



# NOVO AEROGERADOR DE EIXO VERTICAL INTEGRADO NUMA REDE INTELIGENTE EM CONTEXTO URBANO

---

*Nelson António Martins da Costa Batista*

Tese apresentada à Universidade de Évora  
para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Mecatrónica e Energia  
Especialidade: Energia

ORIENTADORES: *Mário Rui Melício da Conceição*  
*Victor Manuel Fernandes Mendes*  
*João Manuel Gouveia de Figueiredo*

ÉVORA, NOVEMBRO DE 2013



**NOVO AEROGERADOR DE EIXO VERTICAL INTEGRADO  
NUMA REDE INTELIGENTE EM CONTEXTO URBANO**

Tese realizada em regime de coorientação sob orientação do

**Doutor Mário Rui Melício da Conceição**

e sob orientação dos

**Doutor Victor Manuel Fernandes Mendes**

**Doutor João Manuel Gouveia de Figueiredo**

Respetivamente, Professor Auxiliar

Professor Catedrático Convidado

Professor Auxiliar

do

Departamento de Física

**UNIVERSIDADE DE ÉVORA**

*'...É preciso generosidade para descobrir o todo através dos outros. Se percebermos que somos apenas um violino, podemos abrir-nos para o mundo, fazendo o nosso papel no concerto...'*

*Jacques Yves Cousteau*

# NOVO AEROGERADOR DE EIXO VERTICAL INTEGRADO NUMA REDE INTELIGENTE EM CONTEXTO URBANO

## Resumo

*Esta tese incide sobre o desenvolvimento de um novo aerogerador de eixo vertical do tipo Darrieus integrado numa rede inteligente em contexto urbano e a implementação de um protótipo do aerogerador para a conversão de energia eólica em energia elétrica. É estudado o auto arranque do aerogerador, sendo apresentada uma metodologia para o desenvolvimento de perfis aerodinâmicos da pá. É apresentado o novo perfil aerodinâmico EN0005 permitindo auto arranque do aerogerador sem componentes extra. Uma nova metodologia de modelação de aerogeradores Darrieus no que respeita às formas de pás é apresentada. Testes de campo recorrendo à utilização de redes de dados aplicando a norma ZigBee são apresentados, permitindo organizar uma proposta de uma arquitetura de rede elétrica inteligente e de segurança de dados. Testes em ambiente urbano e em ambiente controlado de túnel de vento são apresentados no sentido de avaliar as características do protótipo do aerogerador, sendo apresentado sensores adequados à avaliação das características do aerogerador.*

## Palavras-chave

*Energia Eólica*

*Aerogeradores Tipo Darrieus*

*Protótipo*

*Arranque do aerogerador*

*Contexto Urbano*

*Rede Elétrica Inteligente*

*ZigBee*

# NEW VERTICAL AXIS WIND TURBINE INTEGRATED IN A SMART GRID IN URBAN CONTEXT

## Abstract

*This thesis focuses on the development of a new Darrieus type vertical axis wind turbine integrated in a smart grid in urban context and the implementation of a prototype for the conversion of wind energy in electric energy. The self-start of the aero-generator prototype is studied, presenting a methodology for the development of blades aerodynamic profiles. Is presented the new aerodynamic profile EN0005 that offer self-start without the need of extra components. A new methodology for the modeling of Darrieus wind turbines with respect to the blades shapes is presented. Field tests using ZigBee standard are presented in order to organize a proposal for a smart grid architecture and a security data. Tests on urban environment and on wind tunnel controlled environment are presented to evaluate the characteristics of the aero-generator prototype, supported by sensors adequately developed for the evaluation of the aero-generator.*

## Keywords

*Wind Energy*

*Darrieus Wind Turbines*

*Prototype*

*Self-start*

*Urban Context*

*Smart Grid*

*ZigBee*

# Agradecimentos

*Ao Doutor Mário Rui Melício da Conceição, Professor Auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Évora, principal responsável em regime de orientação científica, desejo expressar o meu profundo agradecimento e um muitíssimo obrigado, pela disponibilidade, por todas as horas que despendeu a orientar este trabalho de doutoramento, pelos bons conselhos, pela exigência e rigor que impôs e fundamentalmente pela capacidade de compreensão das dificuldades que surgiram durante os trabalhos de doutoramento, nomeadamente desde 2007 quando começamos a dar os primeiros passos no sentido da concretização deste objetivo.*

*Ao Doutor Victor Manuel Fernandes Mendes, Professor Catedrático convidado do Departamento de Física da Universidade de Évora e Professor Coordenador com agregação do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e Automação do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, responsável em regime de orientação científica, desejo expressar o meu profundo agradecimento, pelos bons conselhos, pelas linhas de orientação e fundamentalmente pela exigência e rigor que impôs durante os trabalhos de doutoramento.*

*Ao Doutor João Manuel Gouveia de Figueiredo, Professor Auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Évora, responsável em regime de orientação científica, desejo expressar o meu profundo agradecimento, pelos bons conselhos e continuado interesse nos resultados obtidos.*

*Á minha família, a quem privei da merecida atenção, desejo expressar o meu profundo agradecimento pelo apoio e pela força que me deram. Espero poder compensar todos os momentos que os privei por estar a realizar este trabalho de doutoramento.*

*Ao Centro de Geofísica da Universidade de Évora, particularmente, aos Professores Doutor Heitor Reis, Doutor Rui Salgado, à Professora Doutora Maria João Costa e ao Samuel Bárias desejo expressar o meu agradecimento pelo auxílio prestado.*

*Ao Centro de Sistemas Inteligentes / Institute of Mechanical Engineering / Associated Laboratory for Energy, Transports and Aeronautics CSI/IDMEC/LAETA do Instituto Superior Técnico, desejo expressar o meu agradecimento pela colaboração no financiamento do protótipo da turbina.*

*À Universidade da Extremadura, nomeadamente, aos Professores Doutor Manuel Calderón Godoy, Doutor António Ramiro González do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e ao Doutor Fernando Zayas Hinojosa do Departamento de Engenharia de Fluidomecânica, desejo expressar o meu agradecimento pela colaboração e apoio durante os ensaios em ambiente controlado de túnel de vento.*

*À Indústria Mecânica Navarra pelo apoio prestado que facultou o uso das oficinas e a obtenção de condições para a construção das pás do protótipo da turbina que foi desenvolvido no âmbito dos trabalhos de doutoramento.*

*Ao Professor Doutor Eugénio Garção e ao Professor Doutor Pedro Areias ambos do Departamento de Física da Universidade de Évora, desejo expressar o meu agradecimento pelo apoio que foi prestado no ensaio de vibração do protótipo.*

*Ao Laboratório de Máquinas Elétricas do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, nomeadamente, ao Mestre Pedro Fonte e ao técnico Carlos Roberto Lucas, desejo expressar o meu agradecimento pela colaboração e apoio prestado.*

*Ao Doutor Hugo Pousinho, Bolseiro de Investigação de Pós-Doutoramento, Cátedra BES – Energias Renováveis e Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade de Évora desejo expressar o meu profundo agradecimento pelas palavras de apoio e auxílio prestado.*

*À Teresa Foito, ao Sérgio Aranha e ao Josué Figueira do Departamento de Física da Universidade de Évora, desejo expressar o meu agradecimento pelo apoio logístico que foi prestado.*

*Aos Engenheiros Teresa Balsinha e Fernando Louro, do Departamento de Engenharia Electrotécnica e Automação do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, desejo expressar o meu agradecimento, pelo apoio logístico dado.*

*Ao Senhor Francisco Vale Antunes Presidente do Conselho de Administração dos Serviços Municipalizados de Água e Saneamento de Vila Franca de Xira por ter permitido os ensaios de uma instalação de rede inteligente num sistema de mini produção de energia de origem renovável de uma das estações de bombagem do Município.*

*Ao Engenheiro João Miranda Grupo GENERG, desejo expressar o meu agradecimento por ter permitido os ensaios de uma instalação de rede inteligente no parque eólico da Gardunha.*

*A todos aqueles que não mencionei mas que contribuíram direta ou indiretamente para a concretização das tarefas envolvidas no trabalho de doutoramento desejo expressar o meu agradecimento.*

# Índice

<b>1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>1</b>
	1.1 Visão Histórica .....	2
	1.2 Enquadramento .....	5
	1.3 Motivação .....	7
	1.4 Estado da arte.....	9
	1.5 Organização do texto .....	17
	1.6 Notação .....	19
<b>2</b>	<b>Desenvolvimento de Perfis.....</b>	<b>20</b>
	2.1 Introdução .....	21
	2.2 Aerogerador de Rotor Vertical .....	23
	2.2.1 Auto Arranque .....	25
	2.3 Metodologia de Estudo de Perfis.....	27
	2.4 Aerogeradores Darrieus .....	41
	2.5 Desenvolvimento do Perfil da Pá .....	48
	2.6 Conclusões .....	60
<b>3</b>	<b>Aerogerador Urbano.....</b>	<b>61</b>
	3.1 Introdução .....	62
	3.2 Modelação.....	63
	3.3 Metodologia de Modelação .....	72
	3.4 Desenvolvimento do Aerogerador .....	78
	3.5 Conclusões .....	94
<b>4</b>	<b>Rede Elétrica Inteligente .....</b>	<b>95</b>
	4.1 Introdução .....	96
	4.2 Definição de REI .....	97
	4.3 Micro Rede .....	103
	4.4 Super Rede.....	104
	4.5 Arquitetura em Camadas .....	105
	4.6 Aerogerador e a REI .....	111
	4.7 Conclusões .....	112

<b>5</b>	<b>Monitorização da REI.....</b>	<b>113</b>
	5.1 Introdução .....	114
	5.2 Norma ZigBee .....	115
	5.3 Módulos Desenvolvidos .....	124
	5.4 Testes de Campo ZigBee .....	129
	5.5 Nuvem Cibernética .....	141
	5.6 Modelo de Segurança de Dados .....	143
	5.7 Conclusões .....	146
<b>6</b>	<b>Testes de Avaliação .....</b>	<b>147</b>
	6.1 Introdução .....	148
	6.2 Testes em Ambiente Urbano .....	148
	6.3 Testes de Túnel de Vento .....	168
	6.4 Desenvolvimento de Sensores .....	176
	6.5 Conclusões .....	195
<b>7</b>	<b>Conclusão .....</b>	<b>196</b>
	7.1 Contribuições .....	197
	7.2 Publicações .....	198
	7.3 Linhas de investigação.....	202
<b>8</b>	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>203</b>

# Lista de Figuras

Figura 2.1 - Moinho Chinês.....	21
Figura 2.2 - Moinho na fronteira do Irão com Afeganistão.....	22
Figura 2.3 - Aerogerador do tipo: Darrieus (A), Savonius (B). ....	22
Figura 2.4 – Escoamento incidente sobre ARH e ARV. ....	24
Figura 2.5 - Tensão de cisalhamento e distribuição de pressão.....	28
Figura 2.6 - Forças aerodinâmicas exercidas sobre a superfície do perfil.....	28
Figura 2.7 - Segmentação de perfil aerodinâmico. ....	32
Figura 2.8 - Cpr em cada segmento elementar do perfil. ....	32
Figura 2.9 - Cpr em um segmento elementar do perfil.....	33
Figura 2.10 - Contribuição do Cpr para a Tpr e Npr. ....	33
Figura 2.11 - Contribuição do Cpr para a Tpr com aplicação JavaFoil.....	35
Figura 2.12 - Contribuição de Cpr para Npr com aplicação JavaFoil. ....	35
Figura 2.13 - Malha à superfície do perfil. ....	36
Figura 2.14 - Malha do túnel de vento. ....	37
Figura 2.15 - Convergência do coeficiente de sustentação $C_L$ . ....	37
Figura 2.16 - Convergência do coeficiente de arrasto $C_D$ . ....	38
Figura 2.17 - NACA0018, NACA0020, NACA4418 e NACA4420. ....	39
Figura 2.18 - Contribuição do Cpr para Tpr.....	39
Figura 2.19 - Contribuição de Cpr para Npr.....	40

Figura 2.20 - Modelos Momento do Elemento de Pá.....	43
Figura 2.21 - Modelo de Tudo de Corrente Simples e modelo de TCM. ....	44
Figura 2.22 - Modelo de TCM e modelo de TCMD. ....	45
Figura 2.23 - Modelo de TCMD e modelo de Vórtice. ....	45
Figura 2.24 - Forças aerodinâmicas em aerogeradores Darrieus.....	46
Figura 2.25 - Perfil aerodinâmico EN0005. ....	49
Figura 2.26 - Contribuição de Cpr pata Tpr. ....	50
Figura 2.27 - Contribuição de Cpr para Npr.....	51
Figura 2.28 - Coeficiente de sustentação do perfil EN0005.....	52
Figura 2.29 - Coeficiente de arrasto do perfil EN0005. ....	52
Figura 2.30 - Coeficiente de momento do perfil EN0005. ....	53
Figura 2.31 - Comparação de aerogeradores Darrieus de pás retas.....	54
Figura 2.32 - Molde de duas dimensões para formação da pá. ....	55
Figura 2.33 - Estrutura de pá criado com moldes de cartão. ....	56
Figura 2.34 - Pás em cartão e película aderente. ....	57
Figura 2.35 - Primeira turbina criada com pás em polietileno expandido.....	58
Figura 2.36 - Segunda turbina de testes desenvolvida. ....	59
Figura 3.1 - Modelo de TCM. ....	63
Figura 3.2 - Modelo de TCMD.....	64
Figura 3.3 - Fluxograma do modelo de TCM.....	68
Figura 3.4 - Modelo de dois discos atuadores em sequência.....	70
Figura 3.5 - Divisão em camadas do aerogerador. ....	73

Figura 3.6 - Transformação de cada camada em aerogeradores virtuais.....	73
Figura 3.7 – Metodologia de EAC análise das camadas. ....	74
Figura 3.8 - Aerogerador sob influência de vento com inclinação.....	76
Figura 3.9 - Vetores de $C_p$ nas diferentes camadas para $TSR=3$ . ....	77
Figura 3.10 - Vetores de $C_p$ nas diferentes camadas para $TSR=11$ . ....	78
Figura 3.11 – Esboço do aerogerador Darrieus desenvolvido.....	78
Figura 3.12 - Diferentes planos de orientação do vento. ....	80
Figura 3.13 - Aerogerador com corpo da pá com forma reta. ....	80
Figura 3.14 - Aerogerador com corpo da pá com forma helicoidal. ....	81
Figura 3.15 - Exemplos de identidade no novo aerogerador. ....	81
Figura 3.16 - Exemplos de identidade no novo aerogerador em parque urbano. ....	82
Figura 3.17 - Diferentes formas das pás e ligações aos braços. ....	82
Figura 3.18 - Desenho tridimensional da pá e braço. ....	84
Figura 3.19 - Moldes utilizados.....	84
Figura 3.20 - Pás produzidas para protótipo de aerogerador.....	85
Figura 3.21 - Torre, GCCIP, pá e braços do protótipo. ....	85
Figura 3.22 - Testes feitos na fábrica. ....	86
Figura 3.23 - Aerogerador instalado no Centro de Geofísica.....	87
Figura 3.24 - Segundo protótipo.....	88
Figura 3.25 - Protótipo no túnel de vento da Universidade da Extremadura. ....	88
Figura 3.26 - Aerogerador de rotor vertical SAV-15W da SAIAM.....	90
Figura 3.27 - Curva de potência do SAV-15W. ....	91

Figura 3.28 - Nova torre com o aerogerador e ligação de sensores.....	92
Figura 3.29 - Braços e peças para ligação das pás ao rotor do GSIP. ....	92
Figura 3.30 - Novo aerogerador comparação do $C_p$ em função do TSR. ....	93
Figura 4.1 - REI, fluxo de energia multidirecional. ....	100
Figura 4.2 - Proposta de arquitetura da ACREI. ....	108
Figura 5.1 - Topologia de rede permitida pela norma ZigBee. ....	118
Figura 5.2 - Camadas definidas pelas normas IEEE 802.15.4 e ZigBee.....	119
Figura 5.3 - Estrutura de mensagem do modo API. ....	126
Figura 5.4 - Módulo ZigBee coordenador.....	127
Figura 5.5 - Módulo final ZigBee.....	128
Figura 5.6 - Módulo ZigBee Sensor. ....	128
Figura 5.7 - Módulo ZigBee de roteamento. ....	128
Figura 5.8 - Cálculo de RSSI nos módulos ZigBee Coordenador e Final.....	132
Figura 5.9 - Controla dos consumos de energia da habitação. ....	133
Figura 5.10 - Controlo dos consumos de energia e serviços de domótica.....	134
Figura 5.11 - Módulo ZigBee coordenador. ....	136
Figura 5.12 - Módulo ZigBee sensor.....	136
Figura 5.13 - Módulo ZigBee de roteamento. ....	136
Figura 5.14 - SMAS Vila Franca de Xira - local dos testes. ....	137
Figura 5.15 - Parque eólico da Gardunha - Grupo GENERG. ....	139
Figura 5.16 - Exemplo do modelo ADCREI. ....	144
Figura 6.1 - Teste realizado a 13 de junho de 2012.....	149

Figura 6.2 – Modificações feitas ao protótipo para acoplar o segundo GCCIP. ....	150
Figura 6.3 - Teste realizado a 10 de julho de 2012.....	151
Figura 6.4 - Resultados do teste realizado a 10 de julho de 2012. ....	152
Figura 6.5 - Teste realizado a 16 de maio de 2013.....	153
Figura 6.6 - Acelerómetro do sensor de vibrações. ....	154
Figura 6.7 - Aceleração Recolha 1 eixo dos XX. ....	156
Figura 6.8 - Aceleração Recolha 1 eixo dos YY. ....	156
Figura 6.9 - Aceleração Recolha 1 eixo dos ZZ. ....	157
Figura 6.10 - Movimento oscilatório nos três eixos da Recolha 1. ....	158
Figura 6.11 - Aceleração Recolha 5 eixo dos XX. ....	159
Figura 6.12 - Aceleração Recolha 5 eixo dos YY. ....	159
Figura 6.13 - Aceleração Recolha 5 eixo dos ZZ. ....	160
Figura 6.14 - Movimento oscilatório dos três eixos da Recolha 5. ....	161
Figura 6.15 - Suporte do acelerómetro e circuitos elétricos. ....	162
Figura 6.16 - Protótipo: teste de avaliação da produção de ruído. ....	163
Figura 6.17 - SAV-15W: teste de avaliação da produção de ruído. ....	164
Figura 6.18 - Teste de avaliação do binário de arranque.....	166
Figura 6.19 - Configuração do túnel de vento. ....	168
Figura 6.20 - Configuração do túnel de vento - Ventiladores. ....	168
Figura 6.21 - Consola de controlo dos ventiladores. ....	169
Figura 6.22 - Potência dos ventiladores, velocidade do vento. ....	169
Figura 6.23 - Primeiro teste feito em túnel de vento. ....	170

Figura 6.24 - Protótipo e seu posicionamento dentro do túnel.....	171
Figura 6.25 - Instrumentação para avaliação da tensão e corrente.....	171
Figura 6.26 - Configuração da turbina após segundo teste.....	173
Figura 6.27 - GSIP usado no terceiro teste.....	174
Figura 6.28 - Terceiro teste: sensores incorporados na torre.....	174
Figura 6.29 - Terceiro teste: Posicionamento dos aerogeradores.....	175
Figura 6.30 - Terceiro teste: RPS das turbinas.....	175
Figura 6.31 - Sensores: sistema de três níveis.....	177
Figura 6.32 - Esquema Arduino com anemómetro.....	178
Figura 6.33 - Fluxo programa informático do Arduino com anemómetro.....	179
Figura 6.34 - Arduino com anemómetro.....	179
Figura 6.35 - Sensor sónico.....	180
Figura 6.36 - Sensor sónico.....	182
Figura 6.37 - Esquema de ligações do sensor sónico.....	182
Figura 6.38 - Fluxo do programa da Arduino do sensor sónico.....	183
Figura 6.39 – Interruptor magnético.....	184
Figura 6.40 - Esquema de ligações do sensor magnético.....	185
Figura 6.41 - Fluxo programa informático do sensor magnético.....	186
Figura 6.42 – Instalação de sensores com interruptores magnéticos.....	186
Figura 6.43 - Sinais do sensor de infravermelhos.....	187
Figura 6.44 - Esquema de ligações do sensor de luz infravermelha.....	188
Figura 6.45 - Fluxo programa informático da Arduino com infravermelho.....	189

Figura 6.46 - Sensor de contagem de rotações por infravermelhos.....	189
Figura 6.47 - Configuração de conjunto de router e coordenador ZigBee n.º1.....	191
Figura 6.48 - Configuração de conjunto de router e coordenador ZigBee n.º2.....	191
Figura 6.49 - Estrutura base do fluxo programático das aplicações.....	192
Figura 6.50 - Aplicação informática contador de pás.....	193
Figura 6.51 - Aplicação informática com contador de pás, tensão e corrente.....	193
Figura 6.52 - Aplicação informática para anemómetro.....	194

# Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Parâmetros do primeiro aerogerador Darrieus .....	83
Tabela 3.2 - Características do ARV SAV-15W.....	90
Tabela 4.1 - Comparação entre a rede elétrica atual e a REI.....	102
Tabela 5.1 - Comparação entre várias normas para a criação de RTD .....	122
Tabela 5.2 - Comparação entre módulos ZigBee .....	125
Tabela 6.1 - Primeiro teste: avaliação do ruído .....	165
Tabela 6.2 - Segundo teste: avaliação do ruído .....	165
Tabela 6.3 - Avaliação do binário de arranque.....	167

# Lista de Siglas

ACREI	Arquitetura em Camadas para Rede Elétrica Inteligente
ADCREI	Acesso de Dados Certificado na Rede Elétrica Inteligente
API	Interface Aplicacional Programável
ARH	Aerogeradores de Rotor Horizontal
ARV	Aerogeradores de Rotor Vertical
BA	Bordo de Ataque
BEM	Modelo Momento do Elemento de Pá
BF	Bordo de Fuga
CaaS	Comunicação como Serviço
CE	Certificação de Conformidade Europeia
CERTS	<i>Consortium for Electric Reliability Technology Solutions</i>
CFD	Dinâmica de Fluidos Computacional
CNC	Controle Numérico Computadorizado
CSA	<i>Cloud Security Alliance</i>
EAC	Estudo de Aerogerador em Camadas
EAGEE	Emissões Antropogénicas de Gases de Efeito de Estufa
ETP	<i>European Technology Platform</i>
FFD	Módulo com Funcionalidade Total

GAD	Gestor de Acesso de Dados
GCCIP	Gerador de Corrente Contínua de Ímanes Permanentes
GD	Geração Distribuída
GRIP	Protocolo de Invocação Remoto Genérico
GSIP	Gerador Síncrono com Excitação Assegurada por Ímanes Permanentes
HST	Número Máximo de Tubos de Corrente Horizontais
IaaS	Infraestrutura como Serviço
IEC	<i>International Electromechanical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
LR-WPAN	Redes de Dados sem Fios de Baixo Consumo Energético
MAC	Camada de Controlo de Acessos de Comunicação
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
PaaS	Plataforma como Serviço
PAN	<i>Personal Area Network</i>
PHY	Camada Física da Norma IEEE 802.15.4
PIV	Volumetria de Partículas por Imagens
POO	Programação Orientada a Objetos
RDE	Recursos Distribuídos de Energia
REI	Rede Elétrica Inteligente
REST	Transferência de Estado Representacional

RFC	Funções de Chamada Remota
RFD	Módulo com Funcionalidade Reduzida
RPM	Rotações por Minuto
RSSI	Indicador de Força de Sinal de Receção
RTD	Redes de Transmissão de Dados
RTDSF	Redes de Transmissão de Dados sem Fios
SaaS	Programas de Computador como Serviço
Senaas	Sensores como Serviço
SOAP	Protocolo de Acesso de Objeto Único
SSID	Identificador do Conjunto de Serviços
TCM	Tubos de Corrente Múltiplos
TCMD	Tubos de Corrente Múltiplos Duplos
TCS	Tubo de Corrente Simples
TSR	Coefficiente de Velocidade Periférica
VSTOC	Stochastic wind simulation for VAWTs
UE	União Europeia

# Lista de Símbolos

## *Constantes e variáveis*

$A$	Força axial paralela à corda do perfil
$A'_S$	Força axial paralela à corda do perfil exercida na superfície da secção elementar na superfície extradorso do perfil
$A'_I$	Força axial paralela à corda do perfil exercida na superfície da secção elementar na superfície intradorso do perfil
$a$	Indução axial
$B1$	Forma de perfil 1
$B2$	Forma de perfil 2
$B3$	Forma de perfil 3
$BA$	Bordo de ataque do perfil
$BF$	Bordo de fuga do perfil
$c$	Corda do perfil
$C_A$	Coefficiente axial
$C_{AT}$	Coefficiente de impulso aerodinâmico
$C_D$	Coefficiente de arrasto
$C_L$	Coefficiente de sustentação

$C_M$	Coeficiente de momento
$C_{MLT}$	Coeficiente de impulso da teoria do momento
$C_N$	Coeficiente normal
$C_P$	Coeficiente de potência
$C_Q$	Coeficiente de binário
$C_T$	Coeficiente tangencial
$C_{pr}$	Coeficiente de pressão
$D$	Força de arrasto
$D_a$	Diâmetro do aerogerador
$D_{obs}$	Distância ao obstáculo
$d$	Distância de transmissão
$e_{B1}$	Espessura do perfil B1
$e_{B2}$	Espessura do perfil B2
$F_N$	Força normal
$F_T$	Força tangencial
$\bar{F}_T$	Força tangencial média
$G_r$	Ganho da antena na recepção

$G_t$	Ganho da antena na transmissão
$H$	Altura do aerogerador
$h$	Altura do tubo de corrente (divisão entre camadas no modelo EAC)
$L$	Força de sustentação
$l$	Largura do tubo de corrente
$m$	Número de amostras de valores de RSSI
$N$	Força normal perpendicular à corda do perfil
$N'_I$	Força normal perpendicular à corda do perfil exercida na superfície da secção elementar na superfície intradorso do perfil
$N'_S$	Força normal perpendicular à corda do perfil exercida na superfície da secção elementar na superfície extradorso do perfil
$N_{pr}$	Contribuição do $C_{pr}$ para a força normal
$N'_{prI}$	Contribuição do $C_{pr}$ para a força normal exercida na superfície da secção elementar na superfície intradorso do perfil
$N'_{prS}$	Contribuição do $C_{pr}$ para a força normal exercida na superfície da secção elementar na superfície extradorso do perfil
$n$	Número de pás do aerogerador
$P$	Potência do aerogerador
$P_r$	Potência de receção

$P_{ref}$	Potência de referência
$P_t$	Potência de transmissão
$P1$	Percurso 1 das pás na camada correspondente
$P2$	Percurso 2 das pás na camada correspondente
$P3$	Percurso 3 das pás na camada correspondente
$P4$	Percurso 4 das pás na camada correspondente
$P5$	Percurso 5 das pás na camada correspondente
$p$	Pressão
$p_\infty$	Pressão do vento em escoamento livre
$Q$	Binário do aerogerador
$R$	Raio do rotor
$R'$	Raio ao eixo do gerador
$R_s$	Força exercida sobre a superfície do perfil
$S$	Superfície da secção elementar na superfície do perfil
$S_I$	Superfície da secção elementar na superfície intradorso do perfil
$S_S$	Superfície da secção elementar na superfície extradorso do perfil
$S_T$	Número de tubos de corrente
$S1$	Camada 1 criada com o modelo EAC

$S_2$	Camada 2 criada com o modelo EAC
$ss$	Força do sinal
$T_{echo}$	Tempo do eco
$T_{pr}$	Contribuição do $C_{pr}$ para a força tangencial
$T'_{prS}$	Contribuição do $C_{pr}$ para a força tangencial exercida na superfície da secção elementar na superfície extradorso do perfil
$T'_{prI}$	Contribuição do $C_{pr}$ para a força tangencial exercida na superfície da secção elementar na superfície intradorso do perfil
$U$	Fator de interferência
$U_d$	Fator de interferência no lado de jusante do rotor
$U_u$	Fator de interferência no lado de montante do rotor
$u(z)$	Velocidade média do vento à altura $z$
$V_a$	Velocidade induzida
$V_{ad}$	Velocidade induzida no lado de jusante do rotor
$V_{au}$	Velocidade induzida no lado de montante do rotor
$V_c$	Velocidade cordal
$V_e$	Velocidade de equilíbrio
$V_n$	Velocidade normal

$V_R$	Velocidade relativa
$V_{rot}$	Velocidade de rotação
$V_w$	Velocidade do vento na esteira
$V_\infty$	Velocidade do vento em escoamento livre
$VertDiv$	Número de divisões verticais do espaço do aerogerador
$W$	Velocidade do vento
$z$	Altura do vento ao solo
$z_0$	Comprimento característico da rugosidade do solo
$z_R$	Altura de referência
$\tau_w$	Tensão de cisalhamento
$\alpha$	Ângulo de ataque do perfil
$\zeta$	Ângulo da pressão exercida sobre a superfície normal à orientação do vento
$\rho$	Densidade do ar
$\rho_\infty$	Densidade do ar para vento em escoamento livre
$\omega$	Velocidade angular do rotor
$\lambda$	Coefficiente de velocidade periférica - TSR
$\theta$	Ângulo axial

$\Delta\theta$	Variação do ângulo axial
$\delta$	Ângulo da pá relativamente ao sentido da divisão da camada
$\beta$	Gradiente de potência-distância ou gradiente de perda de percurso
$\varphi$	Comprimento de onda
$\nu$	Ângulo axial inicial de percurso P4
$\nu'$	Ângulo axial final de percurso P4

---

# CAPÍTULO

# 1

---

## Introdução

*Neste capítulo é apresentada uma visão histórica da evolução da energia eólica, até ao contexto atual de reestruturação do sector elétrico. É apresentado o enquadramento da investigação, a motivação para abordar o tema e um estado da arte. Ainda, é descrita a forma como o texto está organizado e a notação utilizada na tese.*

## 1.1 Visão Histórica

O modo como o aproveitamento da força motriz proveniente da energia do vento foi concretizado está relacionado em função de necessidades verificadas ao longo da história, arte e engenho civilizacional com vertentes, quer no âmbito social quer no político. Embora esta tese incida sobre um sistema de conversão de energia eólica em energia elétrica em contexto atual do sector elétrico, algumas observações que são marcos importantes têm pertinência no sentido de alicerçar um percurso de aproveitamento de energia eólica que ocorreu até ao atual estado de tecnologia.

No início as sociedades obtinham a energia mecânica que necessitavam de fontes de energia com origem renovável, recorrendo ao uso da força muscular, quer animal quer humana. Pelo que, os animais e os humanos eram considerados como as fontes de energia imprescindíveis para a sustentabilidades das sociedades. Mas também a capacidade do vento em proporcionar força motriz foi aproveitada para usos civilizacionais. Esta capacidade está associada à energia cinética presente na massa de ar em movimento. Esta energia cinética, dita de energia eólica, é ocasionada pela energia radiante do Sol que aquece desigualmente regiões da superfície terrestre. Numa região quente no solo ou no mar o ar aquece pelo que se expande na vertical, baixando a densidade e a pressão ao nível do local dessa região; numa região com temperatura inferior, acontece o contrário, o ar arrefece pelo que se contrai na vertical e a pressão ao nível do local dessa região sobe. Caso entre as duas regiões possa ser estabelecida uma circulação de ar, este circulará junto ao solo no sentido da alta para a baixa pressão, i.e., do local frio para o quente. O aquecimento desigual da superfície terrestre, a horografia das regiões terrestres e a força de Coriolis, associada com o movimento de translação terrestre origina que o vento seja um agente indisciplinado de força motriz presente na natureza. Pondo o desafio de saber como aproveitar esta força motriz para contribuir para as necessidades energéticas da sociedade. Em [Melício10] é apresentada uma visão histórica sobre o aproveitamento da força motriz do vento, i.e., da energia cinética do vento. Em [Spera09] é oferecido um contexto histórico bem documentado sobre o desenvolvimento de turbinas. Os moinhos de vento de rotor vertical foram desenvolvidos muito antes dos moinhos de vento de rotor horizontal, talvez devido à sua facilidade de conceção e utilização [Wei10]. Os moinhos de rotor vertical de acordo

com registos históricos [Islam08] terão surgido na Babilónia durante a governação do imperador Hammurabi em projetos de irrigação por volta do século XVII a.C.. Os Persas desenvolveram um moinho de rotor vertical mais evoluído que a versão dos Babilónios usado para moagem de cereais [Islam08]. Estes moinhos eram instalados dentro de edifícios para permitirem um funcionamento mais favorável, aproveitavam os ventos sazonais fortes em um período de 120 dias para moer cereais, conseguindo segundo Wulff [Spera09] moer uma tonelada de grão em 24 horas. Em 1963 quando Wulff visitou a região de Neh, existiam ainda 50 moinhos instalados e em funcionamento.

No século XIII, os Chineses utilizaram um moinho de rotor vertical que usava velas como pás aproveitando as forças de arrasto exercidas pelo vento sobre as velas, com o fim de elevar água para irrigar os campos [Wei10].

Entretanto, as embarcações movidas à vela também evoluíram até ao desenvolvimento das caravelas nos séculos XIII e XV [Melício10].

A fins do século XV, em pleno Renascimento, são importantes as investigações tecnológicas de Leonardo Da Vinci, nomeadamente, sobre os mecanismos e as suas tentativas para construir uma máquina voadora semelhante a uma hélice, que funcionava com o vento e o desenho dos perfis das asas dos pássaros. Estes perfis foram aplicados aos primeiros aeroplanos e às pás dos primeiros aerogeradores nos finais do século XIX e princípios do século XX [Melício10].

No século XVII os moinhos de vento voltaram a ter inovações tecnológicas devido aos importantes desenvolvimentos que teve a mecânica, sendo relevantes as contribuições de Huygens, de Hooke, de Newton, de Leibnitz e dos irmãos Bernoulli [Melício10].

Nos finais do século XIX, com o desenvolvimento de sistemas de transformação e distribuição da eletricidade, a energia eólica convertida anteriormente em energia mecânica para ser utilizada nessa forma no próprio local passou a ser convertida em energia elétrica [Freitas08]. Na Dinamarca foram instalados 100 aerogeradores de rotor horizontal (ARH) entre 1891 e 1918 com potências nominais entre os 20 kW e 35 kW [Manwell02].

Em 1926, G.J.M. Darrieus patenteia uma configuração de aerogerador de rotor vertical (ARV) que aproveita as forças de sustentação exercidas nas pás para propulsão do rotor, causando o movimento de rotação. Os ARV com a configuração desta patente são designados de aerogeradores tipo Darrieus [Darrieus26].

Em 1929, S.J. Savonius patenteia um ARV que aproveita as forças de arrasto exercidas nas pás, geralmente côncavas, para propulsão do rotor. Os ARV com a configuração desta patente são designados de aerogeradores tipo Savonius [Savonius29].

Em 1930, uma das aplicações comerciais de ARH foi utilizada para carregar baterias da Jacobs Wind Electric Power Plant de Marcellus Jacobs [Spera09].

O século XX é caracterizado em termos de investigação por trabalhos teóricos e práticos relacionados com a transformação da energia eólica em energia elétrica, mas sempre acompanhados com pouco interesse por parte da indústria, visto que, as fontes não renováveis eram economicamente e financeiramente mais atrativas [Freitas08]. A crise energética de 1973, originando o aumento do preço dos combustíveis fósseis e o receio da sua extinção num futuro não tão distante, fez ressurgir o interesse pela obtenção de energia elétrica a partir da energia eólica [Burton01, Melício10]. Em consequência, os Estados Unidos e Canadá investem em investigação e desenvolvimento tecnológico em aerogeradores do tipo Darrieus, através da SANDIA National Laboratories, resultando em vários desenvolvimentos quer de modelos matemáticos para representar o desempenho aerodinâmico dos ARV, quer na resolução de questões de construção e desenvolvimento de equipamento adequado [Templin74, Wilson74, Strickland75, Strickland81a, Strickland81b, Paraschivoiu83a, Paraschivoiu83b, Paraschivoiu88].

A geração de energia elétrica mais perto dos locais de consumo é um tema com uma acrescida importância [Behles12], que surge com a necessidade de desenvolvimento de uma rede elétrica mais eficaz, capaz de suprir as necessidades atuais e futuras dos consumidores [IEC10, NIST10, IEEE11, EU06]. As vantagens que os ARV apresentam relativamente aos ARH, principalmente para sistemas de baixa potência [Silva11a], têm como consequência que os ARV apresentam melhor posicionamento no mercado de instalações urbanas relativamente aos ARH. Entre as vantagens são de destacar: a menor quantidade de componentes; o menor ruído, quase inaudível; a instalação mais

perto do solo; o menor custo de produção; a baixa vibração e o facto de não ter necessidade de alinhamento com o vento.

No decorrer do trabalho envolvido na tarefa do estado da arte foi observado que: comparando o número de publicações científicas sobre o desenvolvimento de ARV com o de publicações sobre ARH é constatado como facto o menor número de publicações sobre aerogeradores ARV. Eventualmente, este facto pode denotar ter havido, quer um menor interesse pelo desenvolvimento do ARV, quer a consideração de que pelos estudos realizados pouco mais era possível acrescentar.

## 1.2 Enquadramento

A crise energética de 1973 com o embargo dos países produtores de petróleo à Dinamarca, Holanda, Portugal, África do Sul e Estados Unidos levou ao aumento excessivo do preço do barril de petróleo expondo a sua influência no mercado mundial, repercutindo como consequência no ressurgimento do interesse pelas fontes renováveis de energia [Melício10]. Desta crise é de destacar a tomada de consciência sobre a necessidade de assegurar, por um lado, a diversidade e, por outro lado, a segurança no fornecimento de energia. Adicionalmente, surge uma atenção acrescida sobre a influência do uso de combustíveis baseados em recursos fósseis na degradação das condições ambientais, motivando ainda mais o renovado interesse pelas fontes renováveis de energia. As fontes renováveis de energia desempenham um papel importante, visto que, podem contribuir para a produção de energia elétrica que de outro modo seria eventualmente produzida usando fontes de energia baseadas em recursos fósseis, fonte de emissões antropogénicas de gases de efeito de estufa (EAGEE) para a atmosfera [Freitas08, Melício10].

O crescimento acentuado da população mundial e do desenvolvimento social conduzem a um crescente consumo de energia primária. A Organização para a Cooperação de Desenvolvimento Económico (OCDE) estima um crescimento de 39 % no consumo de energia primária durante o período de 2010 e 2030, sendo os países pertencentes à OCDE responsáveis por 96 % desse crescimento e os restantes países por 4 % [BP13].

As fontes renováveis de energia têm para Portugal, nomeadamente a eólica, particular importância, considerando a dependência externa em termos de energia primária, superior à da média da União Europeia e dos países comparáveis. Acresce ainda que Portugal é confrontado com a necessidade de desenvolver formas alternativas de produção de energia elétrica que permitam proceder a uma política de limitação das EAGEE acordado entre vários países industrializados [Melício10]. A exploração de fontes renováveis de energia apresenta o maior crescimento, contando com um crescimento anual médio de 7,6 % até 2030, seguido pela nuclear que conta com 2,6 % de crescimento anual médio até 2030 [BP13].

Em Portugal, os sistemas de geração eólica estão predominantemente numa situação de ligação à rede elétrica [Melício10]. Embora favorável, esta situação modifica a dinâmica dos sistemas de potência e conduz ao aparecimento de problemas relacionados com a qualidade da energia despachada para a rede elétrica, nomeadamente a distorção harmónica total (*Total Harmonic Distortion*, THD) [Melício10].

Embora o âmbito do trabalho desta tese seja o das fontes renováveis para geração de energia elétrica em contexto urbano, é de antever que este contexto possa acarretar mudanças de operação que devem ser atempadamente acauteladas. Nomeadamente, mudanças que podem ocorrer eventualmente análogas às que acontecem em nível superior ao de distribuição devido aos parques eólicos. Por exemplo, a crescente contribuição em capacidade de energia eólica para a rede elétrica apresenta um novo desafio para os operadores da rede devido à característica de imprevisibilidade da disponibilidade eólica, nomeadamente a de adicionar mais energia elétrica gerada por esta fonte implica também um acréscimo quer da afetação de sistemas que eventualmente compensem a imprevisibilidade, quer de contribuições que evitem a degradação na qualidade da energia oferecida. Outra característica, a de variabilidade leva a que nem sempre a crescente contribuição em capacidade corresponde a um aumento assegurado de contribuição em energia elétrica, em 2012, apesar do acréscimo de capacidade instalada de turbinas eólicas na Alemanha e Irlanda, houve de facto um decréscimo na energia elétrica produzida anualmente. Este facto ocorreu em

consequência da diminuição da velocidade do vento nestas regiões durante esse ano [BP13].

As fontes renováveis para geração de energia elétrica em contexto urbano são ainda pouco exploradas [Behles12]. Pelo que, a experiência do seu impacto na operação é diminuta. Mas sem dúvida que o desenvolvimento de sistemas de geração capazes de funcionar mais perto do ponto de consumo apresentam várias vantagens na gestão da rede elétrica, embora originem novos desafios na sua integração [Webb07]. Em contexto urbano, a energia eólica é considerada uma das fontes renováveis de energia mais favoráveis no que respeita ao aproveitamento das fontes renováveis disponíveis neste contexto [Webb07].

## 1.3 Motivação

A conversão da energia eólica em energia elétrica é economicamente considerada como uma das mais favoráveis conversões, inclusivamente de entre as conversões recorrendo a outras fontes renováveis de energia [BP13]. Em consequência da avaliação económica favorável atribuída à conversão da energia eólica em energia elétrica, esta conversão é referenciada como tendo sido alvo de investimentos significativos [Snyder09] em aproveitamentos com níveis elevados de potência instalada, sendo espectável que se mantenha o interesse pelo aproveitamento da energia eólica e que possa aumentar em aproveitamentos de menor potência instalados em contexto urbano, visto que, neste contexto, a energia eólica é encarada como uma das fontes renováveis de energia mais favoráveis [Mañana11].

O uso dos ARV em contexto urbano apresenta vantagens sobre o uso dos ARH [Muller09, Balduzzi12], sendo em consequência uma opção justificável para que seja feita uma investigação de forma a uma melhor adaptação ao contexto urbano. Particularmente, de entre os ARV os aerogeradores Darrieus são referenciados como uma opção favorável para os aproveitamentos em contexto urbano.

Ao nível da rede de transmissão de energia existem preocupações que têm que ser consideradas, como por exemplo, a que envolve o facto da elevada penetração da energia eólica na rede elétrica afetar a gestão normal do sistema de energia elétrica, visto que, a energia eólica é não só caracterizada por intermitência, mas também por variabilidade temporal face às necessidades dos utilizadores de energia elétrica. Pelo que, a crescente instalação de aerogeradores tem sido referenciada como causa de deterioração quer no nível de estabilidade da rede, quer na qualidade da energia elétrica [Ullah07, Melício10], sendo de antever que possam existir consequências no contexto de exploração urbana de energia eólica no que diz respeito às características de intermitência e de variabilidade.

A motivação para abordar o tema dos aerogeradores Darrieus decorre do interesse que possa advir da inovação tecnológica possibilitar uma adaptação e integração que aperfeiçoe o desempenho no aproveitamento da energia eólica em contexto urbano. A motivação surge no âmbito da identificação de um desafio não só à investigação, mas também ao desenvolvimento que potencie o uso de ARV tipo Darrieus adaptados ao contexto urbano em redes elétricas inteligentes. Particularmente, o estudo do desempenho de aerogeradores em contexto urbano, nomeadamente o estudo de perfis alares da pá é relevante, visto que, proporciona o uso mais adequado do recurso eólico.

O trabalho conducente a esta tese foi organizado de forma a proporcionar contribuições originais que decorrem das seguintes tarefas:

- T1 avaliação do espólio de contribuição científica do estado da arte em aerogeradores Darrieus;
- T2 elaboração de metodologia de previsão de desempenho de aerogeradores Darrieus, baseada nos modelos matemáticos de previsão de desempenho: modelo de Tubos de Corrente Múltiplos (TCM) e modelo de Tubos de Corrente Múltiplos Duplos (TCMD) estudados em T1;
- T3 elaboração de metodologia para o desenvolvimento de perfis alares de pá para aerogeradores Darrieus, i.e., para desenvolvimento de novos perfis com principal incidência no estudo do auto arranque;

- T4 desenvolvimento de perfil alar, i.e., perfil aerodinâmico capaz de auto arranque e bom desempenho para diferentes velocidades de escoamento, aplicando a metodologia apresentada em T3;
- T5 desenvolvimento de aerogerador Darrieus para contexto urbano, capaz de ter auto arranque e bom desempenho para diferentes velocidades de escoamento;
- T6 avaliação do espólio de contribuição científica do estado da arte de aerogeradores Darrieus no âmbito de redes elétricas inteligentes (REI) com enquadramento para a integração de instalações em contexto urbano;
- T7 integração do aerogerador Darrieus apresentado em T5 na monitorização da rede de dados da REI usando a norma ZigBee na criação de redes de transmissão de dados (RTD) sem fios de baixo consumo energético;
- T8 desenvolvimento de um protótipo do aerogerador Darrieus apresentado em T5;
- T9 desenvolvimento de sensores com RTD sem fios de baixo consumo energético de suporte à monitorização do protótipo durante os testes em T10;
- T10 estudar o protótipo em testes de campo e ambiente controlado, i.e., túnel de vento, na sua capacidade de auto arranque, velocidade de rotação versus velocidade de vento, comparação com outro ARV existente no mercado, analisar o tipo de gerador mais adequado ao desenho do aerogerador desenvolvido em T5.

## 1.4 Estado da arte

### *Capacidade e tendências energéticas*

Em [Costa04] é apresentado o atlas europeu do vento e estudos realizados em Portugal para o mapeamento do seu potencial eólico. São analisadas as particularidades que influenciam o potencial eólico de cada região de Portugal. Também é apresentada a metodologia utilizada no desenvolvimento do mapa do potencial eólico de Portugal.

Em [Esteves04] é desenvolvido um sistema para o mapeamento do potencial eólico das regiões de Portugal. Os dados recolhidos são georreferenciados com um Sistema de

Informação Geográfica (SIG) e digitalmente guardados. São analisadas particularidades que influenciam o potencial eólico de regiões de Portugal.

Em [Underwooda07] usando simulação computacional, é estudado o fornecimento de energia elétrica de origem renovável a pequenos consumidores em locais remotos do Paquistão, utilizando um sistema híbrido eólico-fotovoltaico de pequeno valor de potência. Sendo o sistema eólico constituído por um aerogerador de eixo vertical. Para os autores, um sistema híbrido eólico-fotovoltaico pode preencher 42,5 % das necessidades anuais de energia elétrica do consumidor.

Em [Stannard07] no futuro as turbinas eólicas de pequenos valores de potência, nomeadamente os ARV são vistos como potencialmente importantes no conjunto da geração distribuída (GD) no Reino Unido. Assim, é importante o desenvolvimento de aerogeradores melhorados que proporcionem uso mais adequado do recurso eólico.

#### *Aerogeradores de rotor vertical*

Em [Darrieus26] é patenteado um ARV que funciona usando forças de sustentação exercidas sobre as pás. As forças de sustentação são produzidas por uma corrente de escoamento transversal ao eixo da turbina. São contempladas formas de pás, nomeadamente pás de forma vertical reta ditas “*Giromill, H-Bar*” ou “*H-Darrieus*” e pás curvas ditas “*egg beater*”.

Em [Templin74] é proposto o modelo de Tubo de Corrente Simples (TCS) para a previsão do desempenho de aerogeradores Darrieus, considerando a curvatura das pás e o efeito da pá entrar em perda (*Stalling*) devido à velocidade do escoamento. O modelo aplica a teoria do disco atuador mostrada em [Glauert48] para representar a superfície do rotor nas suas revoluções. A superfície do rotor é rodeada por um tubo de corrente simples que não sofre influências da área envolvente.

Em [Lapin75] é proposto o modelo dos dois discos atuadores em paralelo para representar a superfície do rotor do aerogerador Darrieus nas suas revoluções. O modelo é utilizado para estudar o desempenho de um aerogerador com um valor de potência nominal de 10 MW.

Em [Larsen75] é introduzido pela primeira vez o modelo de Vórtice com apenas um elemento de pá para cálculo do desempenho de aerogeradores Darrieus. É assumido que os ângulos de ataque têm pouca variação e que os efeitos de perda são considerados como negligenciáveis.

Em [Paraschivoiu81] é proposto o modelo de TCMD para estudar o desempenho do rotor de aerogeradores do tipo Darrieus, usando pás de forma curva. No TCMD a superfície do rotor é modelada usando dois discos atuadores em paralelo. Comparando com dados de ensaios de campo para o desempenho do rotor, o modelo TCMD apresenta melhores resultados que com o modelo TCS.

Em [Hirsch87] é proposta a metodologia de Cascada para previsão do desempenho de aerogeradores Darrieus. A metodologia de Cascada é geralmente aplicada na representação de um disco de lâminas de turbomáquinas. Neste modelo é assumido que as pás estão dispostas numa superfície plana separadas a uma distância igual à circunferência do aerogerador dividido pelo número de pás.

Em [Strickland87] são usados processos estocásticos para a simulação do escoamento do vento e o estado da corrente do fluxo que chega à turbina. Este processo é a base do desenvolvimento do modelo computacional designado de VSTOC (*stochastic wind simulation for VAWTs*). O VSTOC é aplicado conjuntamente com outros modelos de previsão do desempenho de aerogeradores Darrieus.

Em [Brahimp95] são apresentados vários modelos computacionais para o modelo de TCMD: CARDAA que representa o modelo de TCMD simples; CARDAAV que considera também a variação dos fatores de interferência em cada tubo de corrente e em cada disco atuador; CARDAAAX que incorpora o efeito de expansão a cada tubo de corrente. Estes modelos computacionais são apresentados como ferramentas capazes de oferecer uma boa avaliação do desempenho de aerogeradores Darrieus.

Em [Zhang04] o modelo de Turbulência é usado para estudar o desempenho de aerogeradores Darrieus. Os códigos computacionais XFOIL e EllipSys2D são aplicados no cálculo das propriedades aerodinâmicas dos perfis das pás. O cálculo das propriedades aerodinâmicas dos perfis das pás influencia a avaliação do desempenho de aerogeradores Darrieus revelando a sua importância neste processo.

Em [Ferreira08] é apresentado um estudo das perdas dinâmicas em aerogeradores Darrieus recorrendo à análise de volumetria de partículas por imagens (*Particle Image Velometry*, PIV). O estudo avalia o desempenho de aerogeradores Darrieus mediante a perda de sustentação recorrendo à análise por PIV.

Em [Paraschivoiu09a] são apresentados modelos matemáticos de avaliação do desempenho de aerogeradores Darrieus, nomeadamente o modelo TCM, o modelo de TCMD, o modelo de Vórtice e o modelo de Perda Dinâmica “*Dynamic Stall*”. As modificações realizadas ao longo do tempo sobre os modelos matemáticos são apresentadas. São expostos e analisados os aspetos económicos e sociais muitas vezes associados à instalação de ARV.

Em [Ferreira09c] é feito o estudo da esteira produzida por aerogeradores do tipo H-Darrieus. É estudada a influência da esteira sobre o desempenho do aerogerador recorrendo a modelos de Vórtice. São apresentadas metodologias de estudo da esteira produzida por aerogeradores Darrieus recorrendo a simulações computacionais mediante aplicações informáticas de dinâmica de fluidos (CFD). As simulações computacionais com aplicações informáticas de CFD são validadas com ensaios recorrendo a técnicas de PIV. Uma comparação é feita entre o modelo de TCMD e modelo de Vórtice. O modelo de TCMD apresenta valores muito próximos aos obtidos com o modelo de Vórtice. Tendo obtido uma maior proximidade de resultados ao considerar a expansão do tubo de corrente de escoamento.

Em [Alessandro10] é feita uma análise aerodinâmica de aerogeradores do tipo Savonius. O aerogerador Savonius apresenta um rendimento elevado e um grande binário para ventos de velocidades baixas, no entanto apresenta um rendimento reduzido para ventos com velocidades mais altas. A interação entre o vento envolvente e o desempenho do aerogerador Savonius é analisada, sendo apresentado um modelo matemático para

estudo desta interação. Os resultados do modelo matemático estão em concordância com os resultados dos testes de campo. O modelo matemático apresentado é aplicado no desenvolvimento de novas pás para aerogeradores do tipo Savonius.

#### *Aerogeradores sobre influência de corrente com inclinação*

Em [Mertens03] é feita a comparação entre o desempenho de ARV sujeitos à influência de correntes de escoamento com inclinação e o desempenho de ARV sujeitos à influência de correntes de escoamento sem inclinação, tendo concluído que os ARV do tipo H-Darrieus têm um melhor desempenho para correntes de escoamento com inclinação.

Em [Ferreira06] é apresentado um modelo analítico para o estudo de ARV's do tipo H-Darrieus sobre a influência de correntes de escoamento com inclinação. Em [Ferreira09b] as condições são novamente analisadas aplicando o modelo de Vórtice para previsão do desempenho do ARV's do tipo H-Darrieus. Os resultados do modelo são validados com testes de campo mediante técnicas de PIV.

Em [Balduzzi12] é estudado o desempenho de aerogeradores do tipo Darrieus instalados no topo de edifícios. É apresentada uma metodologia de avaliação do desempenho para aerogeradores do tipo H-Darrieus sujeitos à influência de correntes de escoamento com inclinação, recorrendo aos modelos de Momento do Elemento de Pá, de TCM e de TCMD.

#### *Auto arranque de aerogeradores Darrieus*

Em [Kirke98] são estudados os fatores que habilitam aerogeradores Darrieus de obter auto arranque sem auxiliares externos, nomeadamente a solidez elevada, os perfis de pás com concavidade, os perfis mais largos, a existência de uma ponta no bordo de ataque do perfil para dividir mais eficazmente o escoamento. É desenvolvido um modelo matemático para avaliação do desempenho de aerogeradores Darrieus com variação do ângulo de inclinação das pás “*pitch angle*” dependendo do ângulo axial “*axial angle*”.

Em [Fiedler09] é estudado o comportamento de aerogeradores Darrieus cujas pás têm o ângulo de inclinação fixo. Os testes foram realizados em pás com perfis aerodinâmicos simétricos diferentes, nomeadamente o perfil NACA0015 e o perfil NACA0021. Tendo verificado que os perfis com ângulos de inclinação fixo compreendidos na banda de valores de  $\pm 3,9^\circ$  e  $\pm 7,8^\circ$ , melhoraram o desempenho dos aerogeradores.

Em [Chong12] é proposto o uso de palhetas guia para orientar a corrente de escoamento que incide sobre o aerogerador. O uso de palhetas guia permite não só aumentar o desempenho mas também proporcionar condições que possibilitem o auto arranque, no entanto a solução proposta requer o uso de componentes extra para orientar as palhetas no sentido do escoamento.

### *Aerofólios*

Em [Claessens06] é estudado o desenho de perfis alares para aerogeradores Darrieus e a sua aerodinâmica. São apresentados modelos de avaliação do desempenho do aerogerador, nomeadamente o modelo de Momento, o modelo de Vórtice, o modelo CFD e o modelo de Perda Dinâmica.

Em [Bourguet07] é proposta uma metodologia para melhorar o comportamento aerodinâmico dos aerogeradores Darrieus, utilizando os perfis alares mais comuns, nomeadamente o perfil NACA0012, o perfil NACA0025 e o perfil NACA0018. Tendo concluído que o perfil simétrico NACA0025 apresenta melhor desempenho.

Em [Carrigan12] é proposta uma metodologia para o desenvolvimento de perfis alares para pás de aerogeradores do tipo H-Darrieus recorrendo ao uso do algoritmo de Evolução Diferencial. Os resultados permitem avaliar o desempenho do aerogerador Darrieus para diferentes geometrias de perfis.

### *Rede elétrica inteligente*

Em [EU06] a European Technology Platform (ETP) apresenta uma visão estratégica para a futura rede elétrica no contexto do mercado de energia liberalizado. A futura rede elétrica deve ser flexível, i.e., permitir o fluxo bidirecional de energia, ser confiável, ser sustentável e ser economicamente eficiente. Assim, deve haver um elevado controlo

inteligente sobre os seus componentes e serviços sem negligenciar a segurança. Estes requisitos são assegurados mediante sistemas computacionais suportados por uma vasta rede de comunicações. A capacidade computacional permite que haja inteligência artificial associada aos componentes e serviços para o suporte das decisões de operação, o que determina a designação de Rede Elétrica Inteligente (*Smart Grid* - REI).

Em [Potter09] é abordado o problema do planeamento de curto prazo e médio prazo, no sentido de tirar partido do carácter sequencial que as decisões sobre uma Micro REI podem assumir. Propõe medidas para melhorar a operação de uma Micro REI.

Em [IEC10] a International Electromechanical Commission (IEC) apresenta uma visão da REI no que respeita à sua definição, intervenientes e estrutura. É também apresentado um roteiro de criação e implementação de normas que visam a agilização da criação de serviços e componentes numa REI sem esquecer as suas variadas formas de operação. O roteiro da IEC assenta, nomeadamente sobre as comunicações, a segurança, a distribuição, a automação e a demanda e planeamento.

Em [NIST10] a National Institute of Standards and Technology (NIST) apresenta um roteiro e quadro de implementação de normas para a criação de funcionalidades de operação dentro da REI. É também apresentada uma visão dos atributos, as possíveis arquiteturas, as camadas e formas de operação. Através de casos de estudo são identificadas as normas mais importantes a implementar e são delineados planos de ação para a sua implementação.

Em [IEEE11] o Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) apresenta um guia para a concretização de vários níveis de interoperabilidade entre as várias tecnologias de geração e distribuição de energia e as tecnologias de informação e comunicação. É feita uma abordagem, nomeadamente um guia de boas práticas e abordagens alternativas na implementação da arquitetura da REI.

### *Redes de comunicação de dados*

Em [ZigBee07a] é apresentada a coexistência das frequências de funcionamento da norma ZigBee comuns com as de outras normas de Redes de Transmissão de Dados sem Fios (RTDSF) mais conhecidas, nomeadamente o Bluetooth (norma IEEE 802.15.1) e o Wi-Fi (norma IEEE 802.11). A norma IEEE 802.15.4 incorpora a técnica dita de Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência (AMDF). A AMDF tendo uma banda de frequência de operação de 2.4 GHz, é dividida em 16 canais de 5 MHz cada um, permitindo aos módulos de ZigBee escolher a frequência de operação que apresentar a menor interferência. A norma ZigBee coexiste com outras normas de RTDSF.

Em [ZigBee10] é apontado que as RTDSF criadas utilizando a norma ZigBee podem comunicar diretamente com outras normas através do *ZigBee Gateway*. Os serviços a funcionar numa RTDSF que não sejam ZigBee conseguem aceder facilmente a qualquer módulo ZigBee, mantendo a integridade e segurança da rede de comunicação ZigBee. Os módulos ZigBee são acedíveis por redes externas através do serviço *ZigBee Gateway*.

Em [ZigBee12] é introduzida na norma ZigBee a funcionalidade *Green Power*. A funcionalidade *Green Power* permite desenvolver módulos de comunicação sem fios sem necessidade de recorrer ao uso da energia proveniente de uma bateria, podendo também aceder às RTDSF criadas com a norma ZigBee.

### *Nuvem cibernética*

Em [Singh09] é discutida a integração de contadores na nuvem cibernética e a sua integração na gestão da REI. Com o aumento da utilização de serviços na nuvem, aumentam também os consumos energéticos dos sistemas computacionais que os suportam. É oferecido um modelo de implementação de serviços de contagem suportado pela nuvem cibernética.

Em [Mohsenian10] é apresentado um estudo sobre a interação entre serviços computacionais na nuvem cibernética e as atividades e necessidades da REI. É proposto e testado um serviço de eficiência energética no âmbito da distribuição de energia utilizando a nuvem cibernética. Os testes revelam melhorias significativas no âmbito da eficiência energética.

Em [Yuriyama10] são apresentados desafios no desenho de uma infraestrutura de sensores integrados e virtualizados na nuvem cibernética. No modelo apresentado os sensores físicos são virtualizados na nuvem cibernética. A interação com o sensor físico é feita através do sensor virtual que o representa.

Em [Aoki10] o crescente número de sensores na REI conduzem a uma sobrecarga na troca de informação na infraestrutura de RTD. É proposto um modelo que evita a sobrecarga de informação dos sensores para a nuvem cibernética.

## **1.5 Organização do texto**

Ao escrever este trabalho houve o propósito de conseguir uma forma de exposição que fosse fácil, agradável e harmoniosa, para que o tema seja entendido pelo leitor com precisão, ordem e propriedade. Este propósito determinou a organização seguida para o texto, sendo dividido em seis capítulos.

O Capítulo 2 é destinado ao estudo de uma metodologia para o desenvolvimento de perfis aerodinâmicos da pá. O Capítulo 3 é destinado ao estudo da nova metodologia de modelação de aerogeradores Darrieus no que respeita às formas de pás. O Capítulo 4 é destinado à apresentação da REI, sendo analisada a sua interatividade com o aerogerador. O Capítulo 5 é destinado às tecnologias de monitorização da REI. O Capítulo 6 é destinado à apresentação dos testes em ambiente urbano e em ambiente controlado de túnel de vento no sentido de realizar uma avaliação do protótipo do aerogerador. O Capítulo 7 conclui este trabalho.

Seguidamente é apresentada uma descrição mais detalhada do conteúdo de cada capítulo.

No Capítulo 2 é apresentada uma abordagem aos aerogeradores de rotor vertical com especial incidência para os aerogeradores Darrieus: a visão histórica; as suas capacidades; as vantagens e as desvantagens sobre os aerogeradores de rotor horizontal são apresentadas. É estudado o auto arranque de aerogeradores Darrieus, sendo realizada uma metodologia de estudo para o desenvolvimento de perfis aerodinâmicos da pá. Ainda, neste capítulo são comparados alguns dos modelos para o estudo do comportamento aerodinâmico de aerogeradores Darrieus.

No Capítulo 3 é apresentado um aerogerador tipo Darrieus aperfeiçoado para que a operação em contexto urbano seja favorável. Uma nova metodologia de modelação de aerogeradores Darrieus no que respeita às formas de pás é apresentada neste capítulo baseada nos modelos de TCM e de TCMD.

No Capítulo 4 é apresentada uma visão para a caracterização do que se entende por rede elétrica inteligente. Esta abordagem surge pela necessidade de analisar a função, as características e requisitos de integração de um aerogerador em contexto urbano na rede elétrica e no uso quotidiano de clientes finais. A rede elétrica inteligente é abordada no que respeita à: definição, características, segurança, vantagem e desvantagem. Uma arquitetura de REI é proposta baseada na experiência de campo adquirida, sendo analisada a interatividade esperada entre o aerogerador desenvolvido e a REI.

No Capítulo 5 é apresentada uma visão sobre a monitorização dos componentes, serviços e intervenientes da REI; os seus desafios e necessidades. A criação de uma rede de dados capaz e fiável para troca de informação é fundamental na REI. A norma ZigBee é descrita como uma tecnologia capaz de criar uma rede sem fios de baixo consumo energético robusta e eficaz para controlo e monitorização de componentes e serviços numa REI. Vários testes de campo são expostos visando o estudo das necessidades na implementação de redes ZigBee na REI. Um novo modelo de segurança de dados, serviços e intervenientes na REI é apresentado.

No Capítulo 6 são apresentados testes em ambiente urbano e em ambiente controlado de túnel de vento no sentido de analisar e validar o desempenho do protótipo de aerogerador desenvolvido. Os testes estão classificados em dois domínios de validação: o do comportamento do aerogerador em ambiente urbano e o do comportamento do aerogerador em ambiente controlado de túnel de vento. Ainda, neste capítulo são apresentados os vários módulos de sensores desenvolvidos para monitorização e registo de informação.

No Capítulo 7 são apresentadas as contribuições originais desta tese sobre o tema do novo aerogerador de eixo vertical integrado numa rede inteligente em contexto urbano. Ainda, são indicadas as publicações científicas que resultaram no contexto de divulgação e validação do trabalho de investigação realizado. Por fim, são indicadas direções para futuros desenvolvimentos.

## 1.6 Notação

Em cada um dos capítulos desta tese é utilizada a notação mais usual na literatura especializada, harmonizando, sempre que possível, aspetos comuns a todos os capítulos. Contudo, quando necessário, em cada um dos capítulos é utilizada uma notação apropriada. As expressões matemáticas, figuras e tabelas são identificadas com referência ao capítulo em que são apresentadas e são numeradas de forma sequencial no capítulo respetivo, sendo a numeração reiniciada quando se transita para o capítulo seguinte. A identificação de expressões matemáticas é efetuada através de parênteses curvos ( ) e a identificação de referências bibliográficas é efetuada através de parênteses retos [ ].

---

# CAPÍTULO

# 2

---

## Desenvolvimento de Perfis

*Este capítulo faz uma abordagem aos aerogeradores de rotor vertical com especial incidência para os aerogeradores Darrieus: a visão histórica; as suas capacidades; as vantagens e as desvantagens sobre os aerogeradores de rotor horizontal são apresentadas. É estudado o auto arranque de aerogeradores Darrieus, sendo realizada uma metodologia de estudo para o desenvolvimento de perfis aerodinâmicos da pá. Ainda, neste capítulo são comparados alguns dos modelos para o estudo do comportamento aerodinâmico de aerogeradores Darrieus.*

## 2.1 Introdução

Os moinhos de vento de rotor vertical foram desenvolvidos muito antes dos moinhos de vento de rotor horizontal, talvez devido à sua facilidade de concepção e utilização [Wei10]. Os moinhos de vento de rotor vertical de acordo com registos históricos [Islam08] terão surgido na Babilónia durante a governação do imperador Hammurabi em projetos de irrigação por volta do século XVII a.C. Os Chineses por volta do século XIII utilizaram um moinho que usava velas como pás aproveitando as forças de arrasto exercidas pelo vento sobre as velas para elevar água com o objetivo de irrigar os campos [Wei10]. A configuração do moinho chinês é apresentada na Figura 2.1.

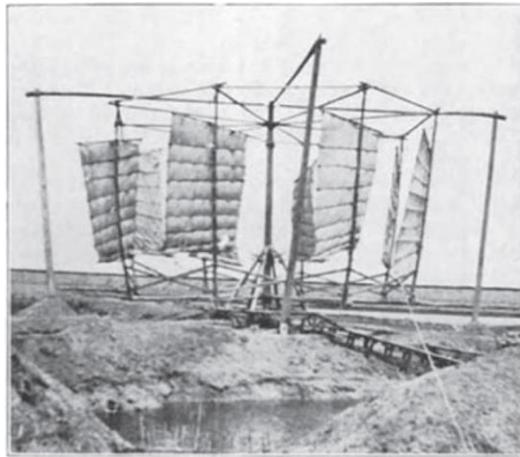


Figura 2.1 - Moinho Chinês  
(fotografia do início do século 20 [Wei10]).

Na mesma altura os persas usaram moinhos de vento de rotor vertical cujas pás se assemelhavam a portas para aproveitar as forças de arrasto exercidas pelo vento sobre a sua superfície. O moinho estava inserido dentro de uma estrutura para aproveitar melhor o fluxo da corrente de escoamento e tinha como finalidade mover mós para moer cereais [Islam08]. O mesmo tipo de moinho também foi usado no médio oriente, nomeadamente na fronteira do Irão com o Afeganistão até finais dos anos 80 do século passado. A sua configuração é apresentada na Figura 2.2.



Figura 2.2 - Moinho na fronteira do Irão com Afeganistão  
(fotografia tirada em 1971 perto de Herat, Afeganistão, autoria de: Alan Cookson).

Os ARV podem ser divididos em dois grupos:

Os aerogeradores que funcionam aproveitando as forças de sustentação exercidas pelo vento sobre as pás, geralmente designados por aerogeradores Darrieus [Darrieus26] por terem sido patenteados por G.J.M Darrieus, cuja configuração é apresentada na Figura 2.3 A;

Os aerogeradores que funcionam aproveitando as forças de arrasto exercidas pelo vento sobre as pás, geralmente designados por aerogeradores do tipo Savonius [Savonius29] por terem sido patenteados por S.J. Savonius, cuja configuração é apresentada na Figura 2.3 B.

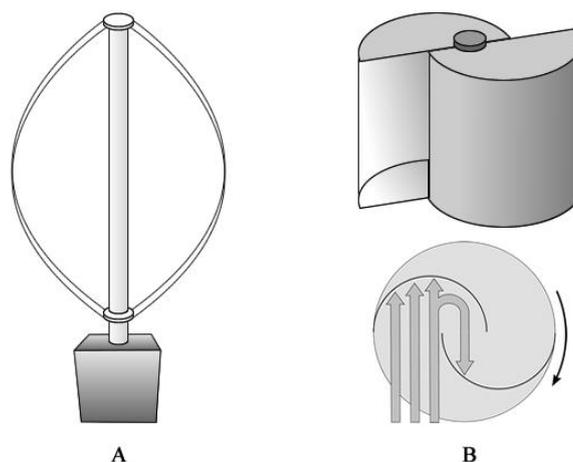


Figura 2.3 - Aerogerador do tipo: Darrieus (A), Savonius (B).

Os aerogeradores Darrieus são constituídos por duas ou mais pás com forma aerodinâmica, funcionam aproveitando as forças de sustentação geradas pelo vento. As configurações das pás mais usuais são as formas retas e concavas. Os aerogeradores Darrieus apresentam um binário baixo para velocidades do vento baixas, mas em compensação podem ter uma eficiência considerável para velocidades do vento altas [Paraschivoiu09a].

Os aerogeradores Savonius são constituídos por duas ou mais pás de forma côncava. A forma côncava das pás permite criar um ponto de estagnação máximo quando estas se apresentam numa posição frontal à direção do vento. Este tipo de aerogerador apresenta um grande binário no arranque para velocidades de vento baixas, mas não apresenta uma grande eficiência para velocidades de vento elevadas [Alessandro10]. O valor máximo do coeficiente de potência é da ordem de 25 % [Paraschivoiu09a, Islam08].

## 2.2 Aerogerador de Rotor Vertical

A produção de energia elétrica é, em si, uma atividade perturbadora do ambiente, sendo praticamente impossível a sua produção sem criar algumas limitações ambientais [Melício10]. Embora a energia eólica esteja associada a benefícios ambientais significativos do ponto de vista das EAGEE para a atmosfera, existem outros aspetos ligados com a sua integração no meio ambiente, nomeadamente em contexto urbano que não podem ser negligenciados.

Em contexto urbano é normalmente referido pelas populações locais que o impacto visual dos aerogeradores, e o ruído constituem duas das formas de poluição que mais afetam, tendo sido estas algumas das preocupações que nortearam este trabalho.

Os ARV em relação aos ARH têm uma imagem tridimensional harmoniosa que facilita a integração visual em contexto urbano, sendo de antever em consequência que haja maior aceitação por parte das populações locais, embora pelo facto de operarem mais perto do solo ou das estruturas arquitetónicas onde possam vir a ser instalados possam

ocorrer objeções à sua utilização. Particularmente, no que respeita à segurança das pessoas e animais.

Também é facto que em contexto urbano o recurso eólico, i.e., o vento predominante é caracterizado por ser turbulento e com rápidas mudanças de direção. Os ARV apresentam vantagens sobre os ARH [Paraschivoiu09a] de serem praticamente inaudíveis e dispensarem os componentes elétricos e mecânicos de posicionamento, ‘yaw’, em relação à direção do escoamento incidente, visto que, para captar energia o fluxo de ar incidente não precisa de ter uma direção privilegiada como é comparativamente apresentado na Figura 2.4.

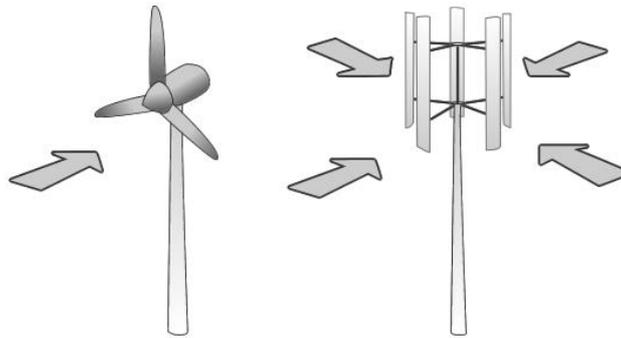


Figura 2.4 – Escoamento incidente sobre ARH e ARV.

Quando o escoamento do vento se apresenta ao aerogerador com uma direção oblíqua, i.e., com direção ascendente ou descende encontrada geralmente no topo de edifícios ou entre estruturas, os ARV têm um maior aproveitamento energético [Mertens03, Ferreira06, Ferreira09b, Balduzzi12]. Esta redução da quantidade de componentes conduz a outras vantagens tais como maior longevidade do aerogerador e menores custos com manutenção.

Tanto os ARV como os ARH apresentam a mesma eficiência apesar dos ARH serem os mais comuns [Paraschivoiu09a].

## 2.2.1 Auto Arranque

Os aerogeradores Savonius tendo um binário de arranque maior para ventos turbulentos e de velocidades baixas, apresentam auto arranque natural. A desvantagem deste aerogerador é o seu baixo coeficiente de potência, que o torna inadequado para locais com ventos turbulentos e de grandes velocidades [Alessandro10], sendo esta uma das razões que leva a encarar o estudo do aerogerador Darrieus de forma a aperfeiçoar o seu comportamento para que possa ser usado em contexto urbano não só com um aproveitamento da captação de energia eólica favorável, mas também com boa integração no contexto urbano.

Os aerogeradores Darrieus apresentam uma incapacidade natural de insuficiência de auto arranque, pelo facto de existirem pás que se movimentam contra a direção da corrente “*Upstream*” [Dominy08], sendo este facto uma influência negativa para que haja uma capacidade de auto arranque suficiente nestes aerogeradores. Várias soluções foram estudadas e desenvolvidas para ultrapassar a incapacidade de auto arranque dos aerogeradores Darrieus. Alguns desses estudos são descritos seguidamente.

Em [Kirke98] é estudada a incapacidade de auto arranque dos aerogeradores Darrieus de forma a identificar características dos perfis das pás de aerogeradores Darrieus que podem influenciar positivamente a capacidade de auto arranque. Neste estudo é de destacar: os perfis de pás com concavidade; a existência de uma ponta no bordo de ataque do perfil para dividir mais eficazmente o escoamento da corrente do vento; os perfis espessos; os perfis mais largos. Apesar de em [Kirke98] ser proposto um novo perfil designado de S1210 que apresenta uma força de sustentação superior para números de Reynolds mais baixos e em [Olson09] ser proposto o perfil DU-06-W-200, não foram detetados testes de campo da eficiência deste perfil no auto arranque de aerogeradores Darrieus, que são sem dúvida uma parte experimental relevante para a aceitação e quantificação do benefício alcançado.

Em [Kirke91, Paraschivoiu09b, Kirke11, Chen13], entre outros trabalhos, é apresentado um sistema de melhoramento do ângulo de inclinação da pá dependendo do ângulo axial, melhorando as forças de sustentação e arrasto exercidas em todas as pás ao mesmo tempo, induzindo auto arranque no aerogerador. Este sistema requer a utilização

de mais componentes no auto arranque, sendo que estes componentes vão estar sobre fadiga mecânica uma vez que ficam sujeitos à elevada velocidade de rotação dos aerogeradores Darrieus. Não só com o aumento de componentes neste sistema se compromete uma das vantagens principais relativamente a ARH, mas também a fadiga sobre estes componentes comprometem a durabilidade do aerogerador.

O uso de palhetas guia que orientam a corrente de vento é uma vantagem uma vez que contribuem para diminuir as forças de arrasto nas pás que se movem contra a corrente e incrementam as forças de sustentação nas pás. Mas tem como desvantagem o facto de as palhetas terem de ser orientadas segundo a direção do vento; o número de componentes aumenta; a solidez do aerogerador também aumenta, levando ao aumento da ação do vento responsável pela flexão do eixo vertical [Takao09a, Takao09b, Chong12].

Uma das soluções apresentadas para ultrapassar a incapacidade de auto arranque do aerogerador Darrieus é ter uma configuração híbrida com um aerogerador Savonius, visto que, o aerogerador Savonius apresenta um grande binário para velocidades baixas do vento o que permite um auto arranque natural. No entanto, esta configuração acarreta problemas para velocidades altas de vento, uma vez que a configuração de aerogerador Savonius cria turbulência e forças de arrasto extra que influenciam negativamente o comportamento do aerogerador Darrieus [Wakui05, Hossain07, Gupta08, Alam09].

Em [Feldman89] são apresentadas algumas soluções que têm como base o recurso a pás que mudam a sua forma durante a rotação do rotor. Estas pás funcionam recorrendo a forças de arrasto ou recorrendo a forças de sustentação alternadamente dependendo do ângulo axial da pá. No entanto, a mudança da forma da pá leva à instalação de componentes extra, aumentando a fadiga da pá, para além de não permitirem uma melhoria adequada do perfil aerodinâmico da pá.

Em [Alidadi09] são apresentadas soluções que recorrem a canais que afunilam e reorientam a corrente do vento incidente sobre as pás, aumentando a sua velocidade. Esta solução apresenta as mesmas desvantagens que a solução que utiliza palhetas guia.

Uma solução usual no mercado é a utilização de um motor elétrico de arranque recorrendo a uma fonte externa de energia elétrica para fazer o arranque inicial do

aerogerador. Nesta solução a velocidade e direção do vento é constantemente monitorizada e ao atingir uma velocidade mínima predefinida ocorre o arranque inicial do aerogerador. Quando o aerogerador chega a uma determinada velocidade de rotação o motor de arranque é desligado passando o gerador a produzir energia elétrica. Esta solução apresenta a desvantagem da complexidade do controlo do aerogerador [Paraschivoiu09a].

## 2.3 Metodologia de Estudo de Perfis

Uma nova metodologia para estudo e desenvolvimento de novos perfis de pá de aerogeradores Darrieus é apresentada neste capítulo. A metodologia não pretende obter as características exatas do perfil a desenvolver mas ser uma ferramenta de uso nas primeiras fases de desenvolvimento de novos perfis, capaz de dar uma visão geral sobre as características da superfície aerodinâmica, com principal incidência no estudo do auto arranque do aerogerador Darrieus [Batista11b, Batista12f].

A nova metodologia de estudo faz ajustes na superfície do perfil a desenvolver, comparando as vantagens e as desvantagens que trazem ao perfil para o auto arranque e funcionamento em aerogeradores Darrieus.

A metodologia tem como base a modelação das forças que caracterizam o estudo de perfis aerodinâmicos [Anderson10]. As forças aerodinâmicas exercidas sobre a superfície do perfil são resultantes de uma tensão normal provocada pela distribuição de pressão  $p$  e tensão de cisalhamento  $\tau_w$ . As forças aerodinâmicas na superfície do perfil nomeadamente a tensão de cisalhamento e distribuição de pressão na superfície do intradorso e extradorso são apresentadas na Figura 2.5.

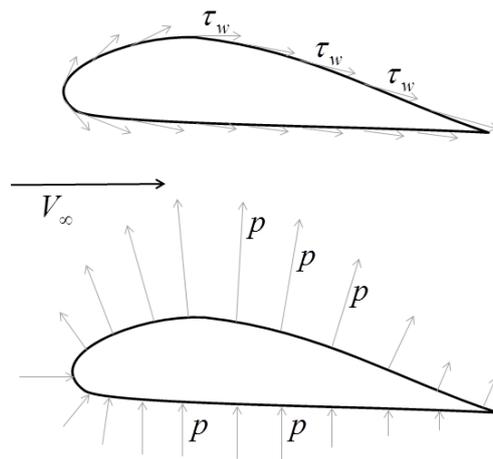


Figura 2.5 - Tensão de cisalhamento e distribuição de pressão.

O vento em escoamento livre com uma determinada orientação e velocidade  $V_\infty$  chega ao perfil com um determinado ângulo  $\alpha$  resultando numa força sobre o perfil  $R_S$  apresentada na Figura 2.6. A força de sustentação  $L$  é a componente de  $R_S$  perpendicular a  $V_\infty$  e a força de arrasto  $D$  é a componente de  $R_S$  paralela a  $V_\infty$ . A força normal  $N$  é a componente de  $R_S$  perpendicular à corda do perfil e a força axial  $A$  é a componente de  $R_S$  paralela à corda do perfil apresentada na Figura 2.6.

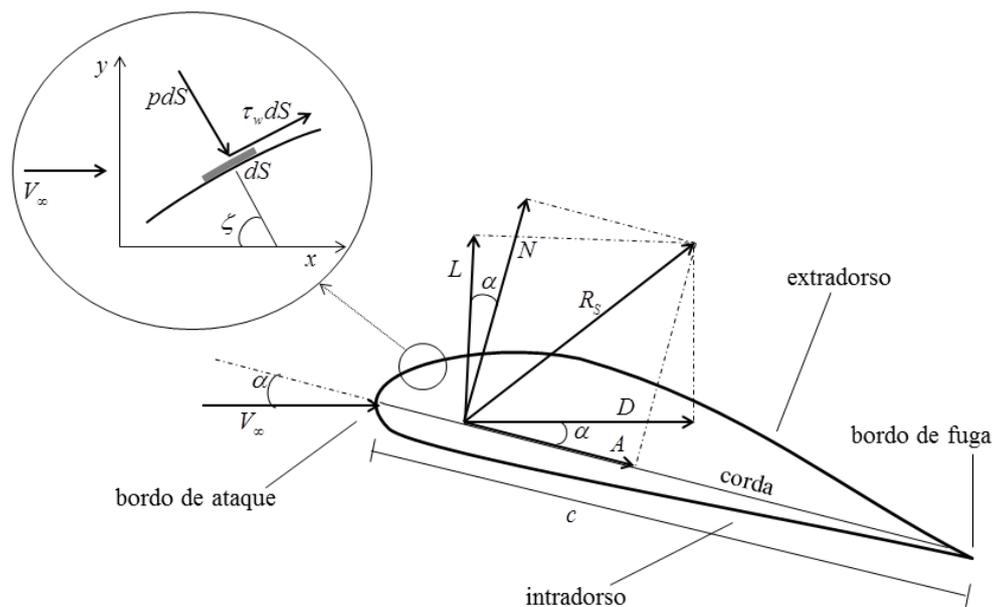


Figura 2.6 - Forças aerodinâmicas exercidas sobre a superfície do perfil.

A relação geométrica entre  $L$ ,  $D$ ,  $N$ ,  $A$  é feita através do ângulo de ataque do perfil  $\alpha$  dada por:

$$L = N \cos \alpha - A \sin \alpha \quad (2.1)$$

$$D = N \sin \alpha + A \cos \alpha \quad (2.2)$$

Considerando uma secção elemental na superfície do extradorso  $dS_s$ , a contribuição elemental da pressão  $p$  e a tensão de cisalhamento  $\tau_w$  para a força normal  $dN'_s$  e a força axial  $dA'_s$  [Anderson10] dadas por:

$$dN'_s = -pdS_s \cos \zeta - \tau_w dS_s \sin \zeta \quad (2.3)$$

$$dA'_s = -pdS_s \sin \zeta + \tau_w dS_s \cos \zeta \quad (2.4)$$

sendo  $\zeta$  o ângulo da pressão exercida sobre a superfície normal à orientação do vento. Considerando uma secção elemental na superfície do intradorso  $dS_I$ , a contribuição elemental da pressão  $p$  e a tensão de cisalhamento  $\tau_w$  para a força normal  $dN'_I$  e a força axial  $dA'_I$  [Anderson10] dadas por:

$$dN'_I = pdS_I \cos \zeta - \tau_w dS_I \sin \zeta \quad (2.5)$$

$$dA'_I = pdS_I \sin \zeta + \tau_w dS_I \cos \zeta \quad (2.6)$$

A força normal total  $N$  e a força axial total  $A$  [Anderson10] são dadas por:

$$\begin{aligned} N &= \int_{BA}^{BF} dN'_s + \int_{BA}^{BF} dN'_I = \\ &= - \int_{BA}^{BF} (p \cos \zeta + \tau_w \sin \zeta) dS_s + \int_{BA}^{BF} (p \cos \zeta - \tau_w \sin \zeta) dS_I \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned}
A &= \int_{BA}^{BF} dA'_S + \int_{BA}^{BF} dA'_I = \\
&= \int_{BA}^{BF} (-p \sin \zeta + \tau_w \cos \zeta) dS_S + \int_{BA}^{BF} (p \sin \zeta - \tau_w \cos \zeta) dS_I
\end{aligned} \tag{2.8}$$

sendo  $BA$  o bordo de ataque,  $BF$  o bordo de fuga do perfil,  $V_\infty$  e  $\rho_\infty$  a velocidade e a densidade do ar para vento em escoamento livre,  $C_L$ ,  $C_D$ ,  $C_N$ ,  $C_A$  os valores adimensionais do coeficiente de sustentação, do coeficiente de arrasto, do coeficiente de normal e do coeficiente de axial dados por:

$$C_L \equiv 2 \frac{L}{\rho_\infty V_\infty^2} \tag{2.9}$$

$$C_D \equiv 2 \frac{D}{\rho_\infty V_\infty^2} \tag{2.10}$$

$$C_N \equiv 2 \frac{N}{\rho_\infty V_\infty^2} \tag{2.11}$$

$$C_A \equiv 2 \frac{A}{\rho_\infty V_\infty^2} \tag{2.12}$$

O estudo sobre as publicações que abordam o auto arranque de aerogeradores Darrieus não permitiu detetar no estado da arte uma metodologia adequada para desenvolvimento rápido de perfis aerodinâmicos com capacidade de oferecer auto arranque. Pelo que, uma das contribuições desta tese é a proposta de uma nova metodologia para esse desenvolvimento. Para estudar as vantagens, as desvantagens e as implicações que trazem ao desempenho e auto arranque do aerogerador Darrieus, novos desenhos ou modificações ao perfil aerodinâmico, é necessário considerar a influência da superfície da pá e o vento em escoamento. Esta influência é quantificada pelo coeficiente de pressão  $C_{pr}$ , que descreve a relação entre a pressão do vento em escoamento livre  $p_\infty$  e a pressão calculada num ponto da superfície do perfil  $p$  [Anderson10], sendo dada por:

$$C_{pr} = 2 \frac{p - p_{\infty}}{\rho_{\infty} V_{\infty}^2} \quad (2.13)$$

Na metodologia de desenvolvimento rápido de perfis para os aerogeradores Darrieus é considerado que o fluido é invíscido, i.e., quando o  $C_{pr}$  é nulo em um determinado ponto da superfície do perfil a pressão  $p = p_{\infty}$ ; quando o  $C_{pr}$  é unitário esse é um ponto estagnação de fluido, i.e., a velocidade do fluido nesse ponto é nula, é relevante quando se melhoram as forças de arrasto; quando o  $C_{pr} < 0$  nesse ponto a velocidade do fluido é superior a  $V_{\infty}$ , sendo relevante quando se melhoram as forças de sustentação.

Com a aplicação da metodologia é obtida a contribuição de  $C_{pr}$  para a força tangencial  $T_{pr}$  e força normal  $N_{pr}$  no perfil, sendo feita da seguinte forma:

1. A superfície do perfil é dividida em segmentos como, por exemplo, é apresentado na Figura 2.7. Esta segmentação é feita ao longo da linha de corda do perfil para a superfície do intradorso e extradorso separadamente. Quanto maior a segmentação melhor é representada a influência da forma da superfície do perfil sobre as forças envolventes;
2. O  $C_{pr}$  em cada segmento da superfície é calculado sendo, por exemplo, apresentado como na Figura 2.8. Este cálculo é feito recorrendo a aplicações informáticas como o ANSYS Fluent;
3. A relação geométrica em cada segmento em análise é calculada relativamente à linha de corda do perfil sendo, por exemplo, apresentado na Figura 2.9, obtendo a contribuição do  $C_{pr}$  em cada segmento para o  $T_{pr}$  e o  $N_{pr}$  no extradorso recorrendo às expressões (2.14) e (2.15) e no intradorso recorrendo às expressões (2.16) e (2.17), apresentado na Figura 2.10;
4. A contribuição total de  $C_{pr}$  para  $T_{pr}$  e para  $N_{pr}$  é dada pelas expressões (2.18) e (2.19).

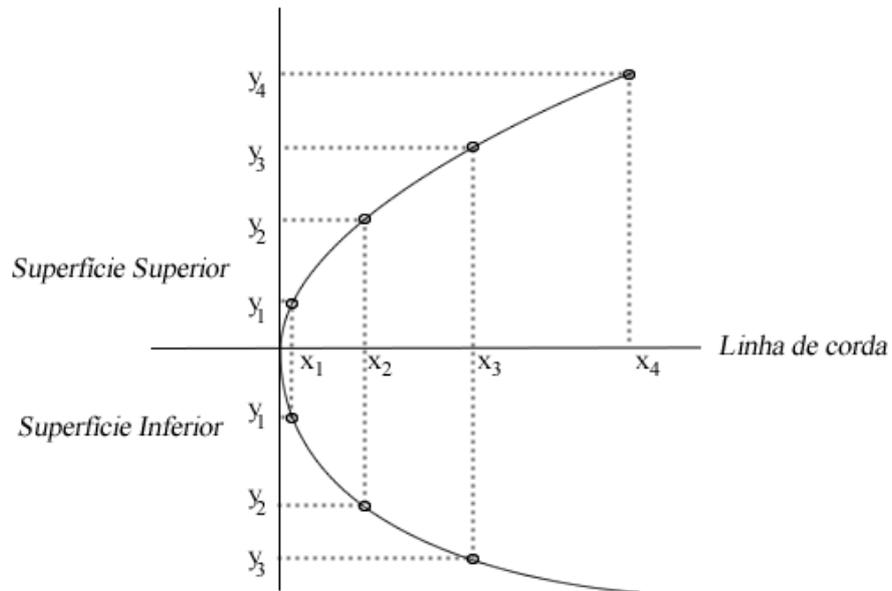


Figura 2.7 - Segmentação de perfil aerodinâmico.

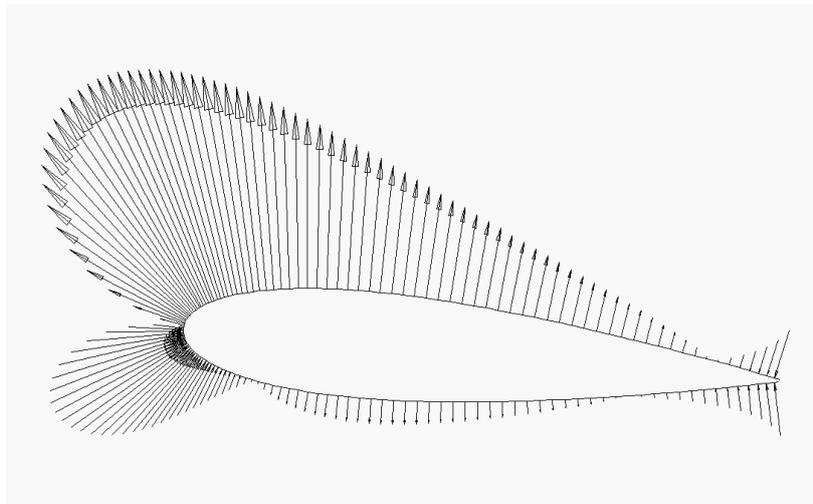


Figura 2.8 - Cpr em cada segmento elementar do perfil.

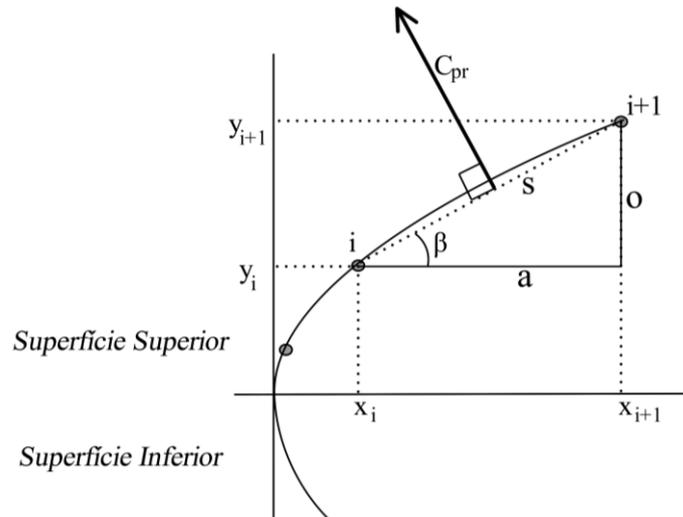


Figura 2.9 -  $C_{pr}$  em um segmento elementar do perfil.

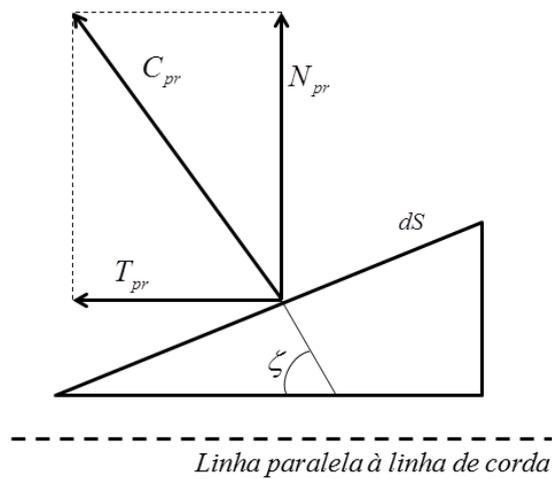


Figura 2.10 - Contribuição do  $C_{pr}$  para a  $T_{pr}$  e  $N_{pr}$ .

A contribuição de  $C_{pr}$  para  $T_{pr}$  e a para  $N_{pr}$  na superfície extradorso do perfil  $dS_s$  [Batista11a, Batista11b] é dada por:

$$dT'_{prS} = C_{pr} dS_s \text{sen} \zeta \quad (2.14)$$

$$dN'_{prS} = -C_{pr} dS_s \text{cos} \zeta \quad (2.15)$$

A contribuição de  $C_{pr}$  para  $T_{pr}$  e a para  $N_{pr}$  na superfície intradorso do perfil  $dS_I$  [Batista11a, Batista11b] é dada por:

$$dT'_{prI} = -C_{pr} dS_I \text{sen} \zeta \quad (2.16)$$

$$dN'_{prI} = C_{pr} dS_I \text{cos} \zeta \quad (2.17)$$

Finalmente, a contribuição total de  $C_{pr}$  para  $T_{pr}$  e para  $N_{pr}$  [Batista11a, Batista11b] é dada por:

$$T_{pr} = \int_{BA}^{BF} (C_{pr} \text{sen} \zeta) dS_S - \int_{BA}^{BF} (C_{pr} \text{sen} \zeta) dS_I \quad (2.18)$$

$$N_{pr} = - \int_{BA}^{BF} (C_{pr} \text{cos} \zeta) dS_S + \int_{BA}^{BF} (C_{pr} \text{cos} \zeta) dS_I \quad (2.19)$$

As aplicações informáticas ANSYS Gambit e ANSYS Fluent foram usadas no cálculo para a criação da malha externa ao perfil e no cálculo dos coeficientes de pressão em cada segmento elementar da superfície do perfil. O ANSYS Gambit é usado para a criação da malha externa ao perfil, i.e., a malha que representa o túnel de vento. O ANSYS Fluent é usado no cálculo dos coeficientes de pressão em cada segmento elementar do perfil.

Quando se estuda o auto arranque, deve ser considerado que as pás estão paradas e que podem estar em um qualquer ângulo axial entre  $0^\circ$  e  $360^\circ$ . Outras aplicações informáticas como o JavaFoil e XFoil foram testadas. Estas aplicações recorrem à análise aerodinâmica dos perfis em fluxo laminar. Esta análise é inadequada quando se estudam as pás do aerogerador Darrieus com perfis assimétricos. Como prova disso apresentamos os resultados obtidos com a aplicação informática JavaFoil para o cálculo do  $C_{pr}$  em cada segmento na Figura 2.11 e na Figura 2.12 que respetivamente apresentam a contribuição de  $C_{pr}$  para  $T_{pr}$  e para  $N_{pr}$ . Usando a aplicação JavaFoil e XFoil o comportamento é simétrico entre  $0^\circ$  e  $180^\circ$  e os  $180^\circ$  e  $360^\circ$ . Este não é um

comportamento esperado principalmente para perfis assimétricos, i.e., o comportamento aerodinâmico do perfil quando o vento aborda o perfil pelo BA não poderá ser igual ao comportamento aerodinâmico do perfil quando o vento aborda o perfil pelo BF.

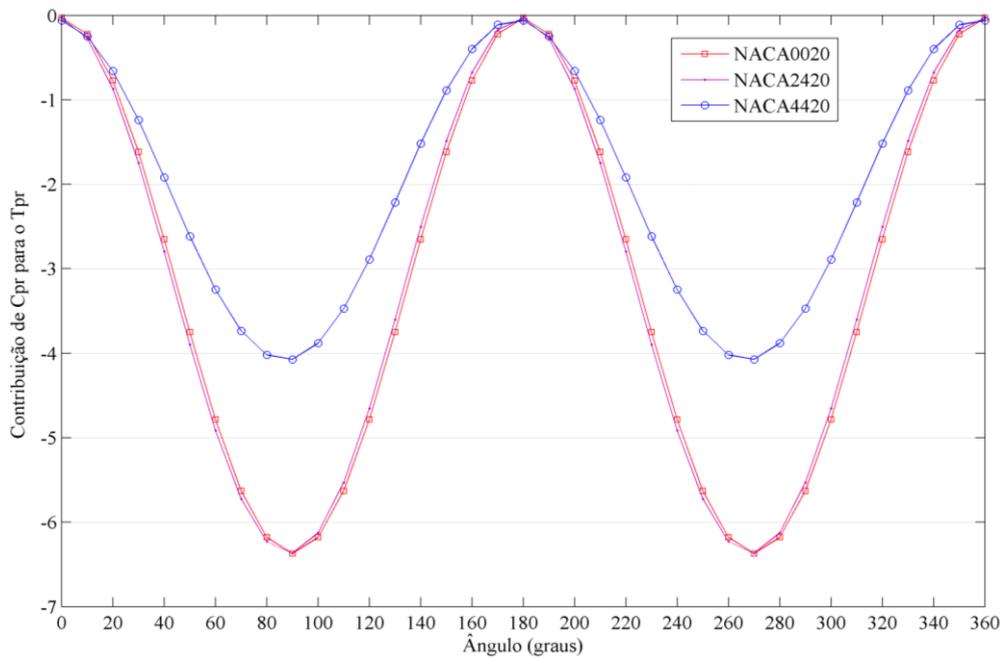


Figura 2.11 - Contribuição do Cpr para a Tpr com aplicação JavaFoil.

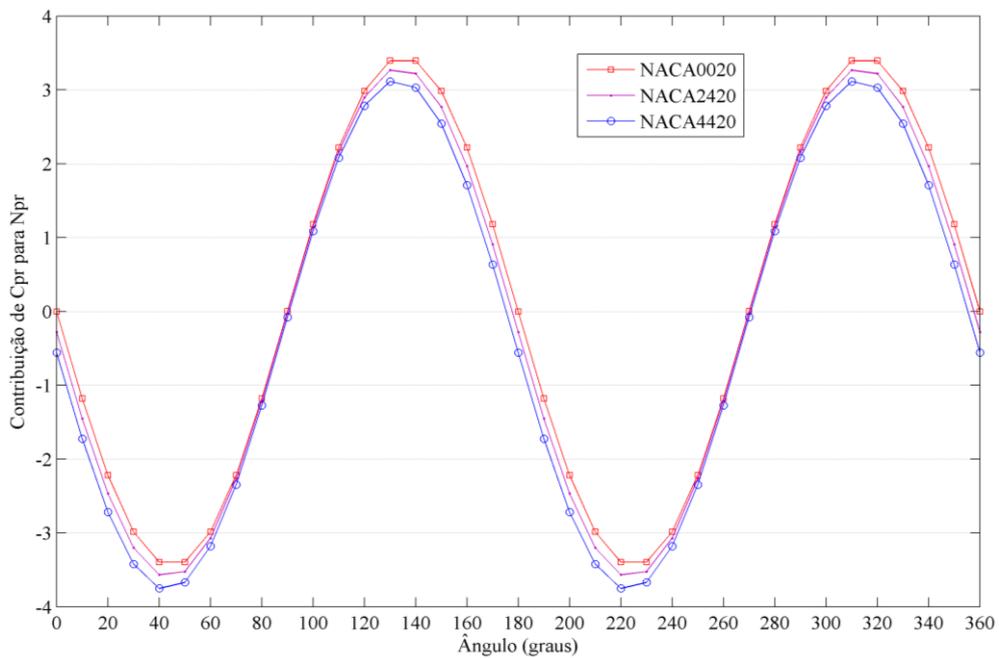


Figura 2.12 - Contribuição de Cpr para Npr com aplicação JavaFoil.

As aplicações informáticas JavaFoil e XFoil são mais adequadas para cálculo das características aerodinâmicas dos perfis num intervalo curto de variação dos ângulos de ataque.

Na criação da malha que representa o espaço de análise do túnel de vento, foram tidos em conta os trabalhos de [Paraschivoiu09a, Nobile11] relativamente à criação mais adequada da malha não só do espaço do túnel de vento, mas também da malha à volta da superfície do perfil.

O túnel de vento é constituído por várias zonas fronteira: duas fronteiras do tipo SYMMETRY que representam a parede superior e a parede inferior do túnel; uma fronteira do tipo VELOCITY-INLET onde se define a velocidade de entrada do fluido; uma fronteira configurada como OUTLET-VENT onde o fluido é escoado; uma superfície do perfil configurada como WALL. O tipo de fluido é configurado como ar com especificações por defeito ao nível no mar.

Respetivamente a malha à superfície do perfil e a do túnel de vento são apresentados na Figura 2.13 e na Figura 2.14.

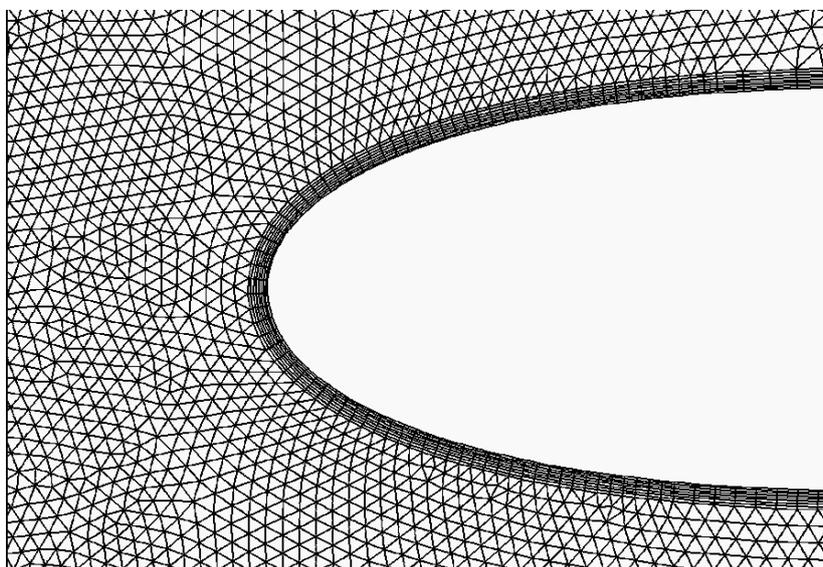


Figura 2.13 - Malha à superfície do perfil.

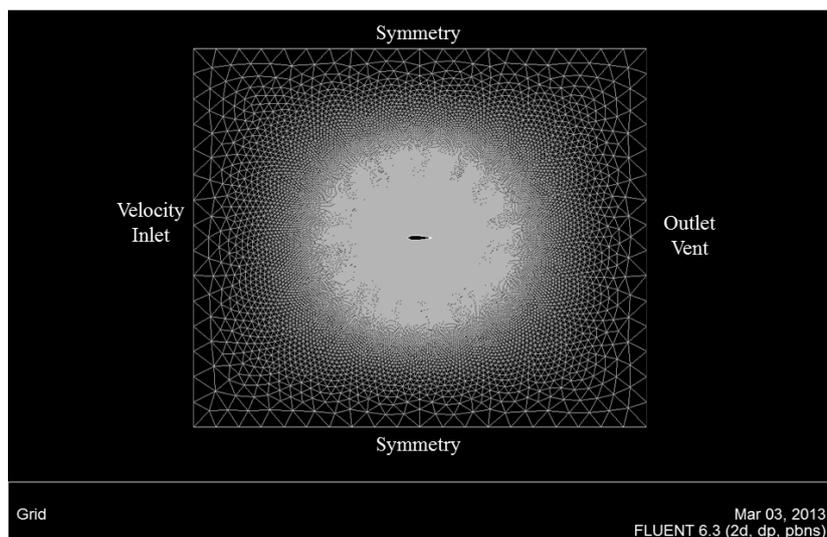
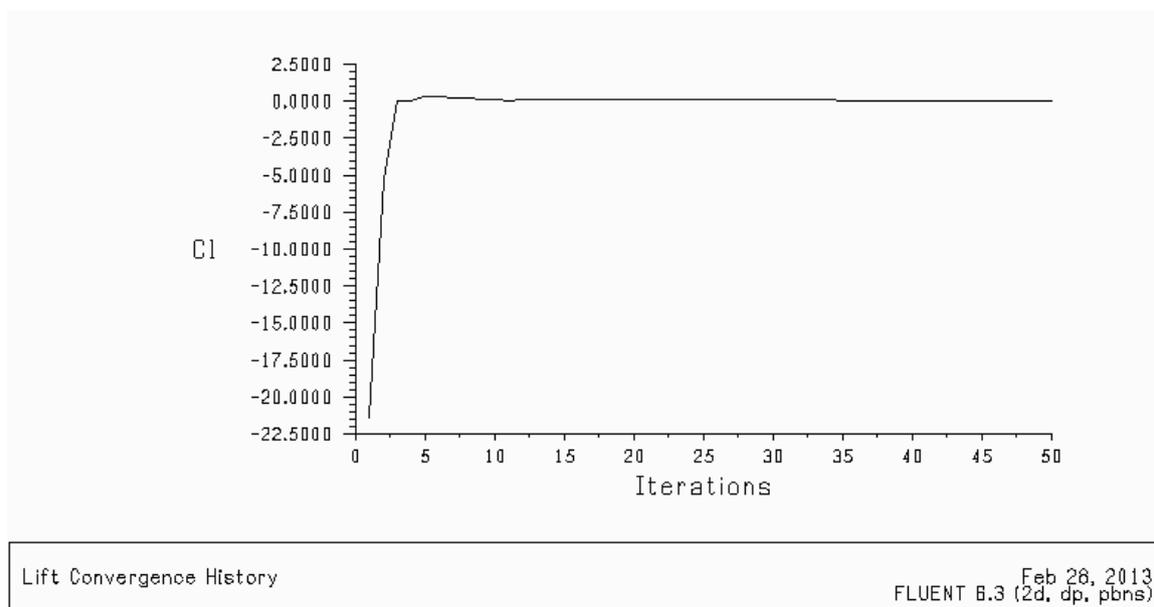


Figura 2.14 - Malha do túnel de vento.

O número de iterações para convergência de dados usadas no ANSYS Fluent foi de 50, o valor ótimo resultante, tendo em conta não só o correto cálculo das características aerodinâmicas dos perfis e a sua convergência, mas também a redução do tempo de execução. A convergência para os coeficientes de sustentação  $C_L$  e de arrasto  $C_D$  são apresentados respetivamente na Figura 2.15 e na Figura 2.16.

Figura 2.15 - Convergência do coeficiente de sustentação  $C_L$ .

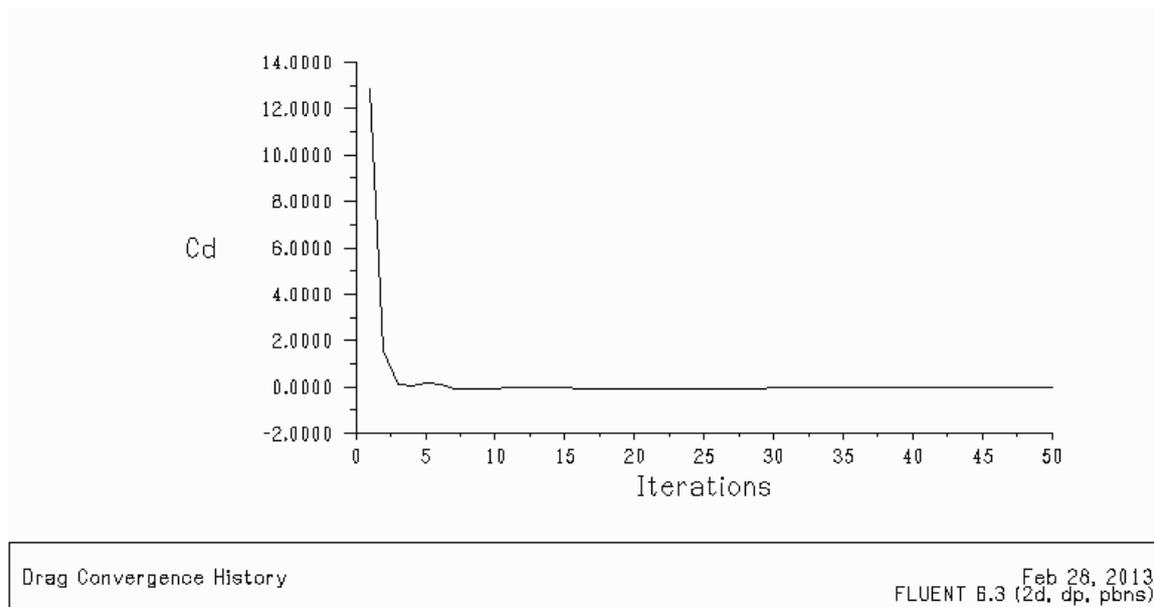


Figura 2.16 - Convergência do coeficiente de arrasto  $C_D$  .

O processo de criação de malhas no ANSYS Gambit foi automatizado recorrendo à utilização de Journals. Os Journals são ficheiros codificados que podem ser executados automatizando processos rotineiros. Um dos processos rotineiros no ANSYS Gambit é a criação de malhas específicas para cada variação dos ângulos entre  $0^\circ$  e  $360^\circ$  e para cada desenho do perfil aerodinâmico. O tempo de criação automatizada das diferentes malhas com ângulos entre  $0^\circ$  e  $360^\circ$  com variações de  $10^\circ$  é em média de 25 minutos.

O processo de calcular os  $C_{pr}$  em cada segmento da superfície do perfil aerodinâmico para cada uma das variações de ângulo entre  $0^\circ$  e  $360^\circ$ , recorrendo às malhas previamente criadas também foi automatizado recorrendo à utilização de Journals. O tempo de cálculo automatizado das características aerodinâmicas dos perfis com 50 iterações para cada um dos 37 diferentes ângulos com o ANSYS Fluent é em média de 56 minutos.

#### *Aplicação da Metodologia*

Os resultados da aplicação desta metodologia para os perfis mais conhecidos e utilizados em aerogeradores Darrieus são em seguida apresentados. A análise foi feita para aerogeradores Darrieus com as pás paradas e sob a influência de velocidades de

vento de 5 m/s. Os perfis em análise são os perfis simétricos NACA0018 e NACA0020 e os perfis assimétricos NACA4418 e NACA4420, apresentados na Figura 2.17.

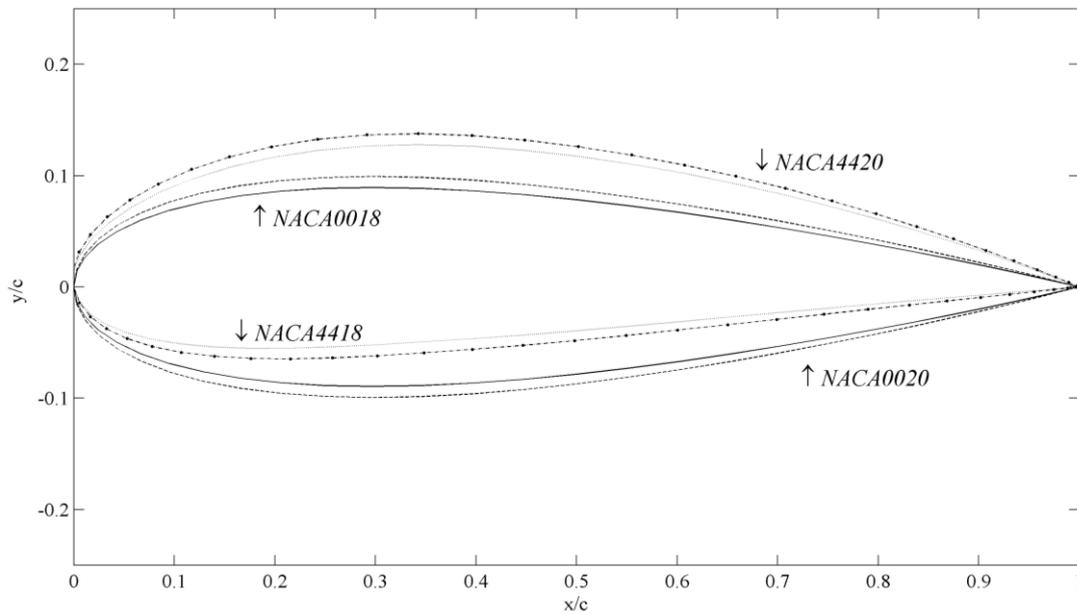


Figura 2.17 - NACA0018, NACA0020, NACA4418 e NACA4420.

As contribuições de  $C_{pr}$  para  $T_{pr}$  para cada perfil simétrico [Batista1a] e assimétrico [Batista1b] são apresentadas na Figura 2.18.

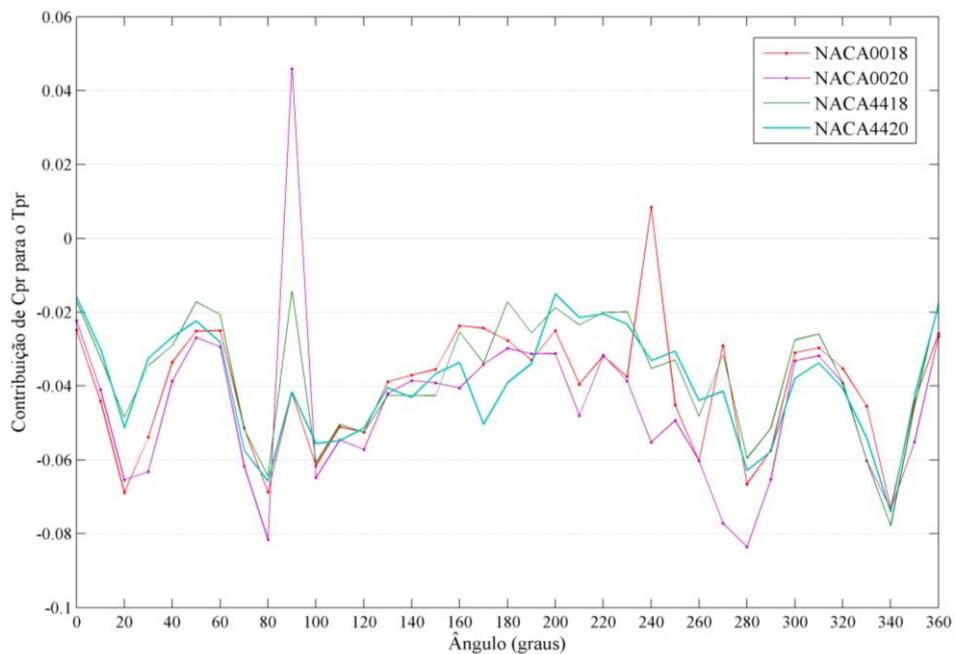


Figura 2.18 - Contribuição do  $C_{pr}$  para  $T_{pr}$ .

De notar que quando o aerogerador Darrieus está parado a maior contribuição para o auto arranque é dos perfis simétricos, como apresentados em [Claessens06].

As contribuições do  $C_{pr}$  para  $N_{pr}$  para cada perfil simétrico e assimétrico estudado são apresentadas na Figura 2.19.

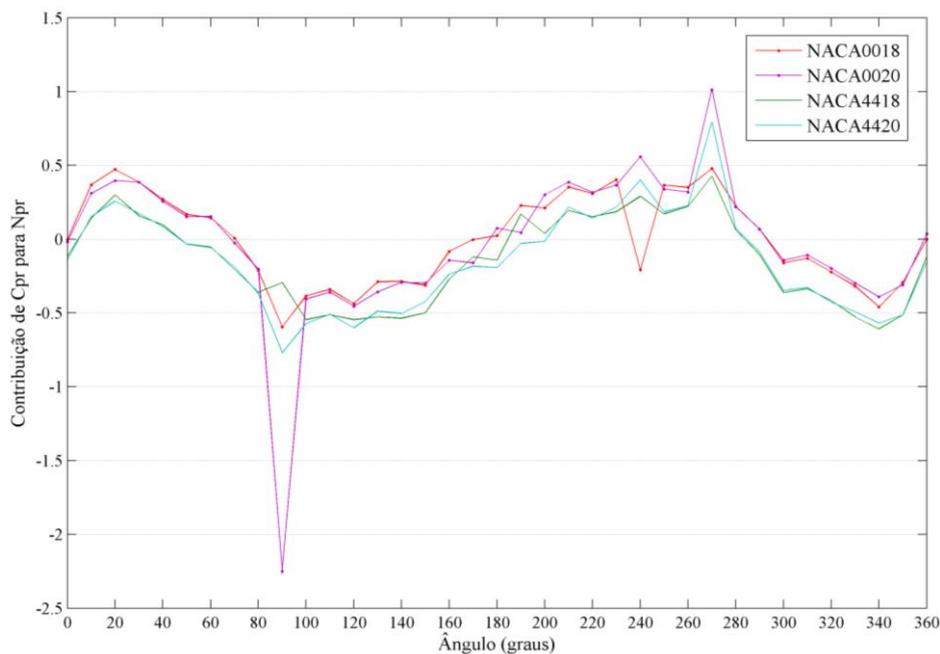


Figura 2.19 - Contribuição de  $C_{pr}$  para  $N_{pr}$ .

Os perfis assimétricos apresentam menor variação nas forças exercidas sobre o veio. Assim, os perfis simétricos precisam de reforçar os braços que ligam as pás ao gerador, implicando maiores custos e uma maior fadiga sobre os componentes do aerogerador.

Todos os perfis apresentam ao longo da variação dos ângulos entre  $0^\circ$  e  $360^\circ$ , uma variação da força normal exercida tanto para o interior como para o exterior do rotor.

## 2.4 Aerogeradores Darrieus

A modelação e avaliação do desempenho de um aerogerador Darrieus é uma tarefa exigente, principalmente em contexto urbano devido aos ventos predominantemente turbulentos. O movimento tridimensional das pás em redor do rotor apresenta desafios aerodinâmicos de avaliação do desempenho.

Apesar da complexidade de representar matematicamente o comportamento aerodinâmico dos aerogeradores Darrieus vários modelos matemáticos foram desenvolvidos, como por exemplo, os indicados nas referências [Melo12, Paraschivoiu09a, Islam08]. Estes modelos matemáticos têm vantagens e desvantagens, com uma maior ou menor precisão na avaliação, dependendo da configuração do aerogerador e das condições do escoamento do vento [Islam08].

Existem alguns trabalhos científicos [Silva11a, Nobile11] que recorrem a técnicas de Dinâmica de Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics* - CFD), esta técnica requer elevados recursos informáticos para o processo. Os resultados obtidos podem ser validados com técnicas de PIV [Ferreira08, Ferreira09a].

Os modelos mais usados na literatura científica podem ser divididos em três categorias: modelo de Vórtice, modelo de Cascada também designado por metodologia de Cascada e modelos Momento do Elemento de Pá (*Blade Element Momentum* - BEM).

Os modelos de Vórtice são basicamente modelos do potencial de fluxo com base no cálculo de velocidade sobre a turbina através da influência de vorticidade na esteira das lâminas. As pás da turbina são representadas por linhas de vórtice encadeadas cujas forças são determinadas utilizando os conjuntos de dados aerodinâmicos da pá calculados usando a velocidade de fluxo relativa e o ângulo de ataque. O modelo de Vórtice foi inicialmente apresentado em [Larsen75], mas apresentava algumas assunções que reduziam a eficiência na avaliação final do desempenho. Outras evoluções foram introduzidas tais como a análise bidimensional do aerogerador [Wilson80, Wilson81], culminando nos trabalhos de [Strickland81a, Strickland81b] onde para além de uma análise tridimensional do aerogerador, também são introduzidos os efeitos da perda dinâmica variável e os efeitos de massa. Os modelos de Vórtice são

inválidos para valores do coeficiente de velocidade periférica (*Tip Speed Ratio* - TSR) elevados e solidez elevada [Paraschivoiu09a]. Tal como em outros modelos de avaliação do desempenho existe sempre a necessidade de analisar as configurações do aerogerador e do vento para saber se este modelo traz mais vantagens sobre outros modelos matemáticos ou se dadas as condições de análise a sua precisão é provável levar a resultados imprecisos.

Na metodologia de Cascada as pás são rearranjadas e dispostas numa superfície plana separadas a uma distância igual à circunferência do aerogerador dividido pelo número de pás [Hirsch87]. A avaliação do desempenho do aerogerador Darrieus é proposta na metodologia de Cascada aplicando princípios de cascada usados em turbinas. A relação entre a velocidade na esteira e a velocidade do vento sem interferência é estabelecida usando as equações de Bernoulli, enquanto a velocidade induzida é relacionada com a velocidade na esteira através de uma expressão semiempírica modelada recorrendo a uma relação com o TSR. Neste modelo as características aerodinâmicas de cada elemento da pá são obtidas separadamente, tanto para as pás que passam a montante do rotor como a jusante, tendo sempre em consideração o número de Reynolds. Apesar de na literatura científica não serem apresentados problemas de convergência e apresentarem bons resultados de avaliação do desempenho, o modelo de cascata necessita também de uma grande capacidade computacional e tempo computacional. A falta de literatura científica e testes de campo sobre este modelo aplicado a diferentes configurações de aerogeradores Darrieus é visto também como uma desvantagem.

Os modelos BEM combinam a Teoria do Momento com Teoria do Elemento da Pá; estudando o comportamento do escoamento de vento nas pás e as forças envolventes. Os modelos BEM podem ser subdivididos nos modelos [Islam08]: modelo de TCS; modelo de TCM; modelo de TCMD; representados na Figura 2.20.

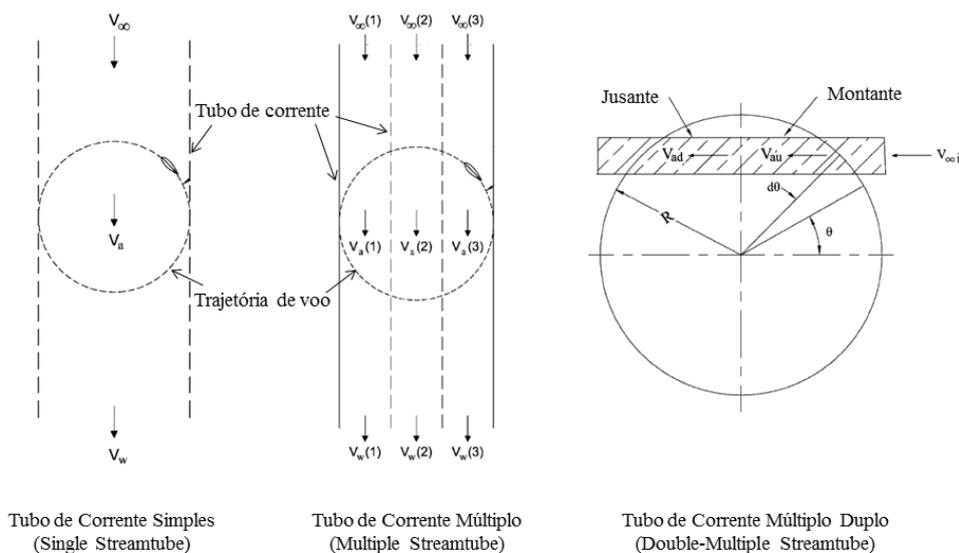


Figura 2.20 - Modelos Momento do Elemento de Pá.

No modelo de TCS [Templin74, Noll80] o aerogerador é colocado dentro de um TCS e as pás durante as suas revoluções são descritas por um disco atuador. É considerado neste modelo que os efeitos do exterior para com o interior do tubo de corrente são negligenciáveis. Este modelo não apresenta uma grande precisão na avaliação de desempenho, resultante das suposições feitas, oferecendo valores acima dos valores reais. Poucas são as configurações de aerogeradores onde este modelo apresenta valores mais próximos do real, sendo geralmente os aerogeradores com valores de solidez baixos para velocidades de vento baixas.

O modelo de TCM [Wilson74] é uma variação do modelo de TCS, onde o tubo de corrente é subdividido em vários tubos de corrente adjacentes que são independentes entre si e com as suas características aerodinâmicas próprias. Este modelo apresenta uma grande evolução relativamente ao modelo de Tubo Simples, contemplando as variações aerodinâmicas ao longo do rotor. Várias evoluções foram introduzidas neste modelo [Strickland75, Sharpe77, Muraca75, Read80, Paraschivoiu88] tais como: a velocidade induzida é calculada através das forças na pá e a mudança de momento ao longo de cada tubo de corrente; o efeito do número de Reynolds no modelo de Strickland é incorporado; os efeitos da estrutura, da proporção da pá e a solidez; e o conceito de expansão do escoamento nos tubos de corrente.

O modelo de TCMD é uma variação do modelo de TCM, onde o disco atuador é dividido em dois discos atuadores em sequência representando o lado a montante e o lado a jusante do rotor. As pás ao passarem no lado a montante do rotor influenciam o escoamento de vento no lado a jusante do rotor. O cálculo do desempenho é feito separadamente às duas metades do rotor a jusante e a montante do tubo de corrente. Em [Paraschivoiu83a, Paraschivoiu83b] os fatores de interferência variáveis e variações na velocidade de indução são introduzidos. Em [Paraschivoiu02, Brahim95] várias soluções computacionais para o modelo de TCMD são apresentadas: o CARDAA que representa o modelo de TCMD simples; o CARDAAV que considera também a variação dos fatores de interferência em cada tubo de corrente e em cada disco atuador; o CARDAAAX que incorpora o efeito de expansão em cada tubo de corrente.

Como foi referido anteriormente existem vantagens e desvantagens na utilização de cada modelo matemático. Pela experiência adquirida e pela literatura científica todos os modelos matemáticos podem ser mais ou menos precisos dependendo da configuração do aerogerador, tal como apresentado na Figura 2.21 [Strickland75] e na Figura 2.22 [Paraschivoiu09a] respetivamente.

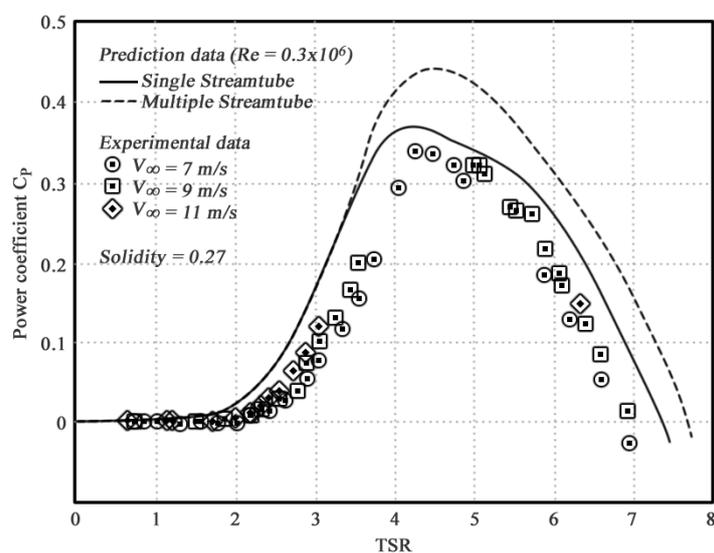


Figura 2.21 - Modelo de Tudo de Corrente Simples e modelo de TCM.

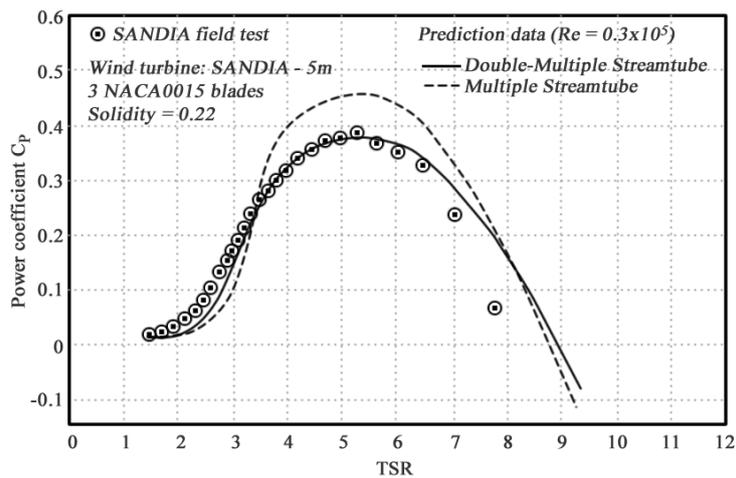


Figura 2.22 - Modelo de TCM e modelo de TCMD.

O modelo de Vórtice parece ser o modelo com maior capacidade para modelar uma maior variedade de configurações de aerogeradores Darrieus, seguido de muito perto pelos modelos de TCM e de TCMD. Dada a maior complexidade de modelação e necessidade de computação do modelo de Vórtice e não havendo grandes diferenças na avaliação do desempenho final com os modelos de TCM e de TCMD como apresentado na Figura 2.23, os modelos de escolha no desenvolvimento deste trabalho foram os modelos de TCM e de TCMD.

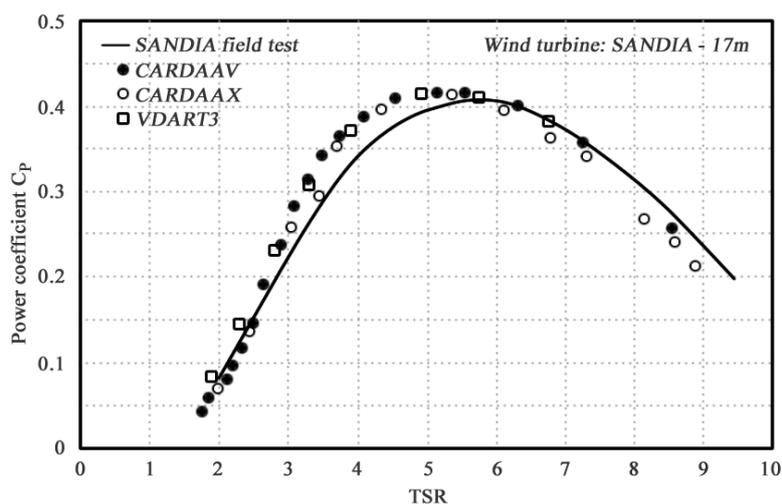


Figura 2.23 - Modelo de TCMD e modelo de Vórtice.

O diagrama das forças aerodinâmicas envolvidas na avaliação do desempenho de aerogeradores Darrieus [Paraschivoiu09a, Islam08] é apresentado na Figura 2.24.

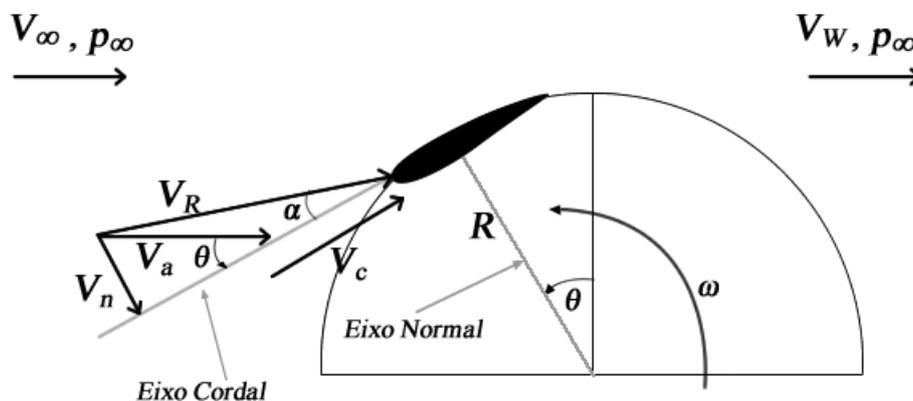


Figura 2.24 - Forças aerodinâmicas em aerogeradores Darrieus.

O aerogerador está sobre a influência de uma velocidade de vento sem interferências  $V_\infty$  chegando ao aerogerador como uma velocidade induzida ou velocidade axial  $V_a$ . A pá no seu movimento apresenta também uma velocidade angular de rotação  $V_{rot}$  que é dada por:

$$V_{rot} = \omega R \quad (2.20)$$

sendo  $\omega$  é a velocidade angular do rotor e  $R$  é o raio do rotor.

O coeficiente de velocidade periférica  $\lambda$  (*Tip Speed Ratio* - TSR) é dado pela relação entre  $V_{rot}$  e  $V_\infty$  dado por:

$$\lambda = \frac{V_{rot}}{V_\infty} = \frac{\omega R}{V_\infty} \quad (2.21)$$

A velocidade cordal  $V_c$ , i.e., a velocidade paralela à linha de corda do perfil da pá e a velocidade normal  $V_n$ , i.e., a velocidade paralela ao eixo normal [Islam08] são dadas por:

$$V_c = \omega R + V_a \cos \theta = \lambda V_\infty + V_a \cos \theta \quad (2.22)$$

$$V_n = V_a \sin \theta \quad (2.23)$$

sendo  $\theta$  o ângulo axial da pá.

A velocidade relativa do vento  $V_R$  que na pá é dada por:

$$V_R = \sqrt{V_c^2 + V_n^2} \quad (2.24)$$

O ângulo de ataque  $\alpha$  da pá relativa a  $V_R$  [Islam08] é dado por:

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{V_n}{V_c}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{V_a \sin \theta}{\omega R + V_a \cos \theta}\right) \quad (2.25)$$

O coeficiente de sustentação  $C_L$  e o coeficiente de arrasto  $C_D$  determinam o comportamento aerodinâmico do perfil da pá utilizado. O coeficiente tangencial  $C_T$  e o coeficiente normal  $C_N$  da pá são dados por:

$$C_T = C_L \sin \alpha - C_D \cos \alpha \quad (2.26)$$

$$C_N = C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha \quad (2.27)$$

A força tangencial  $F_T$  e a força normal  $F_N$  na pá [Islam08] são dadas por:

$$F_T = \frac{1}{2} C_T \rho c H W^2 \quad (2.28)$$

$$F_N = \frac{1}{2} C_N \rho c H W^2 \quad (2.29)$$

sendo  $\rho$  a densidade do ar,  $c$  o comprimento da corda do perfil da pá,  $H$  a altura do rotor do aerogerador e  $W$  é a velocidade do vento.

A força tangencial média  $\bar{F}_T$  é dada em função de  $F_T$  [Islam08] é dado por:

$$\bar{F}_T = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_T(\theta) d\theta \quad (2.30)$$

O binário geral do aerogerador é dado por:

$$Q = n \bar{F}_T R \quad (2.31)$$

sendo  $n$  o número de pás do aerogerador Darrieus.

A potência do aerogerador é dada por:

$$P = Q \omega \quad (2.32)$$

O coeficiente de potência  $C_p$  é a relação entre a energia existente no vento e a energia aproveitada pelo aerogerador é dado por:

$$C_p = 2 \frac{P}{\rho V_\infty^3 HR} = 2 \frac{n \bar{F}_T \omega}{\rho V_\infty^3 H} \quad (2.33)$$

## 2.5 Desenvolvimento do Perfil da Pá

Durante o desenvolvimento do aerogerador para contexto urbano houve a necessidade de desenhar um novo perfil para a pá de aerogerador Darrieus, capaz de oferecer o auto arranque e ao mesmo tempo apresentar um desempenho equivalente ou superior aos aerogeradores existentes no mercado. Assim, foi desenvolvido um perfil aerodinâmico designado de EN0005 apresentado na Figura 2.25 [Batista11c].

Antes de o perfil aerodinâmico EN0005 ter sido criado, várias outras soluções foram testadas, tais como perfis com células de captura de vórtices [Gallizio09], perfis com uma espessura grande [Bourguet07], e perfis modificados [Kirke98].

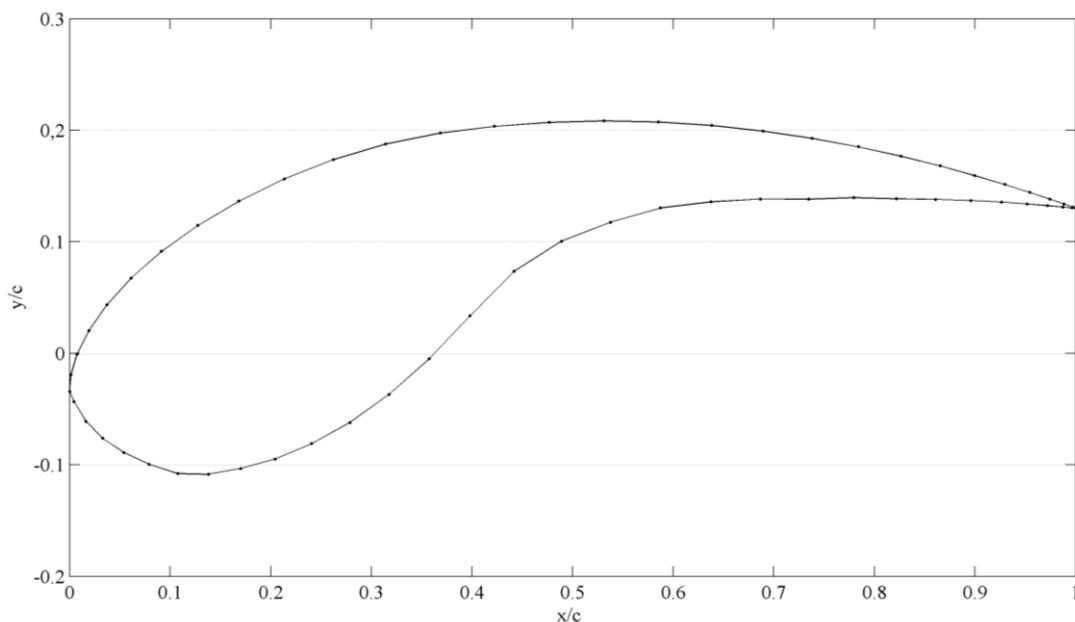


Figura 2.25 - Perfil aerodinâmico EN0005.

O processo para o desenvolvimento do perfil EN0005 foi o de selecionar um perfil de referência e sobre este fazer pequenas modificações sobre a sua superfície usando a metodologia apresentada na secção 2.3, validar se as modificações contribuíam positivamente para o auto arranque do aerogerador Darrieus. Após a obtenção de um perfil aceitável, é feita uma análise do desempenho geral do aerogerador aplicando os modelos apresentados na secção 2.4. Assim, foram criados vários perfis diferentes, onde se destacou o EN0005 como o mais apropriado às necessidades de um aerogerador Darrieus para ser usado em contexto urbano.

O perfil EN0005 tem a superfície extradorso com forma propícia à criação de forças de sustentação. Estas forças de sustentação são superiores na primeira metade da superfície extradorso, tendo uma orientação no sentido desejado do movimento do aerogerador.

No bordo de ataque do perfil existe a formação de uma ponta que reduz as forças de arrasto principalmente quando a pá se movimenta no sentido inverso do escoamento. Esta ponta auxilia também a orientação do escoamento entre a superfície extradorso e superfície intradorso do perfil.

A curvatura do perfil e o bordo de ataque está disposto numa posição mais baixa, para auxiliar no movimento de rotação desejado do rotor.

Os primeiros 20% da superfície intradorso são propícios à formação de forças de sustentação, essencial quando o aerogerador Darrieus está sobre a influência de valores de TSR altos. A restante superfície intradorso tem uma formação em copa que favorece a criação de forças de arrasto quando o aerogerador está parado mas que não cria turbulência quando a pá está em movimento, i.e., orientando o escoamento no bordo de fuga.

Considerando (2.25), quanto maior for a velocidade do escoamento e a velocidade angular de rotação do aerogerador menores são os ângulos de ataque a que a pá está sujeita. Quando a pá está em rotação, a área da superfície extradorso e intradorso da pá mais perto do bordo de ataque é essencial na criação de forças de sustentação. Este facto foi tido em conta no desenvolvimento do perfil EN0005. Comparando o desempenho do EN0005 com os perfis apresentados na secção 2.3 NACA0018, NACA0020, NACA4418 e NACA4420, a contribuição de  $C_{pr}$  para a força tangencial  $T_{pr}$  é apresentada na Figura 2.26 e a contribuição de  $C_{pr}$  para a força normal  $N_{pr}$  é apresentada na Figura 2.27.

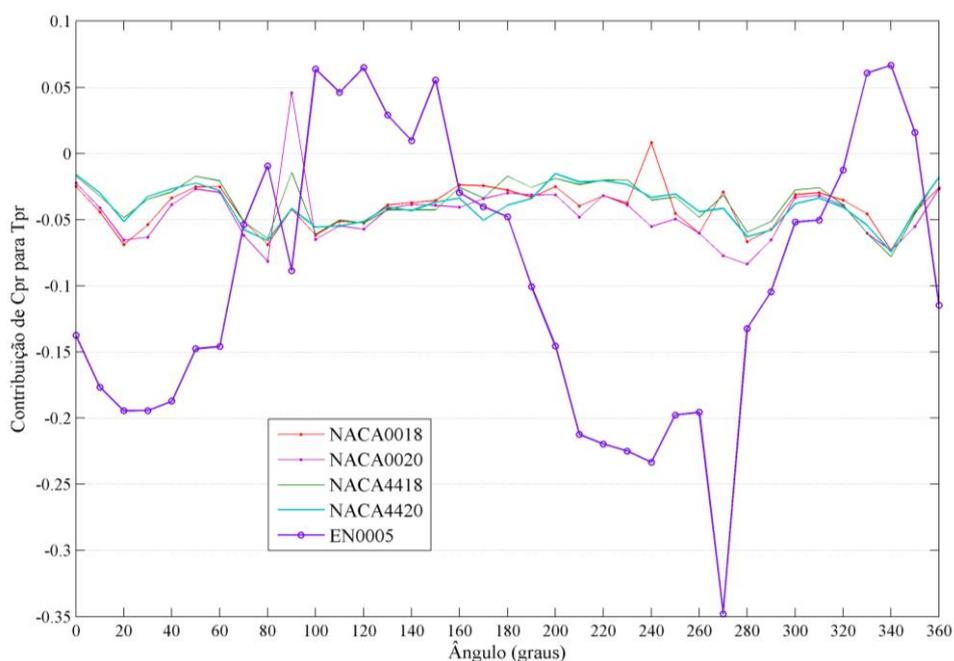


Figura 2.26 - Contribuição de  $C_{pr}$  para  $T_{pr}$ .

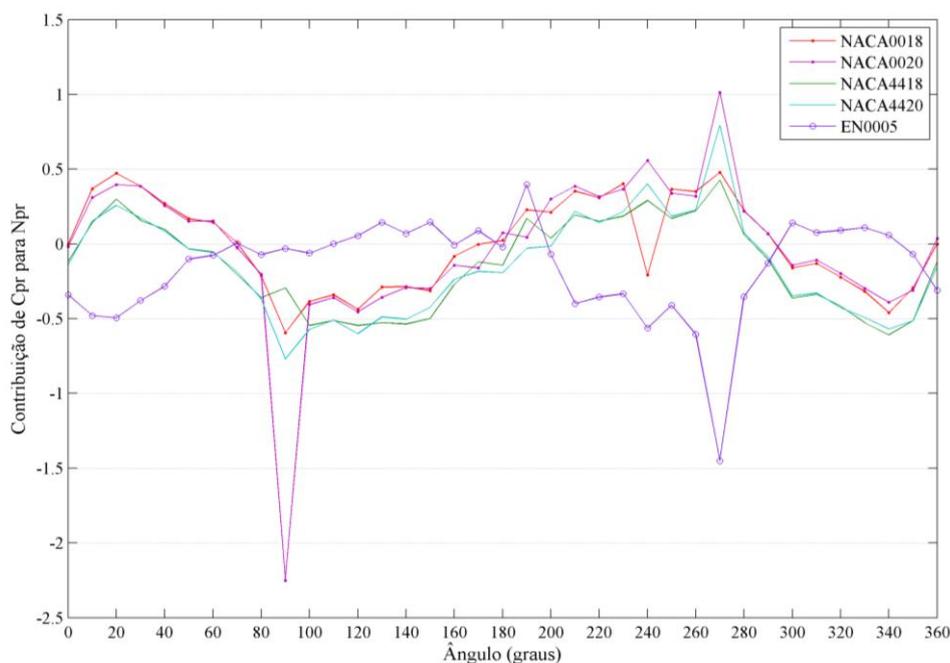


Figura 2.27 - Contribuição de Cpr para Npr.

Na Figura 2.26 é possível verificar a maior eficiência do perfil EN0005 para oferecer o auto arranque a aerogeradores Darrieus. Do ângulo  $0^\circ$  até  $80^\circ$  e de  $180^\circ$  a  $310^\circ$  o perfil apresenta a maior contribuição das forças de sustentação para o auto arranque. De salientar que o perfil EN0005 é o único que apresenta forças de arrasto a contribuírem para o auto arranque no aerogerador Darrieus.

O perfil EN0005 é o perfil que apresenta a menor variação na força normal entre os ângulos  $70^\circ$  e  $180^\circ$ . Nos restantes ângulos axiais a dimensão da força normal é muito semelhante aos restantes perfis apesar da orientação da força ser inversa.

O perfil EN0005 apresenta uma melhor capacidade de oferecer aos aerogeradores Darrieus a capacidade de auto arranque.

A comparação do desempenho do perfil EN0005 comparativamente aos perfis NACA0018 e NACA4418 é feito através dos coeficientes de sustentação  $C_L$ , coeficiente de arrasto  $C_D$  e coeficiente de momento  $C_M$  apresentados respetivamente na Figura 2.28, na Figura 2.29 e na Figura 2.30.

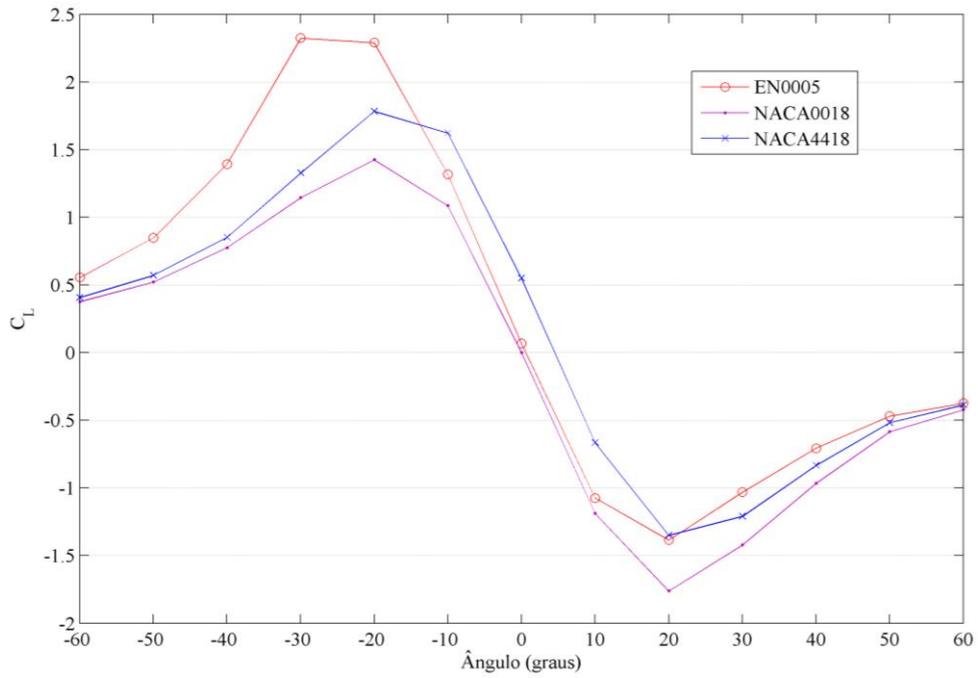


Figura 2.28 - Coeficiente de sustentação do perfil EN0005.

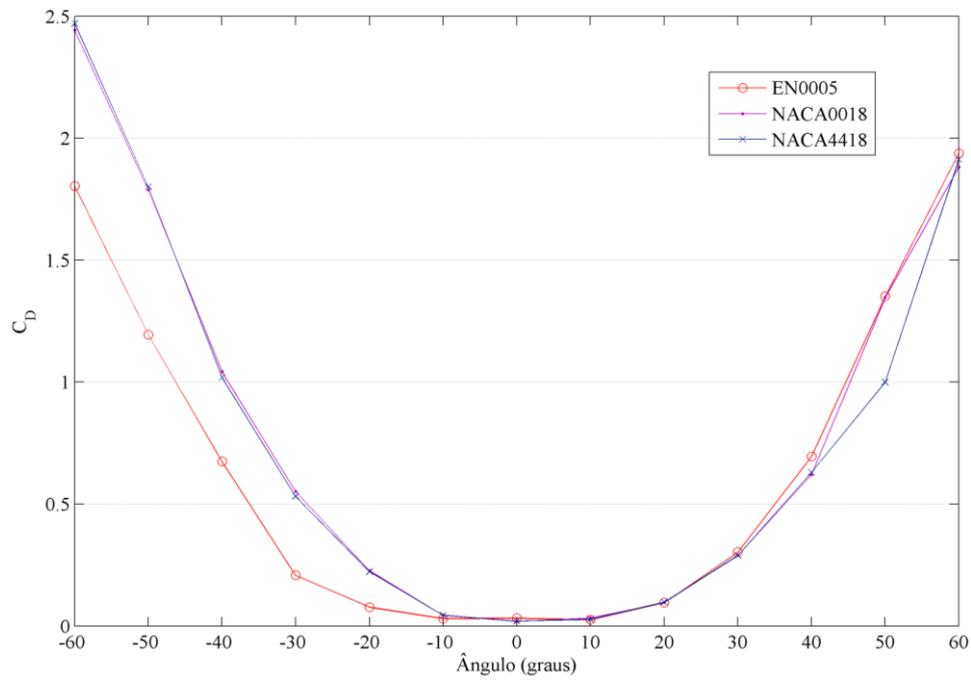


Figura 2.29 - Coeficiente de arrasto do perfil EN0005.

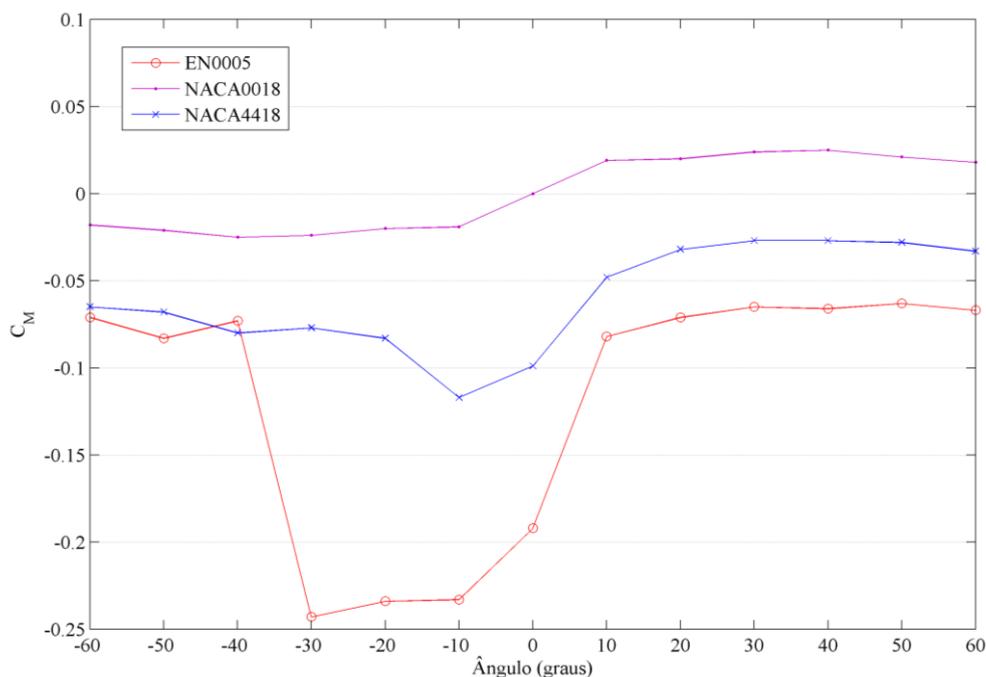


Figura 2.30 - Coeficiente de momento do perfil EN0005.

O coeficiente de sustentação do perfil apresenta um melhor desempenho entre os ângulos  $-15^\circ$  e  $-30^\circ$  resultado do desenho da superfície extradorso do perfil. Nos restantes ângulos o perfil apresenta um desempenho semelhante aos outros perfis como apresentado na Figura 2.28.

O perfil EN0005 entre os ângulos  $-60^\circ$  e  $-10^\circ$  apresenta uma considerável menor força de arrasto, permitindo ao aerogerador Darrieus apresentar um valor para o TSR superior como apresentado na Figura 2.29.

O coeficiente de momento do perfil EN0005 é superior aos outros perfis apresentando um pico considerável entre os ângulos  $0^\circ$  e  $-30^\circ$  como apresentado na Figura 2.30. Estes valores apresentam a tendência do perfil rodar para o interior o que em aerogeradores Darrieus é um comportamento que traz vantagens. A desvantagem que este comportamento traz é o de ter de haver um reforço estrutural dos braços que ligam as pás ao gerador.

O perfil EN0005 apresenta um desempenho superior a outros perfis mais usados no mercado, quando o aerogerador Darrieus está em rotação.

*Coefficiente de Potência*

A comparação dos coeficientes de potência de aerogeradores Darrieus com pás retas empregando o perfil EN0005, o perfil NACA0012 e o perfil NACA0018 é feita aplicando a metodologia de TCMD e é apresentada na Figura 2.31.

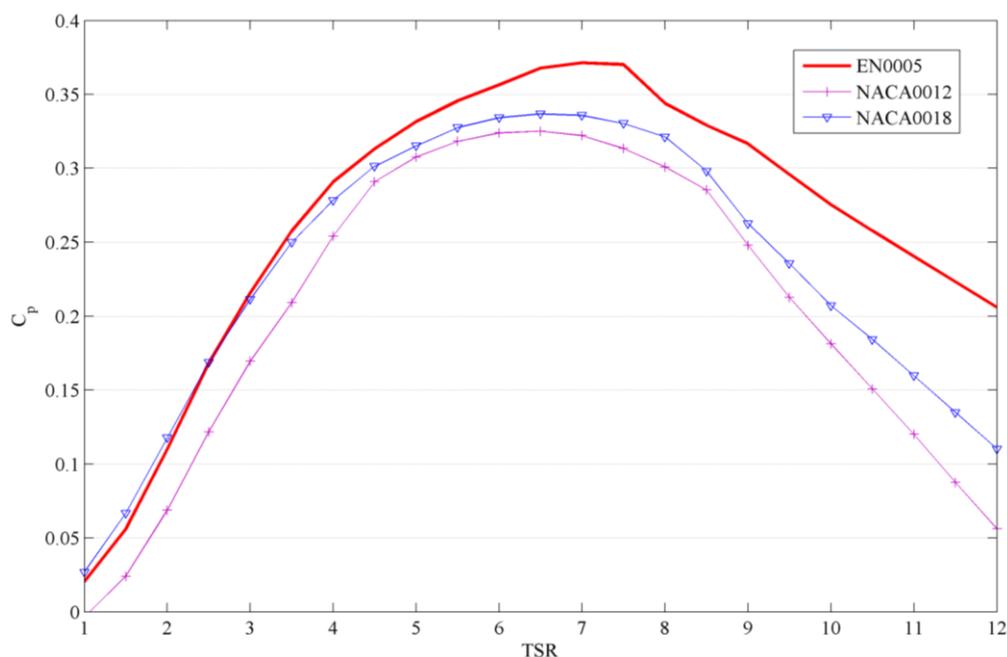


Figura 2.31 - Comparação de aerogeradores Darrieus de pás retas.

As simulações de desempenho foram realizadas para uma turbina com uma pá com corda de perfil de 0,30 m, 5 pás com comprimento de 4,6 m e raio de 2 m, sendo a velocidade do vento de 12 m/s. O desempenho da turbina com o perfil EN0005 é equivalente ao desempenho da turbina com o perfil NACA0018 até ao valor do TSR de 3. O desempenho da turbina com o perfil EN0005 é superior ao desempenho da turbina com o perfil NACA0018 para valores de TSR superiores a 3. O desempenho da turbina com o perfil NACA0012 é sempre inferior ao desempenho das outras turbinas para qualquer valor de TSR.

*Desenvolvimento de Protótipo para Testes de Auto Arranque*

Para testar o auto arranque de turbinas com pás empregando o perfil EN0005 foram desenvolvidos protótipos de turbinas com pás retas. Um dos protótipos apresenta pás com forma helicoidal empregando o perfil EN0005.

A primeira técnica para criar as pás testada foi o desenvolvimento de moldes de duas dimensões, que permitiriam uma produção rápida. Os moldes ao encaixarem uns nos outros formariam no seu todo a estrutura interna de uma pá. O esquema dos moldes desenvolvido é ilustrado na Figura 2.32.

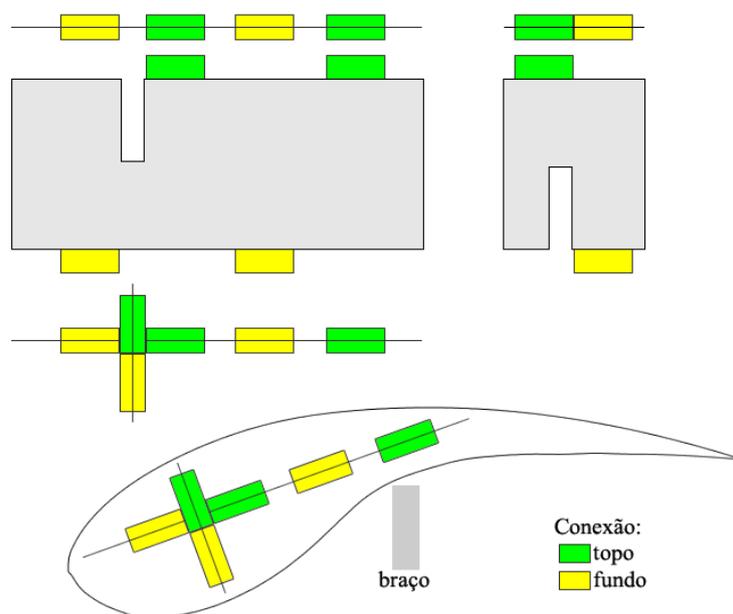


Figura 2.32 - Molde de duas dimensões para formação da pá.

Estes moldes foram cortados em cartão reciclado de caixas de computador, com uma espessura de 7 mm. Os vários moldes foram todos cortados à mão e depois encaixados e colados. As regiões marcadas a verde são conectadas ao perfil que fica no topo, sendo que as regiões marcadas a amarelo são conectadas ao perfil que fica no fundo. Seguidamente o perfil anterior do fundo passa a ser o perfil do topo e novos moldes são conectados seguindo a mesma norma explicada anteriormente. Um reforço foi adicionado no local de ligação ao braço. Uma estrutura de pá com os vários conjuntos de moldes conectados entre si é ilustrada na Figura 2.33.

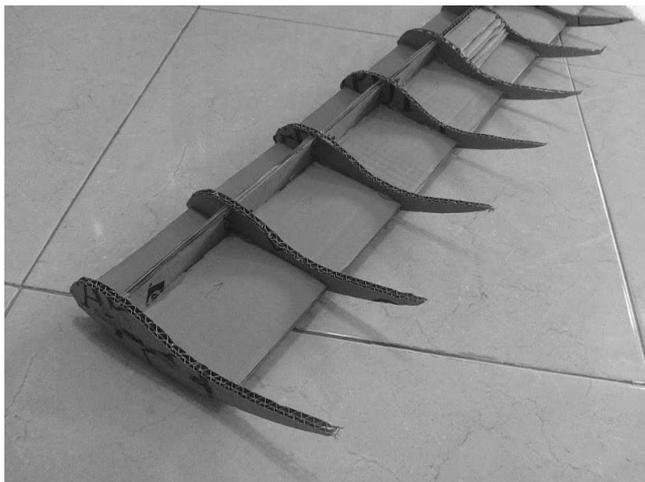


Figura 2.33 - Estrutura de pá criado com moldes de cartão.

No final do trabalho a rigidez estrutural da pá é baixa havendo a necessidade de a reforçar recorrendo à rigidez criada pela aplicação da película que serviria para formar a superfície da pá, ou fazendo um reforço interior com mais cartão. A criação da forma do BF do perfil em cartão apresentou algumas dificuldades durante corte e na manutenção da sua rigidez estrutural atendendo a que a quantidade de cartão neste local é diminuta.

É necessário manter as estrias interiores do cartão no sentido do extradorso para o intradorso do perfil; e de manter as estrias no sentido do topo para o fundo dos moldes de suporte interior. Este sentido nas estrias dá uma maior rigidez aos moldes quando montados, no entanto trouxe dificuldades acrescidas durante o corte. Também os cortes dos locais de encaixe interiores ao perfil trouxeram dificuldades.

Foram testados vários tipos de materiais para formar a superfície da pá, tais como folhas de papel de diferentes gramagens, películas plásticas aderentes e folhas de espuma.

O primeiro material a ser testado foi folhas de papel com diferentes gramagens, mas o inconveniente encontrado com as folhas de papel é a existência de pouca superfície de colagem, dadas as distâncias entre os perfis e a espessura do próprio cartão.

Várias películas plásticas aderentes foram também testadas, mas todas apresentaram a tendência de colar no BF. Para contrariar esta tendência foi usado um reforço de cartão com menor espessura nesta zona como é ilustrado na Figura 2.34.

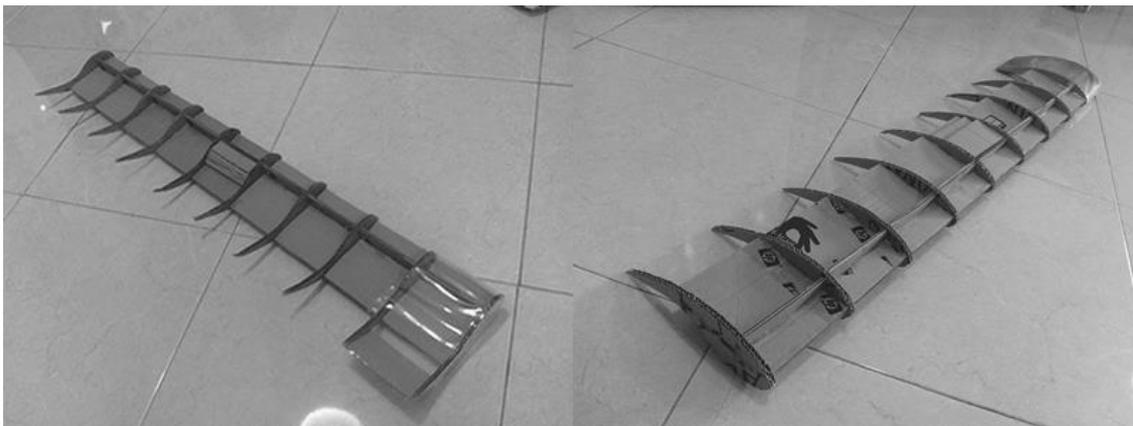


Figura 2.34 - Pás em cartão e película aderente.

Recorrer a esta técnica não favoreceu a criação de uma superfície lisa que mantenha as características do perfil EN0005 com as suas diferentes particularidades de desenho, tais como a ponta existente no BA e a curvatura no intradorso.

Foram testadas folhas de espuma para cobrir a superfície da pá. A colagem deste material, apesar de apresentar melhores resultados comparando com os outros materiais, requer trabalho acrescido de colagem, necessitando de uma cola especial de secagem lenta levando à obtenção de uma superfície irregular e não permitindo manter as características de desenho do perfil EN0005 ao longo de toda a superfície. Outro problema encontrado com as folhas de espuma está associado à sua espessura, muitos dos pormenores aerodinâmicos do perfil EN0005, como por exemplo a ponta existente no BA para reduzir a resistência ao vento e as curvas do intradorso do perfil apresentaram deformações.

O uso da técnica de utilização de moldes de cartão para criar uma estrutura interior onde é aplicado um material para criação da superfície da pá com o perfil EN0005, não favorece a criação de superfícies com consistência e a criação de pás com resistência estrutural para utilização em testes de auto arranque.

Um novo material é empregue para a criação do corpo da pá. Placas de polietileno expandido foram usadas como material para criar novas pás. A técnica empregada recorre a dois moldes em madeira que são usados como plataforma de corte dos perfis. Apesar de levar algum tempo a cortar as várias formas de perfis, quando coladas entre si

o resultado final resulta numa superfície mais lisa e perto das características pretendidas, com as diferentes particularidades da superfície do perfil EN0005, tais como a ponta existente no BA e a curvatura no intradorso. As pás criadas com as placas de polietileno expandido, e a construção de uma primeira turbina com três destas pás são apresentados na Figura 2.35.



Figura 2.35 - Primeira turbina criada com pás em polietileno expandido.

As pás têm uma corda de 30 cm e altura de 100 cm. Os braços foram construídos também em polietileno expandido mas de alta densidade.

Uma nova forma de turbina foi criada para estudar as vantagens das pás com forma helicoidal, por forma a eliminar oscilações no eixo das pás a passarem a montante do rotor e suavizar o auto arranque da turbina.

A segunda turbina tem cinco pás com corda de 5,3 cm e altura de 100 cm. As pás são criadas com perfis em polietileno expandido e retângulos do mesmo material entre perfis para redução de tempo de fabricação. A técnica para corte dos perfis é a mesma usada anteriormente. O acabamento da superfície das pás é feito recorrendo a folhas de papel. Foi usado como gerador, um motor de ventoinha de computador reciclado.

Os restantes componentes da turbina, tais como a base, a torre os braços e a ligação ao gerador foram construídos em polietileno expandido de alta densidade. A segunda turbina é ilustrada na Figura 2.36.

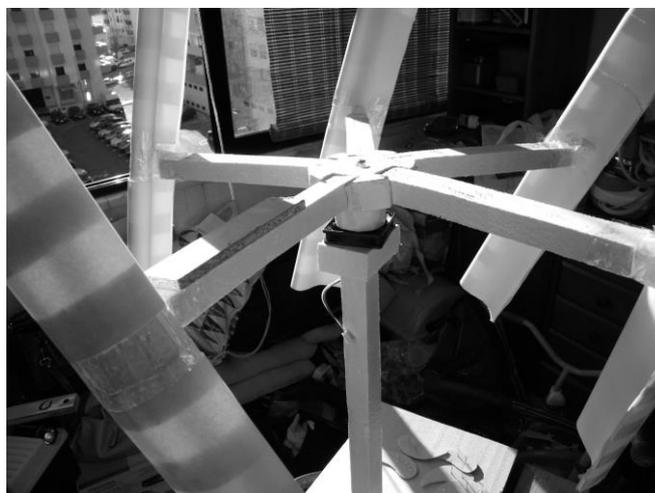


Figura 2.36 - Segunda turbina de testes desenvolvida.

#### *Testes de Auto Arranque*

O teste auto arranque ao perfil EN0005 foi feito com turbinas de pás retas. Dois tipos de turbinas foram usadas no teste de auto arranque: turbina com pás retas com perfil EN0005 em posição vertical e turbina com pás com perfil EN0005 em posição helicoidal.

A turbina com pás retas em posição vertical não tem gerador havendo apenas um rolamento no eixo a fazer a ligação dos braços à torre. A turbina com pás em posição helicoidal tem instalado um motor de ventoinha de computador reciclado usado como gerador, no entanto durante os testes o gerador esteve sempre a funcionar sem carga.

A turbina com pás retas em posição vertical tem um conjunto de três pás e foi testada para velocidade de vento de 1 m/s a 2 m/s apresentando auto arranque. Em algumas ocasiões foram encontrados alguns dos efeitos reportados em [Dominy08], como oscilações no eixo e até mesmo alguns posicionamentos das pás que não favoreciam o auto arranque da turbina. A utilização de apenas três pás não permite à turbina aproveitar as forças de sustentação das pás mais proeminentes nas posições em redor da

turbina, nomeadamente, levando a um desequilíbrio entre as forças que favorecem o auto arranque na direção de rotação pretendida das pás em redor da turbina e as forças de arrasto que impedem essa rotação como verificado em [Dominy08].

Uma segunda configuração de turbina com um conjunto de cinco pás de forma helicoidal foi usada no estudo do auto arranque. O objetivo pretendido foi eliminar oscilações horizontais no eixo da turbina resultantes das pás a passarem a montante do rotor e suavizar o auto arranque. A turbina revelou um auto arranque suave para velocidades de escoamento entre 1 m/s a 2 m/s não sendo verificado qualquer um dos problemas reportados em [Dominy08], tais como oscilações no eixo e posicionamentos das pás que não favorecem o auto arranque da turbina.

## 2.6 Conclusões

É apresentada uma visão histórica dos ARV. As diferenças entre os ARV e ARH são apresentadas com especial incidência aos ARV do tipo Darrieus, comparando a sua eficiência, vantagens e desvantagens em instalações em contexto urbano. Uma apresentação mais detalhada do auto arranque de aerogeradores Darrieus é exposta bem como as diferentes soluções já desenvolvidas para colmatar esta incapacidade. Um componente indispensável ao bom funcionamento de aerogeradores Darrieus é a pá, assim sendo uma metodologia de estudo de perfis para aerogeradores Darrieus é apresentada com o principal intuito de estudar e desenvolver o auto arranque a aerogeradores Darrieus. A apresentação dos modelos matemáticos de avaliação de desempenho de aerogeradores Darrieus é feita bem como a formulação matemática base comum a todos os modelos. Um novo perfil de pá para aerogerador Darrieus designado de EN0005 é apresentado. Este novo perfil foi desenvolvido aplicando a metodologia de estudo de perfis para aerogeradores Darrieus. São apresentados testes de campo realizados ao novo perfil EN0005. O perfil EN0005 revelou ter auto arranque para velocidades de vento de 1 m/s a 2 m/s e um desempenho equivalente ou superior a outros perfis mais usados em ARV. O EN0005 demonstra capacidade para oferecer ao aerogerador auto arranque sem perder desempenho quando este está sobre a influência de ventos com velocidades elevadas.

---

# CAPÍTULO

# 3

---

## Aerogerador Urbano

*Neste capítulo é apresentado um aerogerador tipo Darrieus aperfeiçoado para que a operação em contexto urbano seja favorável. Uma nova metodologia de modelação de aerogeradores Darrieus no que respeita às formas de pás é apresentada neste capítulo baseada nos modelos de TCM e de TCMD.*

### 3.1 Introdução

No âmbito da investigação realizada foi exequível uma contribuição para o desenvolvimento de um aerogerador tipo Darrieus cujo intuito foi o de aperfeiçoar o desempenho deste tipo de aerogeradores para que sejam utilizados favoravelmente durante a operação em contexto urbano.

O aperfeiçoamento do desempenho permitiu um desenvolvimento de forma a oferecer contribuições para o auto arranque, evitando a necessidade de componentes extra ou a injeção de energia de forma que inicie a conversão energética só pela ação do vento; o perfil visual ser harmonioso em contexto urbano, evitando que o impacto visual possa ser adverso e como tal originar desagrado na utilização em contexto urbano.

A base de partida para o desenvolvimento foi uma análise sobre as características dos aerogeradores existentes, i.e., em normal comercialização, com o intuito de adquirir informação para estabelecer pontos fortes para o aerogerador em desenvolvimento. Pelo que, foi considerado que o aerogerador teria de contemplar todas as vantagens de aerogeradores já existentes no mercado e ao mesmo tempo tanto quanto possível evitar as desvantagens encontradas nos mesmos. A consideração desta base de partida proporcionou resultados que deram origem à forma base do aerogerador, tendo direcionado o trabalho no sentido de desenvolver a contribuição para o perfil de pás, dito de perfil EN0005, apresentado na secção 2.5.

O comportamento do aerogerador foi modelado matematicamente, tendo em consideração as vantagens e desvantagens dos modelos matemáticos de modelação de aerogeradores Darrieus apresentados na secção 2.4 e a configuração do aerogerador. Nesta modelação foram usados os modelos de TCM e de TCMD. Estes modelos conseguem modelar aerogeradores Darrieus com pás de formas mais comuns, sendo que a configuração do aerogerador em desenvolvimento apresentou alguns desafios na aplicação dos modelos de TCM e de TCMD, havendo a necessidade de criar uma nova metodologia de modelação baseada nestes modelos. Consequentemente, foi organizada uma metodologia adequada ao desenvolvimento da nova forma de pá.

O aerogerador desenvolvido será apresentado bem como os protótipos usados em testes de campo na secção 3.4.

## 3.2 Modelação

A modelação aerodinâmica para obter o desempenho do aerogerador Darrieus em desenvolvimento foi realizada recorrendo aos modelos de TCM e de TCMD. Estes modelos pertencem ao grupo de modelos de BEM, que incorporam a Teoria do Momento e a Teoria do Elemento da Pá.

O modelo de TCM é uma variante do modelo de TCS, introduzindo uma divisão do tubo de corrente simples em múltiplos tubos de corrente que percorrem o aerogerador como é ilustrado na Figura 3.1.

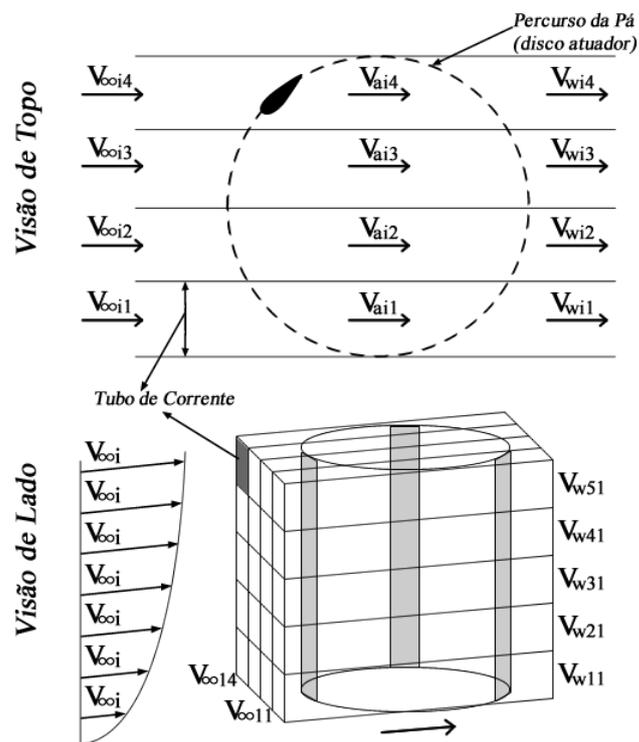


Figura 3.1 - Modelo de TCM.

O modelo de TCMD é uma variante do modelo de TCM. O modelo de TCMD tem por base uma modelação do disco atuador em dois discos atuadores em sequência,

descrevendo respetivamente o lado a montante “*upstream*” e o lado a jusante “*downstream*” do rotor. O modelo de TCMD permite estudar a pá quando passa no lado a montante do rotor e quando passa no lado a jusante do rotor. O modelo de TCMD é ilustrado na Figura 3.2.

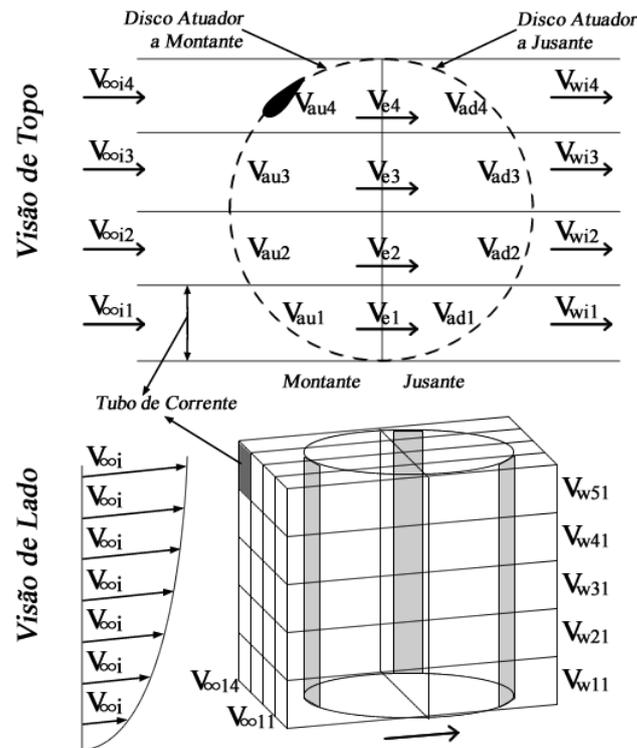


Figura 3.2 - Modelo de TCMD.

No modelo de TCM o espaço do aerogerador é dividido horizontalmente e verticalmente em vários tubos de corrente paralelos e independentes uns dos outros. A largura do tubo de corrente  $l$  [Paraschivoiu09a], é dada por:

$$l = R \Delta\theta \sin\theta \quad (3.1)$$

sendo  $R$  o raio do rotor,  $\theta$  o ângulo axial da pá e  $\Delta\theta$  a variação de  $\theta$  [Paraschivoiu09a].

Neste modelo o desempenho global é o resultado da agregação dos valores associados com cada tubo de corrente, pelo que, é espectável que o resultado seja uma aproximação do valor real. O número máximo de tubos de corrente em largura HST (*Horizontal*

*Streamtubes*, HST) depende da escolha da variação de  $\theta$ , indicada por  $\Delta\theta$  e é dado por:

$$HST = \frac{180^\circ}{\Delta\theta} \quad (3.2)$$

A altura dos tubos de corrente  $h$  é definida pela altura do aerogerador  $H$  dividido pelo número de divisões verticais predefinidas indicado por *VertDiv* na Figura 3.3. Em cada tubo de corrente o vento entra com uma velocidade sem interferências  $V_\infty$  que é uma função da altura do tubo de corrente ao solo. As características aerodinâmicas e forças são estudadas em cada tubo de corrente por forma a caracterizar o comportamento da pá [Paraschivoiu09a, Islam08]. Essas forças são calculadas em função das velocidades do vento na pá.

A Teoria do Momento de Froude para um disco atuador [Paraschivoiu09a] permite uma relação entre a velocidade  $V_\infty$  e a velocidade induzida  $V_a$ . Essa relação é determinada por um fator dito de indução axial  $a$ , sendo a relação dada por:

$$V_a = V_\infty (1 - a) \quad (3.3)$$

A velocidade do vento na esteira  $V_w$  “*Wake Velocity*” é dada por:

$$V_w = V_\infty (1 - 2a) \quad (3.4)$$

Tomando como valor de base  $V_\infty$  [Paraschivoiu09a], a velocidade relativa  $V_R$  obtida em (2.24), terá o valor normalizado dado por:

$$\frac{V_R}{V_\infty} = \sqrt{\left(\frac{V_a}{V_\infty} \cos \theta + \frac{\omega R}{V_\infty}\right)^2 + \left(\frac{V_a}{V_\infty} \sin \theta\right)^2} \quad (3.5)$$

Substituindo (3.3) e usando a definição de coeficiente de velocidade periférica  $\lambda$  em (3.5), a velocidade relativa  $V_R$  é dada por:

$$\frac{V_R}{V_\infty} = \sqrt{[(1-a)\cos\theta + \lambda]^2 + [(1-a)\sin\theta]^2} \quad (3.6)$$

Considerando (2.25) o ângulo de ataque  $\alpha$  é dado por:

$$\alpha = \tan^{-1} \left[ \frac{(1-a)\sin\theta}{(1-a)\cos\theta + \lambda} \right] \quad (3.7)$$

O coeficiente de impulso aerodinâmico  $C_{AT}$ , “*Aerodynamic Thrust Coefficient*”, [Paraschivoiu09a] é dado por:

$$C_{AT} = \frac{2}{\pi} \frac{nc}{D_a} \left( C_N - \frac{C_T}{\tan\theta} \right) \left( \frac{V_R}{V_\infty} \right)^2 \quad (3.8)$$

sendo  $n$  o número de pás e  $D_a$  o diâmetro do aerogerador.

Aplicando a Teoria do Momento, o coeficiente de impulso  $C_{MLT}$ , “*Momentum Loss Thrust Coefficient*” [Paraschivoiu09a], é dado por:

$$C_{MLT} = 4a(1-a) \quad (3.9)$$

Considerando o desenvolvimento de Betz que expressa o coeficiente de potência  $C_p$  em termos de fator de indução axial, assim, (2.33) é reescrito pela expressão dada por [Paraschivoiu09a]:

$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad (3.10)$$

A estrutura de uma aplicação informática para aplicação do modelo de TCM é baseada na análise aerodinâmica do desempenho do aerogerador Darrieus em cada tubo de corrente, sendo no final o desempenho geral do aerogerador dado pela média de todos os tubos de corrente.

Na aplicação informática desenvolvida, em cada tubo de corrente, é escolhido um fator de indução axial  $a$  inicial. As características do aerogerador como velocidade induzida

$V_a$  (3.3), a velocidade relativa  $V_R$  (2.24), o ângulo de ataque  $\alpha$  (2.25) e o número de Reynolds são calculados. O coeficiente de sustentação e o coeficiente de arrasto são calculados, permitindo obter o coeficiente de impulso aerodinâmico  $C_{AT}$ . O fator de indução axial  $a$  é usado para a obtenção do coeficiente de impulso da Teoria do Momento  $C_{MLT}$ .

A diferença entre o coeficiente de impulso aerodinâmico  $C_{AT}$  e o coeficiente de impulso da Teoria do Momento  $C_{MLT}$  determina o erro associado à escolha do fator de indução axial  $a$ . Um novo valor para o fator de indução axial  $a$  é escolhido e o coeficiente de impulso aerodinâmico  $C_{AT}$  e o coeficiente de impulso da Teoria do Momento  $C_{MLT}$  são calculado e comparados novamente, num ciclo de iterações até ser obtido um erro dentro da tolerância predefinida.

O fator de indução axial  $a$  que representa o comportamento do tubo de corrente em estudo é encontrado quando a diferença entre o coeficiente de impulso aerodinâmico  $C_{AT}$  e o coeficiente de impulso da Teoria do Momento  $C_{MLT}$  está dentro de uma tolerância aceitável. Após o fator de indução axial  $a$  ser encontrado é calculado o binário  $Q$  associado com o tubo de corrente. A aplicação informática procede ao processamento do tubo seguinte. Quando todos os tubos de corrente forem processados o coeficiente de binário final  $\bar{C}_Q$  [Paraschivoiu09a] é dado por:

$$\bar{C}_Q = \frac{nc}{D_a} \frac{\sum_{i=1}^{S_T} \left( \frac{V_{Ri}}{V_{\infty i}} \right)^2 C_{Ti}}{S_T} \quad (3.11)$$

sendo  $S_T$  o número de tubos de corrente.

O coeficiente de potência é dado em função de  $\bar{C}_Q$  e do  $\lambda$  dado por:

$$C_p = \bar{C}_Q \lambda \quad (3.12)$$

O fluxograma programático do modelo de TCM usado no desenvolvimento da aplicação informática [Batista13b] é apresentado na Figura 3.3.

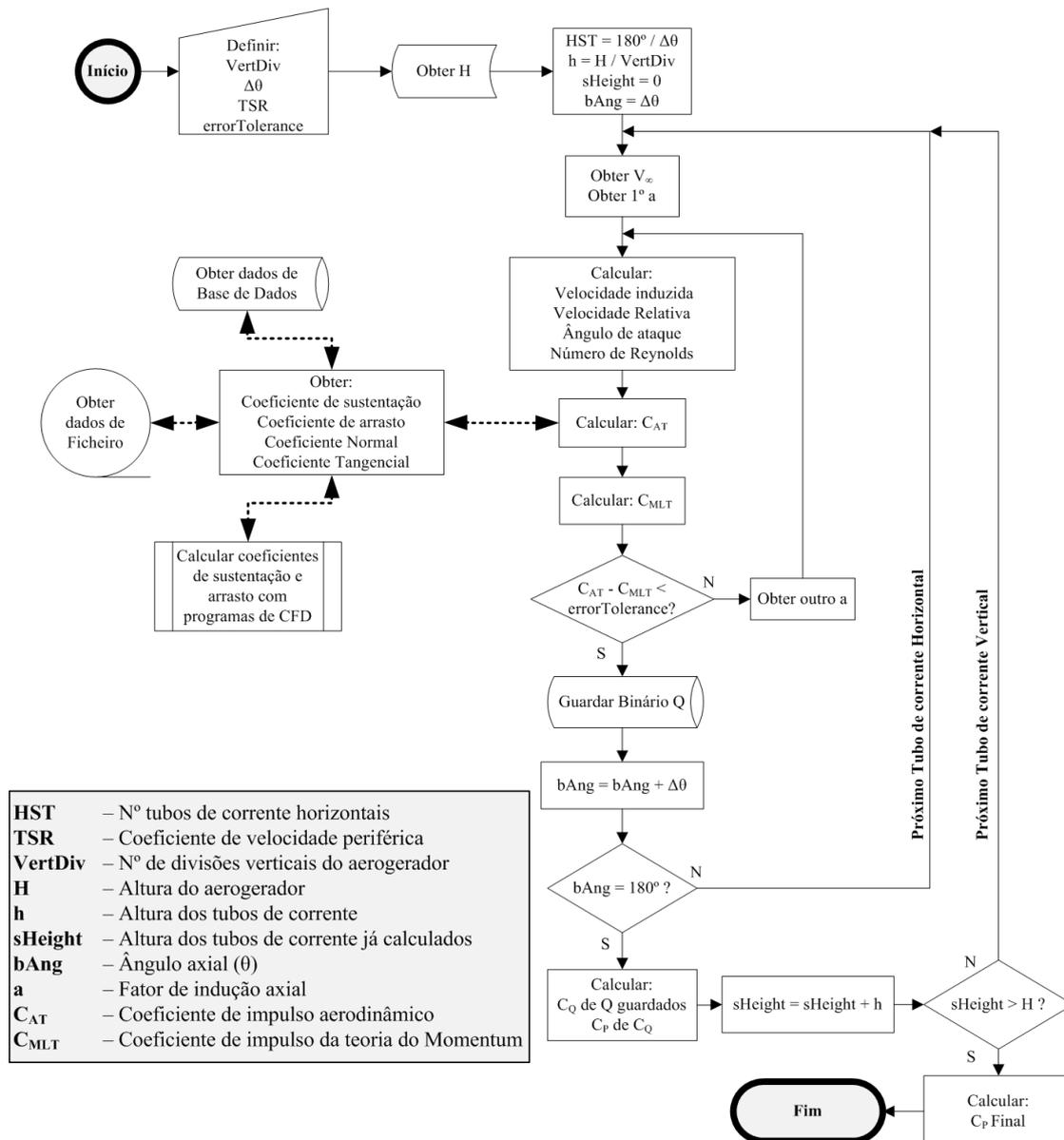


Figura 3.3 - Fluxograma do modelo de TCM.

O fluxograma começa com a definição inicial das divisões verticais *VertDiv* do espaço físico do aerogerador, da variação do ângulo axial  $\Delta\theta$ , do coeficiente de velocidade periférica *TSR* e da tolerância de erro admitida entre o cálculo do coeficiente de impulso aerodinâmico e o coeficiente de impulso usando a Teoria do Momento.

A altura do aerogerador  $H$  permite determinar a altura de cada tubo de corrente  $h$  pela divisão de  $H$  por  $VertDiv$ . O número de tubos de corrente horizontais é dado pela divisão dos  $180^\circ$  axiais a montante do aerogerador pela variação do ângulo axial em  $\Delta\theta$ .

Antes do início do cálculo do binário em cada tubo de corrente, é obtida a velocidade do vento sem interferência  $V_\infty$  e um fator de interferência axial  $a$ . Dependendo do local de instalação o terreno pode apresentar maior ou menor rugosidade, condicionando a variação de velocidade do vento  $V_\infty$  com a altura ao solo. Esta variação segue o comportamento representado pela lei logarítmica de Prandtl [Castro12] dada por:

$$u(z) = u(z_R) \frac{\ln \frac{z}{z_0}}{\ln \frac{z_R}{z_0}} \quad (3.13)$$

sendo  $u(z)$  a velocidade média do vento à altura  $z$ ,  $z_R$  a altura de referência e  $z_0$  o comprimento característico da rugosidade do solo.

O ângulo de ataque  $\alpha$  da pá no tubo de corrente (2.25), o TSR e a velocidade do vento sem interferência  $V_\infty$ , são utilizados no cálculo da velocidade relativa  $V_R$  (2.24) e do número de Reynolds. Assim, é possível obter o coeficiente de sustentação e o coeficiente de arrasto do perfil alar usado na turbina, com os quais se obtém o coeficiente normal  $C_N$  (2.26) e coeficiente tangencial  $C_T$  (2.27), sendo o coeficiente de impulso aerodinâmico  $C_{AT}$  calculado por (3.8).

O coeficiente de impulso dado pela teoria do momento  $C_{MLT}$  (3.9) é calculado recorrendo ao fator de indução axial  $a$ .

A diferença entre os valores do coeficiente de impulso aerodinâmico  $C_{AT}$  e o coeficiente de impulso dado pela teoria do momento  $C_{MLT}$  é calculada, sendo esta diferença comparada com a tolerância de erro admitida. Se a diferença for superior, é escolhido um novo valor para o fator de indução axial  $a$  e o processo de cálculo do

coeficiente de impulso aerodinâmico  $C_{AT}$  e o coeficiente de impulso dado pela teoria do momento  $C_{MLT}$  é iniciado novamente até que a diferença entre estes valores seja inferior à tolerância de erro admitida [Batista13b].

O binário para o tubo de corrente em análise é calculado com base no valor para o fator de indução axial  $a$ . O fluxo programático passa para a análise do próximo tubo de corrente e inicia o processo até encontrar o valor para o fator de indução axial  $a$  do novo tubo de corrente. O processo de cálculo é feito para todos os tubos de corrente. No final da análise de todos os tubos de corrente, é calculado o binário  $Q$  e o coeficiente de potência  $C_p$  da turbina para o coeficiente de velocidade periférica TSR definido inicialmente no fluxo programático.

#### *Modelo de Tubo de Corrente Múltiplo Duplo*

O modelo de TCMD tem uma descrição similar ao modelo de TCM. No entanto, não usa o fator de indução axial, mas usa o fator de interferência  $U < 1$  [Paraschivoiu09a].

No modelo de TCMD, como já foi afirmado, o rotor é descrito como tendo um comportamento que pode ser determinado pela contribuição de dois discos atuadores em sequência representando o lado de montante e o lado de jusante do rotor. Este modelo de dois discos atuadores em sequência é ilustrado na Figura 3.4.

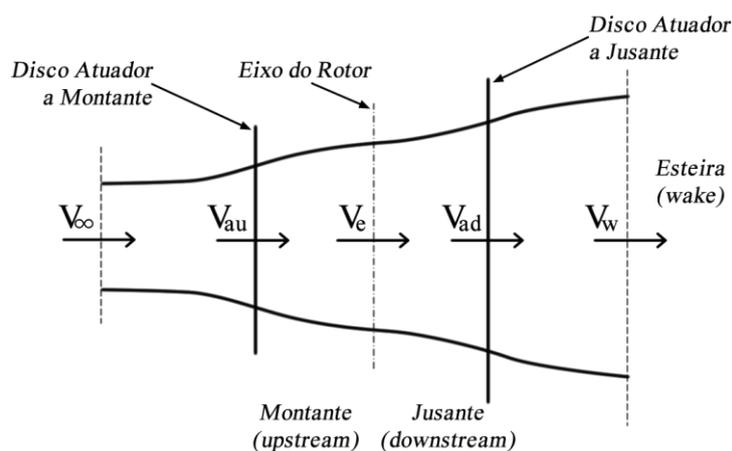


Figura 3.4 - Modelo de dois discos atuadores em sequência.

No lado de montante do rotor a velocidade induzida  $V_{au}$  é determinada recorrendo a um fator de interferência  $U_u$  e à velocidade de vento sem interferências  $V_\infty$  [Paraschivoiu09a] é dada por:

$$V_{au} = U_u V_\infty \quad (3.14)$$

A velocidade de equilíbrio  $V_e$  no eixo do rotor [Paraschivoiu09a] é dada por:

$$V_e = (2U_u - 1)V_\infty \quad (3.15)$$

No lado de jusante do rotor, a velocidade de equilíbrio  $V_e$  é a velocidade de entrada no segundo disco atuador, pelo que, a velocidade induzida  $V_{ad}$  [Paraschivoiu09a] é dada por:

$$V_{ad} = U_d (2U_u - 1)V_\infty \quad (3.16)$$

sendo  $U_d$  o segundo fator de interferência associado com o segundo disco atuador. Considerando  $U_d < U_u$ , o fator de interferência  $U_d$  [Paraschivoiu09a] é dado por:

$$U_d = \frac{V_{ad}}{V_e} \quad (3.17)$$

As velocidades induzidas são calculadas duas vezes por cada tubo de corrente, uma para o lado de montante e outra para o lado de jusante do rotor. O restante processo de cálculo das características aerodinâmicas do aerogerador no que diz respeito ao cálculo envolvido na determinação dos dois fatores de interferência de cada lado de cada tubo de corrente segue a mesma metodologia de iteração da do modelo de TCM.

### 3.3 Metodologia de Modelação

Os modelos matemáticos de modelação do desempenho de aerogeradores Darrieus de TCM e de TCMD apresentados foram desenvolvidos tendo como base aerogeradores com formas de pás comuns neste tipo de aerogerador, quer a forma de pás côncava, quer a forma de pás reta.

O aerogerador Darrieus em desenvolvimento apresenta alguns desafios na aplicação dos modelos de TCM e de TCMD dada a complexidade na forma das pás. Houve a necessidade de criar uma nova metodologia baseada nos modelos de TCM e de TCMD que simplifica o estudo aerodinâmico do aerogerador em desenvolvimento. Esta nova metodologia constitui uma contribuição e é designada por metodologia de Estudo de Aerogerador em Camadas (EAC) [Batista12c].

A metodologia de EAC pode ser usada em conjunto com qualquer um dos modelos matemáticos apresentados na secção 2.4, sendo mais facilmente aplicado aos modelos de TCM e de TCMD, visto que, foram estes modelos que estiveram na base do desenvolvimento da metodologia de EAC.

Na metodologia de EAC o espaço tridimensional do aerogerador Darrieus é dividido em camadas paralelas ao percurso do escoamento do vento. As camadas são separadas entre si por uma distância  $h$ .

A distância  $h$  entre cada camada da divisão do aerogerador pode ser vista como tendo uma relação quase direta com a altura  $h$  de cada tubo de corrente nos modelos de TCM ou de TCMD [Batista12c]. A diferença entre as camadas da metodologia de EAC e os tubos de corrente nos modelos de TCM e de TCMD é que os tubos de corrente são definidos horizontalmente à turbina independentemente do seu posicionamento em relação ao escoamento do vento, mas nas camadas da metodologia de EAC as divisões são concebidas na direção do escoamento do vento incidente sobre a turbina.

A divisão em camadas para a aplicação da metodologia de EAC é ilustrada na Figura 3.5.

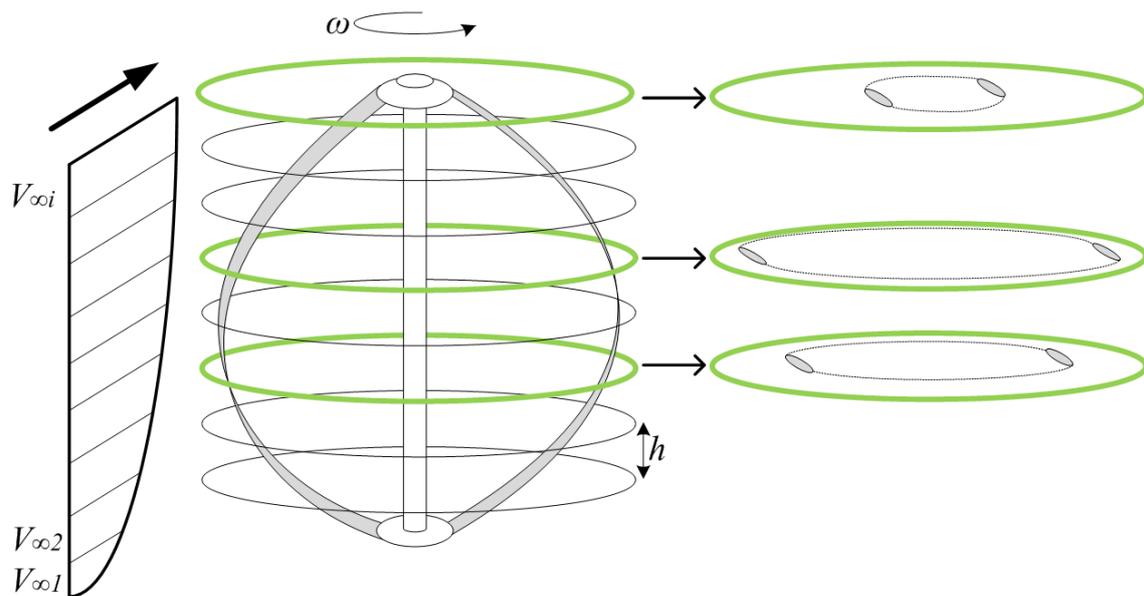


Figura 3.5 - Divisão em camadas do aerogerador.

Para cada camada é criado um aerogerador Darrieus virtual independente com pás retas cuja altura é igual à altura  $h$  da camada respectiva, tal como é ilustrado na Figura 3.6.

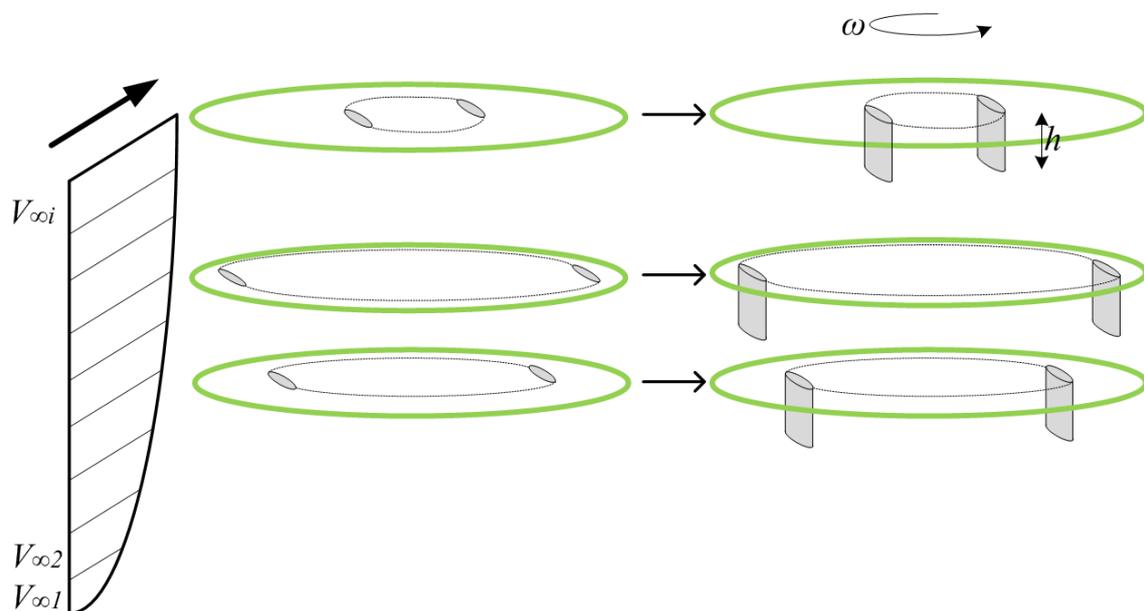


Figura 3.6 - Transformação de cada camada em aerogeradores virtuais.

Outra diferença importante entre a metodologia de EAC e os modelos de TCM e de TCMD é que o percurso e o perfil alar da pá na metodologia de EAC pode apresentar

mutações durante a sua revolução em redor do rotor. Depois da divisão do aerogerador em camadas é feita uma análise ao perfil alar da pá e ao seu percurso em cada camada. A forma alar do perfil e o percurso feito pela pá em cada ângulo axial tal como é encontrado pelo vento no seu percurso são analisados. As modificações do perfil e o seu percurso vão ser tidos em conta quando for estudado o desempenho do aerogerador Darrieus virtual. O estudo da forma do perfil aerodinâmico e do percurso feito pela pá em duas camadas S1 e S2 distintas para cada ângulo axial é ilustrado na Figura 3.7.

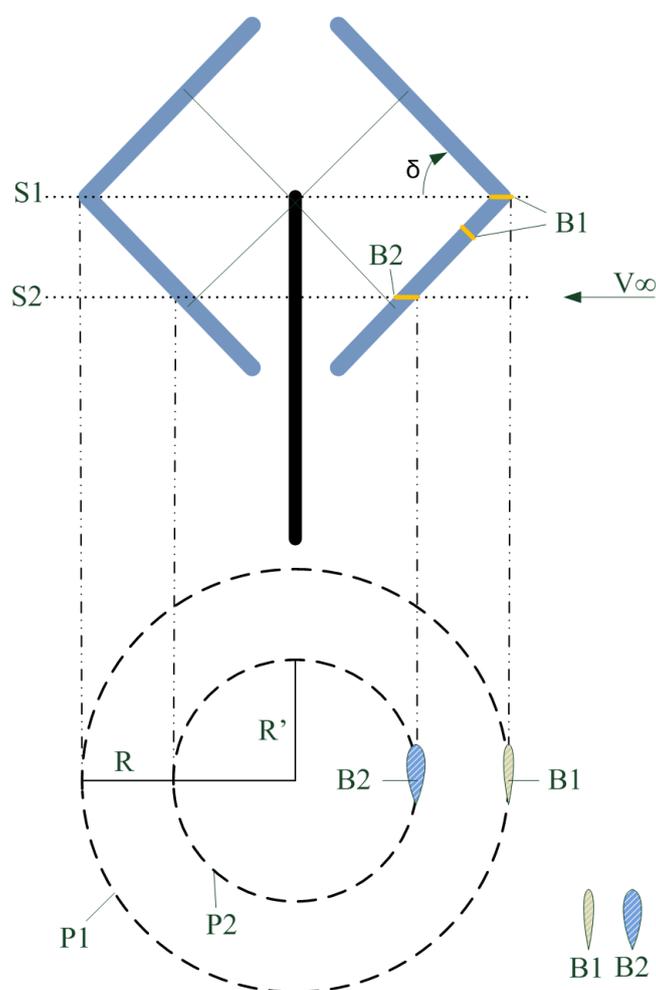


Figura 3.7 – Metodologia de EAC análise das camadas.

Na Figura 3.7 o aerogerador Darrieus real tem as pás em forma de V cujo perfil alar base é definido por B1. Nos modelos de TCM e de TCMD o perfil B1 seria o único perfil a ter em conta e as suas características aerodinâmicas seriam as únicas a influenciarem o desempenho do aerogerador Darrieus.

Duas camadas distintas criadas segundo a direção do percurso do escoamento do vento são assinaladas por S1 e S2 Figura 3.7. O percurso realizado pelas pás na camada S1 é descrito pela trajetória circular P1 cujo raio é  $R$  e o percurso das pás na camada S2 é descrito pela trajetória circular P2 cujo raio é  $R'$ . Na camada S1 o perfil aerodinâmico da pá tal como é encontrado pelo vento é igual ao perfil alar B1 do aerogerador real. Na camada S2 o perfil alar da pá tal como é encontrado pelo vento no seu percurso apresenta uma forma B2 diferente do perfil base B1, ostentando uma espessura maior do perfil. Assim, o comportamento aerodinâmico das pás do aerogerador virtual resultante da camada S1 é diferente do comportamento aerodinâmico das pás do aerogerador virtual resultante da camada S2. Os perfis aerodinâmicos B1 e B2 têm o mesmo comprimento de corda mas espessuras diferentes. A espessura do perfil B2 [Batista12c] é dada por:

$$e_{B2} = \frac{\cos \delta}{e_{B1}} \quad (3.18)$$

sendo  $e_{B1}$  a espessura do perfil B1,  $e_{B2}$  a espessura do perfil B2 e  $\delta$  o ângulo da pá relativamente ao sentido da divisão da camada.

O desempenho de cada aerogerador Darrieus virtual é então estudado. O desempenho do aerogerador Darrieus real que está sobre a influência de vento cujo escoamento tem uma determinada orientação é dado pelo somatório dos vários desempenhos dos diferentes aerogeradores Darrieus virtuais.

A metodologia de EAC é útil para estudar o comportamento de aerogeradores Darrieus quando o percurso do escoamento do vento se apresenta com trajetórias diferentes da horizontal, i.e., fluxos de escoamento com inclinação, predominantes no topo de edifícios. Um exemplo das camadas resultantes da aplicação da metodologia de EAC a um aerogerador Darrieus com pás retas sob a influência de vento com fluxo de escoamento com inclinação é ilustrado na Figura 3.8.

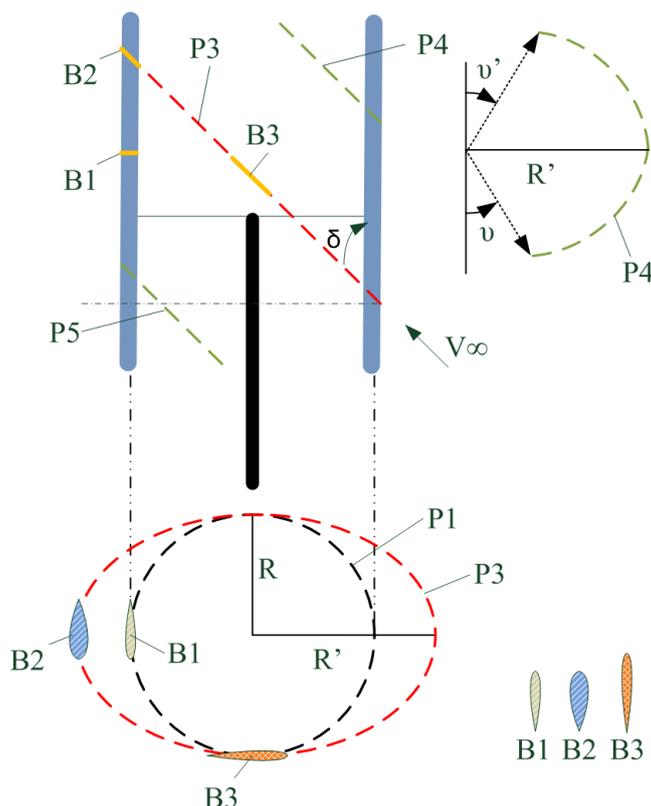


Figura 3.8 - Aerogerador sob influência de vento com inclinação.

O percurso das pás representativo de um escoamento horizontal do vento assinalado na Figura 3.8 como P1 apresenta apenas um raio  $R$  e um perfil aerodinâmico B1. Este seria apenas o perfil alar e o percurso das pás que seria tido em conta nos modelos de TCM e de TCMD.

A forma de um percurso das pás de uma camada resultante de um escoamento do vento com inclinação é representado na Figura 3.8 por P3 apresentando um raio que varia entre  $R$  e  $R'$  exibindo ao mesmo tempo diferentes formas de perfis alares das pás para diferentes ângulos axiais  $\theta$ , cujas formas aerodinâmicas variam entre as formas que estão indicadas na Figura 3.8 como B2 e B3.

Para a camada com o percurso P4 o desempenho aerodinâmico do aerogerador Darrieus virtual resultante, nem todos os ângulos axiais  $\theta$  são tidos em conta, estando estes compreendidos entre o ângulo  $v$  e ângulo  $v'$ .

A metodologia de EAC permite analisar a forma do perfil das pás tal como estas se apresentam ao percurso do escoamento do vento, facilitando o desenvolvimento de novos perfis de pás de aerogeradores Darrieus adaptados a diferentes características dos locais de instalação [Batista12c].

A desvantagem da metodologia de EAC é a existência de fases extra de análise do comportamento das pás em cada camada para cada ângulo axial. Esta desvantagem pode ser minimizada com a implementação de procedimentos automáticos de análise com programas informáticos de CAD (*Computer-Aided Design*).

A análise para  $TSR = 3$  de diferentes aerogeradores Darrieus virtuais resultantes da criação de diferentes camadas determina os vetores representativos dos coeficientes de potência obtidos ilustrados na Figura 3.9.

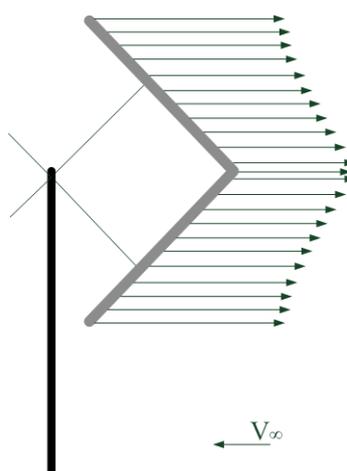


Figura 3.9 - Vetores de  $C_p$  nas diferentes camadas para  $TSR=3$ .

Os vetores representativos do coeficiente de potência nas diferentes camadas para um  $TSR = 11$  são ilustrados na Figura 3.10.

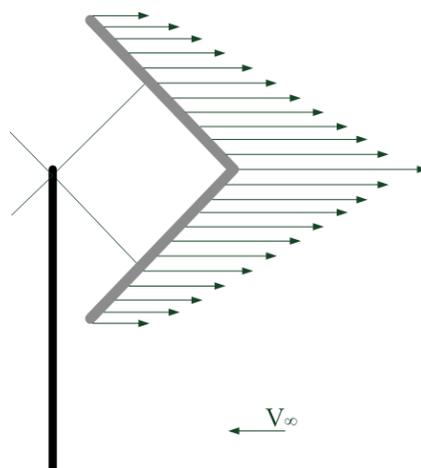


Figura 3.10 - Vetores de  $C_p$  nas diferentes camadas para  $TSR=11$ .

### 3.4 Desenvolvimento do Aerogerador

As metodologias apresentadas na secção 2.3 e na secção 3.3 foram usadas no desenvolvimento do novo aerogerador Darrieus com desempenho melhorado em contexto urbano, sendo usada uma nova forma no desenho das pás por aplicação do novo perfil EN0005 [Batista08, Batista12a, Batista12b]. Um esboço do novo aerogerador Darrieus é ilustrado na Figura 3.11.

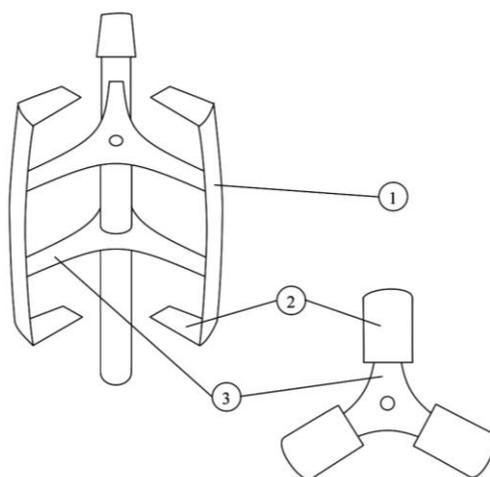


Figura 3.11 – Esboço do aerogerador Darrieus desenvolvido.

A Figura 3.11 indica (1) a pá, (2) as extremidades da pá e (3) os braços de fixação das pás. As extremidades das pás não funcionam como nas lâminas Bellshion [Suzuki08] para redução da turbulência criada. As extremidades das pás são extensões das pás e funcionam como uma continuação das pás mas com orientação para o interior. Estas pás nas extremidades aumentam a área exposta às forças de sustentação. A corrente de escoamento de vento que chega às pás das extremidades encontra um perfil aerodinâmico com uma maior espessura. Assim, para valores baixos de TSR as forças de sustentação são superiores relativamente às exercidas no corpo principal da pá [Batista08, Batista12a, Batista12b], como verificado na comparação entre os vetores ilustrados nas Figura 3.9 e Figura 3.10.

Quando o aerogerador está parado, a ligação entre o corpo principal da pá e as extremidades, juntamente com a forma do perfil aerodinâmico EN0005, criam uma concavidade que aumenta a estagnação do vento quando a pá está na metade a jusante do rotor, auxiliando o auto arranque. Quando o aerogerador está a rodar esta estagnação do vento deixa de existir [Batista08, Batista12a, Batista12b].

Quando o aerogerador está a rodar, as forças de sustentação nas duas extremidades da pá seguem direções opostas, aumentando a estabilidade do rotor durante a rotação das pás reduzindo vibrações no gerador. Quando as rotações são elevadas, as extremidades das pás aumentam as forças de arrasto, uma vez que o vento encontra um perfil com uma espessura maior neste local, resultante da inclinação das extremidades [Batista08, Batista12a, Batista12b].

A configuração das extremidades das pás permite que o aerogerador aproveite a energia do vento quando este se apresente com qualquer ângulo quer num plano vertical quer num plano horizontal relativamente à posição de instalação. Os diferentes planos horizontais (5) e verticais (4) de orientação do vento sobre o rotor do aerogerador são ilustrados na Figura 3.12.

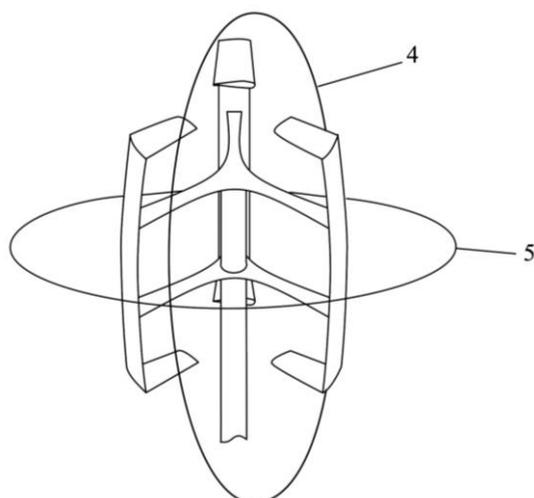


Figura 3.12 - Diferentes planos de orientação do vento.

O aerogerador pode ter um corpo principal das pás com forma reta ou forma helicoidal. A forma helicoidal apresenta vantagens, visto que, permite reduzir substancialmente as vibrações no gerador e na torre, geralmente sentidas em aerogeradores Darrieus de pás com forma reta. A vantagem de usar pás com forma reta advém do menor custo de produção. A forma reta do corpo da pá é ilustrada na Figura 3.13.

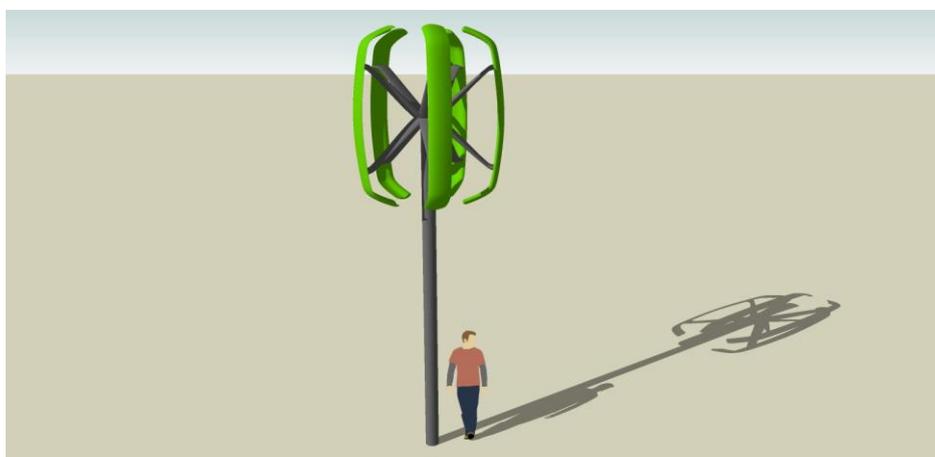


Figura 3.13 - Aerogerador com corpo da pá com forma reta.

A forma helicoidal do corpo da pá é ilustrada na Figura 3.14.



Figura 3.14 - Aerogerador com corpo da pá com forma helicoidal.

Para reduzir as vibrações no gerador aumentando a sua durabilidade, os braços das pás estão ligados diretamente ao gerador numa forma em V. Pelo que, o centro de gravidade está localizado no eixo do rotor do gerador.

O aerogerador está projetado para se adaptar à identidade do cliente final, visto que, um dos aspetos importantes na venda de produtos de consumo é conseguir criar uma relação direta do cliente final com o produto. Alguns exemplos de identidade customizada no que respeita a cores são ilustrados na Figura 3.15 e Figura 3.16.

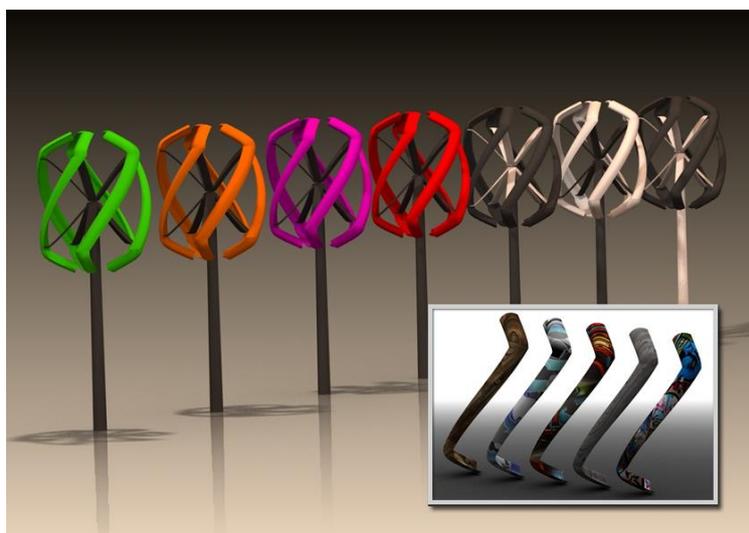


Figura 3.15 - Exemplos de identidade no novo aerogerador.



Figura 3.16 - Exemplos de identidade no novo aerogerador em parque urbano.

As formas das pás e ligações aos braços numa vista de lado e de topo são ilustradas na Figura 3.17.

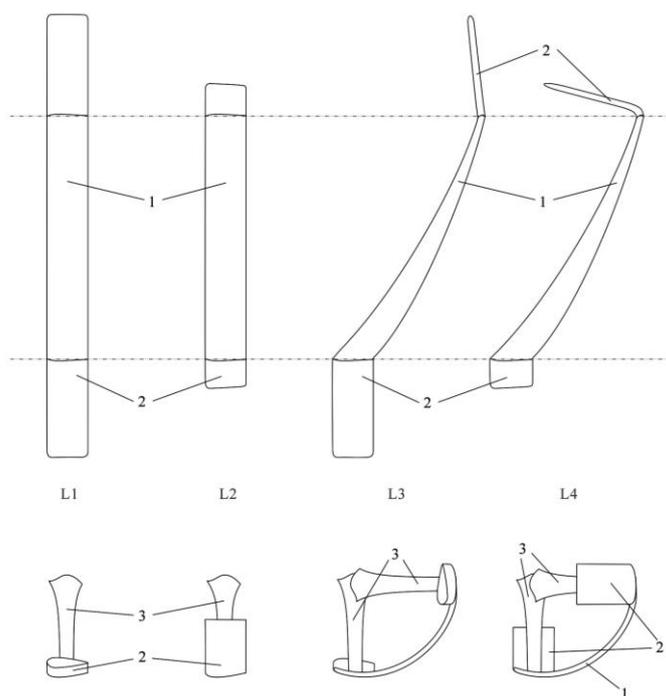


Figura 3.17 - Diferentes formas das pás e ligações aos braços.

*Desenvolvimento do protótipo*

O modelo do novo aerogerador Darrieus foi aplicado no desenvolvimento de um protótipo, por forma a validar as metodologias aplicadas no desenvolvimento do novo aerogerador apresentadas na secção 2.3 e na secção 3.3.

A norma IEC 61400-2 define os requisitos de desenho de aerogeradores de pequenas dimensões e pequenos valores de potência. Os requisitos abrangem: o desenho estrutural do aerogerador; a avaliação das propriedades dos materiais utilizados na produção das pás, nomeadamente a medição de tensão aplicada e elasticidade; o transporte, a montagem e manutenção do aerogerador; os sistemas de proteção e de desconexão; o desenho dos sistemas elétricos; o desenho dos sistemas de suporte; a qualidade; os procedimentos para a realização de testes.

Os requisitos da norma IEC 61400-2 com especial incidência nos procedimentos para a realização de testes foram implementados no protótipo. Os testes ao protótipo foram orientados no sentido de avaliar as contribuições apresentadas neste trabalho de doutoramento.

*Primeiro Protótipo*

O protótipo do aerogerador Darrieus desenvolvido tem como parâmetros os valores indicados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Parâmetros do primeiro aerogerador Darrieus

<b>Corpo da pá</b>	36,0 cm
<b>Altura aerogerador</b>	48,0 cm
<b>Raio aerogerador</b>	17,3 cm
<b>Corda do perfil</b>	5,3 cm
<b>Pá de resina</b>	445 g
<b>Pá de fibra de vidro</b>	180 g

Para a produção das pás e braços foi realizado o desenho tridimensional no programa informático de CAD SolidWorks 2010 ilustrado na Figura 3.18.

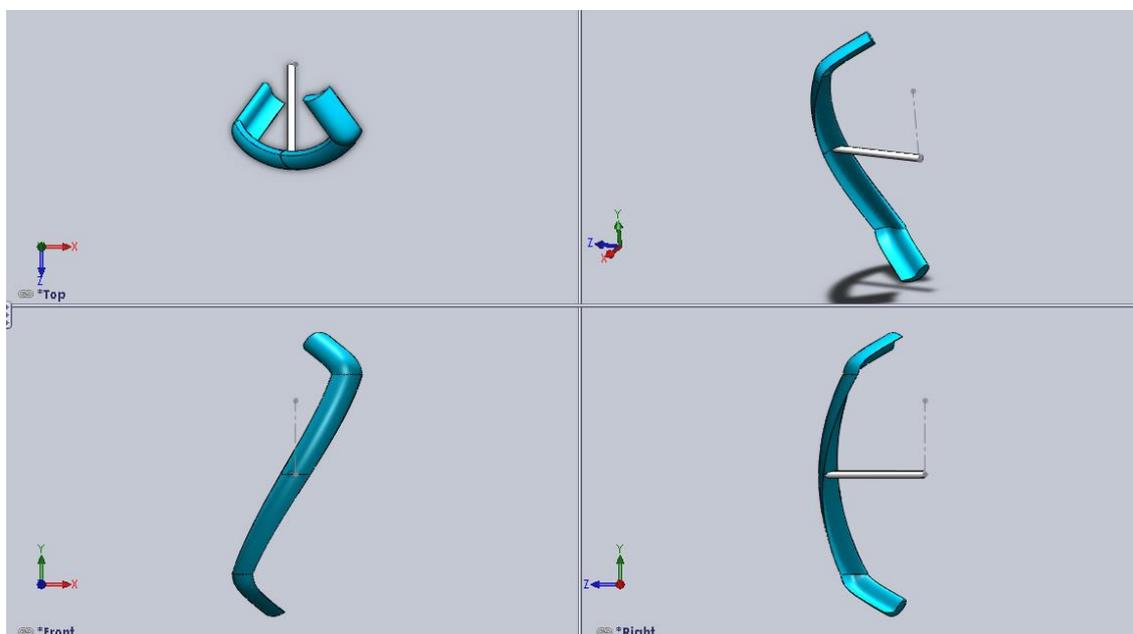


Figura 3.18 - Desenho tridimensional da pá e braço.

O desenho tridimensional Figura 3.18 foi utilizado na maquinação de uma pá em madeira usando uma máquina de controlo numérico computadorizado (CNC) para posteriormente se manufaturar o molde que foi usado para a produção das pás. O molde produzido é ilustrado na Figura 3.19.



Figura 3.19 - Moldes utilizados.

A forma das pás e a medida do seu respetivo peso são apresentados na Figura 3.20.



Figura 3.20 - Pás produzidas para protótipo de aerogerador.

Para a manufatura das pás de cor verde Figura 3.20 foi utilizado como material uma resina termoplástica produzindo um corpo sólido de resina cujo peso é de 455 g por pá. Para a manufatura das pás de cor clara Figura 3.20 foi utilizada uma resina epoxídica líquida para revestir uma manta de fibra de vidro de diversas camadas de tecido bidirecional, sendo o interior da pá oco dando origem a uma pá cujo peso é de 180 g. O tempo de cura completa dos materiais de resina utilizados na manufatura das pás foi de 12 horas. A torre de suporte do aerogerador é construída em alumínio com um bocal no topo onde encaixa um gerador elétrico. O gerador usado é um gerador de corrente contínua de ímãs permanentes (GCCIP) com uma potência nominal de 18 W e uma tensão nominal de 12 V. No topo do GCCIP está ligado um eixo em resina onde encaixam os braços das pás. Dado o tamanho reduzido do protótipo e a complexidade da forma das pás, cada pá fica conectada ao GCCIP apenas por um braço. A torre de suporte com o GCCIP, o eixo onde encaixam os braços das pás, os braços construídos e a pá de fibra de vidro são ilustradas na Figura 3.21.



Figura 3.21 - Torre, GCCIP, pá e braços do protótipo.

Os primeiros testes foram feitos na fábrica Indústria Mecânica Navarra, tendo a sua fixação sido feita como é apresentado na Figura 3.22, por forma a validar a resistência das pás de fibra de vidro e dos braços que ligam ao eixo do GCCIP. O aerogerador foi exposto a vento com velocidades superiores a 7 m/s, medido ao nível do solo.



Figura 3.22 - Testes feitos na fábrica.

A observação dos testes feitos na fábrica permitem concluir que o aerogerador Darrieus apresenta um comportamento coerente com o que os estudos teóricos levavam a prever para velocidades superiores a 7 m/s.

Os primeiros testes de auto arranque foram realizados no Centro de Geofísica da Universidade de Évora. O GCCIP não apresentava um binário constante nas suas revoluções, especialmente verificável para velocidades baixas de vento compreendidas entre 2,5 m/s e 3,5 m/s. O aerogerador instalado no Centro de Geofísica da Universidade de Évora é ilustrado na Figura 3.23.



Figura 3.23 - Aerogerador instalado no Centro de Geofísica.

A observação dos ensaios permite concluir que o aerogerador Darrieus apresenta um auto arranque sem necessidades de componentes extra, coerente com o que os estudos teóricos realizados levavam a prever.

#### *Segundo Protótipo*

Como o GCCIP não apresentava o comportamento e desempenho desejado, sendo encontradas anomalias na transmissão de binário uma vez que não se fazia de modo constante nas suas revoluções, foi adquirido um segundo GCCIP com um binário constante nas suas revoluções. Um segundo protótipo foi construído para ligar o novo GCCIP à torre de suporte. Várias modificações no bocal de fixação da torre ao GCCIP tiveram de ser realizadas.

Um suporte foi construído para facilitar a ligação da torre às infraestruturas disponíveis nas instalações do laboratório do Centro de Geofísica da Universidade de Évora. O segundo protótipo é ilustrado na Figura 3.24.



Figura 3.24 - Segundo protótipo.

Esta versão do protótipo foi testada no túnel de vento da Universidade da Extremadura no Campus de Badajoz. Foi construído um suporte apropriado à instalação do aerogerador dentro do túnel de vento. O posicionamento do segundo protótipo dentro do túnel de vento é ilustrado na Figura 3.25.



Figura 3.25 - Protótipo no túnel de vento da Universidade da Extremadura.

O GCCIP não conseguiu atingir um desempenho eficaz durante os testes no que respeita à turbina apresentando valores baixos de potência para as rotações da turbina. A velocidade do vento no túnel foi elevada à velocidade de 25 m/s. Com o GCCIP em

vazio o protótipo funcionou sem produção de vibração apresentando equilíbrio na velocidade de rotação, o que se julga ser uma consequência da forma das pás.

Na norma IEC 61400-2 é definido que o aerogerador pode ter um travão de emergência controlado fisicamente ou eletronicamente. Assim, por forma a simular um travão de controlo eletrónico, foi adicionada uma carga ao GCCIP de modo a criar um travão à turbina.

Duas simulações foram realizadas para testar o travão de controlo eletrónico: a adição de carga gradual; e a adição de carga repentina elevada.

No primeiro ensaio a carga foi adicionada gradualmente fazendo diminuir a rotação da turbina. A turbina continuou a funcionar corretamente apresentando um comportamento coerente com o que os estudos teóricos e o conhecimento do desempenho do sistema eólico levavam a prever.

No segundo ensaio foi adicionada repentinamente uma carga elevada. Após a adição da carga elevada um fenómeno transitório foi encontrado, onde a diferença entre a potência mecânica da turbina e a potência elétrica do GCCIP, i.e., potência aceleradora, era elevada [Melício10]. A energia cinética do vento foi transformada em energia mecânica pelo rotor e esta não foi totalmente transformada em energia elétrica pelo GCCIP ocorrendo uma elevada potência aceleradora. A energia mecânica não foi totalmente transformada em energia elétrica pelo GCCIP e a turbina no sentido de atingir o equilíbrio acabou por distribuir o excesso de energia mecânica pelos seus componentes. A transferência da elevada energia mecânica pelos componentes da turbina motivou que as pás tenham rodado em torno do ponto central, alterando o seu ângulo de posicionamento em cerca de 20° desde a sua posição original.

A observação dos ensaios permite concluir que o aerogerador Darrieus apresenta um comportamento coerente com o que os estudos teóricos e o conhecimento do desempenho do sistema eólico levavam a prever. Os resultados foram usados para melhorar o desenho e desenvolvimento de novos braços para ligar as pás.

Para melhorar o comportamento do sistema, foi adquirido um gerador conjuntamente com um ARV da marca SAV-15W da SAIAM com pás de forma vertical reta. O ARV é ilustrado na Figura 3.26.



Figura 3.26 - Aerogerador de rotor vertical SAV-15W da SAIAM.

O fabricante forneceu a curva de potência indicada na Figura 3.27. O ARV SAV-15W de acordo com o catálogo fornecido pelo fabricante tem um gerador síncrono com excitação assegurada por meio de ímãs permanentes (GSIP). As características são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Características do ARV SAV-15W

<b>Tipo sistema</b>	trifásico
<b>Potência nominal</b>	10 W
<b>Vel. vento nominal</b>	10 m/s
<b>Potência máxima</b>	15 W
<b>Binário arranque</b>	0,05 Nm
<b>Perfil da pá</b>	NACA4412

O ARV SAV-15W é um aerogerador Darrieus com pás de forma reta, estando instaladas com o intradorso virado para o exterior, i.e., com a concavidade virada para o exterior. A curva de potência do SAV-15W fornecida pelo fabricante é apresentada na Figura 3.27.

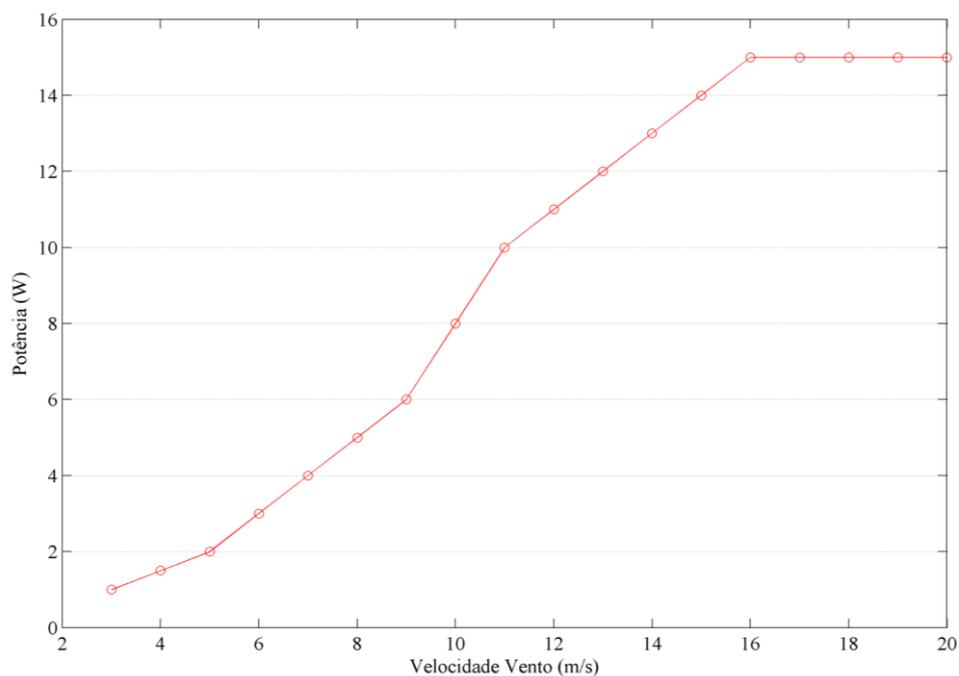


Figura 3.27 - Curva de potência do SAV-15W.

### *Terceiro Protótipo*

Para ligar o GSIP ao terceiro protótipo houve a necessidade de construir uma nova torre de suporte. Na nova torre também foram instalados apêndices para ligar os sensores para monitorização e registo de informação do aerogerador. A nova torre com o terceiro protótipo e apêndices para ligação de sensores é ilustrada na Figura 3.28.



Figura 3.28 - Nova torre com o aerogerador e ligação de sensores.

Por forma a fazer testes comparativos do terceiro protótipo com a turbina SAV-15W usando a mesma torre, a fixação das pás ao protótipo foi modificada, i.e., houve a necessidade de conceber um novo desenho para a fixação das pás aos braços no ângulo exato e mais robusto. Assim, os braços foram construídos em alumínio e dada a complexidade da forma do perfil das pás, usando máquinas de CNC foram construídas peças de alumínio para posicionar as pás no ângulo exato. Os braços e as peças de alumínio para a ligação das pás ao rotor do GSIP são ilustrados na Figura 3.29.



Figura 3.29 - Braços e peças para ligação das pás ao rotor do GSIP.

*Modelação computacional do protótipo*

O perfil aerodinâmico usado na pá do aerogerador e nas suas extremidades é o EN0005. O coeficiente de potência em função do TSR do terceiro protótipo do aerogerador usando o EN0005 é comparado com aerogeradores Darrieus com pás de forma reta usando os perfis aerodinâmicos: o NACA0012, o NACA0018, o NACA4412 ou o NACA4418. O coeficiente de potência em função do TSR é apresentado na Figura 3.30.

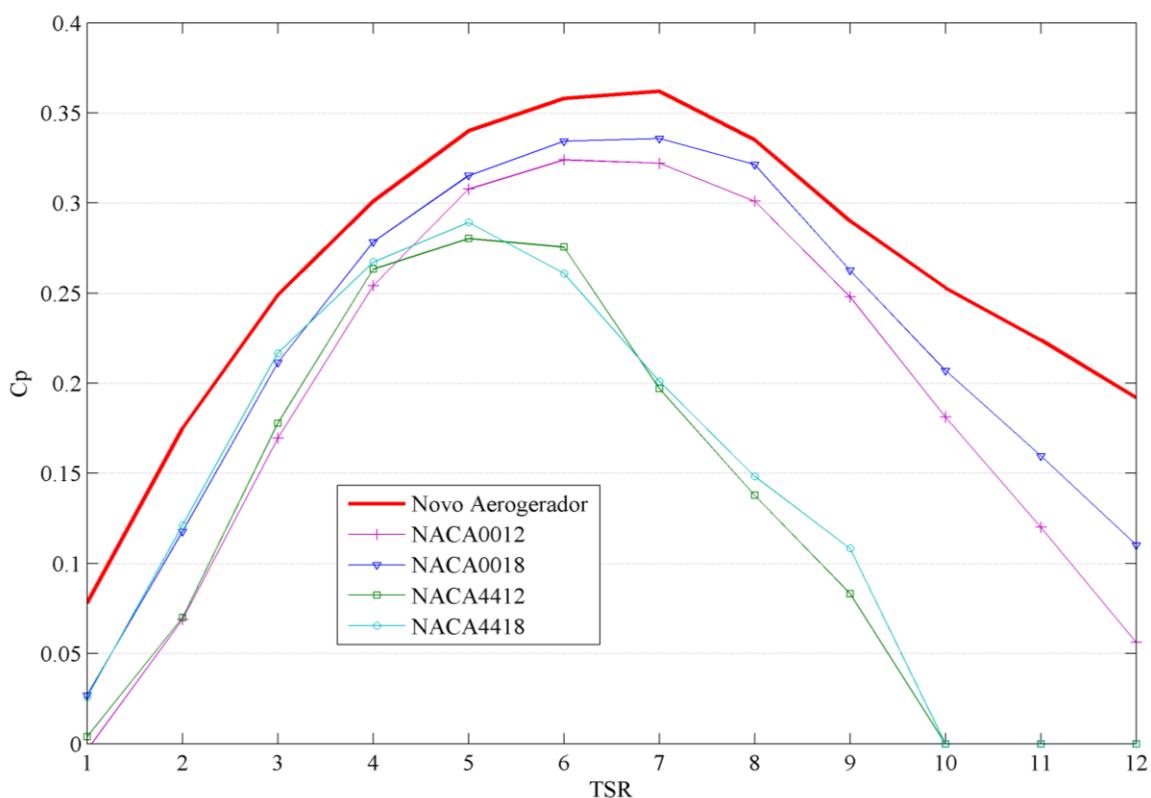


Figura 3.30 - Novo aerogerador comparação do  $C_p$  em função do TSR.

Comparando o desempenho de aerogeradores de pás retas usando o perfil EN0005 apresentado na Figura 2.31 com o desempenho do terceiro protótipo do aerogerador usando pás com o mesmo perfil EN0005, este último apresenta um coeficiente de potência superior para qualquer valor do TSR. A diferença é especialmente evidenciada para  $TRs < 3$ .

### 3.5 Conclusões

Os modelos de TCM e de TCMD para aerogeradores Darrieus são descritos. Um diagrama de fluxo para desenvolvimento de aplicações informáticas aplicando o Modelo de TCM é exposto. Com a complexidade da forma das pás do novo aerogerador Darrieus, foram encontrados desafios na aplicação dos modelos de TCM e de TCMD para avaliação da configuração da pá, havendo a necessidade de desenvolver uma nova metodologia. Esta nova metodologia constitui uma contribuição desta tese sendo designada de metodologia de Estudo de Aerogerador em Camadas. Um novo aerogerador Darrieus com auto arranque para contexto urbano é apresentado. Um protótipo do aerogerador Darrieus foi concebido, com a informação e experiência adquirida durante os testes de campo, foram concebidas várias modificações ao protótipo do aerogerador no sentido de aperfeiçoar a fixação das pás aos braços no ângulo exato e robustez.

---

# CAPÍTULO

# 4

---

## Rede Elétrica Inteligente

*Este capítulo aborda uma visão sobre a rede elétrica inteligente. Esta abordagem surge pela necessidade de analisar a função, as características e requisitos de integração de um aerogerador em contexto urbano na rede elétrica e no uso quotidiano de clientes finais. A rede elétrica inteligente é abordada no que respeita à: definição, características, segurança, vantagem e desvantagem. Uma arquitetura de rede elétrica inteligente é proposta baseada na experiência de campo adquirida e nas expectativas dos utilizadores, sendo analisada a interatividade esperada entre o aerogerador desenvolvido e a rede elétrica inteligente.*

## 4.1 Introdução

A política ambiental da união europeia (UE) está baseada nos princípios da precaução, da prevenção, da correção da poluição na fonte e do poluidor-pagador. O Sexto Programa de Ação em matéria de ambiente estabeleceu o quadro e objetivos a alcançar neste domínio durante o período 2002-2012. Foram igualmente aprovados vários instrumentos e políticas complementares para orientar a ação da UE no domínio da proteção ambiental e, de um modo mais geral, no desenvolvimento sustentável.

Nos últimos anos, os progressos mais significativos no que respeita à integração da política ambiental ocorreram no domínio da política energética e das alterações climáticas, tal como ficou refletido no desenvolvimento do pacote da UE em matéria de energia e de clima. A Comissão publicou o seu roteiro de transição para uma economia hipocarbónica competitiva em 2050, para analisar as formas mais eficientes em termos de custos, de tornar a economia europeia mais respeitadora do clima e menos consumidora de energia, para assim, atingir o objetivo de reduzir as EAGEE em 80 % até 2050.

Assim, no que respeita à política ambiental aumentou a integração de unidades de produção distribuída na rede elétrica, sendo expectável que o aumento prossiga nos próximos anos. Esta política ambiental tem sido acompanhada por alguma da produção distribuída, como é o caso do aproveitamento da energia eólica, numa alternativa competitiva e fiável face à produção centralizada, satisfazendo necessidades de consumo de energia. O conceito de produção distribuída está associado à produção de energia elétrica com pequenas unidades produtoras localizadas próximo dos consumidores, podendo ser interligadas à rede elétrica ou funcionar independentemente da mesma. A interligação e operação destas unidades têm merecido um estudo preliminar para avaliar os seus impactes na rede ao nível das perdas de energia elétrica, da estabilidade e fiabilidade do fornecimento de energia e da qualidade de energia.

O sistema elétrico atual foi concebido segundo o paradigma de produção centralizada, i.e., trânsito de energia direcionado radial dos centros de produção para os de consumo. Pelo que, a integração de unidades de produção distribuída implica desafios.

O aumento no consumo de energia elétrica aliada ao crescimento na integração de energia gerada por fontes renováveis, i.e., produção distribuída cria uma preocupação crescente relacionada com a intermitência na geração, dada a variabilidade das fontes renováveis [Castro12]. Pelo que, é imperativo um novo conceito de rede elétrica, que reformule o anterior para que seja possível suportar as necessidades e exigências futuras. O novo conceito requer que seja uma rede flexível, adaptável, eficiente, robusta, segura e facilmente controlável [NIST10].

Na atual rede elétrica são apontados como motores de uma mudança: a necessidade de ser mais sustentável; o aumento de integração de aproveitamentos renováveis; a necessidade de reduzir as EAGEE; a substituição de componentes com tecnologias com mais de 50 anos; a satisfação da crescente demanda de energia elétrica deve estar assegurada; a introdução de tecnologias que exigem maior necessidade energética, como os veículos híbridos; a introdução de uma maior interação e transparência entre os vários intervenientes na rede elétrica; o aumento da segurança na distribuição; a necessidade de gerir congestionamentos [IEEE11].

## 4.2 Definição de REI

O conceito de Rede Elétrica Inteligente (REI) não tem uma definição objetiva concreta. Este conceito paira sobre um conjunto de ideais do que se espera ser as necessidades da rede elétrica no futuro. A ideia de “rede inteligente” está ligada com a necessidade de através de sensores, controladores e sistemas computacionais que funcionariam como “células nervosas”, conseguir automatizar e oferecer capacidade operacional autómata a muitos dos componentes da REI.

Várias definições de REI podem ser encontradas e quatro das definições mais aceites pela comunidade científica e industrial, são oferecidas pelas organizações: Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) [IEEE11], European Technology Platform (ETP) [EU06], IEC [IEC10], NIST [NIST10].

A definição de REI deve começar por conceitos relacionados não só com a arquitetura atual da rede elétrica, mas também com os requisitos de mudança necessários e a criação de novas exigências que ainda estão para ser previstas. Alguns dos principais requisitos visionados pelas organizações IEEE [IEEE11], ETP [EU06], IEC [IEC10] e NIST [NIST10] são:

Reduzir consumos pela participação crescente dos consumidores na gestão das necessidades energéticas, reduzindo os picos de consumo;

Encorajar a criação de políticas nacionais para a incorporação de novas fontes renováveis de energia, diminuindo as EAGEE e melhorando a eficiência energética;

Desenvolver tecnologias e conhecimento científico que permitam várias melhorias na operação da rede a baixo custo;

Possibilitar o desenvolvimento concertado de novos serviços que permitam a interação entre os vários participantes na rede elétrica e sua partilha de dados;

Aperfeiçoar a implementação do processamento da informação digital melhorando a segurança, consistência e eficiência da rede elétrica;

Instalar recursos e geração distribuídas, incluindo a geração energética por fontes renováveis;

Implementar eletrodomésticos e contadores inteligentes, que permitam serviços de interação com as operações, gestão e distribuição de eletricidade;

Desenvolver tecnologias de armazenamento de energia, prevenção de picos de consumo, inclusão de veículos elétricos e híbridos, armazenamento térmico na implementação de sistemas de ar condicionado integrados;

Criar normas que beneficiem a eficiente criação e implementação de tecnologias de comunicação para interoperabilidade entre componentes, infraestrutura, serviços e participantes da rede elétrica.

Alguns dos principais benefícios visionados que advêm da reestruturação da rede elétrica em um conceito de REI, são:

Acomodar a geração e armazenamento de energia vinda de fontes renováveis, controlando a intermitência da sua disponibilidade energética;

Acomodar com eficiência os recursos distribuídos de produção de energia elétrica;

Melhorar a eficiência no uso dos recursos da rede, reduzindo custos e prevenindo atempadamente a sua manutenção;

Ter capacidade de suprir as necessidades dos consumidores finais, garantindo acesso à sua informação e participação ativa no consumo energético;

Distribuir energia elétrica com qualidade e sem falhas, sendo capaz de prever e suprir as futuras necessidades da procura;

Oferecer segurança e resposta atempada contra ataques cibernéticos, ataques físicos e desastres naturais;

Ter capacidade de regeneração sobre perturbações, congestionamentos e erros de operação na rede.

A Electric Power Research Institute estima que os benefícios que advêm no investimento em desenvolvimento tecnológico e implementação de novas tecnologias na REI como tendo uma relação de custo-benefício de entre 4:1 e 5:1 [ABB09]. Um investimento de \$165 bilhões produzirá receitas de entre \$638 bilhões e \$802 bilhões [ABB09].

A REI não deve ser vista como uma substituição da infraestrutura atual da rede elétrica, nem na criação de uma rede desenvolvida de raiz. A REI deverá ser implementada lado a lado com a atual infraestrutura, abrindo caminho com a implementação de novas tecnologias de informação e substituição de componentes obsoletos que irá beneficiar a crescente eficiência e controlo da operação diária da rede elétrica [ABB09]. Esta via de implementação reduz custos de implementação de curto prazo, melhorando a utilização dos recursos existentes e permitindo a alocação inteligente de recursos financeiros a longo prazo [ABB09].

O processo de implementação das várias componentes da REI, o modo como vão ser instalados e a sua capacidade de interagirem entre si e entre os vários participantes na REI é estudado através de planos estratégicos pela Comunidade Europeia [EU11, EU10, EU07, EU05] apresentando as suas preocupações futuras e os resultados de projetos já implementados.

O fluxo de energia ao nível da distribuição é assumido nos dias de hoje como tendo uma única direção tomando em conta o antigo conceito de rede elétrica, mas na REI precisa

de ser multidirecional com a participação de vários intervenientes. O fluxo de energia multidirecional ao nível da distribuição [ABB09] é apresentado na Figura 4.1.

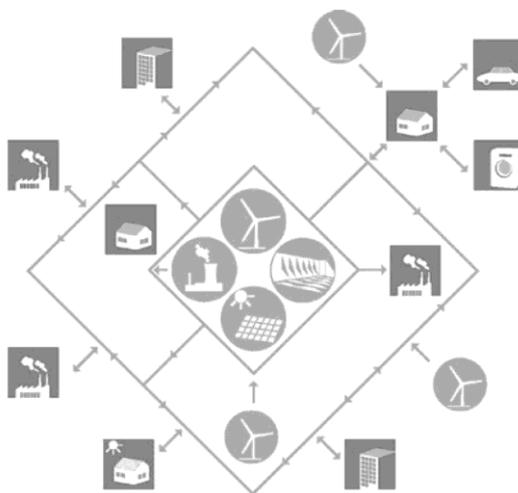


Figura 4.1 - REI, fluxo de energia multidirecional.

(fonte: ABB 2009)

Esta multidireccionalidade da energia não é apenas entre redes elétricas regionais, mas entre diferentes participantes, chegando ao ponto de existir a possibilidade de trocar energia diretamente entre consumidores/produtores [ABB09]. A troca de informação entre os participantes é assim uma necessidade vital e a rede de informação uma ferramenta importante. O controlo de uma rede elétrica com multidireccionalidade da energia e informação precisa de ser eficiente, fácil de manter e operar apesar da sua previsível complexidade e acrescidas necessidades de medidas de segurança [ABB09].

Os automatismos são partes essenciais na REI dada a sua complexidade, requerendo a incorporação alargada de sensores e atuadores com troca constante de informação, com serviços e com participantes na rede elétrica.

Os seres humanos não são reativos o suficiente para gerir a magnitude da informação envolvida na operação da REI, i.e., para responder em tempo útil a algumas das necessidades futuras na operação da rede, visto que, o uso de várias tecnologias incorre em uma grande quantidade de informação [EU10]. Pelo que, a atividade dos humanos na REI será no âmbito da gestão e manutenção de componentes; tomando decisões de alto nível apoiados em sistemas de gestão de informação. A tarefa de processamento da

enorme complexidade da operabilidade da rede elétrica que envolve uma grande quantidade de dados tem que ser feita em tempo útil recorrendo a serviços de processamento computacional [EU10].

As tecnologias e os avanços tecnológicos têm um impacto positivo sobre a distribuição e geração de energia, sobre o seu funcionamento ótimo e no bom funcionamento dos componentes da rede elétrica [EU11, EU10, EU07, EU05]. Mas não deverá ser criada uma REI sem a garantia de segurança, a robustez, a fiabilidade e a confiança dos seus participantes.

Várias tecnologias e serviços serão usados na REI gerando uma grande quantidade de informações, havendo a necessidade de operação semiautomática aplicando capacidades de inteligência artificiais. Estes dispositivos e serviços são geralmente designados de dispositivos inteligentes. Estes dispositivos inteligentes vão ter um impacto positivo na geração e distribuição de energia, no bom funcionamento dos componentes da rede elétrica e na garantia do funcionamento melhorado da REI [IEEE11, EU06, IEC10, NIST10]:

Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados que monitorizam e controlam as funcionalidades e o bom funcionamento da rede elétrica;

Sistemas de controlo e análise em tempo real de situações de inoperabilidade dos sistemas de distribuição, melhorando a estabilidade da rede elétrica;

Sistemas Distribuídos de Gestão que oferecem um controlo mais eficiente das atividades na rede elétrica aos seus operadores;

Automação de Subestações, que permite às distribuidoras planear, monitorar e controlar equipamentos de forma descentralizada, a fim de utilizar de modo otimizado os componentes, reduzindo custos de manutenção e aumentando a fiabilidade dos sistemas;

Eletrónica de energia usada em grande escala nos sistemas de aproveitamentos de fontes renováveis de energia, aplicando os últimos avanços tecnológicos para controlo da tensão, aumentar a eficiência de transmissão e melhorar a invulnerabilidade do sistema de potência;

Componentes autómatos aplicados na localização de falhas e seu isolamento de modo a acelerar a recuperação de falhas de energia;

Contadores inteligentes que permitam aos clientes a sua participação em programas de preços baseados em alturas de maior consumo, aumentando o uso da energia fora dos picos de demanda, e controlo de custos;

Sistemas de gestão energética de edifícios e habitações que vão melhorar o consumo energético e conduzir a uma redução substancial da energia utilizada.

Um balanço comparativo entre a rede elétrica atual no seu antigo conceito e a REI [ABB09] é apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Comparação entre a rede elétrica atual e a REI

	<b>Rede Elétrica Atual</b>	<b>REI</b>
<b>Geração Energética</b>	Centralizada	Centralizada e Distribuída
<b>Fluxo de energia</b>	Unidirecional com controlo e participação limitados	Bidirecional com controlo abrangente e automatizado, capaz de permitir a participação de participantes na rede elétrica
<b>Topologia da rede</b>	Em forma de árvore com o fluxo geralmente unidirecional	Em malha e anel com caminhos múltiplos de fluxo de energia e com resposta rápida às mudanças e necessidades
<b>Restauração após perturbações</b>	Manual com restauração lenta do sistema	Restauração rápida auto regenerativa na maioria das vezes automaticamente
<b>Comunicação de dados</b>	Nenhuma ou em um só sentido	Multidirecional em tempo real
<b>Interação de participantes</b>	Limitada ou inexistente	Extensiva
<b>Medição</b>	Eletromecânica	Digital com redes avançadas que permitem a gestão em tempo real de preços e consumos
<b>Manutenção</b>	Avaliações e manutenção presenciais de componentes	Manutenção preventiva baseada em esquemas temporais e monitorização remota em tempo real por intermédio de sensores

## 4.3 Micro Rede

Ainda não há uma definição concisa de micro REI, algumas definições limitam a sua existência a um ramo independente da rede real que opera em baixa tensão e funciona em paralelo com um único ponto de ligação ou em modo isolado da infraestrutura da rede elétrica [Wang11], outros definem como uma rede elétrica pequena em tamanho que tem a sua própria geração de energia, transmissão e armazenamento [Lasseter11]. Para muitos [Vasquez10, Amjady10, Laaksonen10] a micro REI é vista como uma forma de integrar Recursos Distribuídos de Energia (RDE), nomeadamente integrar a Geração Distribuída na REI.

Algumas organizações como a Consortium for Electric Reliability Technology Solutions (CERTS) [Nikkhajoei09, Lasseter11] têm estudado modelos de arquitetura de estruturação da micro REI, componentes e tecnologias melhoradas para este tipo de arquitetura de rede.

O impacto da micro REI na rede elétrica é grande [Potter09], não só na capacidade de oferecer a integração de RDE, nomeadamente da GD por fontes renováveis, como também na maior capacidade de adaptação da geração energética às reais necessidades do consumidor, reduzindo flutuações de energia na rede e adicionando medidas extra de segurança contra ataques ou falhas.

As micro REI vão ter globalmente um crescimento de investimento de 64% nos próximos anos, com investimentos de \$144,2 milhões em 2011 a uma previsão para 2016 de \$1,7 bilhões a \$3 bilhões dependendo dos incentivos governamentais nesta área de desenvolvimento tecnológico [Asmus10].

Existem já 140 projetos de micro REI por todo o mundo totalizando 1,1 GW de produção de energia local [Asmus10]. Estes projetos contam com instalações em comunidades remotas fora da rede elétrica, complexos militares, locais industriais, campus universitários e edifícios comerciais. Nestes projetos é aplicada uma grande variedade de últimos avanços tecnológicos para redes elétricas: os sistemas de armazenamento de energia; a geração por fontes renováveis; os componentes de controlo de redes elétricas; a inovação em sistemas computacionais de gestão; as

previsões de geração e consumo energético; os sistemas autômatos com inteligência artificial para manutenção e a gestão de componentes e distribuição.

Estes desenvolvimentos tecnológicos têm também um grande impacto na construção da REI testando previamente a sua implementação, funcionamento e gestão, apesar de serem testados em arquiteturas mais pequenas de micro REI.

## 4.4 Super Rede

O objetivo de reduzir a dependência da Comunidade Europeia sobre os combustíveis fósseis e a redução de EAGEE associados com a produção da energia elétrica tem levado a que vários trabalhos tenham sido elaborados sobre a possibilidade da integração de mega parques solares e eólicos instalados em África, Médio Oriente e Mar do Norte, na rede elétrica Europeia [Battaglini09].

Estes sistemas de mega geração e sistemas de transmissão de energia trazem diversos desafios, nomeadamente a elevada complexidade da rede de transmissão, a complexidade de coordenação, o congestionamento de transmissão e a complexidade dos sistemas de gestão. Esta centralização de geração, sendo controlada centralmente é à primeira vista uma abordagem antagonista da abordagem que se preconizada na REI [Williges10].

Alguns trabalhos têm vindo a ser feitos por forma a estudar a integração desta abordagem na futura REI, sendo apelidada de Super REI [Battaglini08]. A Super REI é uma visão ambiciosa para uma futura REI onde coexiste não só a GD e geração centralizada em cada país, mas também uma mega geração energética por fontes renováveis vinda de outros continentes com maiores recursos energéticos renováveis. Estes sistemas de transmissão teriam de usufruir das mais recentes inovações tecnológicas em materiais e tecnologias de transmissão de energia elétrica.

A implementação de uma Super REI levaria ao aumento de competitividade da energia fotovoltaica com a energia gerada por centrais de carvão aos preços de mercado

[Williges10]. Em [Schellekens11] é apresentado um plano de implementação até 2050 de 100 % de consumo energético gerado por fontes renováveis.

Existem no entanto várias incertezas, obstáculos políticos e necessidades financeiras avultadas que ultrapassam a capacidade técnica da implementação deste tipo de mega arquitetura [Battaglini09]. O problema da dependência energética Europeia de outros países não Europeus muitos deles com instabilidade política persiste com esta solução da Super REI.

É de salientar que a Europa tem uma grande capacidade de geração energética por fontes renováveis. Sem contar com o potencial eólico marítimo do Mar do Norte da Europa, Portugal com o seu potencial eólico quer em terra [Costa04, Esteves04] quer contando com a sua zona marítima, de mais de 1.727.000 km<sup>2</sup>, teria a capacidade de sozinho suprir as necessidades Europeias de energia.

## 4.5 Arquitetura em Camadas

Tomando em conta a indefinição de uma arquitetura concreta da REI e baseando nas experiências adquiridas durante os testes de monitorização da REI a ser apresentada na secção 5.4, existiu a necessidade de criar uma arquitetura concreta e estruturada capaz de contemplar os requisitos visionados pelas organizações IEEE [IEEE11], ETP [EU06], IEC [IEC10] e NIST [NIST10]. Ao mesmo tempo esta nova arquitetura permite a atual implementação e integração facilitada de tecnologias da REI já existentes no mercado sem afetar o funcionamento da rede elétrica existente.

A arquitetura aqui oferecida é baseada nas melhores práticas de engenharia de programação aplicando as normas de programação orientada a objetos (POO), sendo que o intercâmbio de energia e de dados na rede elétrica, com todos os seus componentes, interações e eventos, são modelados como objetos diferentes e independentes de uma aplicação informática. Esta arquitetura é menos exigente sobre a arquitetura de dados necessária para gerir uma REI.

As definições existentes de REI são arquitetadas sobre uma visão muito geral de todos os componentes, intervenientes e infraestruturas como um todo, criando uma visão arquitetónica complexa que se baseia em normas que precisam de coordenar todos os intervenientes ao mesmo tempo. Assim, levando à crescente complexidade de manutenção, operação e controlo de segurança, limitando a coexistência da definição de diferentes normas e criação de serviços.

A Super REI [Battaglini09, Schellekens11] e a micro REI [Lasseter11, Asmus10] são consideradas na nova proposta de arquitetura de REI. Esta nova visão da arquitetura da REI constitui uma contribuição e é designada de Arquitetura em Camadas para a REI (ACREI). A ACREI adiciona valor à organização dos componentes da rede elétrica, intervenientes e infraestruturas, definindo visões de alto nível sobre a forma de grupos de componentes da rede elétrica. A redução da complexidade da rede elétrica a grupos em termos de operação reduz complexidade e facilita a operação e gestão. Os grupos na ACREI são definidos como objetos, operando independentemente uns dos outros, proporcionando capacidade de aplicar normas diferentes para um mesmo serviço em diferentes grupos.

A capacidade de implementar diferentes medidas e normas para um mesmo serviço em diferentes grupos cria uma segurança adicional aumentando a dificuldade dos ataques, mas mantendo mesmo assim a simplicidade na implementação e operação.

O uso de práticas de engenharia de programação aplicando as normas de POO permite desenvolver aplicações informáticas que são fáceis de desenvolver, operar, manter e estender. Nesta prática, os processos de negócio são encapsulados em objetos. Estes objetos são criados ou estendidos a partir de outros objetos existentes, que por sua vez são criados a partir de outros e assim por diante até chegar a objetos mais simples, fáceis de usar, de estender e manter. Os objetos mais simples constituem as unidades fundamentais das aplicações informáticas. As interações entre objetos são controladas por métodos que criam uma abstração do objeto em si, facilitando ainda mais a utilização de determinado objeto e aumentando a sua segurança. Um programador aplicativo não precisa de saber como determinados objetos são constituídos, acessíveis ou até mesmo tratados, necessitando apenas de conhecer como comunicar e interagir

com eles através de uma interface, que encapsula um determinado processo de negócio. As atividades e eventos associados a um determinado objeto são alcançáveis através da interface.

Para aplicar técnicas de POO implica que no início de cada desenvolvimento aplicativo, deve ser sempre definida qual a estrutura e objetos fundamentais, i.e., objetos mais simples, a empregar.

Na ACREI todos os componentes ou grupos de componentes desde os mais fundamentais até aos mais complexos são chamados de objetos. Os objetos podem conter em si objetos mais simples ou fazer parte de outros objetos mais complexos. De modo a simplificar a explicação e compreensão da ACREI, é assumido que o objeto mais simples e fundamental desta proposta de arquitetura da REI é a micro REI apresentado na Figura 4.2.

Na Figura 4.2 quanto mais alto o nível, mais complexo é o objeto no sentido de incorporar em si mais objetos diferentes. Vários componentes da rede elétrica são agregados em objetos lógicos que por sua vez são convertidos em pequenas unidades estruturais da REI e que se necessário podem operar autonomamente do resto da rede elétrica. Todos os objetos são independentes entre si por definição, até mesmo objetos de mais alto nível que os contêm. A ACREI assegura a simplicidade de manutenção e operabilidade.

A Micro REI é considerada como o objeto mais simples da nova arquitetura apresentada, tendo apenas um ponto de ligação com o objeto de nível superior que é a Rede Regional, por onde é feita a troca bidirecional de energia e de dados. A Micro REI pode operar isolada da rede ou manter uma ligação constante, tendo ou não o seu próprio armazenamento energético ou GD.

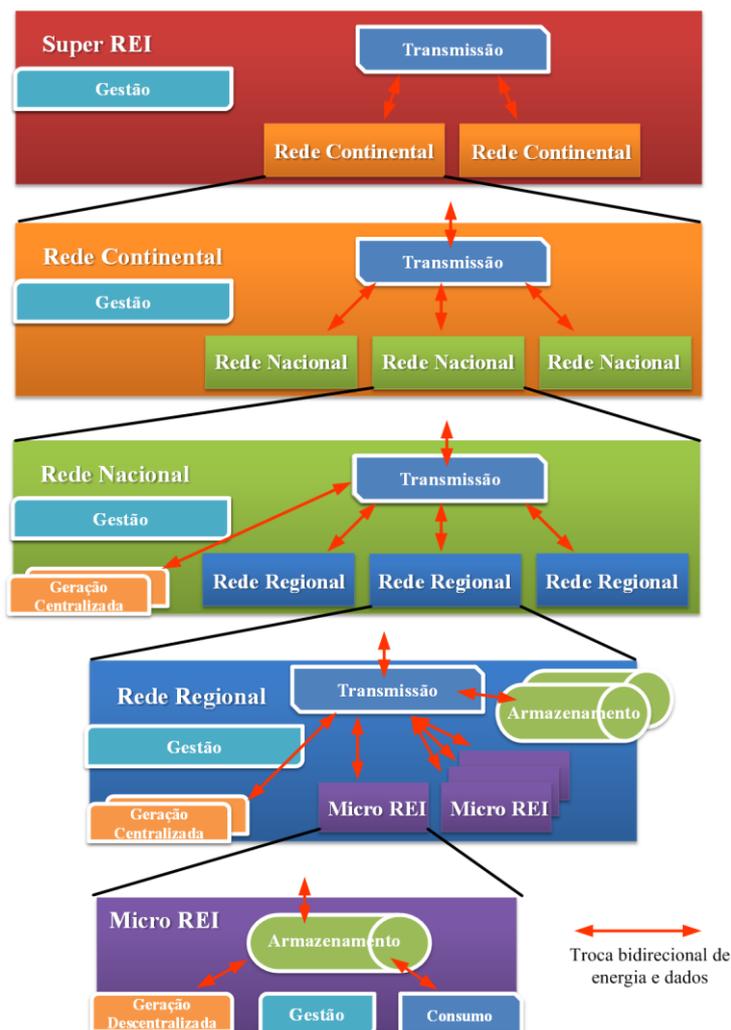


Figura 4.2 - Proposta de arquitetura da ACREI.

A Micro REI na nova arquitetura vai para além da simples integração de GD na rede ou de isolar certos consumidores da rede elétrica. A Micro REI representa a divisão fundamental da ACREI, encapsulando por exemplo um conjunto de consumidores, GD e armazenamento.

A Micro REI tem o seu próprio sistema de gestão que controla todos os aspetos do consumo energético, necessidades futuras, GD, armazenamento e avaliação do comportamento energético local. Os modelos de avaliação do comportamento, geração, armazenamento e consumo, são desenvolvidos com uma maior simplicidade, tendo apenas de prever o comportamento local da Micro REI, convergindo mais rapidamente em modelos de avaliação mais refinados.

O nível seguinte na ACREI é o objeto Rede Regional apresentado na Figura 4.2, encapsulando uma visão da arquitetura regional da rede elétrica. A Micro REI apenas comunica com a Rede Regional, trocando energia e a informação necessária para a sua operação. A Micro REI não precisa de saber como a Rede Regional opera ou como as suas medidas de segurança estão implementadas, necessitando apenas de conhecer como pode interagir com a Rede Regional. Isto aumenta a segurança e permite a implementação de diferentes normas com o mesmo objetivo em diferentes Micro REI não interferindo com a comunicação existente entre estas e a Rede Regional.

A Rede Regional não conhece nem precisa de conhecer que componentes, consumidores, GD, e armazenamento existem nas Micro REI que se conectam a si, precisando apenas de saber como comunicar com as suas Micro REI e como satisfazer as suas necessidades. Apesar de não ser obrigatório a Rede Regional pode ter a sua GD, geração centralizada e armazenamento energético. A energia que necessita pode ser requisitada às Micro REI que estão abaixo de si ou ao objeto de mais alto nível onde se insere, no caso da Figura 4.2 a Rede Nacional. As Micro REI não sabem da existência de outras Micro REI da mesma Rede Regional apesar de poder haver entre si trocas de energia que são geridas apenas pela Rede Regional.

A Rede Nacional é construída sobre várias Redes Regionais, pode ter a sua geração centralizada e apenas serve as necessidades das Redes Regionais como um todo, não precisando de saber da existência de Micro REI, consumidores e GD. Sobre a mesma Rede Nacional, as Redes Regionais não sabem da existência de outras redes Regionais, mesmo que estas tenham trocas energéticas, comunicando e trocando energia e dados apenas com a Rede Nacional. Existe apenas um ponto de comunicação e troca de dados e energia entre cada Rede Regional e a Rede Nacional.

No nível acima da Rede Nacional está o objeto Rede Continental que serve várias Redes Nacionais satisfazendo as suas necessidades. Poderá haver geração centralizada dentro de uma Rede Continental que pode servir mais de uma Rede Nacional. O objeto Rede Continental pode representar por exemplo a rede elétrica da Comunidade Europeia que serve vários países (vários objetos Rede Nacional), ou os Estados Unidos onde cada

estado é considerado como uma Rede Nacional na ACREI. Existe apenas um ponto de comunicação e troca de dados e energia entre cada Rede Nacional e a Rede Continental.

O nível mais alto da ACREI é o objeto Rede Intercontinental que serve vários objetos Rede Continental apresentado na Figura 4.2. Existe apenas um ponto de comunicação e troca de dados e energia entre cada Rede Continental e a Rede Intercontinental.

Várias vantagens advêm da implementação da ACREI e que podem ser sumarizadas em:

Simplificação da infraestrutura da rede elétrica;

Implementação, manutenção e extensibilidade fácil;

Abstração da troca de energia e dados entre os vários objetos nos diferentes níveis, aumentando a segurança, uma vez que várias normas e diferentes medidas de segurança podem ser implementadas ao mesmo tempo;

Proteção da arquitetura da rede elétrica contra ataques ou catástrofes ambientais, uma vez que a energia pode ser facilmente roteada, i.e., encaminhada pelos vários objetos em diferentes níveis até ao ponto de necessidade;

Medidas extra de segurança contra falhas, uma vez que um objeto na ACREI não é afetado por outro objeto no mesmo nível e as falhas não se espalham a níveis superiores. Se um objeto num nível mais alto é afetado, os objetos abaixo de si só são afetados se precisarem de partilhar energia através desse objeto afetado;

Rápida implementação de REI, mesmo não existindo a definição completa de todas as normas;

Simplificação e menor quantidade de dados a serem transmitidos, controlados e mantidos, tendo apenas de contar com comportamentos encapsulados em objetos;

Menor tempo de processamento e reação, resultado da menor quantidade de dados a serem manuseados no mesmo instante e de estruturas a controlar;

Simplificação nas tarefas de modelação dos comportamentos energéticos de consumo e geração por fontes renováveis, uma vez que os objetos simplificam a modelação;

Melhores níveis de serviço e experiência [Zhou12], resultado de uma maior eficiência, desempenho e controlo na troca de informação, levando ao aumento na qualidade dos serviços oferecidos pela REI;

Melhor e mais rápida capacidade de recuperar de desastres e falhas na distribuição de eletricidade. A energia pode ser roteada entre outros objetos em níveis mais altos ou mais baixos, sempre pelo mesmo ponto de controlo e ligação com o objeto no nível superior.

## 4.6 Aerogerador e a REI

O aerogerador em contexto urbano estando perto do ponto de consumo poderá funcionar desligado da rede elétrica, fornecendo a eletricidade diretamente ao consumidor com ou sem armazenamento próprio. Numa situação onde não exista armazenamento próprio é geralmente usada uma configuração diretamente ligada à rede elétrica.

Outros casos existem onde toda a energia elétrica gerada pelo aerogerador é entregue à rede elétrica e o consumidor não usufrui diretamente dessa energia produzida pelo aerogerador, mas através do diferencial entre o consumo direto da rede e a energia elétrica vendida.

Em contexto urbano, para além do tipo de instalação produtor/consumidor, haverá outras configurações talvez até mais vantajosas para o bem-estar das comunidades, da ecologia e democratização da geração limpa de energia. Uma dessas configurações é a criação de aglomerações de vários aerogeradores que funcionando em conjunto disponibilizam uma maior quantidade de energia. Estes aglomerados funcionam geralmente associados a uma tecnologia de armazenamento de energia.

Estes aglomerados podem pertencer a vários tipos de entidades, cada uma delas com intenções distintas: empresa privada que complementa a oferta de mercado vendendo a energia elétrica diretamente ao consumidor ou a outros fornecedores de maior porte; empresa pública financiada com dinheiro de impostos dos seus contribuintes que fica responsável por fornecer energia para satisfazer as necessidades geralmente de comunidades isoladas da rede elétrica; empresa comunitária financiada com dinheiro de um grupo de pessoas ou comunidades que se juntam de modo a que lhes seja dado o acesso a sistemas de fornecimento de energia limpa.

Tendo em conta todos estes factos, o aerogerador em contexto urbano deverá estar preparado para ser integrado na arquitetura da REI e disponível aos serviços por ela disponibilizados. Os serviços de integração do aerogerador na REI vão passar pela recolha de informação do seu comportamento geral e de seus componentes; pela validação e avaliação do seu desempenho; e pelo controlo remoto do seu comportamento e funcionamento.

Para que isto seja possível sem afetação da simplicidade de instalação do aerogerador urbano, uma tecnologia de comunicação sem fios e de baixo consumo energético deverá ser usada permitindo a sua agregação à arquitetura de dados da REI. O tema da integração do comportamento e controlo do aerogerador urbano na arquitetura e serviços de dados da REI vai ser abordado no capítulo 5.

## **4.7 Conclusões**

O aerogerador urbano está inevitavelmente inserido numa REI. Para uma melhor perceção das preocupações que acarreta a integração de um aerogerador urbano na REI e os seus possíveis desafios, há que apresentar uma visão geral do conceito de REI. Neste capítulo os vários conceitos de definições mais usuais de REI são apresentados. Baseado na pesquisa feita sobre o estado da arte, aleado aos testes de campo apresentados na secção 5.4 e usufruindo dos conhecimentos já adquiridos de boas práticas de arquitetura de aplicações computacionais é idealizada uma nova arquitetura de REI designada de ACREI, que traz vantagens acrescidas aos conceitos já existente na literatura científica.

---

# CAPÍTULO

# 5

---

## Monitorização da REI

*Neste capítulo é apresentada uma visão sobre a monitorização dos componentes, serviços e intervenientes da REI; os seus desafios e necessidades. A criação de uma rede de dados capaz e fiável para troca de informação é fundamental na REI. A norma ZigBee é descrita como uma tecnologia capaz de criar uma rede sem fios de baixo consumo energético robusta e eficaz para controlo e monitorização de componentes e serviços numa REI. Vários testes de campo são expostos visando o estudo das necessidades na implementação de redes ZigBee na REI. Um novo modelo de segurança de dados, serviços e intervenientes na REI é apresentado.*

## 5.1 Introdução

O novo aerogerador em contexto urbano está incorporado numa REI, havendo a necessidade de monitorizar o seu comportamento e controlo numa RTD da REI, como referido na secção 4.6.

O aerogerador urbano será reconhecido como mais um componente integrante da vasta arquitetura da REI e a interação deverá ser configurada por serviços que serão disponibilizados pela REI.

No mercado existem já contadores inteligentes com funcionalidades que permitem informar automaticamente o fornecedor de energia elétrica sobre o comportamento de clientes no que respeita ao perfil de consumo de energia elétrica, podendo até em alguns casos interagir com os aparelhos elétricos que o cliente tem em casa e agindo em conformidade com contratos em vigor, i.e., enviar informação ao cliente sobre os aparelhos ligados, identificando os que consomem mais energia, ou até controlar diretamente aparelhos podendo proceder à operação de desligar se houver picos de consumo energia elétrica na rede que legitimem a sua interrupção.

O aerogerador em contexto urbano irá operar recorrendo a serviços inteligentes de gestão e controlo de seus componentes e comportamento. Para que isso seja possível, o aerogerador urbano tem de estar ligado à RTD da REI. O aerogerador em contexto urbano deverá aceder à RTD da REI existente na maioria dos casos através de uma RTDSF, como forma de facilitar o processo e reduzir custos de instalação. A RTDSF a usar deve ser ambientalmente aceitável consumindo o mínimo de energia possível sem afetar a sua capacidade na oferta de serviços.

Várias tecnologias sem fios foram analisadas no âmbito das tarefas envolvidas no estado da arte [Gao11, Parikh10, Polyak11, Shahraeini10] e a norma ZigBee foi escolhida por oferecer os serviços (de gestão e controlo) anteriormente referidos na secção 4.6. Neste capítulo uma análise sobre esta norma e os desafios que se apresentam na sua implementação vão ser abordados na secção 5.4, incluindo a descrição de testes de campo especialmente planeados para a criação de redes sem fios de baixo consumo.

Tanto o modelo escolhido de implementação de testes, bem como os módulos eletrónicos desenvolvidos são apresentados. Durante a descrição dos testes várias propostas de implementação vão ser apresentadas.

## 5.2 Norma ZigBee

A norma ZigBee é uma especificação de comunicação de alto nível baseada na norma IEEE 802.15.4. A norma ZigBee define camadas aplicacionais de mais alto nível desenvolvidas sobre as camadas físicas de transmissão de dados da norma IEEE802.15.4 [Benakila10, Iwayemi11, Gomez10, Silva11b]. A norma ZigBee é continuamente desenvolvida pela organização ZigBee Alliance, uma organização independente sem fins lucrativos criada em 2002 com o objetivo de desenvolver uma norma de redes de dados sem fios de baixo consumo energético (*Low-Rate Wireless Personal Area Network* – LR-WPAN). A organização conta já com mais de 360 companhias em todo o mundo como seus membros, nomeadamente no mercado de eletrodomésticos, da domótica, da automação de edifícios, da gestão de energia e do controlo industrial.

A norma IEEE 802.15.4 é uma definição de LR-WPAN, especificando a camada física (*Physical* - PHY) e a camada de controlo de acessos de comunicação (*Media Access Control* - MAC) [Silva11b]. O propósito principal desta norma é a de criar uma LR-WPAN para a comunicação entre aparelhos com um baixo custo de produção, comunicação universal de baixa velocidade com ênfase no baixo consumo energético, suportando medidas de segurança apertadas, com gestão de consumo energético e controlo de colisão de pacotes de dados.

A norma IEEE 802.15.4 pode operar em três possíveis bandas de rádio industriais e médicas não licenciadas: 868,0 MHz até 868,6 MHz na Europa permitindo um canal; 902 MHz até 928 MHz na América do Norte dividido em 10 canais; e 2400 MHz até 2483.5 MHz em todo o mundo divididos em 16 canais [ZigBee07a].

A camada PHY oferece os serviços para transmissão de dados, providenciando funções de gestão do sinal, gestão física da frequência de transmissão e recepção da frequência de rádio, criação e escolha de canais e o interface de gestão de toda a entidade da camada PHY.

A camada MAC oferece serviços de transmissão de dados com a possibilidade de ativar mecanismos de envio de estrutura sincronizada “*beacon enabled*” ou transmissão sem estrutura sincronizada “*non-beacon enabled*” [Batista13a].

Nas redes com mecanismos de envio de estrutura sincronizada “*beacon enabled*”, os dados são transmitidos durante um período de tempo predefinido. É a camada MAC que oferece os serviços de transmissão de dados através de estruturas MAC usando a camada PHY, que controla as aberturas de tempo de transmissão, controla a validação das estruturas a enviar e gere a rede em estrutura sincronizada [Benakila10]. As estruturas são unidades de envio de informação e podem ser de quatro tipos: dados; reconhecimento de receção; estrutura “*beacon*”; e comando MAC [Benakila10]. A organização da estrutura contém toda a informação da rede e é transmitida periodicamente para anunciar a sua presença na RTDSF, é constituída por um cabeçalho, um corpo de dados e uma verificação de redundância cíclica para validar a integridade de toda a estrutura [Digi12]. O cabeçalho inclui a morada MAC da origem e do destino dos dados, bem como informação relativa ao processo de comunicação [Digi12]. O corpo da mensagem tem vários outros tipos de informação, nomeadamente: o intervalo entre as aberturas de tempo de transmissão; a data e hora para permitir a sincronização; o identificador do conjunto de serviços (*Service Set Identifier - SSID*) que identifica a RTD [Batista13a].

Nas redes com mecanismos de envio de estrutura sincronizada “*beacon enabled*”, uma vez que usam aberturas de tempo de transmissão predefinidos, os seus módulos podem entrar em modo de suspensão entre transmissões diminuindo consideravelmente o consumo de energia, uma vez que diminuem os seus ciclos de trabalho [Benakila10].

As redes sem mecanismos de envio de estrutura sincronizada “*non-beacon enabled*” os recetores de informação têm de estar continuamente ativos requerendo um maior consumo energético [Benakila10].

Nas redes com mecanismos de envio de estrutura sincronizada “*beacon enabled*”, quanto maior for o tempo entre transmissões menor é o consumo energético dos módulos, mas aumenta a necessidade de controlar os tempos das transmissões de todos os módulos, uma vez que estes não podem transmitir ao mesmo tempo para o mesmo recetor, o que representa um aumento considerável de processamento, revelando um aumento dos custos de produção dos módulos [Benakila10]. Nas redes sem mecanismos de envio de estrutura sincronizada “*non-beacon enabled*”, a simplicidade de transmissão de dados permite a criação de redes heterogéneas com a existência de módulos que estão continuamente a receber transmissões e outros módulos que apenas transmitem quando estimulados externamente ou dentro de um esquema de tempos predefinidos, podendo entrar também em suspensão [Benakila10]. Neste tipo de redes os módulos necessitam de processamento reduzido, diminuindo consideravelmente os custos de produção. Vários autores estudaram as vantagens e desvantagens na implementação deste tipo de configurações, oferecendo várias soluções passando mesmo pela cooperação entre os dois tipos de configuração [Hanzalek10, Hwang10].

A norma IEEE 802.15.4 define dois tipos de nós na rede: módulo com funcionalidade total (*Full Functioning Device* - FFD) e módulo com funcionalidade reduzida (*Reduced Functioning Device* - RFD) [Batista13a].

O FFD pode comunicar com qualquer outro tipo de módulo, pode retransmitir mensagens de outros módulos, pode funcionar como sensor/atuador e pode funcionar como coordenador de toda a rede.

Os RFD têm recursos e requisitos de comunicação reduzidos, implicando uma capacidade de processamento reduzida, mas diminuindo consideravelmente os custos de produção. Este tipo de módulos têm de estar ligados a um FFD e não podem funcionar como coordenadores da rede, nem retransmitir mensagens de outros módulos. Os RFD são geralmente usados como sensores/atuadores.

A rede tem de ter pelo menos um FFD que funcionará como coordenador da rede, fazendo toda a gestão e identificação dos módulos, gerindo funcionalidades, nomeadamente a segurança e a topologia da rede. Cada dispositivo tem uma

identificação única de 64-bit mas poderá funcionar com uma segunda identificação mais curta de 16-bit dentro de uma determinada rede.

Existem dois tipos de topologia de rede permitida pela norma ZigBee: Ponto-a-Ponto e Estrela [Batista12e] ilustrado na Figura 5.1.

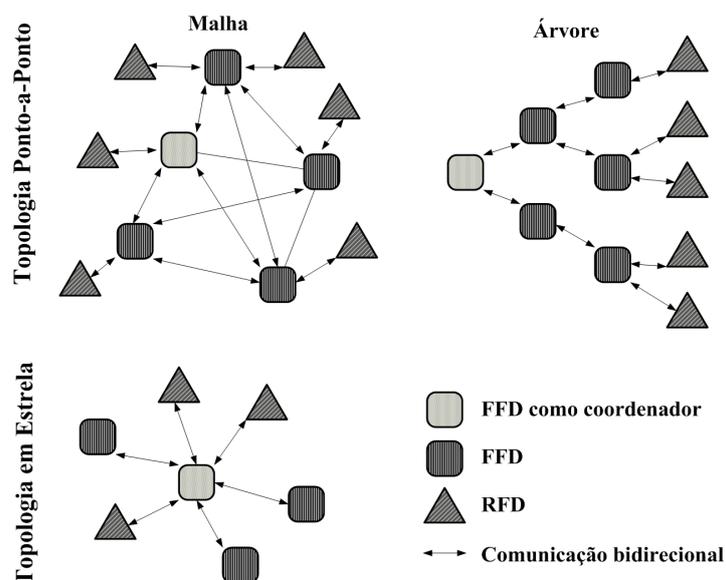


Figura 5.1 - Topologia de rede permitida pela norma ZigBee.

Na topologia de rede Ponto-a-Ponto não existem rotas de transmissão fixas ou infraestrutura preexistente, em vez disso todos os FFD participam no roteamento, i.e., encaminhamento e retransmissão de dados para outros módulos, sendo que os dados podem ter uma rota de transmissão dinâmica dependendo da disponibilidade de ligação, e passar por vários módulos antes de chegar ao seu destino (chamadas muitas vezes de redes “*ad-hoc*” ou “*multi-hop*”). Este tipo de topologia de rede permite criar redes em malha, onde qualquer FFD pode comunicar com qualquer outro FFD ou RFD, e onde as mensagens podem ser retransmitidas para outros módulos até chegar ao módulo destino que pode estar fora do alcance do módulo transmissor. Este tipo de redes permite a criação de redes complexas que se podem reorganizar e regenerar sempre que necessário. Se um módulo deixa de funcionar, a rede continua a transmitir as mensagens de dados uma vez que pode encontrar outra rota de transmissão. A desvantagem da topologia de rede em malha é a latência na transmissão de dados resultado da

retransmissão das mensagens de dados por vários módulos, uma vez que não existe uma rota predefinida de transmissão [Batista12e, Batista13a].

Também dentro do tipo de topologia de rede Ponto-a-Ponto existe a possibilidade de criar uma rede em *Árvore*, que consiste na criação inicial de uma rede em malha onde o FFD que coordena a rede valida os melhores percursos de transmissão de dados entre módulos e define rotas estáticas. Neste tipo de rede o coordenador é a raiz da rede e tem ligado a si múltiplos módulos como ramos, que por sua vez também podem ter ligados a si outros múltiplos módulos como ramos de uma *árvore*, terminando nos módulos de fim da linha geralmente RFD, que são as folhas da rede em *Árvore*. O coordenador inicia a rede como a raiz e a seguir os nós são anexados à rede através de relações pai/filho. Este tipo de rede reduz o número de módulos que contribuem para a retransmissão das mensagens de dados, permitindo uma redução substancial dos tempos de transmissão de uma mensagem de dados e a redução de consumo de energia dos módulos.

No tipo de topologia de rede em *Estrela*, o coordenador da rede é o módulo central ao qual todos os outros módulos se ligam.

A norma ZigBee é definida pela ZigBee Alliance sobre as camadas PHY e MAC da norma IEEE 802.15.4, definindo e criando as camadas: Rede e Segurança; Estrutura Aplicacional; e Perfis Aplicacionais. A pilha de camadas definida pela norma ZigBee [ZigBee07a, Batista13a] é apresentada na Figura 5.2.

Definido pelo Fabricante	Perfis Aplicacionais
Norma ZigBee Alliance	Estrutura Aplicacional
	Camada de Rede e Segurança
Norma IEEE 802.15.4	Camada MAC
	Camada PHY

Figura 5.2 - Camadas definidas pelas normas IEEE 802.15.4 e ZigBee.

A camada de Rede e Segurança é responsável pela criação e gestão da rede, pela gestão da entrada e saída de nós da rede, por suportar a criação das diferentes topologias de rede, por gerir o roteamento de mensagens de dados, pela reparação da rede e reconfigurações automáticas, e por gerir as medidas de segurança.

A camada de Estrutura Aplicacional providencia uma interface entre todas as outras camadas e a última camada de mais alto nível, i.e., a camada de Perfis Aplicacionais. A camada de Perfis Aplicacionais é definida pelo fabricante. Isto significa que os fabricantes produzem os seus produtos interligando os seus sensores e atuadores através da camada de Estrutura Aplicacional às camadas inferiores definidas pelas normas IEEE 802.15.4 e norma ZigBee.

A ZigBee Alliance com o objetivo de facilitar o trabalho dos fabricantes tem desenvolvido perfis aplicacionais, dos quais se destacam: o ZigBee Smart Energy, o ZigBee Home Automation, o ZigBee Building Automation, o ZigBee Health Care, o ZigBee RF4CE, o ZigBee Telecom Services (internet das coisas, serviços de informação, pagamentos móveis), o ZigBee Industrial Control, o ZigBee Input Device (substituição de periféricos ligados por cabo ou Bluetooth), o ZigBee 3D Sync (visionamento 3D), o ZigBee Retail.

Na norma ZigBee existem quatro tipos de módulos [Batista13a]:

O coordenador ZigBee – é um FFD que coordena a rede e forma a raiz, pode também fazer a ponte com outros tipos de redes, gere a segurança da rede e as suas chaves de encriptação e tem a capacidade de guardar informação sobre a rede;

O roteador ZigBee – é um FFD que apesar de poder ter sensores e atuadores ligados a si, as suas capacidades vão para além disso, sendo capazes de retransmitir as mensagens de outros módulos funcionando como um roteador;

O módulo final ZigBee – é um RFD ao qual se conectam sensores e atuadores e pode entrar em modo de suspensão a maior parte do tempo diminuindo consideravelmente o consumo de energia; não pode retransmitir mensagens de dados de outros módulos, sendo que a sua capacidade de processamento é muito reduzida, significando que são mais baratos de produzir;

O módulo ZigBee Green Power – é um RFD sem ligação a uma fonte de energia que não está anunciado na rede. Este é um novo tipo de módulo anunciado nas últimas atualizações da norma ZigBee Pro 2012 [ZigBee12]. Este tipo de módulo consegue comunicar com os módulos roteadores ZigBee que enviam as mensagens de dados em seu nome. A energia deste tipo de módulos vem geralmente do movimento ou da interatividade que é tida com os aparelhos, i.e., energia de carregar num interruptor, sensores de luz que usam a luz como fonte de energia, sensores de temperatura que aproveitam as diferenças de temperatura para gerar energia, sensores de vibração que usam a própria vibração para gerar energia.

### *ZigBee e Outras Tecnologias sem fios*

Uma preocupação existe sobre a coexistência de redes sem fios da norma ZigBee com outras tecnologias já existentes no mercado uma vez que esta norma usa uma frequência de baixa energia [Gungor10, Gungor11]. Os módulos construídos com a norma ZigBee usam rádios digitais pequenos, baratos e de baixo consumo energético, para a criação de RTDSF seguras com baixa taxa transmissão de dados. Estes módulos são adequados para a criação de redes de sensores e controladores que apenas precisam de transmitir pequenas quantidades de dados de cada vez e necessitam de operar durante longos períodos de tempo sem manutenção.

Nos testes de campo apresentados a seguir, não foi encontrada qualquer interferência entre normas de criação de redes sem fios com a norma ZigBee, apesar de afirmado em alguns trabalhos [Yi11]. A própria ZigBee Alliance apresentou um estudo expondo a coexistência sem problemas da norma ZigBee com outras normas [ZigBee07a].

Embora a norma ZigBee tenha uma taxa de transmissão de dados muito baixa, para redes de sensores e controladores essa velocidade é suficiente, uma vez que a quantidade de dados a transmitir de cada vez é muito baixa.

O baixo consumo energético dos módulos ZigBee é uma característica importante durante a operação permitindo no caso de utilização de baterias como fonte de energia elevar a sua duração a mais de 1000 dias. Aliando esta característica à capacidade de criar RTDSF de 65000 nós, onde os nós podem participar na retransmissão de mensagens de outros nós estendendo sobremaneira a área de transmissão, posicionam os

módulos ZigBee como uma das melhores soluções para implementação de RTDSF na REI [Drake10, Fadlullah11, ZigBee07b, ZigBee07c].

Uma comparação entre várias normas de RTD é apresentada na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Comparação entre várias normas para a criação de RTD

<b>NOME</b>	<b>ZIGBEE (802.15.4)</b>	<b>GSM/GPRS</b>	<b>WI-FI (802.11B)</b>	<b>BLUETOOTH (802.15.1)</b>
Aplicação	Monitorização e controlo	Transmissão de dados e voz	Correio eletrónico, vídeo, internet	Ligação de periféricos
Recursos de sistema	4 kB–32 kB	16 MB+	1 MB+	250 kB+
Duração de bateria (Dias)	100 a 1000+	1 a 7	0.5 a 5	1 a 7
Tamanho da rede (nós)	+65000	1	32	7
Taxa de transmissão (kB/s)	20-250	64-128+	11000+	720
Latência (segundos)	< 0.030	-	< 0.003	< 10
Área de transmissão (metros)	1-100+	1000+	1-100	1-10+
Métricas para sucesso	Estável, baixo consumo energético, baixo custo	Área de transmissão, qualidade	Velocidade, flexibilidade	Conveniência, Custo

### *ZigBee Gateway*

Quando de um ponto de vista estratégico existe a necessidade de ligar a RTDSF ZigBee a outros tipos de redes com e sem fios, esta deve ter a capacidade de comunicar sem problemas e sem criar brechas de segurança. A ZigBee Alliance oferece esta capacidade através da designada ZigBee Gateway [ZigBee10].

O ZigBee Gateway permite a ligação de uma grande variedade de serviços, aplicações e dispositivos à RTDSF ZigBee e aos seus módulos sem lhe dar o acesso direto. O ZigBee Gateway apresenta a RTDSF ZigBee, os seus módulos e protocolos de comunicação numa variedade de formatos de comunicação. Todos os elementos da RTDSF ZigBee estão isolados e são apresentados às redes externas apenas como abstrações dos equipamentos reais. Os comandos e mensagens enviadas são traduzidos pelo ZigBee Gateway e enviados em seu nome [ZigBee10].

Esta transparência de comunicação entre as redes sem fios ZigBee com outras redes permite a implementação da norma ZigBee em arquiteturas de dados já existentes e a ligação com serviços já existentes por exemplo na internet.

O ZigBee Gateway define uma Interface Aplicacional Programável (*Application Programming Interface - API*) em duas camadas para a troca de dados e comandos entre módulos ZigBee e dispositivos e serviços baseados no protocolo internet (*Internet Protocol - IP*) [ZigBee10]. Especifica um conjunto de funções abstratas que são independentes de protocolos de comunicação e que formam o meio de exposição da própria RTDSF ZigBee e seus módulos.

O ZigBee Gateway define uma API de funções de chamada remota (*Remote Function Call - RFC*) que permite a gestão das funcionalidades da norma ZigBee oferecendo serviços de segurança. De modo a facilitar a implementação e de aproveitar os conhecimentos já existentes no mercado, os RFC são disponibilizados em três protocolos de comunicação amplamente usados na internet: o Protocolo de Acesso de Objeto Único (*Single Object Access Protocol - SOAP*); a Transferência de Estado Representacional (*Representational State Transfer - REST*); o Protocolo de Invocação Remoto Genérico (*Generic Remote Invocation Protocol - GRIP*) [ZigBee10].

Assim o ZigBee Gateway oferece a capacidade de ligar uma RTDSF ZigBee e seus módulos a outros tipos de redes e serviços externos, oferecendo uma forma simples, segura e transparente de comunicação, troca de dados, controlo e gestão.

## 5.3 Módulos Desenvolvidos

Os módulos desenvolvidos para testar a rede ZigBee na REI necessitam de satisfazer um conjunto de características, nomeadamente a capacidade de criar rapidamente uma rede em malha, a facilidade na passagem de uma rede em malha para uma rede em árvore, a capacidade de se auto regenerar, a segurança, a facilidade de instalação independentemente da funcionalidade ou local de instalação.

Estas características são definidas no protocolo ZigBee, tornando esta norma como uma solução viável e estável na criação de redes de informação que vão ligar os vários componentes da REI. Os módulos escolhidos e desenvolvidos para a elaboração e avaliação em testes de campo no sentido de avaliar a criação dos RTDSF numa REI implementam a norma ZigBee. Os módulos ZigBee escolhidos foram os Digi XBee ZB cujo custo tem o valor de \$17 apresentados na Tabela 5.2.

Os módulos ZigBee têm três modos de operação:

Modo Transparente – o módulo funciona como uma porta de serie, como um cabo invisível, todos os dados recebidos do pino #3 “*DIN*” são transmitidos ao módulo ZigBee configurado para receber os dados, sendo este o modo por defeito dos módulos ZigBee. Os dados recolhidos pelo módulo ou os valores dos seus pinos I/O são enviados pelo pino #2 “*DOUT*” [Digi12];

Modo Comando – com este modo é possível fazer uma grande variedade de comandos AT (*Attention*) e são iniciados enviando o comando “+++” para o módulo. Quando se envia um comando o módulo responde com a resposta “OK”, reconhecendo a receção do comando [Digi12];

Modo API – este é o modo com mais capacidade mas o mais complexo de ser usado. Os dados e comandos são enviados em estruturas predefinidas de mensagens [Digi12].

Tabela 5.2 - Comparação entre módulos ZigBee

	<b>XBee ZB</b>	<b>XBee-PRO ZB</b>	<b>XBee-PRO 868</b>
<b>Alcance entre paredes</b>	40 m	90 m	550 m
<b>Alcance em linha de vista</b>	120 m	1500 m / 3200 m	40 km
<b>Taxa Transmissão</b>	250 kbps	250 kbps	24 kbps
<b>Frequência</b>	2.4 GHz	2.4 GHz	868 MHz
<b>Energia Transmissão</b>	1.25 mW / 2 mW	10 mW / 63 mW	1 mW / 315 mW
<b>Encriptação</b>	128-bit AES		
<b>Nº de Canais</b>	16	15	1
<b>Transmissão Corrente</b>	35 mA / 45 mA	205 mA	500 mA
<b>Receção Corrente</b>	38 mA / 40 mA	47 mA	65 mA
<b>Topologia Rede</b>	Malha	Malha	Estrela
<b>Preço</b>	\$17	\$28	\$69
<b>Regiões Permitidas</b>	Europa; USA; Austrália; Canada; Japão;	Europa; USA; Austrália; Canada; Japão;	Europa

A estrutura de mensagens no modo API é ilustrada na Figura 5.3.

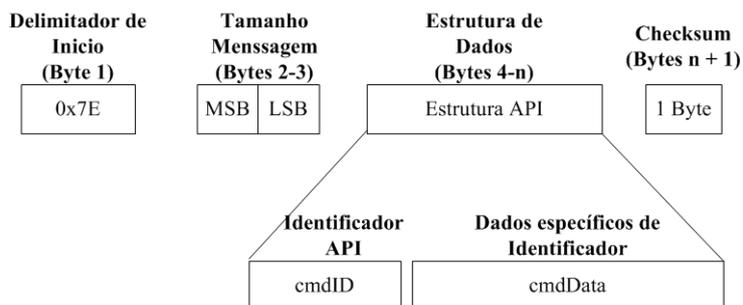


Figura 5.3 - Estrutura de mensagem do modo API.

O modo Transparente é o mais simples de usar, especialmente quando se tem de lidar com um número reduzido de módulos. Mas quando se gere a atividade de um grande número de módulos, este não é o mais rápido nem o mais prático, uma vez que os módulos têm de ser configurados usando o modo AT e depois voltar a mudar o modo de operação do módulo para modo Transparente para enviar os dados. Se os módulos estiverem ligados a uma placa de circuitos impressos com processamento este é o modo mais simples de comunicação, uma vez que é possível construir a estrutura de dados desejada e a própria placa de circuitos impressos com processamento pode fazer os comandos AT que sejam necessários.

O melhor modo de operação dos módulos de ZigBee e o mais aconselhável é o modo API. É o modo que permite mais facilmente integrar produtos com outros já existentes no mercado. Usando uma estrutura de mensagem apropriada e definida pelo fabricante é possível fazer comandos AT, configuração de módulos e receção e envio de dados. Cada envio de mensagem recebe uma confirmação de receção. Em cada transmissão de dados dentro do cabeçalho existe a possibilidade de receber a informação da qualidade do sinal de receção dos módulos designado por indicador de força de sinal de receção (*Received Signal Strength Indicator - RSSI*), importante quando se faz uma avaliação da colocação de um módulo.

Na análise da implementação de módulos ZigBee na REI, alguns fatores importantes são a qualidade do sinal em cada módulo, a facilidade com que os módulos numa rede recuperam de falhas e se a rede se regenera quando está sobre a influência de falhas de módulos ou interferências.

Vários tipos de módulos foram construídos:

Módulo ZigBee coordenador – ilustrado na Figura 5.4 configurado com um módulo XBee ZB a funcionar como coordenador, uma placa de circuitos impressos Arduino para processamento de dados, um LCD para visualização de dados, nomeadamente o RSSI, um díodo LED vermelho para saber se o módulo ZigBee tem energia, um díodo LED amarelo para saber se uma rede foi criada;

Módulo final ZigBee – ilustrado na Figura 5.5 configurado com um módulo XBee ZB a funcionar no mesmo canal e PAN (*Personal Area Network*) do coordenador, uma placa de circuitos impressos Arduino para processamento de dados, um LCD para visualização de dados, nomeadamente o RSSI, um díodo LED vermelho para saber se o módulo ZigBee tem energia, um díodo LED amarelo para saber se conseguiu entrar na rede criada pelo coordenador;

Módulo ZigBee Sensor – ilustrado na Figura 5.6 configurado com um módulo XBee ZB a funcionar no mesmo canal e PAN do coordenador, um díodo LED vermelho para saber se o módulo ZigBee tem energia, um díodo LED amarelo para saber se conseguiu entrar na rede criada pelo coordenador, um sensor de luminosidade. Este módulo de ZigBee está também configurado para enviar ao coordenador os valores obtidos no pino #20 do sensor fotoelétrico a cada segundo;

Módulo ZigBee de roteamento – ilustrado na Figura 5.7 configurado com um módulo XBee ZB a funcionar no mesmo canal e PAN do coordenador, um díodo LED vermelho para saber se o módulo ZigBee tem energia, um díodo LED amarelo para saber se conseguiu entrar na rede criada pelo coordenador. Este é um módulo que serve apenas para testar a criação de redes em malha e testar a rapidez de regeneração automática das redes de dados. Estes módulos foram usados para fazer de retransmissores de mensagens de dados de outros módulos quando estes estavam para além da distância física máxima ou suportavam grandes interferências no sinal de transmissão de dados.

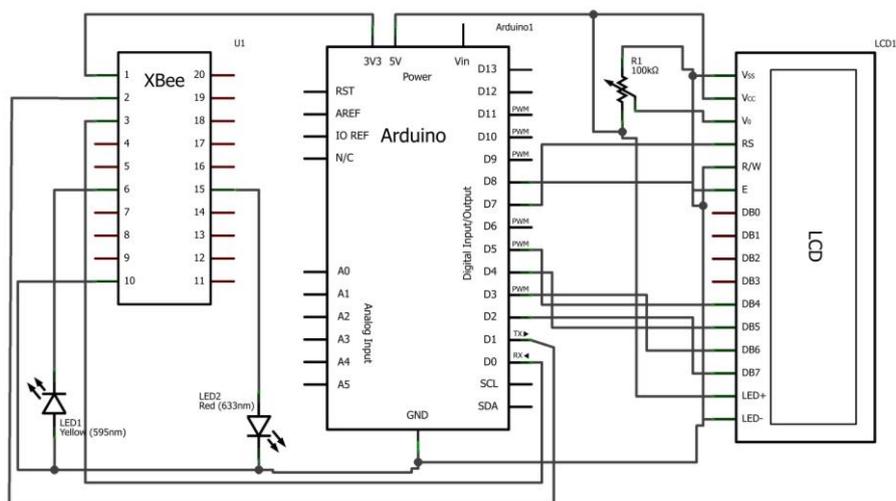


Figura 5.4 - Módulo ZigBee coordenador.

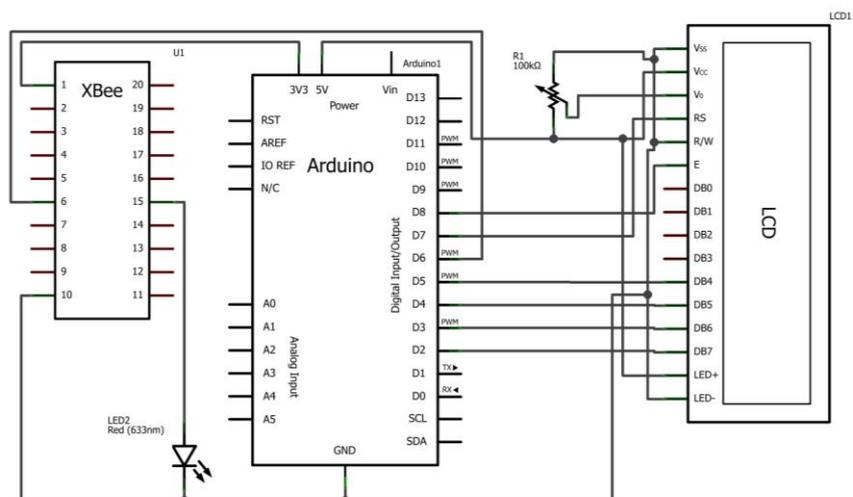


Figura 5.5 - Módulo final ZigBee.

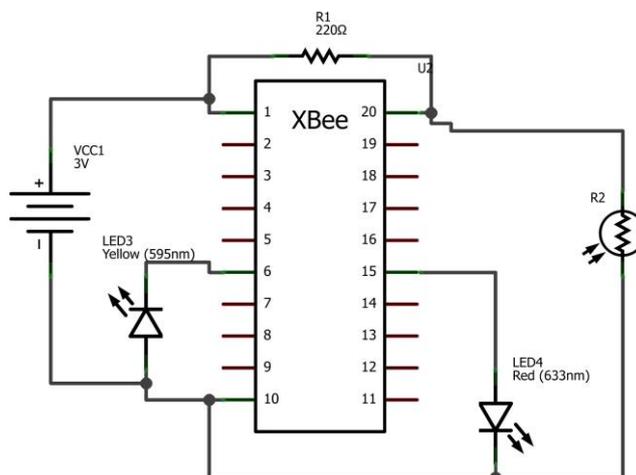


Figura 5.6 - Módulo ZigBee Sensor.

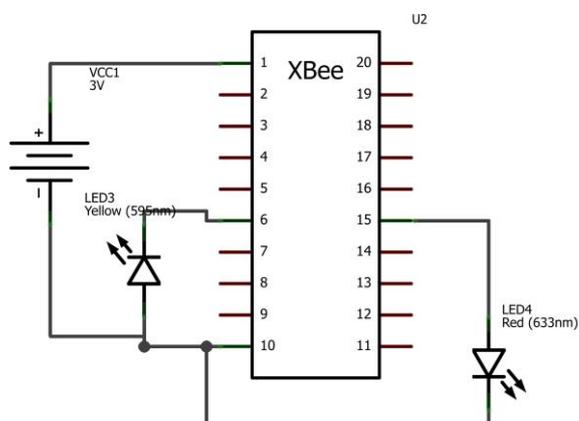


Figura 5.7 - Módulo ZigBee de roteamento.

## 5.4 Testes de Campo ZigBee

Para a criação de RTDSF na REI foram realizados testes de campo em habitação, em contexto urbano, em um dos sistemas fotovoltaicos pertencente ao SMAS de Vila Franca de Xira e em um aerogerador do parque eólico da Gardunha pertencente ao Grupo GENERG.

Duas questões se levantam na instalação de um módulo de ZigBee: saber se a informação chega ao seu destino; ou se chega sem erros de dados ou falhas de transmissão. Para os testes realizados em meio urbano a informação do RSSI e a dissipação de informação foram analisadas. Os módulos de ZigBee da Figura 5.4 e da Figura 5.5 foram configurados para operar em modo API, tendo a capacidade de entregar a informação de RSSI na estrutura da mensagem enviada e permitindo avaliar se a mensagem chega sem erros através do último byte da estrutura de dados que contém a soma de verificação “*checksum*”.

O módulo ZigBee coordenador fica numa posição fixa e os módulos finais ZigBee são posicionados em diferentes locais. Os dados de RSSI são recolhidos tanto no lado do módulo ZigBee coordenador como no módulo final ZigBee. Quando existe a necessidade de melhorar a qualidade do sinal de transmissão e receção dos módulos ZigBee, ou ainda, existe uma dissipação de dados, são introduzidos os módulos ZigBee de roteamento.

Os valores RSSI recolhidos nos módulos ZigBee são referentes apenas à qualidade do sinal entre o módulo em avaliação e o módulo ao qual este se conecta. Assim, se existirem vários módulos a rotear a mensagem até ao destino final, apenas conta a qualidade do sinal entre o módulo em avaliação e o módulo de roteamento ao qual se conecta diretamente.

O módulo ZigBee coordenador está ligado a uma placa de circuitos impressos Arduino com capacidade de processamento. A placa Arduino inicializa o processamento do envio de mensagens ao módulo final ZigBee numa base temporal predefinida de um segundo entre mensagens. Depois de receber a mensagem de validação da receção de dados correta por parte do módulo final ZigBee, a placa Arduino recolhe o RSSI e

guarda esse valor. O valor de RSSI médio é apresentado no ecrã LCD, sendo calculado sobre uma base predefinida de amostras de valores de RSSI.

O módulo final ZigBee está ligado a uma placa Arduino com capacidade de processamento. A placa Arduino recolhe o valor de RSSI pelo pino #6 do módulo ZigBee, processa os dados e apresenta o resultado no ecrã LCD.

Os módulos ZigBee de roteamento não têm qualquer capacidade de processamento, limitando a sua funcionalidade apenas a reenviar as mensagens de outros módulos.

Os testes em contexto urbano foram feitos sem necessidade de recorrer a módulos intermédios para que o valor de RSSI obtido seja o da ligação direta entre o módulo ZigBee coordenador e o módulo final ZigBee. Várias localizações na instalação foram usadas no sentido de avaliar a interferência na REI em contexto urbano.

#### *Modelo Matemático*

Nos lugares sem obstrução, o sinal de rádio decai à velocidade do gradiente de perda de percurso  $\beta$ . Para uma potência de transmissão  $P_t$ , a uma determinada distância  $d$  em metros, a força do sinal  $ss$  é dada por:

$$ss = P_t d^{-\beta} \quad (5.1)$$

O sinal propagado em todas as direções e a densidade da força do sinal é caracterizada por uma esfera de raio  $d$  onde o total do sinal irradiado é dividido pela área da esfera ( $4\pi d^2$ ). A relação entre a potência de transmissão  $P_t$  e a potência de receção  $P_r$  é dada pela expressão de transmissão de Friis sobre condições ideais no espaço de transmissão dada por:

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left( \frac{\varphi}{4\pi d} \right)^2 \quad (5.2)$$

sendo  $G_t$  e  $G_r$  respetivamente os ganhos da antena do transmissor e da antena do recetor,  $d$  a distância entre o transmissor e o recetor,  $\varphi$  o comprimento de onda do

transportador, definido pela escolha do canal dos módulos de ZigBee. Definindo uma potência de referência  $P_{ref} = 1 \text{ mW}$  [Blumenthal07] (5.2) é dada por:

$$\frac{P_{ref}}{P_t} = G_t G_r \left( \frac{\varphi}{4\pi} \right)^2 \quad (5.3)$$

Considerando (5.2)  $P_r$  é dado por:

$$P_r = \frac{P_{ref}}{d^2} \quad (5.4)$$

Em dispositivos incorporados, a intensidade do sinal recebido é convertido para um valor de RSSI, que é definido como a relação da potência recebida para a potência de referência e que é dada em dBm, uma abreviatura para a relação de potência em decibéis da potência medida com referência a um mili-watt. Assim, o RSSI [Blumenthal07] é dado por:

$$RSSI = 10 \log \frac{P_r}{P_{ref}} \quad (5.5)$$

Nos módulos ZigBee é possível obter os valores de RSSI de um determinado módulo recorrendo a comandos AT, que retorna o valor de RSSI em -dBm do último pacote recebido. É também possível ler o valor de RSSI pelo pino #6 do módulo ZigBee ou em modo API, recolher o valor do módulo de destino na mensagem de receção de comando.

O valor final de RSSI é recolhido tanto no módulo ZigBee coordenador como no módulo ZigBee final, é dado por:

$$\overline{RSSI} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m RSSI_i \quad (5.5)$$

sendo  $m$  o número de amostras de valores de RSSI lidas, sendo posteriormente calculado o seu valor médio [Corral12a]. Esta metodologia é chamada de modelo de valor médio estatístico (*Statistical Mean Value Model*) [Jianwu09].

De salientar que nos módulos ZigBee para além do valor de RSSI apenas refletir a potência do sinal entre os módulos ligados diretamente entre si, também apresenta o valor de RSSI da última mensagem recebida. Assim, é necessário durante os testes fazer uma transmissão periódica de mensagens para obtenção de valores atualizados.

Um fluxograma das transmissões de dados, recolha de valores de RSSI e tratamento de dados quer do módulo ZigBee coordenador, quer do módulo ZigBee final, é ilustrado na Figura 5.8.

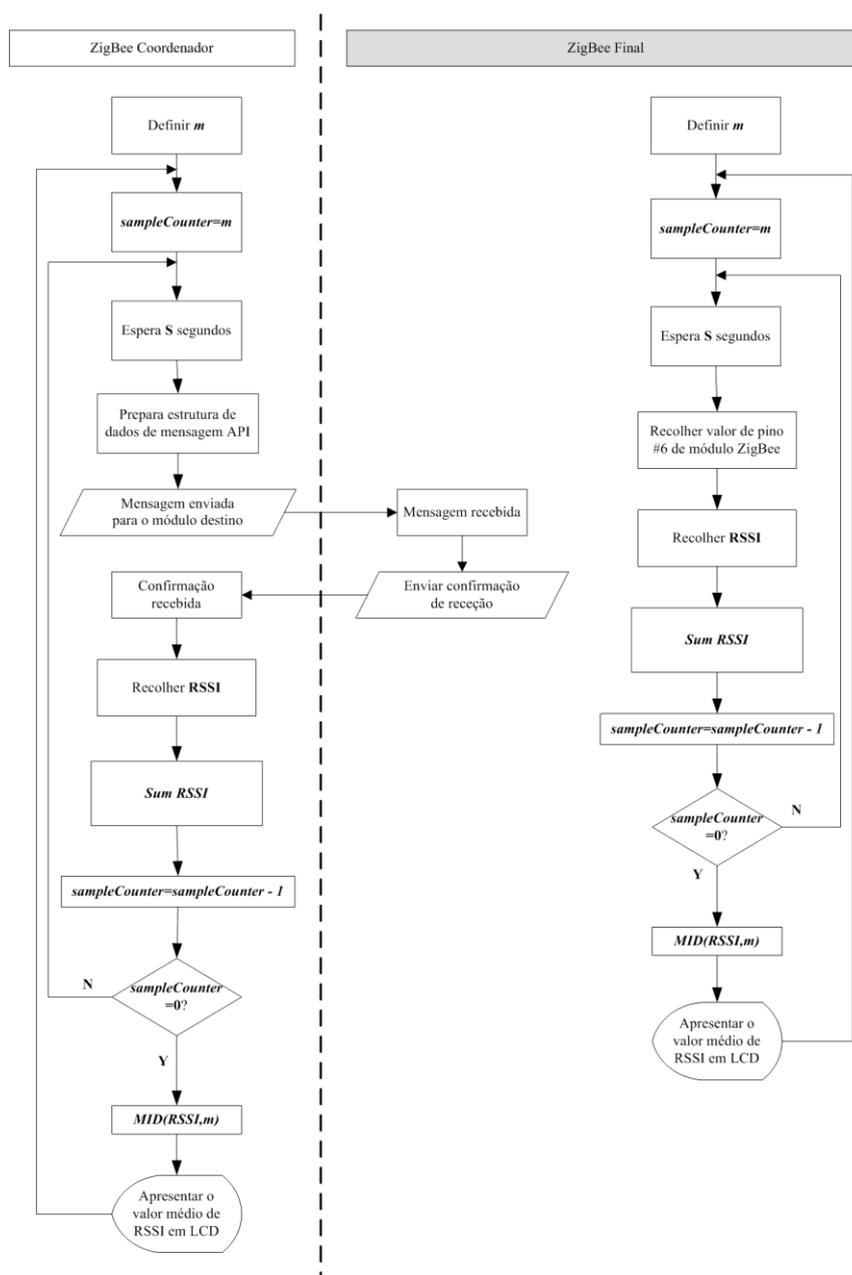


Figura 5.8 - Cálculo de RSSI nos módulos ZigBee Coordenador e Final.

*Testes de implementação ZigBee em habitação em contexto urbano*

Dois cenários de teste de sinal em habitação em contexto urbano para os módulos ZigBee foram realizados: o módulo ZigBee coordenador é colocado no quadro elétrico no sentido de transmitir para o distribuidor dados relativos aos valores dos consumos de energia elétrica [Batista12e] apresentados na Figura 5.9; o módulo ZigBee coordenador é colocado junto ao ponto de acesso à internet, para que o consumidor consiga monitorizar e controlar os seus consumos de energia e implementar serviços de domótica [Batista12f] apresentados na Figura 5.10.



Figura 5.9 - Controla dos consumos de energia da habitação.

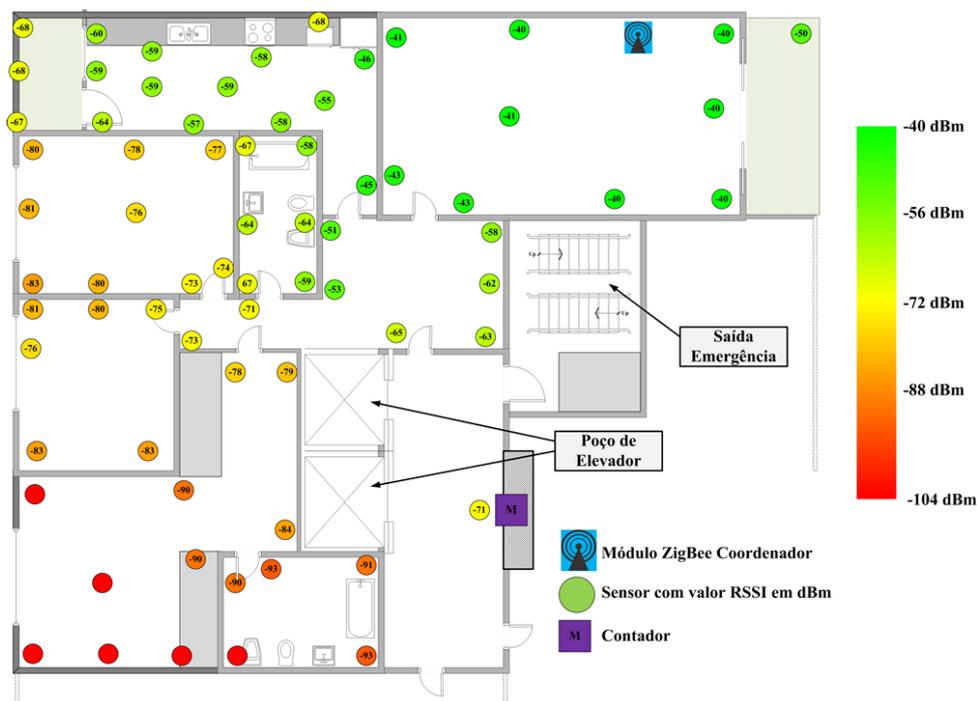


Figura 5.10 - Controlo dos consumos de energia e serviços de domótica.

O módulo ZigBee coordenador é colocado no quadro elétrico da habitação, num cenário com o objetivo de o distribuidor de energia elétrica poder conhecer e controlar os hábitos de consumo do seu cliente apresentado na Figura 5.9.

Os dados do consumo de energia seriam enviados pelo contador de energia elétrica instalado fora de casa [Corral12b] usando uma rede ZigBee coordenada pelo módulo ZigBee coordenador. Os contadores de energia elétrica podem estar inseridos dentro de uma outra rede ZigBee. A rede ZigBee pode ter até 65000 nós. A rede ZigBee pode recolher dados dos hábitos de consumo, controlar os eletrodomésticos e o comportamento do consumidor. O contador pode comunicar por interface própria com o módulo ZigBee coordenador da habitação, interferindo no controlo dos restantes módulos ZigBee também da habitação.

O módulo ZigBee coordenador é colocado junto do ponto de acesso à internet, num cenário onde só o consumidor tem acesso aos dados do consumo energético dos seus aparelhos elétricos, apresentado na Figura 5.10. Neste cenário o módulo ZigBee coordenador pode ter a capacidade de usar o ZigBee Gateway, permitindo ao consumidor usufruir de serviços existentes na internet que lhe permitam visualizar e

controlar o seu consumo energético, ou até mesmo aceder a um serviço completo de domótica da sua habitação.

Em ambos os cenários apresentados na Figura 5.9 e na Figura 5.10 não foram usados módulos ZigBee de roteamento. Assim, a informação de RSSI representa a comunicação direta entre o módulo ZigBee coordenador e módulo ZigBee final.

Em ambos os cenários a potência do sinal é baixa podendo mesmo ser nula, devido ao posicionamento do módulo ZigBee coordenador. Assim, para aumentar a potência do sinal é proposta a utilização de um módulo ZigBee de roteamento no meio da casa, ou um módulo ZigBee coordenador com uma potência de sinal superior.

Os módulos ZigBee de roteamento nunca podem entrar em ciclo de suspensão, mantendo sempre a sua atividade para receber e retransmitir as mensagens de outros módulos.

Os resultados dos testes de sinal na habitação em contexto urbano apresentam um comportamento coerente com o anunciado pelo fabricante dos módulos XBee utilizados e com os requisitos da norma ZigBee.

#### *Implementação ZigBee em sistemas descentralizados*

Os módulos usados nos testes de campo para a implementação da norma ZigBee em sistemas descentralizados de geração de energia foram: o módulo ZigBee coordenador apresentado na Figura 5.11; o módulo ZigBee sensor apresentado na Figura 5.12; o módulo ZigBee de roteamento apresentado na Figura 5.13.

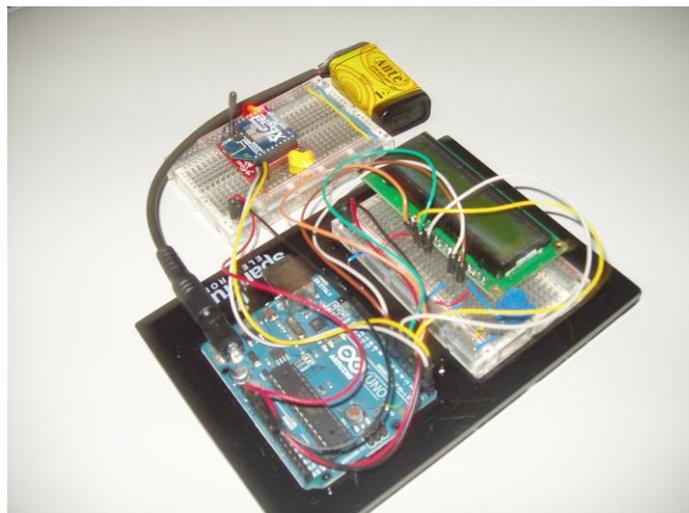


Figura 5.11 - Módulo ZigBee coordenador.

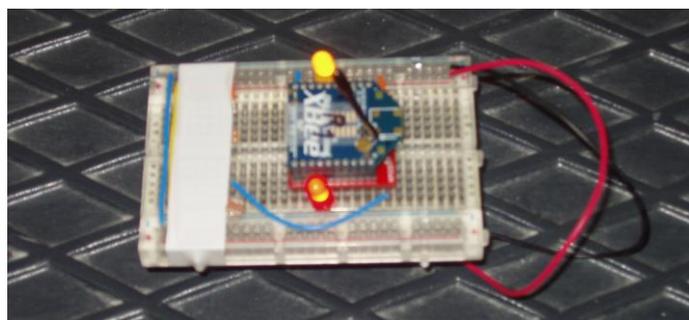


Figura 5.12 - Módulo ZigBee sensor.

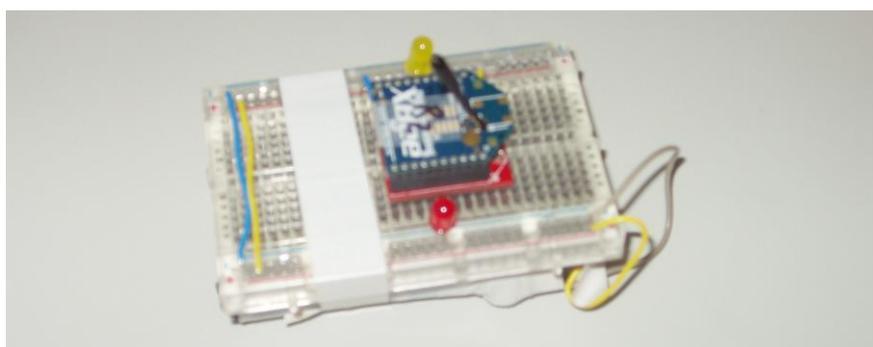


Figura 5.13 - Módulo ZigBee de roteamento.

Os testes de campo foram realizados no sentido de: a análise da latência durante a recuperação de falhas da RTDSF ZigBee; a velocidade de criação da RTD; a distância máxima entre módulos para avaliar a entrega de informação sem falhas; a facilidade da

incorporação de módulos de roteamento numa RTD ZigBee existente; o estudo de interferências no sinal produzido por componentes da rede elétrica; e a facilidade de posicionamento dos módulos.

O módulo ZigBee sensor foi configurado para enviar a cada segundo diretamente ao módulo ZigBee coordenador os valores de uma célula fotoelétrica conectada ao pino #20 configurado como entrada analógica. O módulo ZigBee coordenador foi configurado para receber os valores do módulo ZigBee sensor e apresentar em um LCD. Dois módulos ZigBee de roteamento foram configurados apenas para fazer o roteamento de mensagens. Estes módulos apenas são usados quando existir interferências na receção de dados do módulo ZigBee sensor. Todos os módulos operam com bateria própria [Batista12d].

O primeiro teste foi feito num dos sistemas fotovoltaicos da empresa SMAS de Vila Franca de Xira [Batista13a]. A empresa tem vários reservatórios, cada um com um sistema fotovoltaico constituído por dezoito painéis fotovoltaicos de Si policristalino com sistema de rastreamento solar. Cada painel fotovoltaico é do modelo SM-220PA8 da S-Energy com um valor de potência de 220 Wp. O inversor usado na ligação do sistema fotovoltaico à rede elétrica é um SMA Sunny Boy SB-3800. O local dos testes com o sistema fotovoltaico, perto do reservatório de água é apresentado na Figura 5.14.



Figura 5.14 - SMAS Vila Franca de Xira - local dos testes.

O envio da informação resultante da monitorização do sistema fotovoltaico atualmente utilizado pela empresa é o seguinte: os dados são enviados pelo inversor para um serviço na internet que permite a monitorização através de um portal.

No local de testes vários parâmetros podem ser monitorizados, nomeadamente: temperatura dos painéis; vários parâmetros da funcionalidade do inversor; sistema de rastreamento solar, vibração devida ao vento; velocidade e direção do vento; intensidade e posicionamento solar. Outros parâmetros relacionados com a operabilidade dos sistemas de saneamento e distribuição de água, nomeadamente o nível de água do reservatório e controlo do bombeamento podem ser monitorizados.

Todos estes componentes podem ser monitorizados, geridos e controlados remotamente recorrendo à utilização de uma RTDSF usando a norma ZigBee.

Um teste em distância foi realizado para medir a interferência de vários componentes no percurso de transmissão: painéis fotovoltaicos; torre; inversor; estrutura metálica. Não foi detetada qualquer interferência; todas as mensagens transmitidas ao módulo ZigBee coordenador chegaram sem problemas.

Outros testes de interferência foram feitos agora com os componentes envolvidos na distribuição de água, nomeadamente: reservatório; e quarto das bombas de água. Numa distância máxima do local de 50 m, nenhuma interferência foi encontrada à exceção de quando o reservatório estava no percurso de transmissão do sinal. Esta interferência foi rapidamente ultrapassada adicionando um módulo ZigBee de roteamento.

O quarto das máquinas está instalado a um nível abaixo da superfície, sendo instalado o módulo ZigBee sensor no nível mais baixo do quarto das máquinas, nenhuma interferência foi encontrada à exceção de quando o reservatório estava no percurso de transmissão. Esta interferência foi também ultrapassada adicionando um módulo ZigBee de roteamento à entrada do quarto das máquinas.

É proposto que no local de testes se recorra à utilização de apenas um módulo ZigBee de roteamento no topo do reservatório ou à entrada do quarto das máquinas. Este módulo ZigBee de roteamento pode estar ligado a um sensor de nível de água ou a um sensor de intrusão.

O segundo teste foi realizado no parque eólico da Gardunha, Grupo GENERG [Batista13a]. O parque eólico é constituído por cinquenta e sete aerogeradores ENERCON E82 e E70 de 2 MW cada, numa capacidade instalada de 114 MW com uma produção anual de energia elétrica de 277 GWh. Este parque eólico vai ser estendido em mais 25 MW de capacidade instalada. O local de testes no parque eólico da Gardunha é apresentado na Figura 5.15.



Figura 5.15 - Parque eólico da Gardunha - Grupo GENERG.

Foram realizados testes de distância para medir a interferência de vários componentes do parque no percurso de transmissão de dados, no interior da casa de controlo da subestação, sendo os níveis de tensão na subestação da ordem dos 150 kV/30 kV. Nenhuma interferência foi encontrada mesmo quando a um lateral da subestação estava no percurso de transmissão. Dentro da casa de controlo não houve a necessidade de usar módulos ZigBee de roteamento.

O acesso à casa de controlo é feito através de uma porta metálica reforçada. Quando se faziam testes de interferência entre o interior da casa de controlo e o exterior, não foi encontrada qualquer interferência à exceção de quando o módulo ZigBee estava atrás da porta metálica. A porta metálica impediu a propagação do sinal por completo. Assim, é proposto a colocação de um módulo ZigBee de roteamento na parede ao lado da porta metálica para ultrapassar a interferência no sinal.

Nos ensaios realizados no exterior, mas na zona da subestação foi encontrada interferência considerável afetando a potência do sinal tal como reportado em [Shan11], assim, para melhorar a potência do sinal foi necessário recorrer a vários módulos ZigBee de roteamento. Através da informação fornecida pelos técnicos do Grupo GENERG que nos acompanhavam, também nos cabos de rede de dados instalada no local existe uma grande interferência na transmissão dos dados resultante dos níveis de tensão 150 kV/30 kV na subestação. É proposto a colocação de módulos ZigBee de roteamento para aumento da potência do sinal entre módulos ultrapassando as interferências encontradas no sinal.

Os módulos ZigBee usados nos testes são de baixo custo usando uma energia de transmissão muito baixa. É proposto em alternativa para controlo de componentes na subestação a utilização de módulos ZigBee com energia de transmissão mais altas e antenas que permitam maiores ganhos.

Os testes continuaram no restante parque eólico não existindo qualquer interferência, sendo que os módulos cumpriam com as características de alcance em linha de vista apresentadas pelo fabricante de 120 m. Apenas era visível alguma interferência quando os módulos estavam colocados tendo a subestação no percurso de transmissão.

Não houve interferências quando os módulos ZigBee foram colocados dentro das torres dos aerogeradores. A instalação dos módulos ZigBee perto dos componentes eletrónicos dos aerogeradores não sofreram interferências, nem por sua vez geraram interferências aos mesmos.

Mesmo tendo em conta que os módulos ZigBee usados nos testes de campo são os de menor custo existente no mercado e portanto com menos capacidade de transmissão, pode ser afirmado que a norma ZigBee é uma solução estável e robusta para criar RTDSF para controlar os componentes de uma REI.

Os resultados dos testes em sistemas descentralizados de geração de energia apresentam um comportamento coerente com o anunciado pelo fabricante dos módulos XBee utilizados e com os requisitos da norma ZigBee.

## 5.5 Nuvem Cibernética

Para haver um controlo sincronizado da REI não basta apenas a criação de uma RTD que interliga os seus componentes e intervenientes, mas também um conjunto de serviços de informação e gestão do seu funcionamento.

A forma mais rápida de implementar uma RTD de gestão e controlo da REI é aproveitando outros serviços existentes com já alguma maturidade, apresentando uma sustentabilidade comprovada na oferta de funcionalidades e serviços. A tecnologia mais usada é a usualmente chamada de nuvem cibernética.

A nuvem cibernética é um conceito que representa um conjunto de infraestruturas de computação, armazenamento de dados e comunicação acessíveis de qualquer ponto do mundo. Toda esta arquitetura de computação está espalhada por várias infraestruturas distribuídas por todo o mundo mas interligadas por meio de uma RTD.

Toda a capacidade de computação e armazenamento de dados é acessível através de modelos de abstração, pelo que o utilizador nunca sabe onde é que os recursos computacionais que está a usar estão instalados fisicamente. Esta abstração é simbolizada por uma nuvem, dando origem ao seu nome.

Os serviços são oferecidos sempre numa base de utilização/custos. O cliente paga segundo o volume de utilização que faz dos serviços da nuvem cibernética.

Os modelos de serviços geralmente oferecidos podem ser divididos em:

Infraestrutura como serviço (*Infrastructure as a service - IaaS*) – o cliente utiliza um conjunto de infraestruturas computacionais num todo: servidores ou máquinas virtuais; armazenamento; redes; balanceadores de carga; e outros;

Plataforma como serviço (*Platform as a service - PaaS*) – o cliente utiliza um conjunto de plataformas computacionais onde projeta os seus próprios desenvolvimentos computacionais, utilizando: serviços de processamento; bases de dados; servidores de internet; aplicações informáticas de desenvolvimento; entre outros;

Aplicações informáticas como serviço [Kapadia11] (*Software as a service* - SaaS) – o cliente usa um conjunto de programas informáticos já criados prontos a usar numa base de pagamento por usabilidade: programas informáticos de gestão de clientes; Google Docs; entre outros;

Comunicação como serviço (*Communication as a service* - CaaS) – o cliente usufrui de uma infraestrutura de comunicação unificada, geralmente baseada num determinado protocolo ou serviço de comunicação;

Sensores como serviço [Alam10] (*Sensor as a service* - SenaaS) – o cliente liga os seus sensores e atuadores a um serviço de virtualização desses mesmos sensores e atuadores permitindo o acesso direto a estes através de serviços já desenvolvidos.

O ZigBee Gateway possibilita a interligação dos módulos em uma RTDSF da norma ZigBee, com serviços de SenaaS através de uma RTD externa, i.e., como uma ligação usando a infraestrutura de internet. Neste serviço de SenaaS os módulos de ZigBee são virtualizados em serviços na nuvem cibernética, podendo outros serviços comunicar com estes módulos virtuais e aceder às suas funcionalidades.

O acesso direto ao módulo ZigBee físico não é permitido por motivos de segurança, o ZigBee Gateway é o único que comunica com o módulo ZigBee e que responde por este, personificando o módulo perante o serviço externo.

Um dos serviços mais maduros e utilizados no mercado de SenaaS com a norma ZigBee é o iDigi Device Cloud da Digi International Inc. Esta é uma solução pronta a usar que oferece a virtualização dos módulos ZigBee e o acesso e gestão destes através dos serviços de nuvem cibernética, oferecendo a máxima segurança proveniente da sua associação à Cloud Security Alliance (CSA).

Pela experiência adquirida durante os testes de campo da norma ZigBee na REI, a implementação de módulos ZigBee através de serviços de SenaaS é a melhor solução no início da criação da infraestrutura de sensores e atuadores. É proposta assim a utilização de SenaaS para acelerar a implementação da RTD da REI e diminuir substancialmente os custos de implementação inicial, uma vez que grande parte da infraestrutura física reside na nuvem cibernética.

Com a crescente implementação de módulos ZigBee e se os custos da sua virtualização justificarem, é proposta a mudança gradual dos módulos da infraestrutura virtual para uma infraestrutura física da empresa prestadora de serviços.

A utilização de serviços de SenaaS permite às empresas acelerar a implementação de infraestruturas de sensores e atuadores na REI, obter um retorno de investimento mais rápido e distribuir os custos de construção da infraestrutura de RTD por um período de tempo mais alargado.

## **5.6 Modelo de Segurança de Dados**

Uma grande preocupação existe relativamente à segurança e privacidade dos dados dos consumidores, nesta crescente oferta de serviços de informação e principalmente virtualização.

Os consumidores não têm a perceção de como os seus dados são usados nem como são acedidos. Este estado de insegurança é por vezes um impedimento para a agilização da criação da REI e a sua RTD. Mas estas constricções de segurança existem não só com os consumidores mas com todos os participantes na REI.

Apesar de algumas medidas de segurança já existirem e outras apenas virem a ser implementadas em futuras normas, ainda não existe um caminho claro definido, tal como manter a privacidade dos dados da REI ao mesmo tempo que se implementam novos serviços.

Um modelo de segurança para acesso de dados e criação de serviços é proposto neste trabalho. Este modelo de segurança constitui uma contribuição e é designado por Acesso de Dados Certificado na REI (ADCREI).

O ADCREI tem a premissa de que o dono do dispositivo é o dono da sua gestão e dos dados por ele gerados. Sempre que outra entidade queira aceder aos dados ou gerir os dispositivos deve pedir permissões de acesso. Este acesso deverá ser certificado,

mediado e negociado por uma entidade externa independente que fornecerá uma chave de encriptação a usar nas comunicações.

A entidade que quer aceder aos dados, anuncia à entidade certificadora e ao dono do dispositivo essa necessidade. O dono do dispositivo indica à entidade certificadora que permite o acesso e esta entrega um certificado à entidade que quer aceder aos dados permitindo o acesso ao dispositivo e seus dados.

Para que as negociações e gestão de acessos sejam feitas é necessário criar um gestor de acesso de dados (GAD) que deverá residir dentro ou perto dos dispositivos ou dos sistemas de acesso. O GAD será distribuído pela entidade certificadora para garantir integridade e segurança. O GAD pode vir integrado dentro dos dispositivos a instalar na REI e funcionar como um dos serviços desses dispositivos.

Um exemplo do modelo ADCREI a funcionar entre um distribuidor de eletricidade e um dos seus clientes é ilustrado na Figura 5.16.

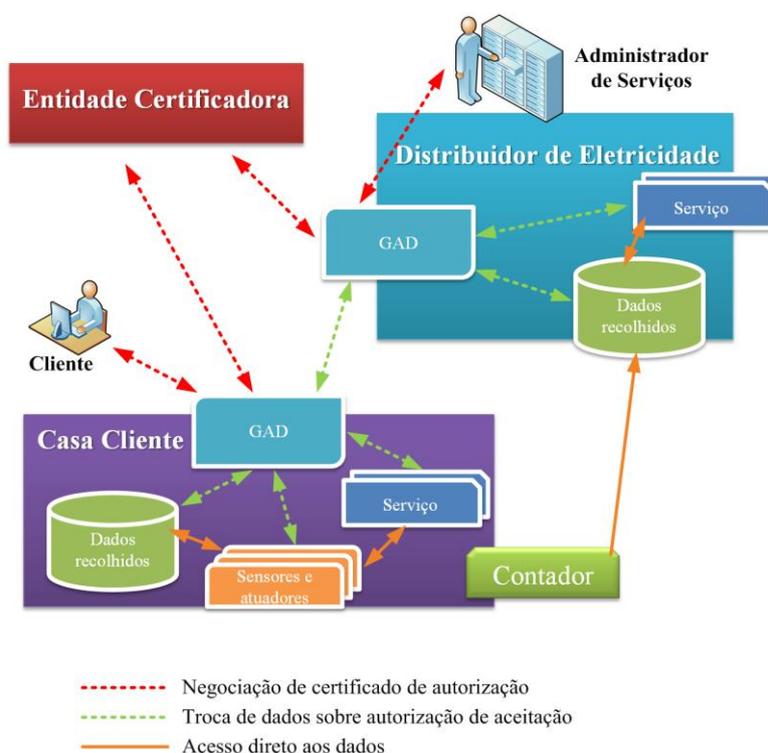


Figura 5.16 - Exemplo do modelo ADCREI.

O distribuidor de eletricidade uma vez que é dono dos contadores de eletricidade não precisa de pedir acesso certificado à sua gestão e aos seus dados. Pelo que, pode criar uma ligação direta ao contador sem passar pelo GAD.

Quando o distribuidor de eletricidade precisar de aceder a dados ou atividade de um eletrodoméstico, sensor ou serviço residente na casa do seu cliente, tem primeiro de passar pelo processo de certificação do modelo ADCREI:

O distribuidor de eletricidade através do GAD tem de anunciar à entidade certificadora que pretende aceder a determinados dados, serviços ou dispositivos do seu cliente;

A entidade certificadora anuncia ao cliente através do GAD que o seu distribuidor de eletricidade pretende aceder a determinados dispositivos, dados ou serviços;

O cliente através do GAD valida a entidade que fez o pedido de acesso e autoriza esse acesso;

A entidade certificadora através do GAD entrega a autorização e certificado ao distribuidor de eletricidade;

A partir deste momento o distribuidor de eletricidade acede através do seu GAD e do GAD do cliente aos dados, serviços ou dispositivos aos quais tem autorização.

O modelo ADCREI permite oferecer transparência e visibilidade na troca de dados e acesso a dispositivos entre diferentes entidades. Oferece também às entidades envolvidas a informação a qualquer momento dos acessos que são feitos aos seus dados e a atividade associada.

O modelo ADCREI apresenta duas grandes desvantagens, a complexidade no processo de pedido e aceitação de acesso à informação e a dificuldade de inserir o serviço GAD nos dispositivos já implementados na REI.

## 5.7 Conclusões

A monitorização da REI assenta sobre uma estrutura de RTD vasta que apresenta vários desafios, tais como o elevado número de componentes e serviços a monitorizar e controlar, mantendo um elevado nível de segurança e permitindo em simultâneo flexibilidade para se adaptar às necessidades e recuperar a falhas. A norma ZigBee permite a criação de RTDSF de baixo consumo energético e foi apresentada e aplicada em testes de campo por forma a avaliar a sua capacidade de criação de RTD na monitorização da REI. Na REI os serviços oferecidos pela nuvem cibernética, com especial incidência nos SenaaS são uma ferramenta fundamental. Um novo modelo de segurança de dados para a REI designado de modelo ADCREI é apresentado oferecendo transparência e visibilidade na troca de informação entre participantes na REI, permitindo o controlo individual sobre a informação a cada participante.

---

# CAPÍTULO

# 6

---

## Testes de Avaliação

*Neste capítulo são apresentados testes em ambiente urbano e em ambiente controlado de túnel de vento no sentido de analisar e validar o desempenho do protótipo de aerogerador desenvolvido. Os testes estão classificados em dois domínios de validação: o do comportamento do aerogerador em ambiente urbano e o do comportamento do aerogerador em ambiente controlado de túnel de vento. Ainda, neste capítulo são apresentados os vários módulos de sensores desenvolvidos para monitorização e registo de informação.*

## 6.1 Introdução

Utilizando a experiência apresentada na secção 5.4, foram realizados testes ao protótipo do aerogerador desenvolvido estando organizados em dois domínios de validação: testes em ambiente urbano e testes em ambiente controlado de túnel de vento.

Para a realização dos testes foi necessário recorrer ao desenvolvimento de módulos de sensores e de aplicações informáticas para aquisição e armazenamento de dados de monitorização. Durante o desenvolvimento dos módulos de sensores houve a necessidade de criar circuitos elétricos, configurar microprocessadores e placas de circuitos impressos com capacidade de processamento. Essas funcionalidades e as aplicações informáticas são sumariamente apresentadas no âmbito do tema dos testes ao protótipo na secção 6.4.

Para que seja possível integrar o aerogerador em contexto urbano na arquitetura da REI sem afetação da simplicidade de instalação do aerogerador é sugerida a tecnologia de comunicação sem fios e de baixo consumo energético com norma ZigBee na comunicação com os sensores, sendo usada para suporte dos procedimentos que são propostos.

## 6.2 Testes em Ambiente Urbano

Os testes de campo em ambiente urbano foram realizados no Centro de Geofísica da Universidade de Évora, em uma zona residencial localizada em Cabanas de Viriato, Carregal do Sal, no Distrito de Viseu e em uma zona residencial localizada na Póvoa de Santa Iria, Vila Franca de Xira, no Distrito de Lisboa.

### *1º teste*

O primeiro teste em ambiente urbano foi realizado no Centro de Geofísica da Universidade de Évora no dia 13 de junho de 2012, sendo orientado para o ensaio de validação do auto arranque do protótipo para velocidades baixas de vento entre o valor de 2 m/s e o valor de 3 m/s

Os testes foram realizados durante o período das 11:00 h e 12:30 h. Os registos dos períodos de arranque e funcionamento do aerogerador foram comparados com os dados disponíveis no sítio da internet do Centro de Geofísica da Universidade de Évora. Os dados disponíveis do sítio de internet são dados que correspondem a um período de 10 min, oferecendo a média dos valores durante esse tempo. A instalação em teste é apresentada na Figura 6.1.



Figura 6.1 - Teste realizado a 13 de junho de 2012.

Durante os testes a velocidade do vento apresentou um comportamento com oscilações repentinas. Os dados recolhidos do sítio de internet do Centro de Geofísica da Universidade de Évora permitiram por comparação com o comportamento observado durante o teste que o aerogerador arrancou para velocidades compreendidas entre o valor de 2,5 m/s e o valor de 2,7 m/s.

Foi verificado que o binário do GCCIP usado não permaneceu constante, revelando desequilíbrios no movimento do eixo do aerogerador.

Com a aquisição de um segundo GCCIP e o desenvolvimento de um sensor para contagem de rotações do protótipo, foram realizadas algumas adaptações à torre para acoplar os novos componentes. O detalhe das adaptações feitas à torre do protótipo para acoplar o segundo GCCIP é apresentado na Figura 6.2.



Figura 6.2 – Modificações feitas ao protótipo para acoplar o segundo GCCIP.

Para a instalação da torre do protótipo no corrimão do Centro de Geofísica da Universidade de Évora foi utilizado um suporte físico. Este suporte como será descrito originou a propagação das vibrações do edifício ao gerador.

Os testes revelaram que o aerogerador Darrieus com desempenho melhorado em contexto urbano apresentado na secção 3.4 apresenta auto arranque para velocidades baixas de vento compreendidas entre o valor de 2,5 m/s e o valor de 2,7 m/s sem auxiliares externos ou componentes extra, comprovando uma das características inovadoras evidenciadas no âmbito da investigação realizada para o desenvolvimento de um aerogerador tipo Darrieus, o auto arranque sem a necessidade de utilização de componentes extra ou a injeção de energia, para que inicie o movimento e possa proceder à conversão energética só pela ação do vento.

### *2º teste*

O segundo teste em contexto urbano foi realizado no Centro de Geofísica da Universidade de Évora no dia 10 de julho de 2012, sendo orientado para testar o auto arranque do protótipo com o novo GCCIP, o sensor de contagem de rotações e as adaptações feitas à torre. Na recolha de dados da velocidade de vento efetuado pelo

Centro de Geofísica da Universidade de Évora foi utilizado um temporizador de recolha de dados com um tempo mínimo entre recolhas com o intervalo de um minuto.

O protótipo com o novo GCCIP, o sensor de rotações ligado à torre e o novo suporte são apresentados na Figura 6.3.

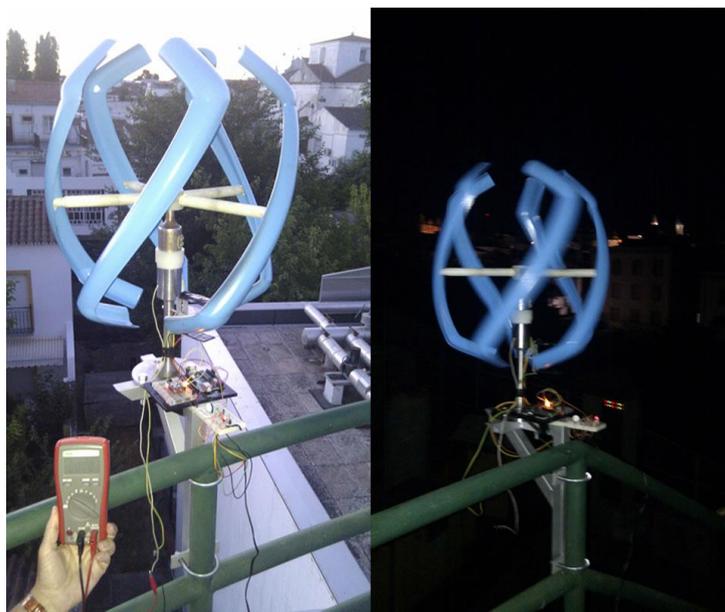


Figura 6.3 - Teste realizado a 10 de julho de 2012.

Os resultados obtidos pelo sensor de rotações conjuntamente com os dados cedidos gentilmente pelo Centro de Geofísica da Universidade de Évora são apresentados na Figura 6.4.

Os resultados revelaram que o protótipo apresentou auto arranque para velocidades do vento compreendidas entre o valor de 2 m/s e o valor de 3 m/s. Estes são resultados já obtidos durante o primeiro teste com o GCCIP anterior.

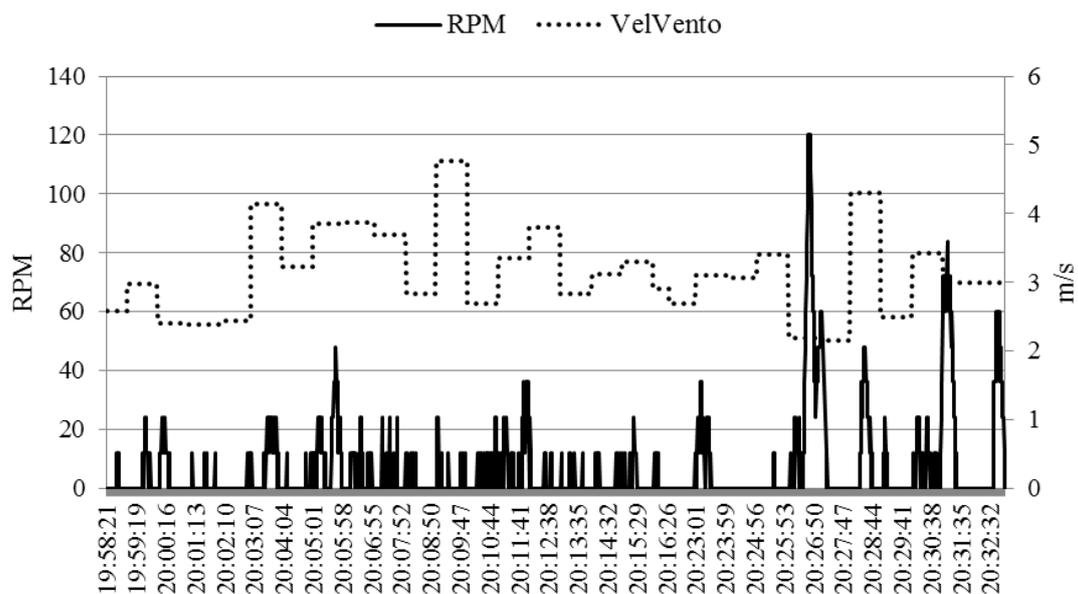


Figura 6.4 - Resultados do teste realizado a 10 de julho de 2012.

Para melhorar o desempenho do protótipo tentando reduzir o momento de inércia e o atrito das chumaceiras do GCCIP usado, foi adquirido um GSIP modelo SAV-15W. O GSIP adquirido foi desenvolvido para aerogeradores de rotor vertical pela empresa SAIAM. Ao mesmo tempo foi também adquirida à SAIAM, uma turbina de pás retas para realizar ensaios com o intuito de comparar o seu desempenho com o do protótipo do aerogerador desenvolvido. Assim, o protótipo foi adaptado por forma a ligar o GSIP às pás do protótipo. Foi construída uma nova torre para o protótipo e melhorado o sistema de fixação das pás aos braços.

Para a monitorização dos ensaios do desempenho do protótipo, a torre foi adaptada para montagem de suportes para novos sensores, nomeadamente um anemómetro A100R da Vector Instruments e um sensor de conta rotações por infravermelhos.

Um sistema aplicacional informático de recolha de dados em tempo real foi planeado e desenvolvido recorrendo à recolha de dados dos sensores por RTDSF aplicando a norma ZigBee.

As características de auto arranque do aerogerador Darrieus com desempenho melhorado em contexto urbano apresentadas na secção 3.4 foram testadas, tendo o protótipo apresentando auto arranque para velocidades baixas de vento compreendidas

entre 1 m/s e 2 m/s sem auxiliares externos ou componentes extra. O protótipo apresentou estabilidade na rotação da turbina para ventos com escoamento com elevada turbulência e mudança repentina de orientação observados durante os ensaios.

### *3º teste*

O terceiro teste em contexto urbano foi realizado no Centro de Geofísica da Universidade de Évora no dia 16 de maio de 2013 com o objetivo de verificar o comportamento do GSIP, as adaptações feitas ao sistema de fixação das pás aos braços e o sistema integrado de recolha de dados do anemómetro e conta rotações. O protótipo apresentou um comportamento estável com o GSIP e as adaptações feitas. O sistema integrado de recolha de dados do anemómetro e conta rotações teve um comportamento esperado funcionando sem falhas. A onda da tensão durante o arranque do GSIP e o sistema de recolha de dados em tempo real do sensor de conta rotações e do anemómetro são ilustrados na Figura 6.5.



Figura 6.5 - Teste realizado a 16 de maio de 2013.

Os resultados dos testes apresentam um comportamento coerente com o anunciado pelo fabricante dos módulos XBee utilizados e com o comportamento esperado para os programas informáticos desenvolvidos.

*4º teste*

O quarto teste em contexto urbano foi realizado no Centro de Geofísica da Universidade de Évora no dia 07 de junho de 2013, por volta das 12 h com o objetivo de avaliar a produção de vibrações pelo protótipo e pelo SAV-15W. O teste de vibração tem como objetivo principal verificar se a rotação das pás originam vibrações nos componentes, com especial incidência no gerador e na torre, ou pelo contrário o desenho das pás cumpre com a sua funcionalidade descrita na secção 3.4 de reduzir as vibrações no gerador.

O acelerómetro necessita de uma base lisa para colar o sensor. O local inicial previsto para instalação do acelerómetro era na base de ligação do GSIP à torre, mas como esse local não oferecia espaço suficiente um segundo local de instalação foi escolhido. Este local serve de suporte do conta rotações por infravermelhos. Todos os componentes do conta rotações foram retirados desse suporte para reduzir o máximo de vibrações no sensor. O acelerómetro do sensor de vibrações foi instalado numa base lisa do suporte próximo da torre logo abaixo das pás apresentado na Figura 6.6.



Figura 6.6 - Acelerómetro do sensor de vibrações.

O acelerómetro foi instalado de modo a que o eixo dos YY represente as vibrações geradas verticalmente e os eixos dos XX e dos ZZ representem as vibrações laterais como representado na Figura 6.6.

Foram realizadas cinco recolhas de dados de 20 segundos cada:

Recolha 1 – às 12:00:45 h com velocidade de vento entre 1,25 m/s e 2,5 m/s com uma frequência de recolha de dados de 5 kHz;

Recolha 2 – às 12:03:47 h com velocidade de vento entre 1,25 m/s e 3,75 m/s com uma frequência de recolha de dados de 5 kHz;

Recolha 3 – às 12:07:29 h com velocidade de vento entre 3,75 m/s e 7,5 m/s com uma frequência de recolha de dados de 10 kHz;

Recolha 4 – às 12:10:46 h com velocidade de vento entre 1,25 m/s e 6,25 m/s com uma frequência de recolha de dados de 10 kHz;

Recolha 5 – às 12:11:45 h com velocidade de vento entre 3,75 m/s e 8,75 m/s com uma frequência de recolha de dados de 10 kHz.

Nas Figura 6.7, na Figura 6.8 e na Figura 6.9 são respetivamente apresentados os resultados das acelerações em  $m/s^2$  nos eixos dos XX, dos YY e dos ZZ da Recolha 1. A Recolha 1 descreve um comportamento associado com ventos de velocidade baixa de 1,25 m/s a 2,5 m/s. As barras a preto representam a passagem das pás junto do acelerómetro sendo a barra maior representativa da pá de referência onde está conectado o íman usado no contador de rotações do sensor magnético com um interruptor magnético “*reed switch*”. O eixo das abcissas apresenta o período temporal da recolha de dados em segundos. Abaixo dos gráficos é apresentada a velocidade do vento na altura da recolha.

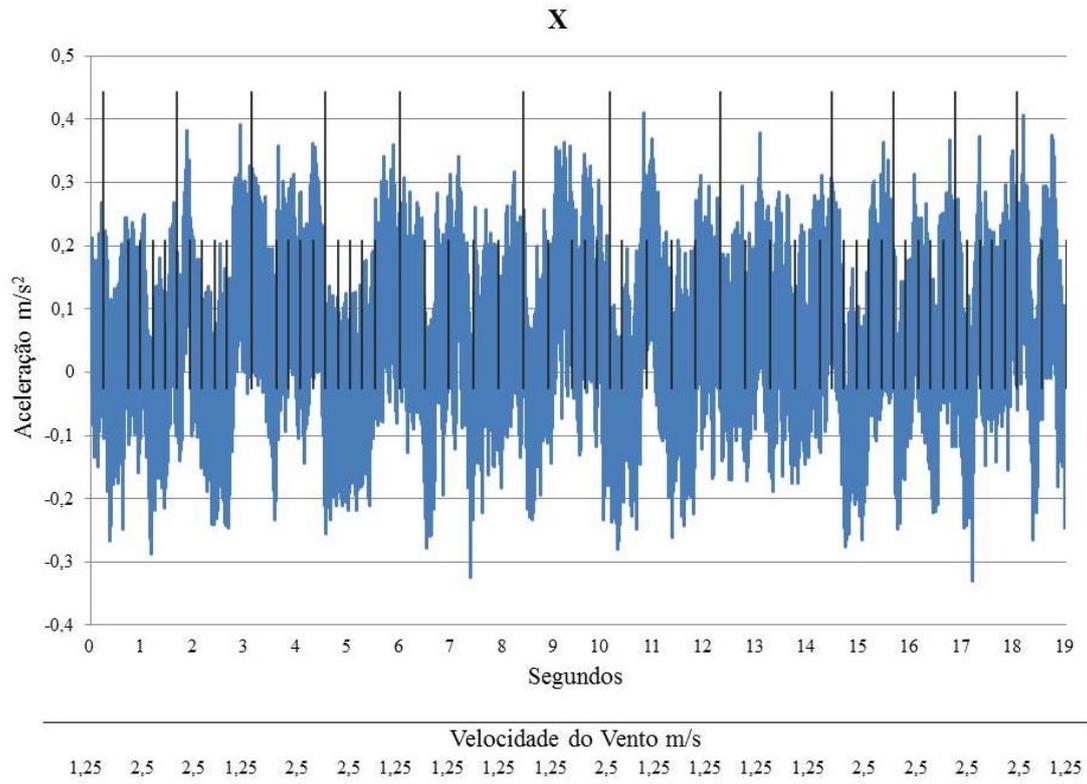


Figura 6.7 - Aceleração Recolha 1 eixo dos XX.

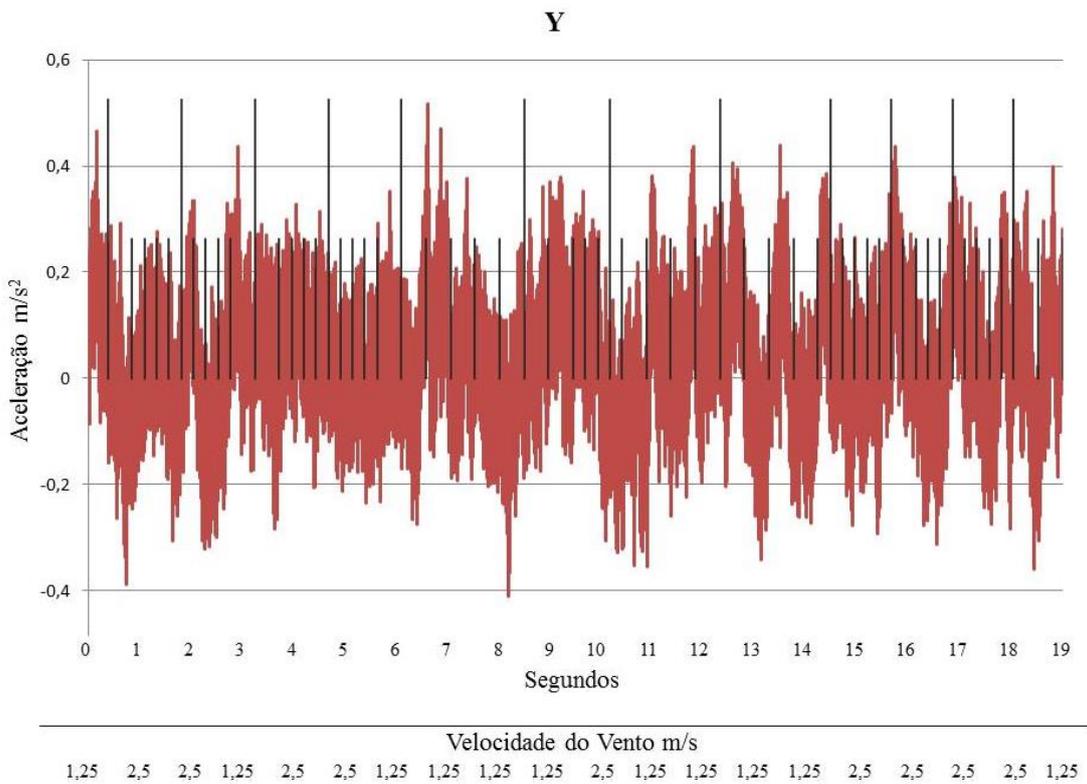


Figura 6.8 - Aceleração Recolha 1 eixo dos YY.

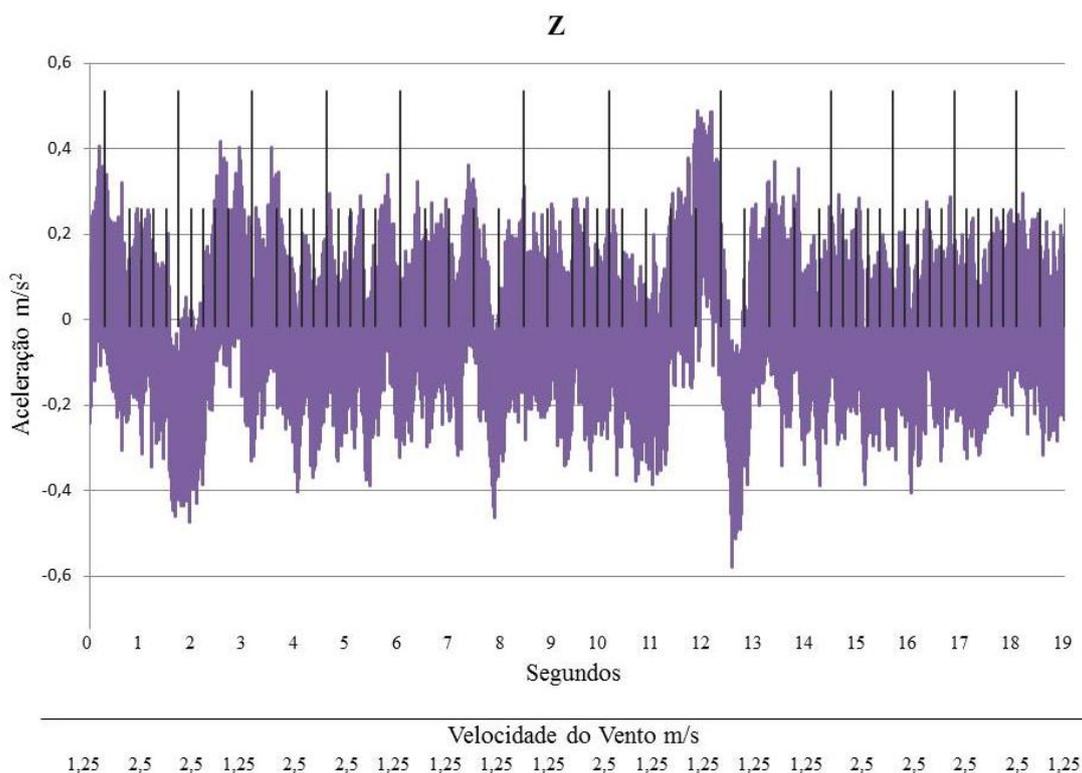


Figura 6.9 - Aceleração Recolha 1 eixo dos ZZ.

Pela análise dos dados não é possível afirmar a existência de uma relação entre o movimento das pás da turbina e as oscilações nas acelerações em qualquer um dos três eixos. Não aparenta também existir uma relação entre as oscilações nas vibrações e as diferentes velocidades do vento.

O suporte físico para ligação da torre do protótipo ao corrimão do edifício propaga as vibrações do edifício à torre, sendo de considerar esta situação nos resultados obtidos.

O movimento oscilatório em mm nos eixos dos XX, dos YY e dos ZZ durante a Recolha 1 é apresentado na Figura 6.10.

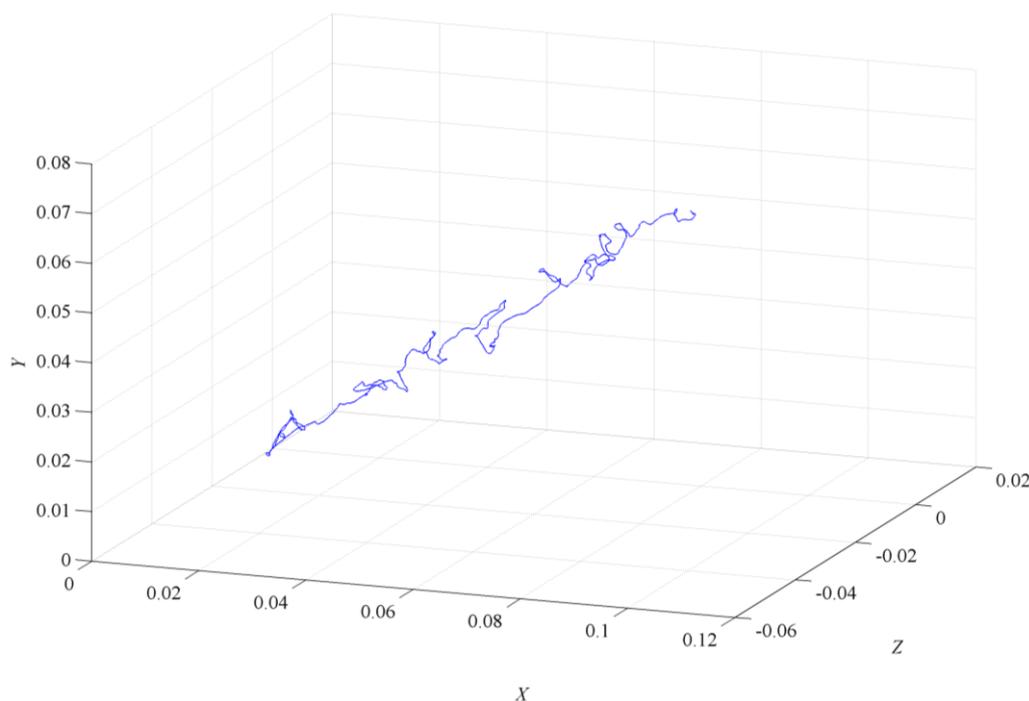


Figura 6.10 - Movimento oscilatório nos três eixos da Recolha 1.

É notória a tendência no movimento do sensor uma vez que é fustigado pelo vento. Esta tendência pode ser explicada pela forma da barra onde está instalado o acelerómetro, assinalada a vermelho na Figura 6.15. O suporte apresenta uma configuração em “L”. O vento estava a incidir diretamente sobre o suporte levando à tendência verificada no movimento do sensor. Também a fibra ótica que transmite os sinais do acelerómetro, é fustigada pelo vento reforçando esse mesmo comportamento do suporte.

Na Figura 6.11, na Figura 6.12 e na Figura 6.13 são respetivamente apresentados os resultados das acelerações em  $m/s^2$  nos eixos dos XX, dos YY e dos ZZ da Recolha 5. A Recolha 5 descreve um comportamento associado com ventos de velocidade elevada de 5 m/s a 8 m/s. As barras a preto representam a passagem das pás junto do acelerómetro sendo a barra maior representativa da pá de referência onde está conectado o íman usado no contador de rotações do sensor magnético com o interruptor magnético. O eixo das abcissas apresenta o período temporal da recolha de dados em segundos. Abaixo dos gráficos é apresentada a velocidade do vento na altura da recolha.

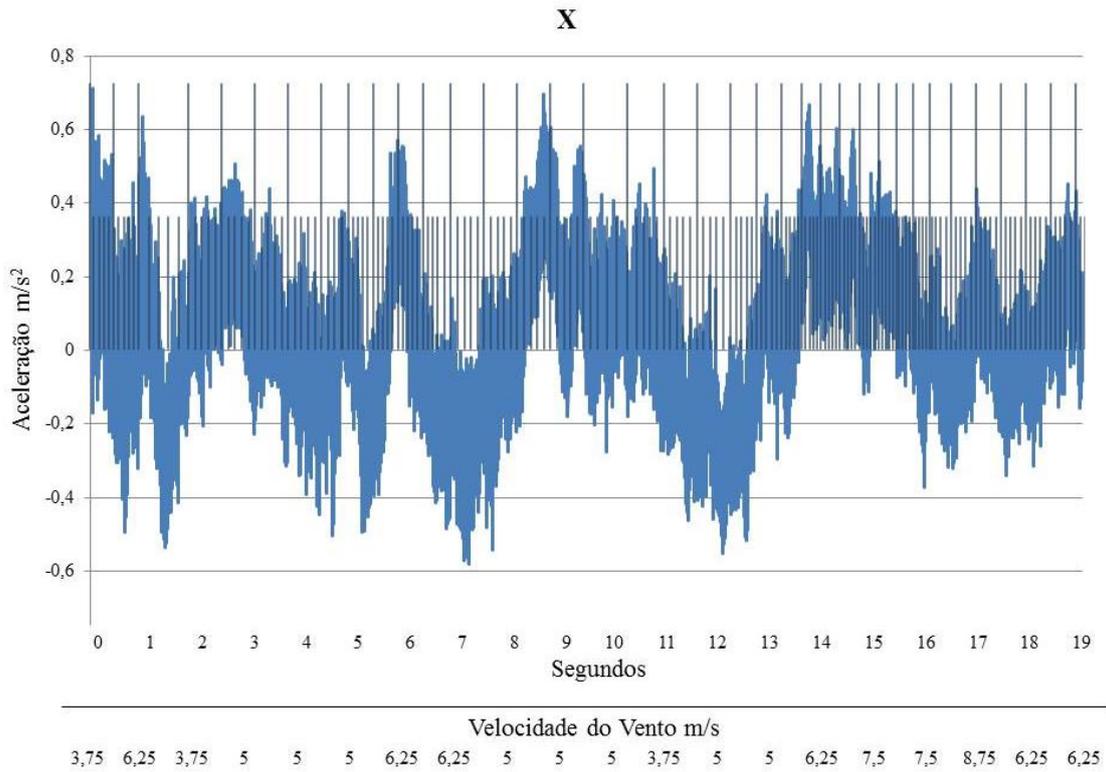


Figura 6.11 - Aceleração Recolha 5 eixo dos XX.

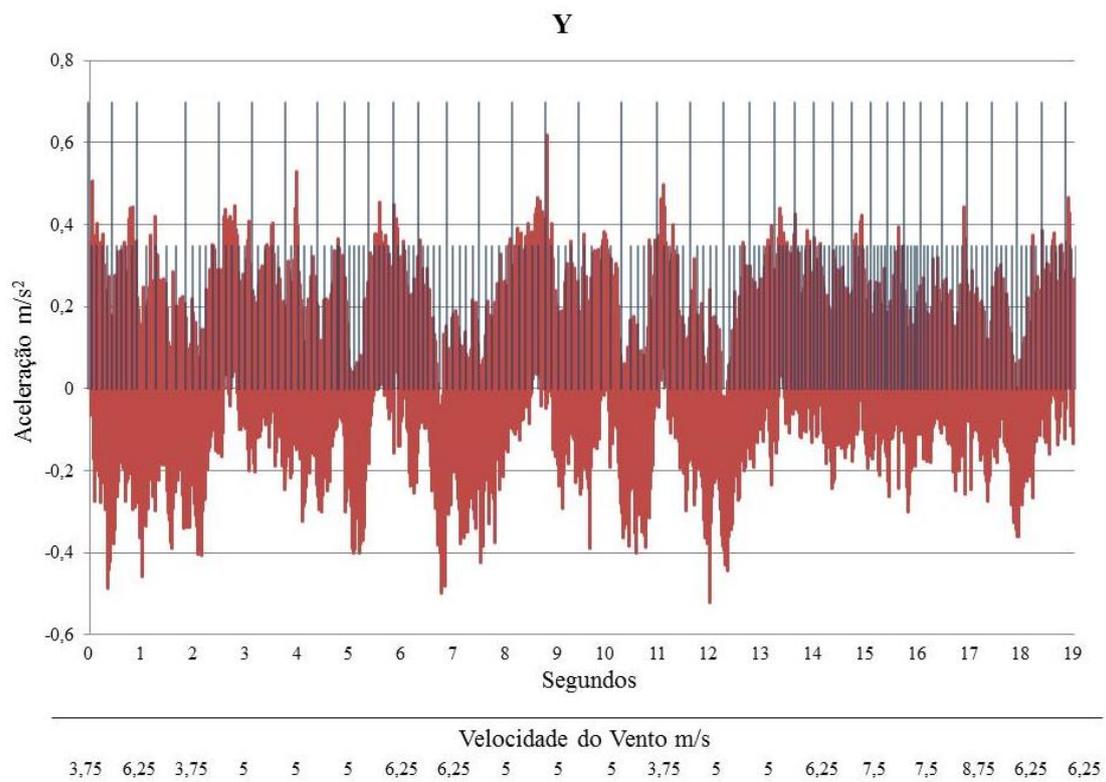


Figura 6.12 - Aceleração Recolha 5 eixo dos YY.

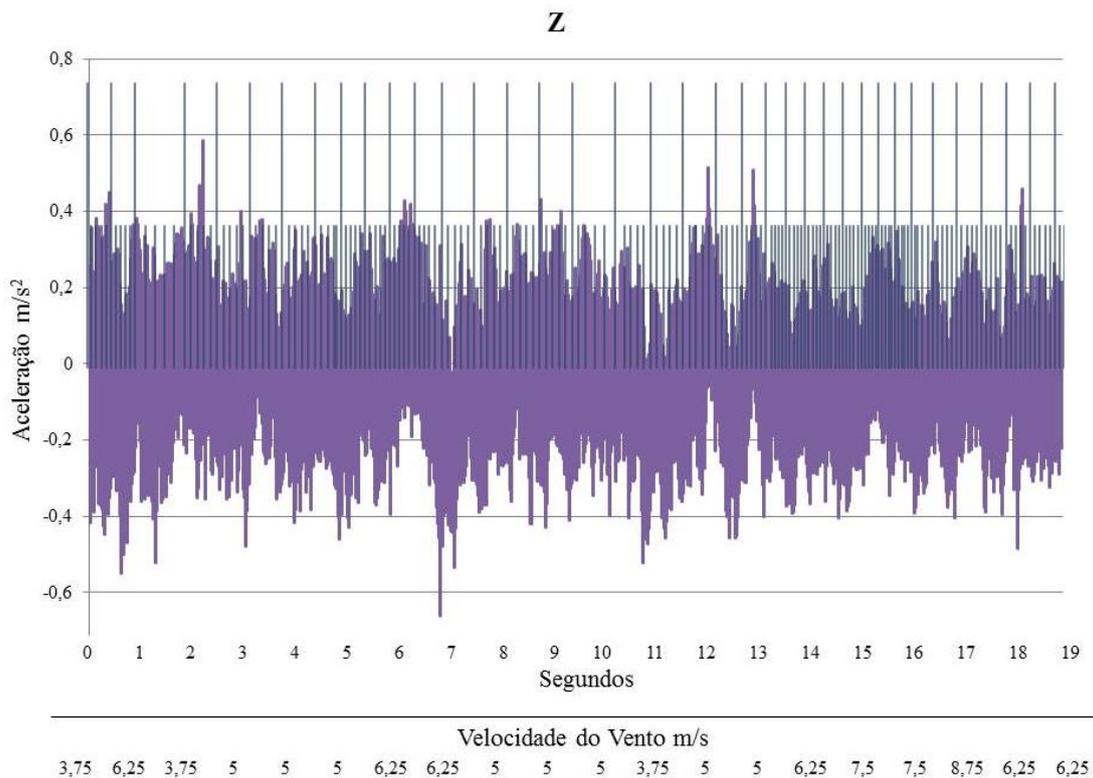


Figura 6.13 - Aceleração Recolha 5 eixo dos ZZ.

A análise dos dados da Recolha 5, com ventos com velocidade a variar entre os 3,17 m/s e 8,75 m/s durante um período temporal de 20 s, também não permite identificar uma relação entre o movimento das pás da turbina e as acelerações em qualquer dos eixos dos XX, dos YY e dos ZZ. Não é verificável também uma relação entre as oscilações nas acelerações e as variações de velocidade do vento.

O movimento em mm nos eixos dos XX, dos YY e dos ZZ durante a Recolha 5 é apresentado na Figura 6.14.

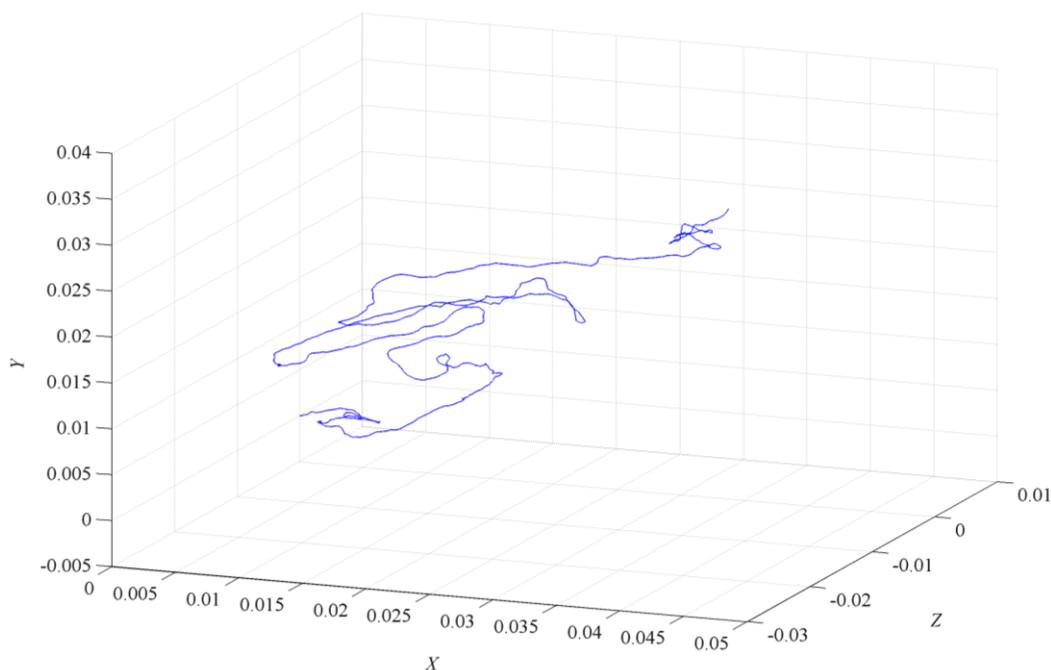


Figura 6.14 - Movimento oscilatório dos três eixos da Recolha 5.

A Recolha 5 não apresenta uma tendência no movimento do sensor. A variação no movimento pode ser explicada, tal como na Recolha 1, pela forma da barra onde está instalado o acelerómetro, assinalada a vermelho na Figura 6.15, onde incide o vento com velocidades que variam entre os 3,17 m/s e 8,75 m/s durante um período temporal de 20 s fazendo vibrar o suporte.

O suporte onde está instalado o acelerómetro (assinalado com círculo vermelho) e os circuitos elétricos do contador de rotações do sensor magnético com interruptor magnético (assinalado a laranja) é ilustrado na Figura 6.15.



Figura 6.15 - Suporte do acelerómetro e circuitos elétricos.

As características do aerogerador Darrieus com desempenho melhorado em contexto urbano apresentadas na secção 3.4 foram testadas, no que se refere à geração de vibração. O protótipo apresentou estabilidade no seu funcionamento não criando vibrações significativas na torre diretamente relacionadas com o seu funcionamento.

#### *5º teste*

O quinto teste em contexto urbano foi realizado em uma zona residencial localizada em Cabanas de Viriato, Carregal do Sal, no Distrito de Viseu no dia 05 de outubro de 2013, sendo orientado para a avaliação do ruído produzido pelo protótipo e pelo SAV-15W.

Em [DecretoLei07] são definidas várias zonas de ruído no plano municipal de ordenamento do território, sendo: zona sensível as áreas existentes ou previstas em instrumentos de planeamento territorial como vocacionadas para usos habitacionais, existentes ou previstos, bem como para escolas, hospitais, espaços de recreio e lazer e outros equipamentos coletivos prioritariamente utilizados pelas populações como locais

de recolhimento, existentes ou a instalar; zona mista a área definida em plano municipal de ordenamento do território, cuja ocupação seja afeta a outros usos, existentes ou previstos, para além dos referidos na definição de zona sensível; zona urbana consolidada a zona sensível ou mista com ocupação estável em termos de edificação. Em [DecretoLei07] a regulação da produção de ruído nas zonas sensíveis define um limite máximo de ruído durante o período diurno-entardecer-noturno de 55 dB(A) e um limite máximo de ruído durante o período noturno de 45 dB(A).

Para a realização dos testes de produção de ruído do protótipo e do SAV-15W foi escolhida uma zona residencial classificada no plano municipal de ordenamento do território como uma zona sensível. O local de testes é uma zona residência localizada em Cabanas de Viriato, Carregal do Sal, no Distrito de Viseu. Foram realizados dois testes de avaliação da produção de ruído: o primeiro teste com vento com a velocidade de 2,5 m/s; o segundo teste com vento com a velocidade de 5 m/s.

A instalação do protótipo para a realização dos testes para avaliação da produção de ruído é apresentada na Figura 6.16.



Figura 6.16 - Protótipo: teste de avaliação da produção de ruído.

A instalação do SAV-15W para a realização dos testes para avaliação da produção de ruído é apresentada na Figura 6.17



Figura 6.17 - SAV-15W: teste de avaliação da produção de ruído.

Os testes foram realizados com um sonómetro digital Hibok-412 posicionado a jusante da turbina, sendo a velocidade do vento de 2,5 m/s e 5 m/s, a pressão atmosférica de 99,99 kPa e a temperatura ambiente de 28 °C. O sonómetro apresenta uma precisão da ordem de 1,5 %.

O procedimento de avaliação do ruído emitido pelo protótipo e pelo SAV-15W esteve de acordo com o seguinte procedimento: avaliação do ruído ambiente existente na zona envolvente junto do sistema eólico, estando a turbina parada; avaliação do ruído junto do sistema eólico estando em funcionamento; avaliação a 1 m de distância do sistema eólico estando em funcionamento; avaliação a 2 m de distância do sistema eólico estando em funcionamento; e avaliação a 3 m de distância do sistema eólico estando em funcionamento.

No primeiro teste foi possível fazer a avaliação da produção de ruído ao protótipo, visto que, teve auto arranque durante o teste. O SAV-15W apenas apresenta auto arranque para velocidades de vento da ordem de 4,25 m/s. O ruído ambiente existente na zona

envolvente junto do protótipo, estando a turbina parada era de 42,5 dB(A). Os resultados da avaliação do ruído durante o primeiro teste estando o protótipo em funcionamento são apresentados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Primeiro teste: avaliação do ruído

Vento com velocidade de 2,5 m/s	<b>Protótipo</b> [dB]
<b>0 m</b>	42,5
<b>1 m</b>	42,5
<b>2 m</b>	42,5
<b>3 m</b>	42,5

A observação da Tabela 6.1 permite concluir que para velocidades de vento de 2,5 m/s o protótipo não produz ruído.

No segundo teste para a velocidade de vento de 5 m/s o ruído ambiente existente na zona envolvente junto do protótipo, estando a turbina parada era de 44,2 dB(A). Os resultados da avaliação do ruído com o protótipo e o SAV-15W em funcionamento são apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Segundo teste: avaliação do ruído

Vento com velocidade de 5 m/s	<b>Protótipo</b> [dB]	<b>SAV – 15W</b> [dB]
<b>0 m</b>	44,2	44,3
<b>1 m</b>	44,2	44,2
<b>2 m</b>	44,2	44,2
<b>3 m</b>	44,2	44,2

A observação da Tabela 6.2 permite concluir que para velocidades de vento de 5 m/s o protótipo não produz ruído. O SAV-15W apresenta ruído junto do sistema eólico quando está em funcionamento apesar de não ser perceptível ao ouvido. Pelo que, por comparação o protótipo de aerogerador relativamente ao ruído apresenta condições mais favoráveis para ser aceite em contexto urbano. Estes testes permitem concluir que é possível instalar o protótipo em zonas definidas no plano municipal de ordenamento do território como zonas sensíveis [DecretoLei07].

#### *6º teste*

O sexto teste em contexto urbano foi realizado em uma zona residencial localizada na Póvoa de Santa Iria, Vila Franca de Xira, no Distrito de Lisboa no dia 10 de novembro de 2013, sendo orientado para a avaliação do binário de arranque do protótipo.

A instalação do protótipo para a realização do teste para a avaliação do binário de arranque é apresentada na Figura 6.18.

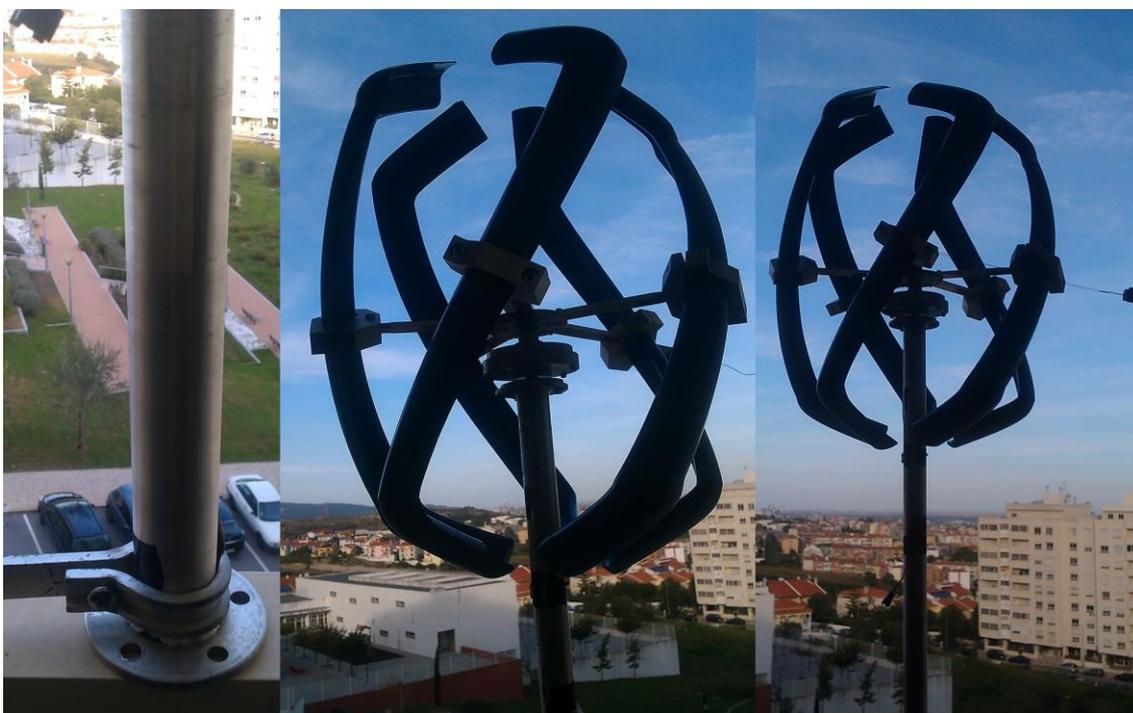


Figura 6.18 - Teste de avaliação do binário de arranque.

Os testes foram realizados com um dinamómetro 2 N com precisão de 0,02 N e escala em Newton com 100 subdivisões. O dinamómetro está ligado a uma pá do protótipo por intermédio de um cordel como apresentado na imagem da direita da Figura 6.18.

O procedimento de avaliação do binário de arranque do protótipo esteve de acordo com o seguinte procedimento: avaliação da velocidade do vento, estando a turbina parada; recolha do binário de arranque quando o vento apresenta uma velocidade constante durante um período temporal nunca inferior a 10 segundos.

Durante o teste de avaliação do binário de arranque do protótipo o vento apresentou turbulência e velocidades baixas entre 1 m/s e 3 m/s.

Os resultados da avaliação do binário de arranque do protótipo são apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Avaliação do binário de arranque

<b>Velocidade do vento</b> [m/s]	<b>Força</b> [N]	<b>Binário</b> [Nm]	<b>Coefficiente de Potência</b>
1,25	0,2	0,035	0,416
2	0,4	0,069	0,321
2,25	0,5	0,087	0,314
3	0,9	0,156	0,313

A observação da Tabela 6.3 permite concluir que o protótipo apresentou um comportamento coerente com a modelação computacional do protótipo, nomeadamente o coeficiente de potência apresentada na Figura 3.30.

## 6.3 Testes de Túnel de Vento

Os testes em ambiente controlado de túnel de vento foram realizados na Universidade da Estremadura no campus de Badajoz.

### *1º teste*

O primeiro teste em túnel de vento foi realizado no dia 17 de dezembro de 2012 com o objetivo de avaliar as condições de instalação do protótipo no túnel de vento. O túnel de vento tem uma área de instalação para estruturas, tais como aerogeradores, apresentando 2 m de altura e 2 m de largura.

As instalações do túnel de vento são apresentadas na Figura 6.19 e na Figura 6.20.

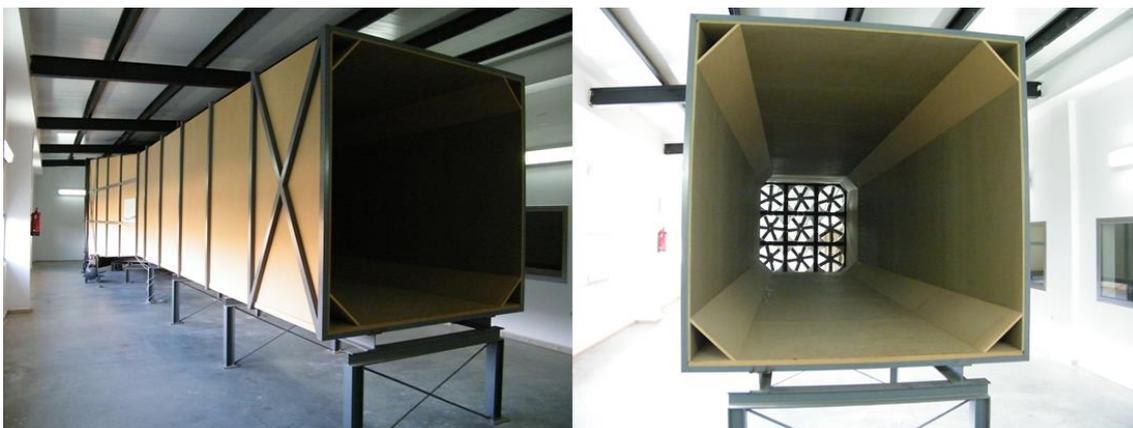


Figura 6.19 - Configuração do túnel de vento.



Figura 6.20 - Configuração do túnel de vento - Ventiladores.

O sistema de controlo dos ventiladores é feito por intermédio de uma consola apresentada na Figura 6.21.



Figura 6.21 - Consola de controlo dos ventiladores.

A consola controla os ventiladores através da potência aplicada em força-de-cavalo (hp), também designado de cavalo de potência. Uma relação entre a potência dos ventiladores e a velocidade do vento dentro do túnel de vento disponibilizada pela equipa da Universidade da Extremadura é apresentada na Figura 6.22.

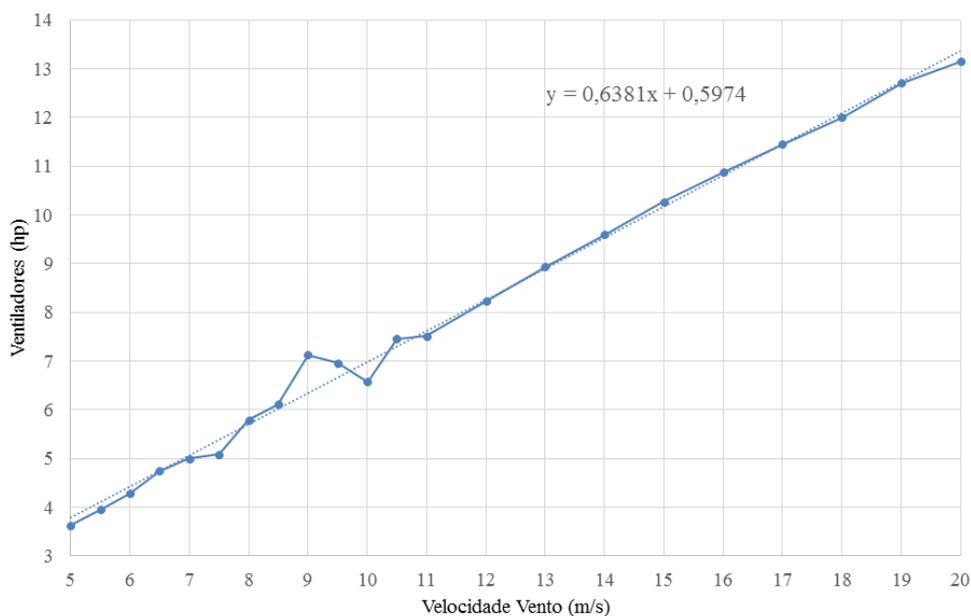


Figura 6.22 - Potência dos ventiladores, velocidade do vento.

A segunda versão do protótipo foi colocada na entrada de ar do túnel de vento segura com pesos para verificar a resistência da ligação dos braços às pás. O protótipo em teste é apresentado na Figura 6.23.

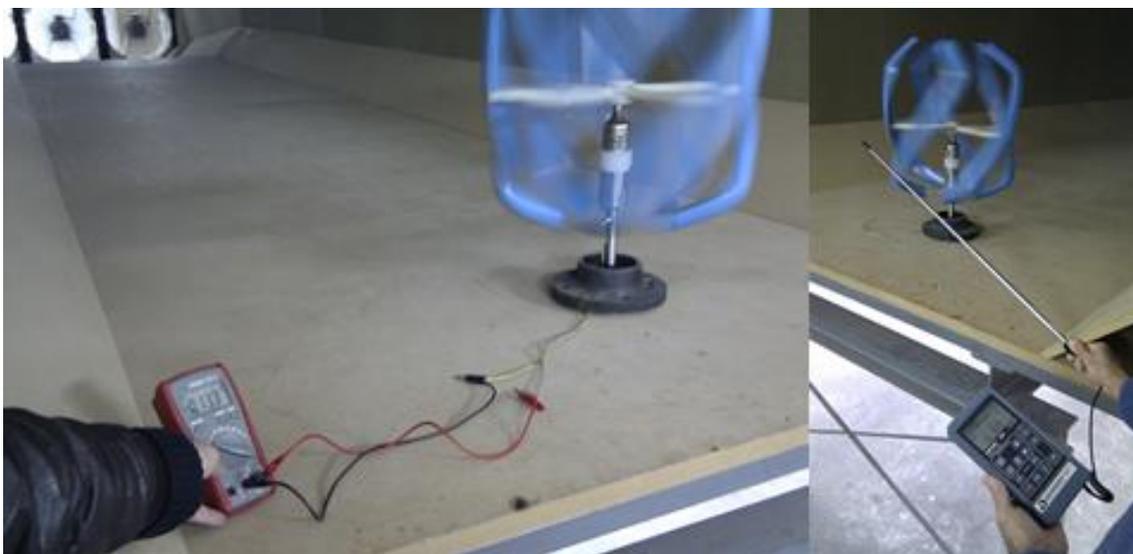


Figura 6.23 - Primeiro teste feito em túnel de vento.

No teste foi usado um multímetro digital ISO-TECH IDM 72 e um anemómetro DUNHOFF Airflow TAS. O aerogerador teve um auto arranque para velocidades do vento entre os 2,5 m/s e 3 m/s, tal como já verificado na Universidade de Évora. A velocidade do vento foi elevada aos 15 m/s sem problemas observáveis no comportamento do aerogerador durante o ensaio.

As características do aerogerador Darrieus com desempenho melhorado em contexto urbano apresentadas na secção 3.4 foram testadas e comprovadas as características evidenciadas, tais como, o auto arranque para velocidades baixas de vento entre os 2,5 m/s e 3 m/s sem auxiliares externos ou componentes extra e a estabilidade da rotação da turbina perante ventos com escoamento com turbulência.

*2º teste*

O segundo teste em contexto de túnel de vento foi realizado no dia 14 de fevereiro de 2013 com o objetivo de avaliar o comportamento do protótipo durante o auto arranque, a exposição a velocidade de vento elevada de 25 m/s e avaliar um sistema de travagem eletrónico. O campus de Badajoz da Universidade da Extremadura construiu um sistema de fixação da torre para instalação do aerogerador no centro do túnel de vento. A instalação do protótipo e o seu posicionamento dentro do túnel de vento é apresentado na Figura 6.24.



Figura 6.24 - Protótipo e seu posicionamento dentro do túnel.

Para avaliar a tensão e corrente elétrica, podendo ao mesmo tempo ser adicionada carga ao aerogerador, foi usada instrumentação da Hewlet Packard apresentada na Figura 6.25.



Figura 6.25 - Instrumentação para avaliação da tensão e corrente.

O auto arranque do protótipo ocorreu aos 2,25 m/s.

Segundo a norma IEC 61400-12 [IEC05] se o aerogerador não tem sistema de paragem físico é necessário validar a segurança do seu comportamento para velocidades de vento máximas nunca inferiores a 25 m/s. Assim, a velocidade do vento foi elevada até aos 25 m/s. O aerogerador não apresentou problemas de funcionamento. Os braços desta segunda versão do protótipo estão encaixados no eixo de rotação do GCCIP. O desenho geral das pás está equilibrado e as extensões nas extremidades das pás, tal como apresentado na secção 3.4, aumenta o equilíbrio e estabilidade das rotações da turbina.

O comportamento de um travão eletrónico foi ensaiado, mantendo a velocidade do vento nos 25 m/s, aplicando uma carga resistiva ao GCCIP. O ensaio consistiu na observação de dois comportamentos: com a adição gradual de resistência elétrica; com a adição repentina de 2  $\Omega$  de resistência elétrica.

No ensaio com a adição gradual de resistência elétrica, o aerogerador não apresentou qualquer alteração no comportamento mantendo a sua estabilidade, havendo apenas uma pequena redução na rotação da turbina como espetável.

No ensaio com a adição repentina de resistência elétrica, o aerogerador sofreu um fenómeno transitório idêntico ao anterior ensaio mas mais severo, visto que, existe uma diferença relativamente ao ensaio anterior que consiste num aumento repentino da conversão da energia mecânica em energia elétrica. Consequentemente a velocidade de rotação é reduzida de forma mais acentuada que a anterior.

O efeito repentino de travagem originou que as pás sofressem uma rotação relativamente à sua posição inicial de aproximadamente 20° originada pela falta de resistência mecânica dos braços das pás. Este ensaio permitiu concluir que o desenho dos braços do protótipo é inadequado para resistir a fenómenos extremos tais como o anteriormente referido, pelo que levou ao desenvolvimento de novos braços para ligar as pás ao eixo do gerador. O estado, i.e., a configuração da turbina após o segundo teste é ilustrado na Figura 6.26.

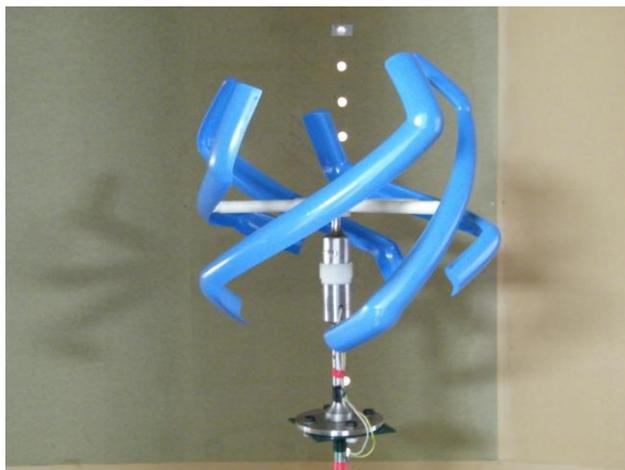


Figura 6.26 - Configuração da turbina após segundo teste.

Os testes revelaram que o aerogerador Darrieus com desempenho melhorado em contexto urbano apresentado na secção 3.4 apresenta auto arranque para velocidades baixas de vento de 2,25 m/s sem auxiliares externos ou componentes extra. O protótipo apresentou um comportamento estável para velocidades de vento até 25 m/s. Devido ao regime transitório que se provocou neste ensaio toda a energia cinética armazenada no rotor foi descarregada sobre os braços e pás da turbina levando à sua rotação relativamente à sua posição inicial. A rotação das pás é devida a estas estarem apenas encaixadas nos braços.

### *3º teste*

O terceiro teste de túnel de vento foi realizado no dia 17 de maio de 2013 com o objetivo de avaliar o comportamento do terceiro protótipo conjuntamente com a turbina SAV-15W de pás retas. Ambas as turbinas usaram o mesmo GSIP apresentado na Figura 6.27.



Figura 6.27 - GSIP usado no terceiro teste.

Neste teste os sensores de conta rotações por infravermelho e anemómetro respetivamente, estavam incorporados na torre apresentados na Figura 6.28.



Figura 6.28 - Terceiro teste: sensores incorporados na torre.

O posicionamento do protótipo e da turbina SAV-15W dentro do túnel de vento é apresentado na Figura 6.29.



Figura 6.29 - Terceiro teste: Posicionamento dos aerogeradores.

O protótipo apresentou um auto arranque para velocidades de vento de 1,25 m/s e a turbina SAV-15W apresentou um auto arranque para velocidades de vento de 4,25 m/s. Pelo que, o protótipo apresenta melhor desempenho no que respeita ao auto arranque, que a turbina SAV-15W. Este melhor desempenho está associado com o perfil e a forma da pá do protótipo que permite obter o binário necessário com velocidade de vento de 1,25 m/s. As rotações por segundo (RPS) do protótipo e do SAV-15W para cada velocidade de vento são apresentadas na Figura 6.30.

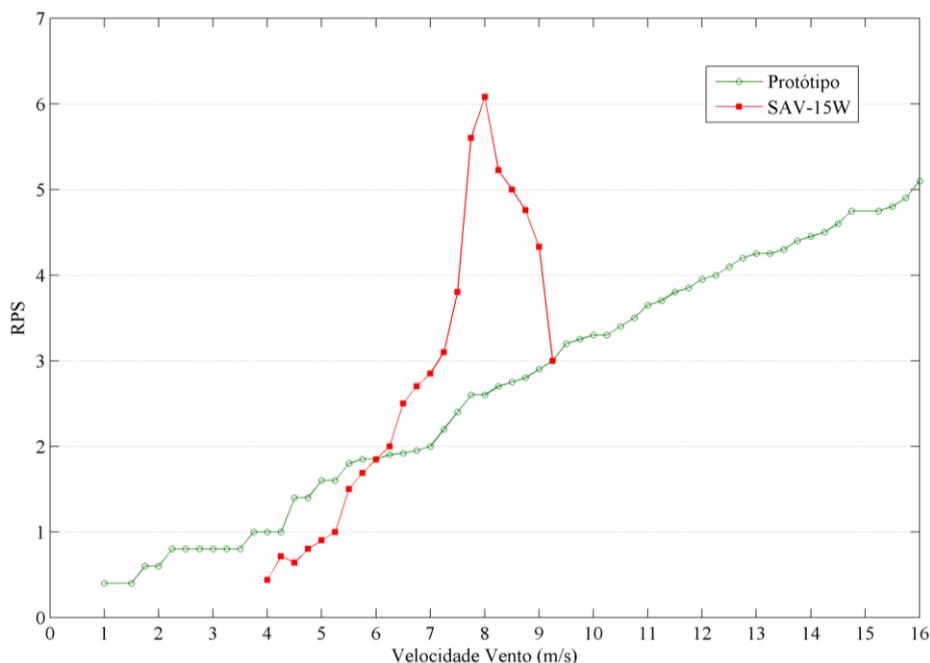


Figura 6.30 - Terceiro teste: RPS das turbinas.

O protótipo teve um comportamento estável e previsível para todas as velocidades de vento apesar de apenas chegar às 5 RPS para velocidades de vento de 16 m/s. A turbina SAV-15W conseguiu chegar às 5 RPS para velocidade de vento de 8 m/s, mas com uma elevada instabilidade. A turbina SAV-15W não apresenta um comportamento estável para velocidades abaixo dos 9,25 m/s e para velocidades superiores a sua integridade estrutural fica comprometida criando bastantes vibrações na torre. O protótipo apresentou um auto arranque para a velocidade de vento de 1,25 m/s. O SAV-15W só conseguiu o auto arranque para a velocidade do vento de 4,25 m/s.

O gerador usado durante os testes é um GSIP para funcionamento melhorado para alta rotação. Dado o comportamento do protótipo, um gerador preparado para funcionar em baixa rotação será o mais adequado para esta configuração de turbina.

As características do aerogerador Darrieus com desempenho melhorado em contexto urbano apresentadas na secção 3.4 foram testadas e comprovadas as características evidenciadas, tais como, o auto arranque para velocidades baixas de vento de 1,25 m/s sem auxiliares externos ou componentes extra e a estabilidade para velocidades de vento superiores a 1 m/s.

## 6.4 Desenvolvimento de Sensores

Os módulos eletrónicos desenvolvidos para implementar a norma ZigBee e a sua capacidade de integração numa REI foram apresentados na secção 5.3. Nesta secção são indicados esquematicamente os módulos eletrónicos [Batista13c] orientados para a recolha de dados em tempo real dos testes anteriormente apresentados, que podem ser usados em outros trabalhos académicos requerendo aquisição de informação semelhante à realizada nos testes.

Os vários sistemas de recolha de dados desenhados foram baseados num sistema de três níveis que é apresentado na Figura 6.31.

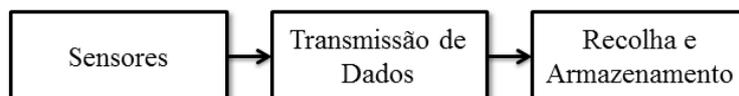


Figura 6.31 - Sensores: sistema de três níveis.

Nível de Sensores – compreende o conjunto de sensores usados e as placas de circuitos impressos com capacidade de processamento de dados. As placas de processamento de dados são usadas sempre que haja necessidade de tratamento de dados antes do seu envio.

Nível de Transmissão de Dados – compreende a tecnologia usada para a transmissão de dados, sendo que no caso dos testes ao protótipo e recorrendo à experiência já adquirida durante os testes de campo sobre a REI, a tecnologia usada na transmissão de dados emprega a norma ZigBee.

Nível de Recolha e Armazenamento – compreende o sistema de recolha de dados e seu armazenamento para posterior análise.

#### *Nível de Sensores*

O tipo de sensores escolhido tem como característica principal a sua capacidade de criar a menor interferência possível no comportamento da turbina.

#### *Anemómetro*

Em alguns testes foi utilizado um anemómetro junto da torre do protótipo para recolha da velocidade do vento em tempo real [Batista13c]. O anemómetro é um A100R da Vector Instruments que cumpre os requisitos de calibração da norma IEC 61400-12-1 [IEC05]. Os dados do anemómetro foram processados por uma placa Arduino, i.e., foi feita uma opção pelo processamento ao nível do sensor, antes de serem enviados para armazenamento. Para cada rotação do anemómetro a velocidade de vento correspondente é de 1,25 m/s.

O esquema de ligações do anemómetro à placa Arduino é ilustrado na Figura 6.32.

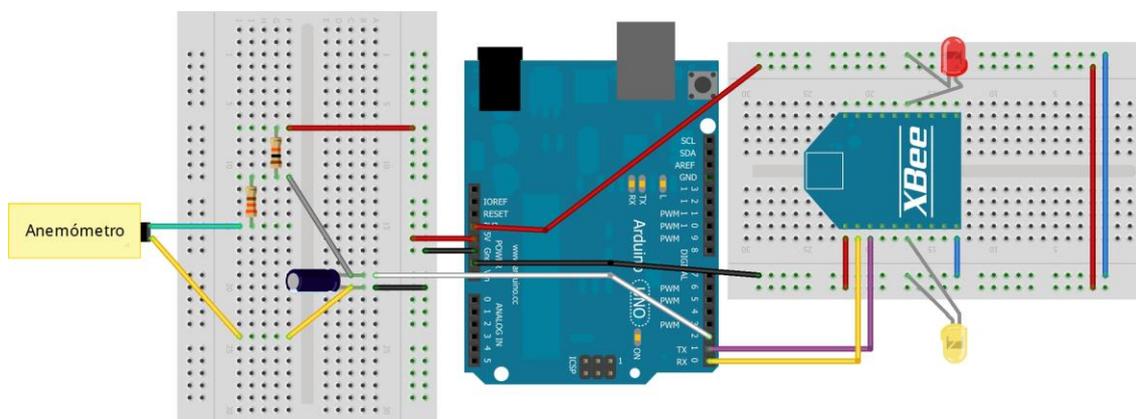


Figura 6.32 - Esquema Arduino com anemómetro.

O módulo XBee tem o pino #1 ligado a uma fonte de alimentação de 3 V e o pino #10 ligado ao pino terra da placa Arduino. Existe um díodo LED amarelo ligado no pino #6 do XBee para indicar a sua inserção numa RTDSF ZigBee e um díodo LED vermelho ligado no pino #15 para indicação de corrente no módulo. O pino #3 do XBee (RX - *receive*) está ligado ao pino #D1 da placa Arduino (TX - *transmit*). O pino #2 do XBee (TX) está ligado ao pino #D0 da placa Arduino (RX).

O anemómetro está ligado à fonte de 5 V do Arduino por intermédio de um divisor de tensão de duas resistências respetivamente de 10 k $\Omega$  e 330  $\Omega$  resultando numa tensão de 0,16 V de entrada no anemómetro.

O anemómetro usado recorre a um interruptor magnético interno para fazer a contagem das rotações. Para diminuir ruído vindo do sistema interno do anemómetro é utilizado um condensador de desacoplagem de 4,7 nF. As contagens das rotações do anemómetro são feitas através do pino digital #2 do Arduino.

O fluxo do programa informático da placa Arduino é apresentado na Figura 6.33.

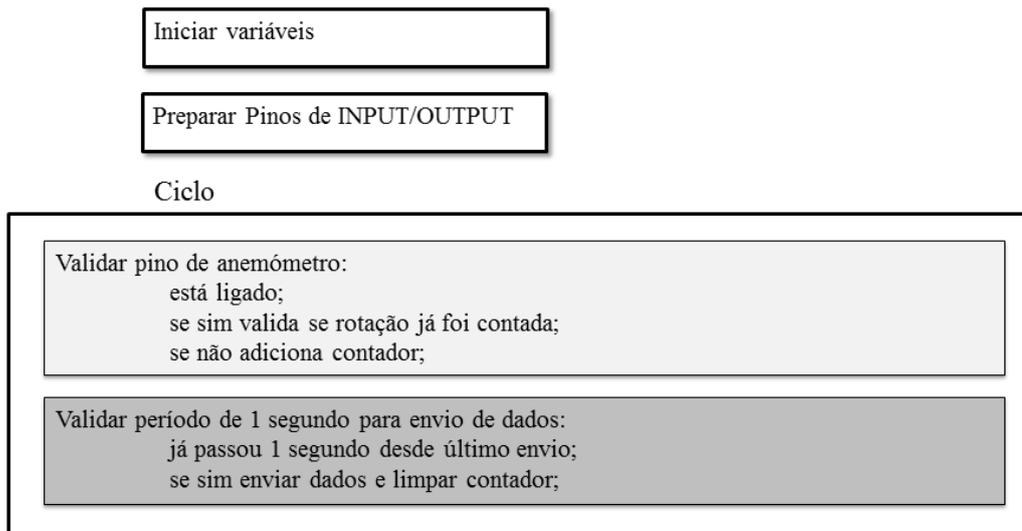


Figura 6.33 - Fluxo programa informático do Arduino com anemómetro.

A placa Arduino com o anemómetro instalado é apresentada na Figura 6.34.



Figura 6.34 - Arduino com anemómetro.

Para transmissão dos dados é usado um módulo ZigBee visível na Figura 6.34. A observação do comportamento do anemómetro durante a realização de testes está coerente com as especificações apresentadas pelo fabricante. O desempenho dos módulos XBee para a criação da RTDSF apresenta um comportamento coerente com o que os estudos teóricos e o conhecimento do desempenho da norma ZigBee levavam a prever.

Os sensores para a contagem de rotações da turbina não podem ter contato físico com os componentes da turbina para não influenciar no seu comportamento. Os sensores testados que reúnem estas características são: o sensor de laser, o sensor sónico, o sensor magnético, e o sensor de infravermelhos.

Os sensores de laser foram descartados devido ao seu preço e à insegurança que existe durante a sua utilização.

#### *Sensor Sónico*

O sensor sónico testado é um Seed Ultrasonic Sensor da Seed Studio Works. O sensor sónico é apresentado na Figura 6.35.



Figura 6.35 - Sensor sónico.

Este sensor funciona com uma fonte de alimentação de 5 V, ideal para utilização conjunta com placas Arduino para processamento dos dados do sensor. O sensor permite a deteção de objetos entre uma distância de 2 cm a 4 m, dentro de um ângulo de 30°. O som emitido pelo sensor tem uma frequência ultrassónica de 40 kHz num conjunto de oito impulsos de 10  $\mu$ s. Os oito impulsos são emitidos, refletidos pelo obstáculo e o eco é recolhido, o sensor vai devolver o tempo entre a emissão dos impulsos e a chegada do eco. Se o pino de saída devolver 38 ms significa que não foi

encontrado nenhum obstáculo. O cálculo da distância ao obstáculo [Seed10] é dado por:

$$D_{obs} = \frac{T_{echo}}{29 \times 2} \quad (6.1)$$

sendo  $D_{obs}$  a distância ao obstáculo em cm,  $T_{echo}$  o tempo do eco em  $\mu$ s.

Considerando que o que se toma como velocidade média do som no ambiente de ensaio o valor de 344,82 m/s, atendendo a elementos que têm a ver com a densidade, a temperatura e a pressão atmosférica, significa que o eco percorre um centímetro em 29 ms. Uma vez que recebemos apenas o som refletido no objeto, significa que o som percorreu duas vezes a distância entre o sensor e o obstáculo.

O fabricante aconselha que o ciclo de envio de impulsos seja inferior a 50 ms. Mesmo aumentando este período para 80 ms, é possível detetar 12500 obstáculos por segundo.

O processamento do cálculo da distância ao obstáculo é feito ao nível do sensor, recorrendo à utilização de uma placa Arduino. Uma vez que o sensor poderia apanhar várias pás em simultâneo como obstáculo, a placa Arduino foi programada para processar os ecos de objetos dentro de um determinado espaço configurável por intermédio de potenciómetros, que definem a distância mínima e a distância máxima para contagem de obstáculos.

O sensor foi colocado num bloco de polietileno expandido de alta densidade, que seria cortado de acordo com as necessidades de instalação do sensor.

A placa Arduino com os sensores e potenciómetros, i.e., o sensor sónico é apresentado na Figura 6.36.

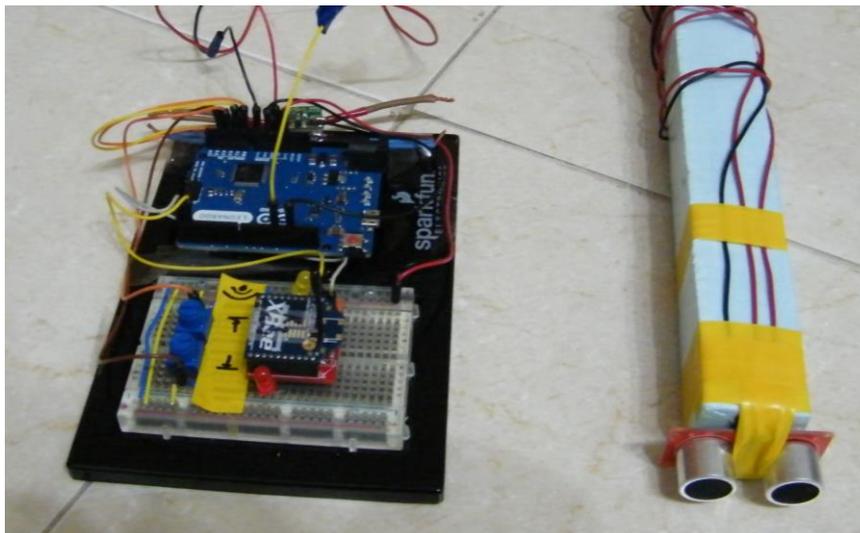


Figura 6.36 - Sensor sónico.

Uma anotação gráfica foi colocada junto dos potenciômetros para auxiliar na regulação das distâncias mínima e máxima de contagem, como é visível a amarelo na Figura 6.36. Para transmissão dos dados é usado um módulo ZigBee. O esquema de ligações do sensor sónico é apresentado na Figura 6.37.

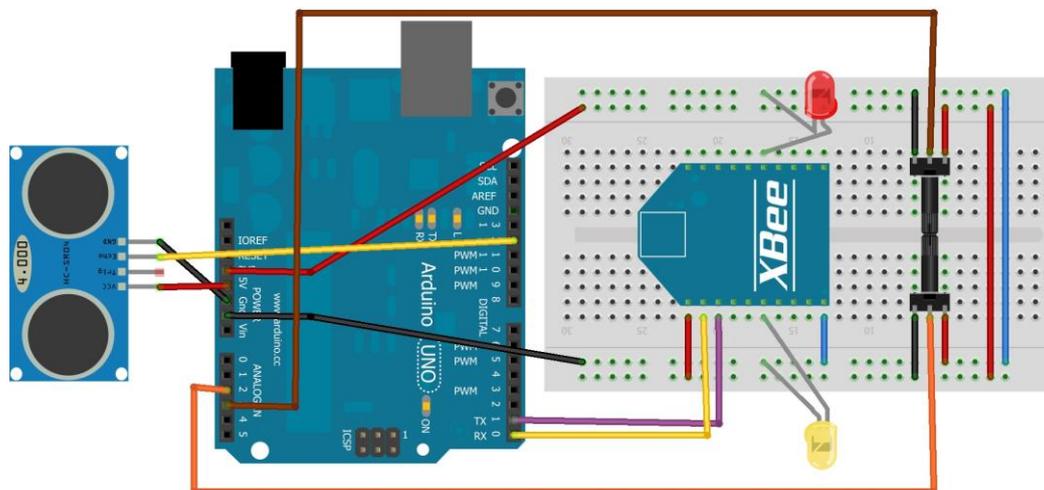


Figura 6.37 - Esquema de ligações do sensor sónico.

O módulo XBee tem o pino #1 ligado a uma fonte de alimentação de 3 V e o pino #10 ligado ao pino terra da placa Arduino. Existe um díodo LED amarelo ligado no pino #6 do XBee para indicar a sua inserção numa RTDSF ZigBee e um díodo LED vermelho ligado no pino #15 para indicação de corrente no módulo. O pino #3 do XBee (RX) está

ligado ao pino #D1 da placa Arduino (TX). O pino #2 do XBee (TX) está ligado ao pino #D0 da placa Arduino (RX).

A tensão selecionada nos dois potenciômetros é recolhida pelo pino analógico #2 e pelo pino analógico #3. Esta medição de tensão nos potenciômetros é usada para definir a distância mínima e distância máxima onde o objeto alvo de contagem pode ser encontrado.

O sensor sónico está ligado a uma fonte de alimentação de 5 V. A interação com o sensor sónico é feita através do pino digital #11 da placa Arduino.

O fluxo do programa informático da placa Arduino do sensor sónico é apresentado na Figura 6.38.

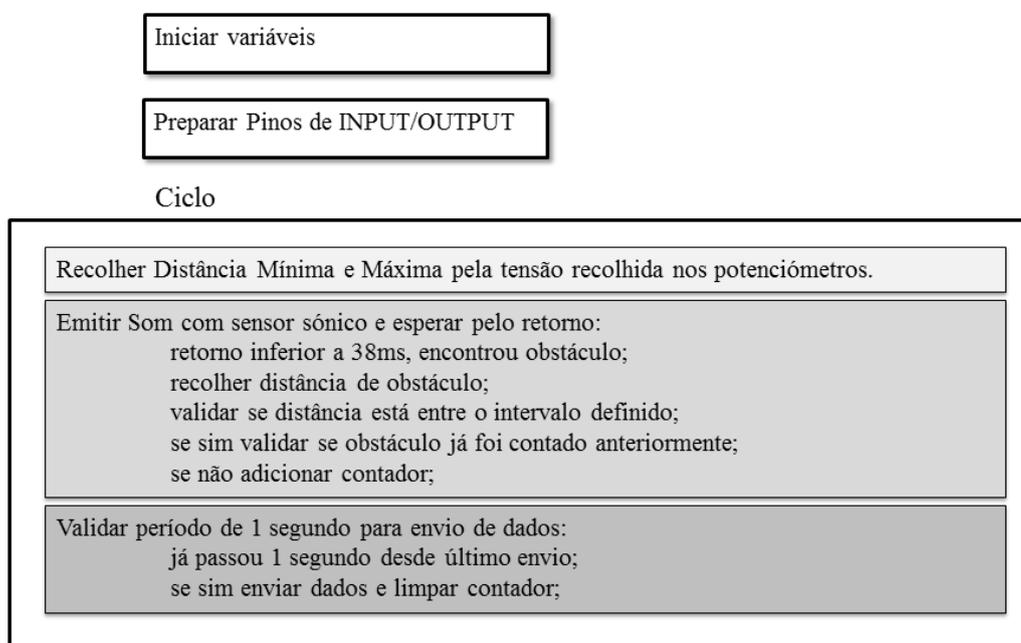


Figura 6.38 - Fluxo do programa da Arduino do sensor sónico.

A observação do desempenho durante a utilização nos testes permite concluir que o conjunto de sensor sónico, a placa Arduino e os módulos XBee, apresentam um comportamento coerente com o que os estudos teóricos e o conhecimento do desempenho dos sistemas eletrónicos levavam a prever.

### *Sensor Magnético*

O sensor magnético incorpora um interruptor magnético. O interruptor magnético “*reed switch*” foi escolhido para os testes com sensor magnético. O interruptor magnético é apresentado na Figura 6.39.



Figura 6.39 – Interruptor magnético.

Inicialmente foram usados ímanes plásticos. A força típica do campo magnético deste tipo de ímanes é de 0,001 T. Apesar da sua grande disponibilidade no mercado tem a inconveniência da curta distância necessária entre o interruptor magnético e o íman, sempre inferior a 3 mm. Esta curta distância inviabilizou a utilização deste tipo de ímanes, porque na rotação das pás qualquer oscilação poderá resultar em contacto físico com o sensor.

Um íman de neodímio foi retirado do suporte de um disco rígido de computador. A força típica do campo magnético deste tipo de ímanes é de 1 T a 1,3 T. Com este tipo de íman o interruptor magnético pode estar a vários centímetros de distância. A desvantagem é que o seu campo magnético afeta o interruptor magnético mais rapidamente, criando grandes oscilações das palhetas do interruptor magnético antes e depois da passagem do íman, i.e., criando várias conexões ou estados de ligado e desligado durante a mesma passagem do íman. Para resolver esta questão foram usados dois interruptores magnéticos, sendo o segundo usado para controlo de passagem do íman, fazendo a contagem apenas quando o íman passa pelo segundo interruptor magnético. O esquema de ligações do sensor magnético, i.e., dos dois interruptores magnéticos à placa Arduino é apresentado na Figura 6.40.

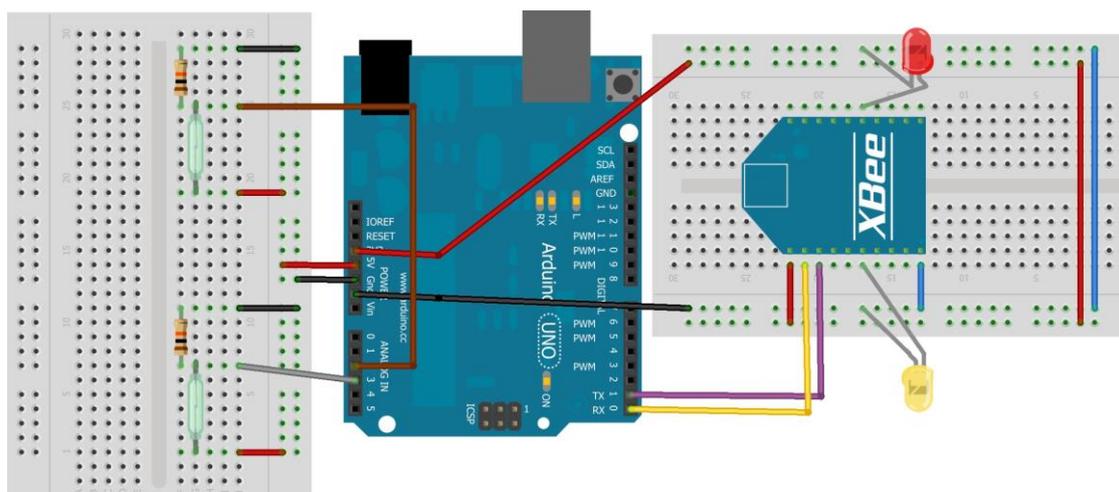


Figura 6.40 - Esquema de ligações do sensor magnético.

O módulo XBee tem o pino #1 ligado a uma fonte de alimentação de 3 V e o pino #10 ligado ao pino terra da placa Arduino. Existe um díodo LED amarelo ligado no pino #6 do XBee para indicar a sua inserção numa RTDSF ZigBee e um díodo LED vermelho ligado no pino #15 para indicação de corrente no módulo. O pino #3 do XBee (RX) está ligado ao pino #D1 da placa Arduino (TX). O pino #2 do XBee (TX) está ligado ao pino #D0 da placa Arduino (RX).

Associado a cada interruptor magnético existe uma resistência de 10 k $\Omega$  para diminuição da tensão. Os interruptores magnéticos estão conectados aos pines analógicos #2 e #3 da placa Arduino.

O fluxo do programa informático da placa Arduino com dois interruptores magnéticos é apresentado na Figura 6.41.

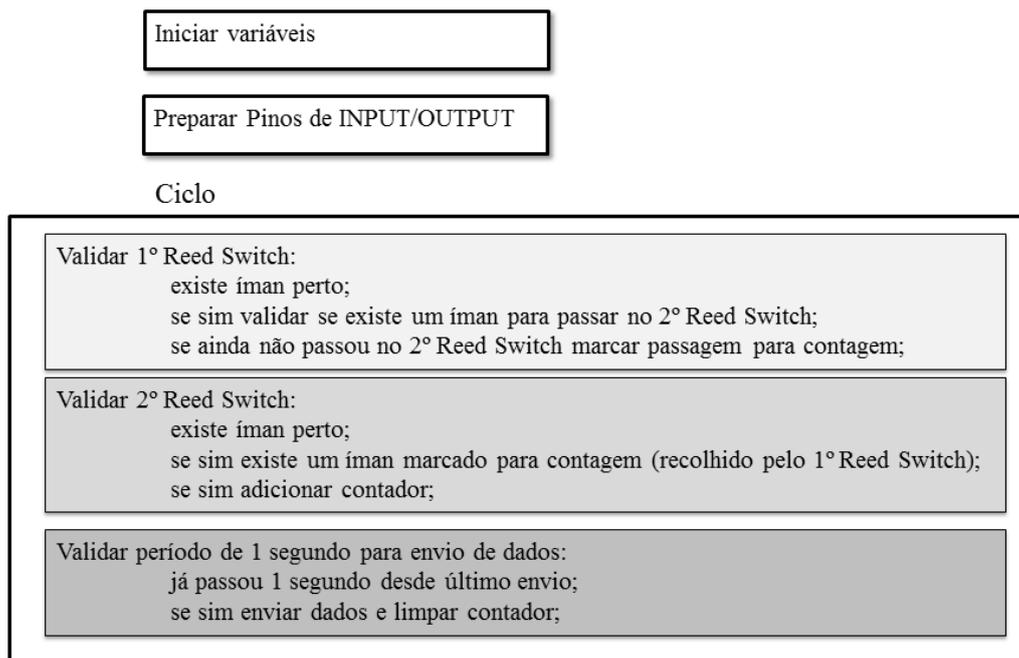


Figura 6.41 - Fluxo programa informático do sensor magnético.

A configuração da instalação dos interruptores magnéticos, o seu suporte, a instalação do íman e as ligações à placa Arduino são apresentados da Figura 6.42.



Figura 6.42 – Instalação de sensores com interruptores magnéticos.

### *Sensor Infravermelho*

O sensor de infravermelhos é constituído por um díodo LED de infravermelhos de alta intensidade e uma célula fotoelétrica de infravermelhos. A passagem de um obstáculo entre o díodo LED e a célula fotoelétrica produz uma interrupção de luz infravermelha no sensor fotoelétrico.

Este sensor foi o mais usado durante os testes para fazer a contagem de rotações do protótipo. Este sensor funciona sem problemas em locais fechados ou em locais ao ar livre durante a noite. Foram encontrados problemas para conseguir pôr a funcionar este sensor ao ar livre durante o dia. O problema estará no sensor fotoelétrico que recolhe um espectro eletromagnético de luz muito alargado, capturando muita interferência da luz do sol.

Para controlo da intensidade luminosa do diódo LED, foi adicionado um potenciómetro. Quando o sensor fotoelétrico apanha um obstáculo entre si e a fonte luminosa existe alguma oscilação que interfere na contagem. A onda pode ser transformada em estados de ligado e desligado. Esta transformação é apresentada na Figura 6.43, onde o sinal no topo é emitido diretamente pelo sensor e o sinal inferior é o sinal já tratado.

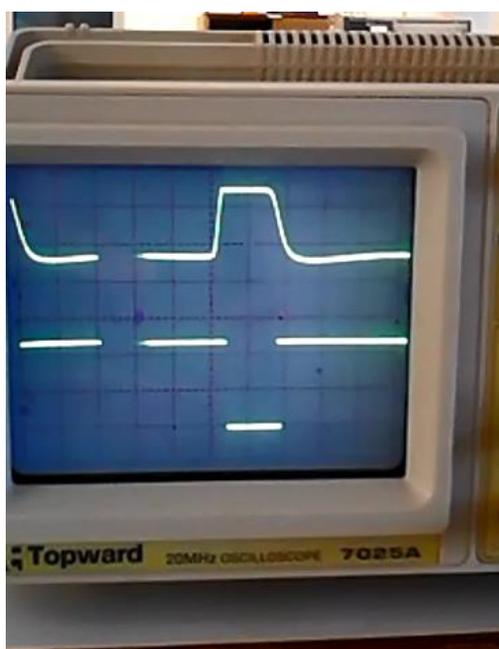


Figura 6.43 - Sinais do sensor de infravermelhos.

O esquema de ligações do diódo LED de infravermelhos, da célula fotoelétrica e do potenciómetro à placa Arduino é apresentado na Figura 6.44.

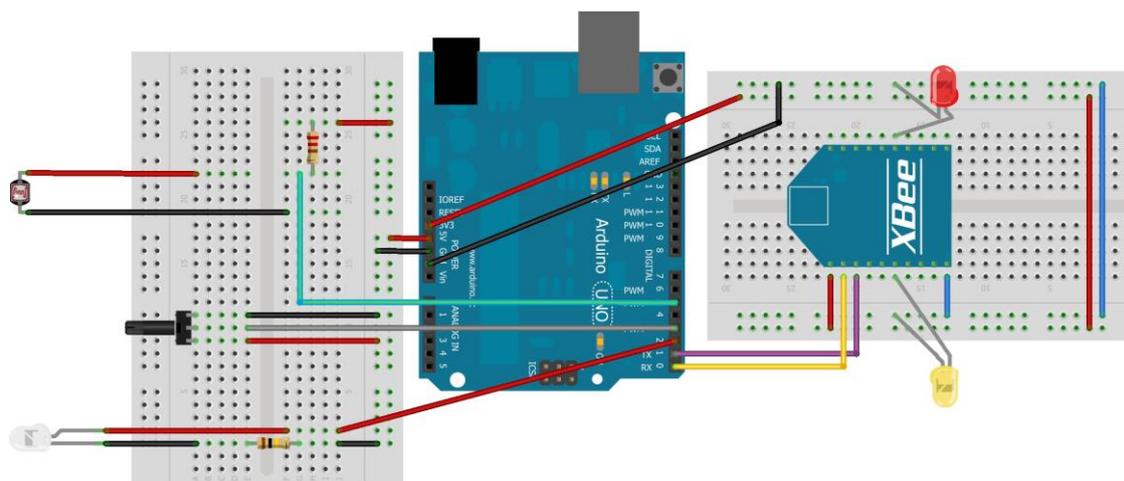


Figura 6.44 - Esquema de ligações do sensor de luz infravermelha.

O módulo XBee tem o pino #1 ligado a uma fonte de alimentação de 3 V e o pino #10 ligado ao pino terra da placa Arduino. Existe um diodo LED amarelo ligado no pino #6 do XBee para indicar a sua inserção numa RTDSF ZigBee e um diodo LED vermelho ligado no pino #15 para indicação de corrente no módulo. O pino #3 do XBee (RX) está ligado ao pino #D1 da placa Arduino (TX). O pino #2 do XBee (TX) está ligado ao pino #D0 da placa Arduino (RX).

O sensor tem um potenciômetro ligado ao pino digital #3 da placa Arduino usado para controlar a intensidade luminosa do diodo LED de infravermelhos. O sensor fotoelétrico está ligado a uma fonte de 5 V em série com uma resistência de 220  $\Omega$ . As interrupções de luminosidade infravermelha feitas pelos obstáculos em passagem são registadas pelo pino digital # 5 da placa Arduino. O diodo LED de infravermelhos tem como fonte de alimentação o pino digital #2 que fornece o máximo de 3,3 V, tendo uma redução de tensão com a utilização em série de uma resistência de 100 k $\Omega$ .

A contagem de rotações é feita sempre que haja uma interrupção de luz infravermelha. O fluxo do programa informático da placa Arduino do sensor de luz infravermelha é apresentado na Figura 6.45.

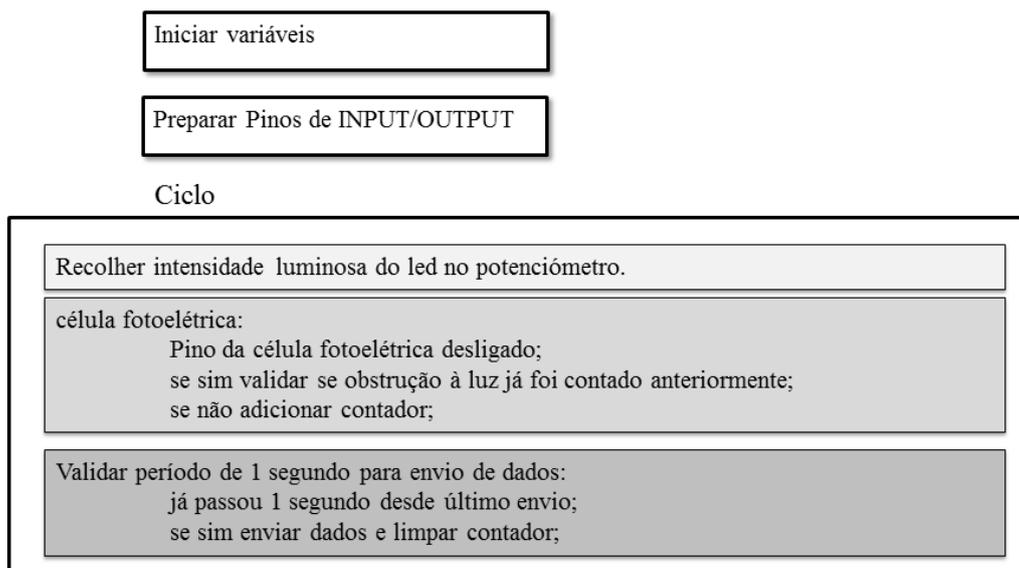


Figura 6.45 - Fluxo programa informático da Arduino com infravermelho.

Os componentes do sensor de luz infravermelha para contagem de rotações são apresentados da Figura 6.46.

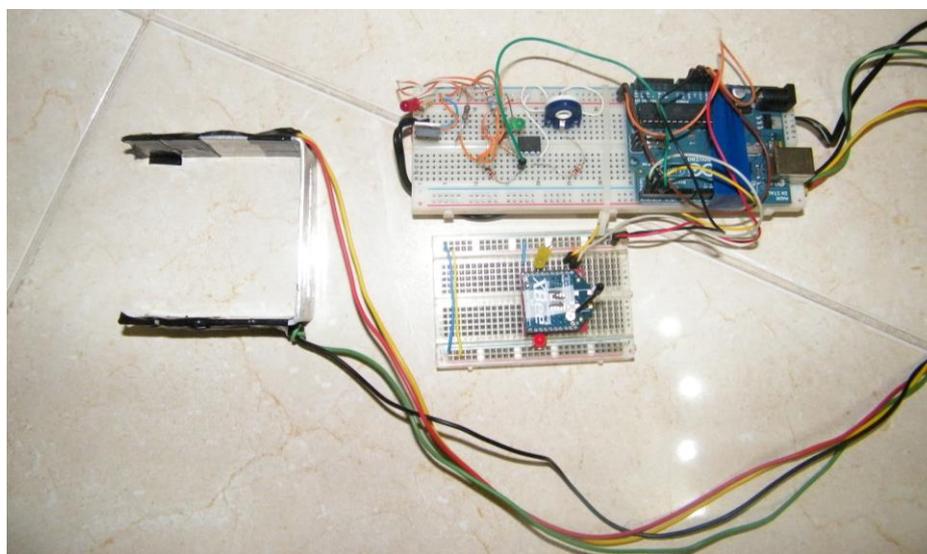


Figura 6.46 - Sensor de contagem de rotações por infravermelhos.

A observação do desempenho durante a utilização nos testes permite concluir que o sensor de luz infravermelha, i.e., o conjunto de díodo LED de infravermelhos de alta intensidade, a célula fotoelétrica de infravermelhos, a placa Arduino e os módulos

XBee, apresentam um comportamento coerente com o que os estudos teóricos e o conhecimento do desempenho dos sistemas eletrônicos levavam a prever.

#### *Nível de Transmissão de Dados*

A transmissão de dados é feita usando RTDSF com a norma ZigBee. Os sensores estão ligados a uma placa Arduino que processa os dados e os envia usando um módulo XBee. Os dados são respetivamente transmitidos e recebidos entre a placa Arduino e o módulo XBee pelos pinos TX e RX.

Os módulos ZigBee estão configurados no modo Transparente, sendo a transmissão de dados feita em série com um formato de dados predefinido. A mensagem de envio de dados tem como formato: um conjunto de caracteres iniciais que identifica que os dados provêm da placa Arduino correta; um separador de início de mensagem; e vários blocos de valores com separador próprio entre si. Cada bloco de valores é constituído por um identificador de tipo de valor a enviar; separador de tipo de valor; e valor a enviar.

O módulo de ZigBee ligado à placa Arduino é configurado como Router em modo Transparente. Um outro módulo ZigBee está ligado a um computador para recolha de dados configurado como coordenador AT. Estes conjuntos de dois módulos de ZigBee estão configurados com o mesmo identificador de rede (ID) da RTD e como destino final de envio o identificador do módulo oposto. Sendo geralmente usados em simultâneo para conjuntos de sensores diferentes, a configuração de conjunto de router e coordenador ZigBee n.º1 é apresentada na Figura 6.47.

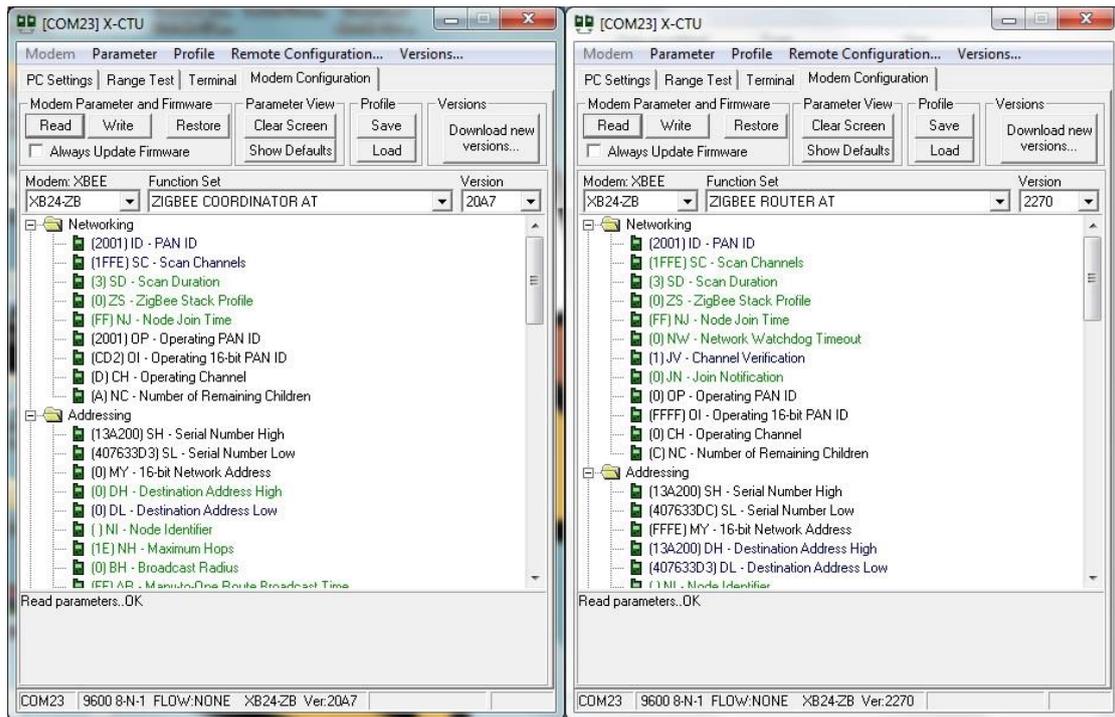


Figura 6.47 - Configuração de conjunto de router e coordenador ZigBee n.º1.

A configuração de conjunto de router e coordenador ZigBee n.º2 é apresentada na Figura 6.48.

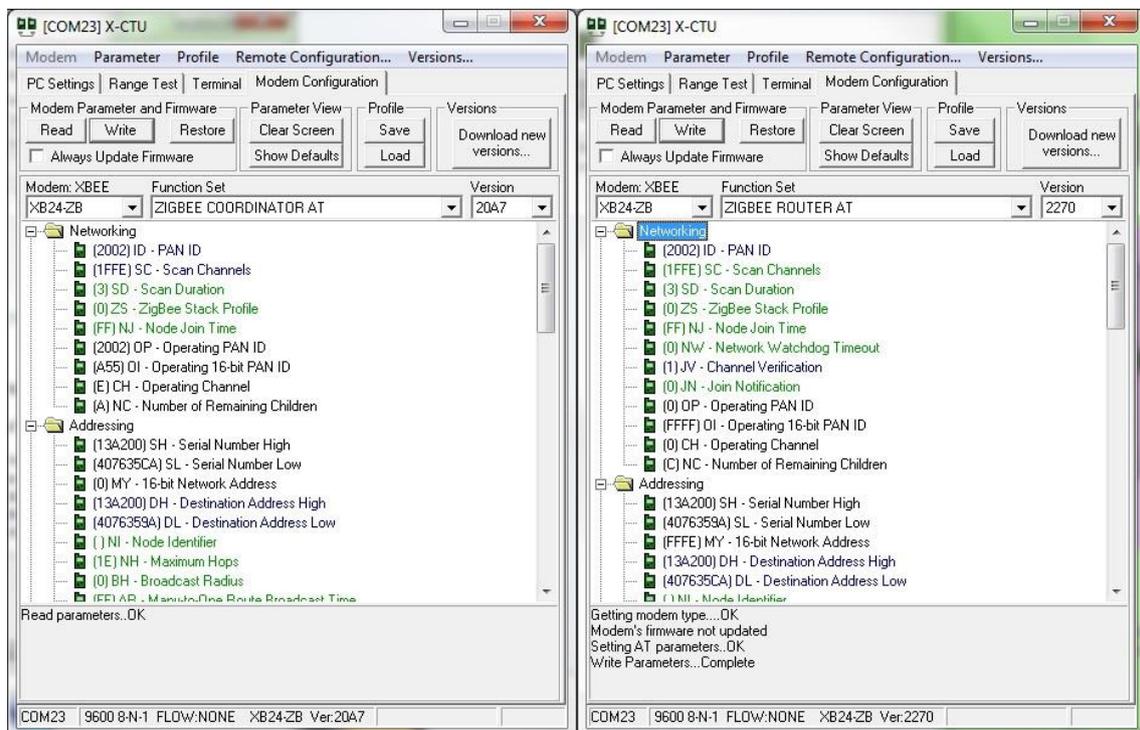


Figura 6.48 - Configuração de conjunto de router e coordenador ZigBee n.º2.

*Nível de Recolha e Armazenamento*

A recolha e armazenamento de dados são feitos por um computador. A esse computador está ligado o módulo ZigBee coordenador que recebe os dados. Os dados são recebidos por uma aplicação informática que foi desenvolvida à medida para cada tipo de sensor construído. As aplicações informáticas foram desenvolvidas na linguagem C# com o editor Visual Studio 2011 e Visual Studio 2012. A estrutura base do fluxo programático das aplicações informáticas é apresentada na Figura 6.49.

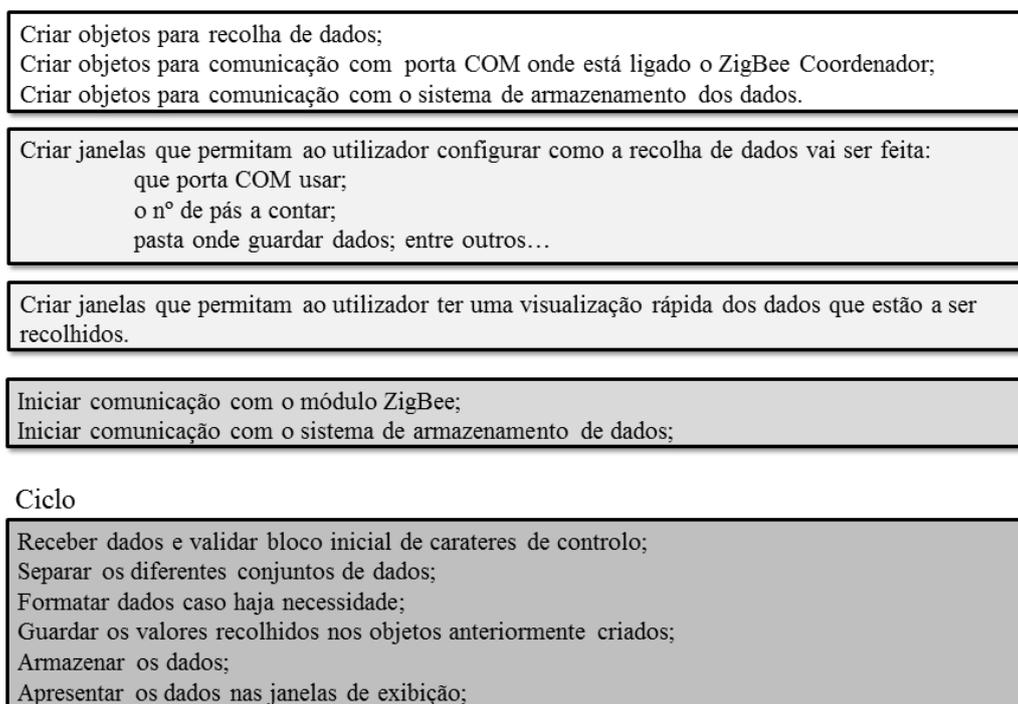


Figura 6.49 - Estrutura base do fluxo programático das aplicações.

A janela de aplicação informática para o contador de pás é apresentada na Figura 6.50.

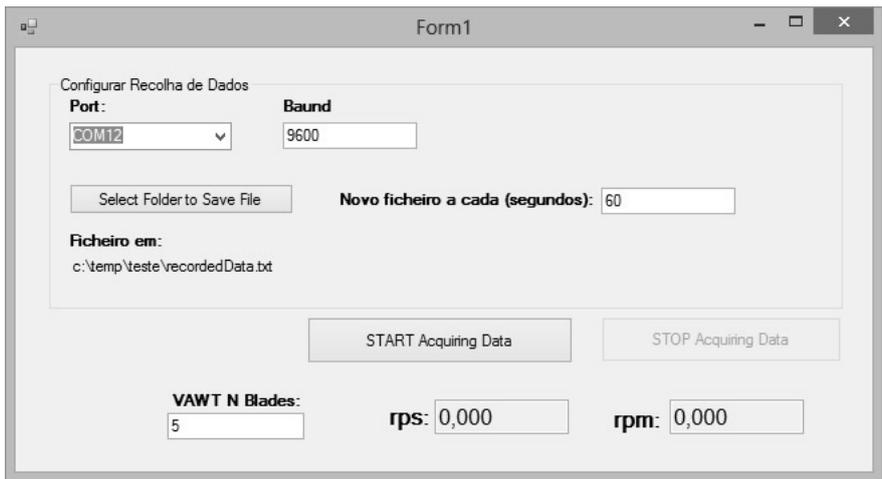


Figura 6.50 - Aplicação informática contador de pás.

A janela de aplicação informática para o contador de pás, tensão e corrente é apresentada na Figura 6.51.

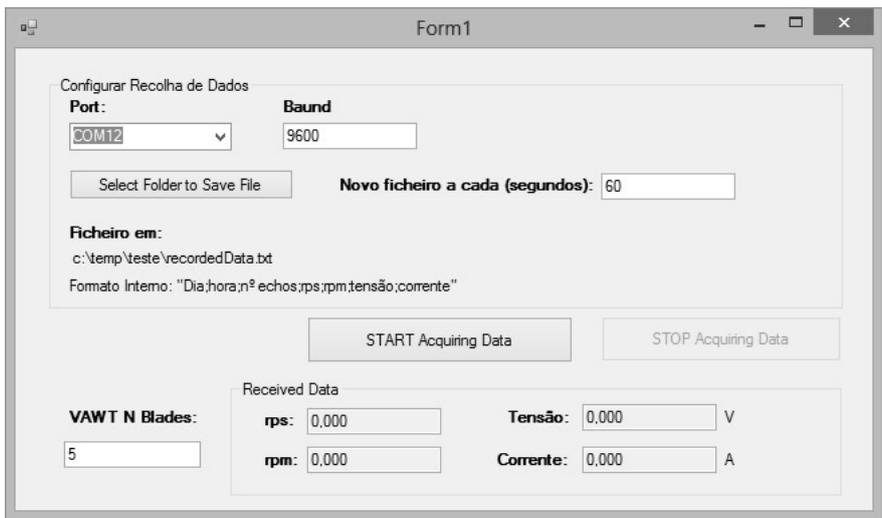
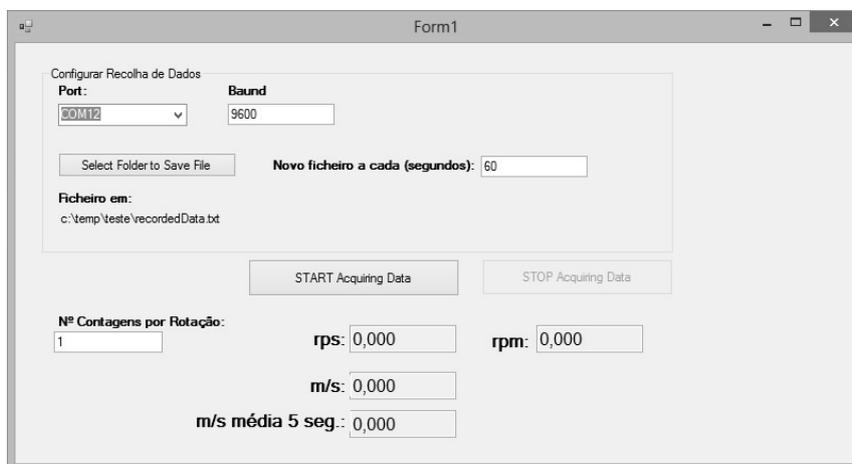


Figura 6.51 - Aplicação informática com contador de pás, tensão e corrente.

A janela de aplicação informática para o anemómetro é apresentada na Figura 6.52.



The screenshot shows a software application window titled "Form1". The window contains the following elements:

- Configurar Recolha de Dados** (Configure Data Collection):
  - Port:** A dropdown menu showing "COM12".
  - Baud:** A text input field containing "9600".
  - Select Folder to Save File:** A button.
  - Novo ficheiro a cada (segundos):** A text input field containing "60".
  - Ficheiro em:** A text input field containing "c:\temp\teste\recordedData.txt".
  - START Acquiring Data:** A button.
  - STOP Acquiring Data:** A button.
- Nº Contagens por Rotação:** A text input field containing "1".
- rps:** A text input field containing "0,000".
- rpm:** A text input field containing "0,000".
- m/s:** A text input field containing "0,000".
- m/s média 5 seg.:** A text input field containing "0,000".

Figura 6.52 - Aplicação informática para anemómetro.

Em todos os testes realizados o armazenamento de dados recolhidos foi feito em ficheiro. Os ficheiros foram automaticamente divididos entre espaços temporais definidos pelo utilizador.

## 6.5 Conclusões

A nova forma de pá conjuntamente com o perfil EN0005 proporciona um auto arranque para velocidades de vento de 1,25 m/s sem qualquer auxílio externo ou componentes extra.

A nova forma da pá do aerogerador mostrou ser adequada para várias velocidades de vento. O protótipo deste aerogerador foi testado até velocidades de vento de 25 m/s sem apresentar vibrações visíveis e instabilidade na rotação.

O protótipo com maior massa nas pás consegue armazenar mais energia cinética o que permite uma maior regularidade na velocidade de rotação tendo em consideração as alterações de velocidade de vento. A maior massa não criou perturbações ao bom funcionamento do aerogerador.

Vários sensores foram desenvolvidos permitindo a recolha em tempo real de vários dados do protótipo. A comunicação dos dados por RTDSF permite eliminar a quantidade de cabos necessários para a recolha de dados, criando menor interferência no desempenho do protótipo. Os módulos usados na criação de RTDSF com a norma ZigBee apresentaram bastante estabilidade, fiabilidade e segurança, que são características importantes na criação de RTD na REI já estudadas na secção 5.4.

Foram apresentados vários desenvolvimentos de sensores: anemómetro, conta rotações com sensor sónico, conta rotações com sensor magnético, conta rotações por infravermelhos. Estes trabalhos são úteis para futuros trabalhos similares de recolha de dados.

---

# CAPÍTULO

# 7

---

## Conclusão

*Neste capítulo são apresentadas as contribuições originais desta tese sobre o tema do novo aerogerador de eixo vertical integrado numa rede inteligente em contexto urbano. Ainda, são indicadas as publicações científicas que resultaram no contexto de divulgação e validação do trabalho de investigação realizado. Por fim, são indicadas linhas de investigação para futuros desenvolvimentos.*

## 7.1 Contribuições

Na última década, a conversão de formas de energia associadas com fontes renováveis para a forma de energia elétrica tem sido concretizada com uma intensificação crescente, sendo identificado como fatores impulsionadores para o uso das fontes renováveis de energia o aumento do valor médio do custo dos combustíveis fósseis e a crescente consciencialização sobre a importância de reduzir as EAGEE para a atmosfera. Esta consciencialização permitiu concretizar acordos de âmbito internacional para que haja uma política comum e se aja na sociedade contemporânea de forma energética e ambientalmente sustentável. Pelo que, é de antecipar que o recurso às fontes renováveis de energia se mantenha e sejam proporcionadas condições para um incremento do aproveitamento destas fontes em contexto urbano, proporcionando uma descentralização mais acentuada da produção de energia elétrica.

Por um lado, é constatado que a sociedade contemporânea é cada vez mais dependente da energia elétrica e a rede elétrica necessita cada vez mais de se adaptar às crescentes necessidades não só no que respeita ao trânsito de energia, que tem de considerar a possibilidade de reversibilidade, i.e., reversão do fluxo de energia elétrica, mas também envolvendo a necessidade de se compatibilizar como via para a prestação de serviços e para a transmissão de dados. Uma adaptação da atual rede elétrica de forma a materializar os conceitos do que propende para a designação de rede inteligente é um assunto de investigação que se julga ser essencial para a futura rede elétrica. Pelo que, é de antecipar que o aproveitamento em contexto urbano de fontes renováveis de energia terá de ser integrado na futura rede elétrica inteligente.

Por outro lado, é constatado que a necessidade de assegurar a diversidade, segurança e estabilidade no fornecimento de energia elétrica em meios urbanos tem vindo a crescer, impulsionando a descentralização da produção energética como forma de colmatar essa necessidade, i.e., aumentando o uso ao recurso energético local para colmatar o uso da energia elétrica requerida nesse local. No aproveitamento de fontes renováveis de energia em meios urbanos a energia eólica é considerada como favorável. Nestes meios de contexto urbano é facto que na literatura técnico-científica os ARV são considerados como opção mais favorável comparativamente com os ARH. Pelo que, é de antecipar

que o aproveitamento neste contexto urbano da energia eólica tenha uma preponderância no recurso aos ARV.

O trabalho de investigação realizado surge como corolário das observações que conduziram a admitir as afirmações antecipadas anteriormente, enunciadas neste capítulo. Este trabalho permitiu oferecer contribuições no âmbito de aerogeradores Darrieus no que respeita: à nova metodologia de estudo baseada nos modelos de TCM e de TCMD, sendo designada de metodologia de Estudo de Aerogerador em Camadas; à metodologia para o estudo de perfis de pá proporcionando auto arranque; ao perfil aerodinâmico designado de EN0005 permitindo auto arranque sem componentes extra, revelando ter auto arranque para velocidades de vento de 1 m/s a 2 m/s e um desempenho equivalente ou superior a outros perfis mais usados em ARV; ao desenvolvimento do protótipo do aerogerador Darrieus; à arquitetura de REI que é designada de Arquitetura em Camadas para a REI; ao modelo de segurança que é designado por Acesso de Dados Certificado na REI; ao desenvolvimento de sensores para monitorização e registo do desempenho de aerogeradores Darrieus em contexto urbano integrado numa rede inteligente.

## 7.2 Publicações

Quando se adota um tema de investigação com originalidade e cujos trabalhos têm como objetivo principal não só contribuir para o desenvolvimento científico e tecnológico da área escolhida, mas também a obtenção de um grau académico pós-graduado, como é o caso desta tese, é fundamental, à medida que os trabalhos envolvidos nas tarefas previamente planeadas vão sendo cumpridos, que os resultados sejam submetidos a audiência da comunidade científica por publicação em revista, comunicação em conferência ou por pedido de patente, permitindo a discussão e à troca de ideias, resultando usualmente no aperfeiçoamento dos trabalhos realizados e conduzindo a uma melhor adequação dos resultados. Em consequência, tendo em consideração a submissão anteriormente referida, em resultado das contribuições desta tese é feita seguidamente a apresentação da lista de publicações, patentes e protótipo.

### Publicações científicas em revistas

- 1 Batista N.C., Melício R., Matias J.C.O., Catalão J.P.S., “Photovoltaic and Wind Energy Systems Monitoring and Building/Home Energy Management Using ZigBee Devices Within a Smart Grid”, Energy (Elsevier), Vol. 49, pp. 306-345, January 2013. (ISI Web of Science) 7 citações

### Capítulo de Livro

- 1 Batista N.C., Melício R., Mendes V.M.F., Figueiredo J., Reis A.H., “Darrieus Wind Turbine Performance Prediction: Computational Modeling”, in: Contribution to Technological Innovation, Eds. L.M. Camarinha-Matos, E. Shahamatnia, G. Nunes, SPRINGER, Heidelberg, Germany, ISBN: 978-3-642-28254-6, pp. 329-336, February 2013. (ISI Web of Science)

### Patentes

- 1 Batista N.C., Melício R., Matias J.C.O., Catalão J.P.S., “Vertical axis turbine blade with adjustable form”, Patent US 2012-0163976-A1, June 2012. (ISI Web of Science)
- 2 Batista N.C., Melício R., Matias J.C.O., Catalão J.P.S., “Pás de forma ajustável de turbinas de rotor vertical”, Patent PT 105445, June 2012.
- 3 N.C. Batista, “Pás de turbinas de rotor vertical operadas a fluído”, Patent PT 104100, June 2008.

## Protótipo

- 1 Desenho e conceção de protótipo de aerogerador de eixo vertical. Inclui o desenho e conceção de sensores inteligentes para monitorização, recolha e armazenamento de dados em tempo real do aerogerador de eixo vertical, nomeadamente o anemómetro, o sensor de velocidade de rotação sónico, o sensor de velocidade de rotação magnético, o sensor de velocidade de rotação fotoeléctrico, i.e., luz infravermelha e o sensor de tensão e corrente

## Publicações científicas em conferências

- 1 Batista N.C., Melício R., Mendes V.M.F., Figueiredo J., “Wireless monitoring of urban wind turbines by zigbee protocol: support application software and sensor modules”, in: Proceedings of the Conference on Electronics, Telecommun. and Computers — CETC 2013, pp. 1-8, Lisbon, Portugal, December 2013.
- 2 Batista N.C., Melício R., Matias J.C.O., Catalão J.P.S., “ZigBee wireless area network for home automation and energy management: field trials and installation approaches”, in: Proceedings of the 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe Conference — ISGT Europe 2012, pp. 1-5, Berlin, Germany, October 2012. (ISI Web of Science) 1 citação
- 3 Batista N.C., Melício R., Matias J.C.O., Catalão J.P.S., “Vertical axis wind turbine performance prediction: an approach to the double multiple streamtube model”, in: Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality — ICREPQ’12, pp. 1-4, Santiago de Compostela, Spain, March 2012.

- 4 Batista N.C., Melício R., Matias J.C.O., Catalão J.P.S., “ZigBee devices for distributed generation management: field tests and installation approaches”, in: Proceedings of the 6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives — PEMD 2012, pp. 1-5, Bristol, UK, March 2012. (SCOPUS)
- 5 Batista N.C., Melício R., Matias J.C.O., Catalão J.P.S., “ZigBee standard in the creation of wireless networks for advanced metering infrastructures”, in: Proceedings of the 16th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference — MELECON’2012, pp. 220-223, Yasmine Hammamet, Tunisia, March 2012. (ISI Web of Science) 5 citações
- 6 Batista N.C., Melício R., Matias J.C.O., Catalão J.P.S., “New blade profile for Darrieus wind turbines capable to self-start”, in: Proceedings of the IET Renewable Power Generation Conference — RPG 2011, pp. 1-5, Edinburgh, UK, September 2011. (SCOPUS) 1 citação
- 7 Batista N.C., Melício R., Matias J.C.O., Catalão J.P.S., “Self-start evaluation in lift-type vertical axis wind turbines: methodology and computational tool applied to asymmetrical airfoils”, in: Proceedings of the III International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives — PowerEng 2011 (technically co-sponsored by IEEE), pp. 1-6, Málaga, Spain, May 2011. (SCOPUS)
- 8 Batista N.C., Melício R., Matias J.C.O., Catalão J.P.S., “Self-start performance evaluation in Darrieus-type vertical axis wind turbines: methodology and computational tool applied to symmetrical airfoils”, in: Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality — ICREPQ’11, pp. 1-6, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, April 2011.

## 7.3 Linhas de investigação

As linhas de investigação para futuros desenvolvimentos, que não estão enquadrados nos objetivos desta tese, merecem consideração pelo interesse prático da continuação de estudos de aplicação do novo aerogerador de eixo vertical integrado numa rede inteligente em contexto urbano.

Assim, como linhas de investigação para desenvolvimento futuro são indicadas:

- D1 desenvolver o novo aerogerador Darrieus apresentado na secção 3.4 em tamanho real em concordância com a norma IEC 61400-2 [IEC06a] e a sua aplicação prática em instalação em contexto urbano;
- D2 avaliar as características aerodinâmicas do perfil EN0005 em ambiente controlado de túnel de vento;
- D3 realizar ensaio ao GSIP instalado na última versão do protótipo para determinação das grandezas elétricas e mecânicas;
- D4 desenvolver um conversor eletrónico de potência adaptado ao novo aerogerador Darrieus apresentado na secção 3.4 para ligação à rede elétrica;
- D5 avaliar o funcionamento e controlo do novo aerogerador Darrieus apresentado na secção 3.4 em coordenação com sistemas fotovoltaicos e sistemas de armazenamento de energia, utilizando sensores para monitorização e registo de informação do desempenho;
- D6 avaliar a possibilidade de elevar o coeficiente de velocidade periférica do aerogerador Darrieus apresentado na secção 3.4 instalando uma caixa de velocidades no veio;
- D7 desenvolver aplicação informática para aplicação do modelo EAC apresentado na secção 3.3, com especial incidência na divisão do espaço da turbina em camadas;
- D8 realizar testes ao novo aerogerador Darrieus apresentado na secção 3.4 em tamanho real, em concordância com as normas IEC 61400-11 [IEC06b] e IEC 61400-12 [IEC05].

## Referências Bibliográficas

- [ABB09] ABB Inc., *Toward a smarter grid: ABB's vision for the power system of the future*, ABB Inc. White Paper, www.abb.com, 2009.
- [Alam09] Alam M.J., Iqbal M.T., “design and development of hybrid vertical axis turbine”, *Proc. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering — CCECE'09*, pp. 1178-1183, May 2009.
- [Alam10] Alam S., Chowdhury M.M.R., Noll J., “SenaaS: An event-driven sensor virtualization approach for Internet of things cloud”, *Proc. IEEE International Conference on Networked Embedded Systems for Enterprise Applications — NESEA2010*, pp. 1-6, Suzhou, China, December 2010.
- [Alessandro10] D'Alessandro V., Montelpare S., Ricci R., Secchiaroli A., “Unsteady aerodynamics of a Savonius wind rotor: a new computational approach for simulation of energy performance”, *Energy*, Vol. 35, No. 8, pp. 3349–3363, August 2010.
- [Alidadi09] Alidadi M., *Duct optimization for a ducted vertical axis hydro current turbine*. Doctoral Thesis, School of Mechanical Engineering University of British Columbia, June 2009.
- [Amjady10] Amjady N., Keynia F., Zareipour H., “Short-term load forecast of microgrids by a new bilevel prediction strategy”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 1, No. 3, pp. 286-294, December 2010.
- [Anderson10] Anderson J., *Fundamentals of aerodynamics*, McGraw-Hill Series in Aeronautical and Aerospace Engineering, 5th Edition, February 2010.

- [Aoki10] Aoki H., Shikano H., Okuno M., Ogata Y., Miyamoto H., Tsushima Y., Yazaki T., Nishimura S., “Cloud architecture for tight interaction with the real world and deep sensor-data aggregation mechanism”, *Proc. International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks — SoftCOM2010*, pp. 280-284, Split, Croatia, November 2010.
- [Asmus10] Asmus P., Davis B., Wheelock C., *Microgrids: smart energy aggregation platforms for distributed power generation, safe grid islanding, reliability, security, and emergency services*, Research Report, 4th quarter 2010.
- [Balduzzi12] Balduzzi F., Bianchini A, Carnevale E.A., Ferrari L., Magnani S., “Feasibility analysis of a Darrieus vertical-axis wind turbine installation in the rooftop of a building”, *Applied Energy*, Vol. 97, pp. 921–929, September 2012.
- [Batista08] Batista N.C., “Pás de turbinas de rotor vertical operadas a fluído”, PT Patent no. 104 100, June 2008.
- [Batista11a] Batista N.C., Melício R., Matias J.C.O., Catalão J.P.S., “Self-start performance evaluation in Darrieus-type vertical axis wind turbines: methodology and computational tool applied to symmetrical airfoils”, *Proc. International Conference on Renewable Energies and Power Quality — ICREPQ’11*, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, April 2011.
- [Batista11b] Batista N.C., Melício R., Matias J.C.O., Catalão J.P.S., “Self-start evaluation in lift-type vertical axis wind turbines: methodology and computational tool applied to asymmetrical airfoils”, *Proc. III International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives — PowerEng 2011*, Málaga, Spain, May 2011.

- [Batista11c] Batista N.C., Melício R., Matias J.C.O., Catalão J.P.S., “New blade profile for Darrieus wind turbines capable to self-start”, *Proc. IET Renewable Power Generation Conference — RPG 2011*, Edinburgh, UK, September 2011.
- [Batista12a] Batista N.C., Melício R., Matias J.C.O., Catalão J.P.S., “Pás de forma ajustável de turbinas de rotor vertical”, PT Patent no. 105 445, June 2012.
- [Batista12b] Batista N.C., Melício R., Matias J.C.O., Catalão J.P.S., “Vertical axis turbine blade with adjustable form”, US Patent no. 0 163 976-A1, June 2012.
- [Batista12c] Batista N.C., Melício R., Matias J.C.O., Catalão J.P.S., “Vertical axis wind turbine performance prediction: an approach to the double multiple streamtube model”, *Proc. International Conference on Renewable Energies and Power Quality — ICREPQ’12*, Santiago de Compostela, Spain, March 2012.
- [Batista12d] Batista N.C., Melício R., Matias J.C.O., Catalão J.P.S., “ZigBee devices for distributed generation management: field tests and installation approaches”, *Proc. 6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives — PEMD 2012*, Bristol, UK, March 2012.
- [Batista12e] Batista N.C., Melício R., Matias J.C.O., Catalão J.P.S., “ZigBee standard in the creation of wireless networks for advanced metering infrastructures”, *Proc. 16th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference — MELECON’2012*, Yasmine Hammamet, Tunisia, pp. 220-223, March 2012.
- [Batista12f] Batista N.C., Melício R., Matias J.C.O., Catalão J.P.S., “ZigBee wireless area network for home automation and energy management: field trials and installation approaches”, *Proc. 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe Conference — ISGT Europe 2012*, Berlin, Germany, October 2012.

- [Batista13a] Batista N.C., Melício R., Matias J.C.O., Catalão J.P.S., “Photovoltaic and wind energy systems monitoring and building/home energy management using ZigBee devices within a smart grid”, *Energy*, Vol. 49, pp. 306-345, January 2013.
- [Batista13b] Batista N.C., Melício R., Mendes V.M.F., Figueiredo J., Reis A.H., “Darrieus wind turbine performance prediction: computational modeling”, *Contribution to Technological Innovation*, Eds. L.M. Camarinha-Matos, E. Shahamatnia, G. Nunes, SPRINGER, Heidelberg, Germany, ISBN: 978-3-642-28254-6, pp. 329-336, February 2013.
- [Batista13c] Batista N.C., Melício R., Mendes V.M.F., Figueiredo J., “Wireless monitoring of urban wind turbines by Zigbee protocol: support application software and sensor modules”, *Proc. Conference on Electronics, Telecommun. and Computers — CETC2013*, Lisbon, Portugal, December 2013.
- [Battaglini08] Battaglini A., Lilliestam J., Bals C., Haas A., “The supersmart grid”, *Proc. European Climate Forum Computers — ECF*, pp. 1-11, Potsdam, Germany, June 2008.
- [Battaglini09] Battaglini A., Lilliestam J., Haas A., Patt A., “Development of supersmart grids for a more efficient utilization of electricity from renewable sources”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 17, No. 10, Pages 911–918, July 2009.
- [Behles12] Behles D., “An integrated green urban electrical grid”, *William & Mary Environmental Law and Policy Review*, Vol. 36, No. 3, pp. 671-712, 2012.
- [Benakila10] Benakila I., Femmam S., George L., “Designing a ZigBee network for signal perception”, *European Journal of Scientific Research*, Vol. 40, No. 2, pp. 264-278, 2010.

- [Blumenthal07] Blumenthal J., Grossmann R., Golatowski F., Timmermann D., “Weighted centroid localization in ZigBee-based sensor networks”, *Proc. IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing Computers — WISP 2007*, pp. 1-6, Alcalá de Henares, Spain, October 2007.
- [Bourguet07] Bourguet R., Martinat G., Harran G., Braza M., “Aerodynamic multi-criteria shape optimization of VAWT blade profile by viscous approach”, *Wind Energy*, pp 215-219, 2007.
- [BP13] BP, *BP energy outlook 2030*, BP London, <http://www.bp.com/en/global/corporate/about-bp/statistical-review-of-world-energy-2013.html>, January 2013.
- [Brahimp95] Brahimp M.T., Allet A., Paraschivoiu I., “Aerodynamic analysis models for vertical-axis wind turbines”, *International Journal of Rotating Machinery*, Vol. 2, No. 1, pp. 15-21, 1995.
- [Burton01] Burton T., *Wind energy handbook*, John Wiley & Sons; 2001.
- [Carrigan12] Carrigan T.J., Dennis B.H., Zhen X.H., Wang B.P., “Aerodynamic shape optimization of a vertical-axis wind turbine using differential evolution”, *ISRN Renewable Energy*, Vol. 2012, October 2012.
- [Castro12] Castro R.M.G., *Uma introdução às energias renováveis*, IST Press, 2nd Edition, 2012.
- [Chen13] Chen C.C., Kuo C.H., “Effects of pitch angle and blade camber on flow characteristics and performance of small-size Darrieus VAWT”, *Journal of Visualization*, Vol. 16, No. 1, pp. 65-74, February 2013.
- [Chong12] Chong W.T., Poh S.C., Fazlizan A., Pan K.C., “Vertical axis wind turbine with omni-directional-guide-vane for urban high-rise buildings”, *Journal of Central South University*, Vol. 19, No. 3, pp. 727-732, March 2012.

- [Claessens06] Claessens M.C., *The design and testing of airfoils for application in small vertical axis wind turbines*, Master Dissertation, School of Aerospace Engineering, Delft University of Technology, 2006.
- [Corral12a] Corral P., Pérez J.A., Lima A.C., Ludwig O., “Parking spaces detection in indoor environments based on ZigBee”, *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 10, No. 1, pp. 1162-1167, Jan. 2012.
- [Corral12b] Corral P., Pérez J.A., Lima A.C., Ludwig O., “Design of automatic meter reading based on ZigBee”, *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 10, No. 1, pp. 1150-1155, January 2012.
- [Costa04] Costa P.A.S., *Atlas do potencial eólico para Portugal continental*, Master Dissertation, School of Earth Science and Engineering - Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, June 2004.
- [Darrieus26] Darrieus G.J.M., “Turbine having its rotating shaft transverse to the flow of the current”, U.S. Patent 1 835 018, Oct, 1926.
- [DecretoLei07] Decreto-Lei n.º 9/2007 de 17 de janeiro, Diário da República, 1.ª série N.º 12, *Regulamento geral do ruído*.
- [Digi12] Digi International, *XBee/XBee-PRO ZB RF modules*, 2012 Digi International Inc., September 2012.
- [Dominy08] Dominy R., Lunt P., Bickerdyke A., Dominy J., “Self-starting capability of a Darrieus turbine”, *Journal of Power and Energy*, Vol. 221, No.1, pp. 111-120, November 2008.
- [Drake10] Drake J., Najewicz D., Watts W., *Energy efficiency comparisons of wireless communication technology options for smart grid enabled devices*, General Electric Company, GE Appliances & Lighting, December 2010.

- [Esteves04] Esteves T.M., *Base de dados do potencial energético do vento em Portugal – metodologia e desenvolvimento*, Master Dissertation, School of Earth Science and Engineering - Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, March 2004.
- [EU05] European Commission - Community Research, *Toward smart power networks: lessons learned from european research FP5 projects*, European Commission Directorate-General for Research, Unit 2 – Energy Production and Distribution Systems, Fifth Framework Programme - FP5, 2005.
- [EU06] European Technology Platform SmartGrids, *Vision and strategy for Europe's electricity networks of the future*, European Commission Directorate-General for Research - Sustainable Energy Systems, Unit 2 – Energy Production and Distribution Systems, 2006.
- [EU07] European Technology Platform, *Strategic research agenda for Europe's electricity networks of the future*, European Commission Research & Innovation, Seventh Framework Programme - FP7, 2007.
- [EU10] European Technology Platform, *Smartgrids: strategic deployment document for Europe's electricity networks of the future*, European Commission Research & Innovation, Seventh Framework Programme - FP7, April 2010.
- [EU11] European Commission - Community Research, *Smart grids: from innovation to deployment*, The European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, EU2020 agenda, April 2011.
- [Fadlullah11] Fadlullah Z.M., Fouda M.M., Kato N., Takeuchi A., Iwasaki N., Nozaki Y., “Toward intelligent machine-to-machine communications in smart grid”, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 49, No. 4, pp. 60-65, April 2011.

- [Feldman89] Feldman L., “XERXES: a sail bladed wind turbine”, *Proc. 24th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, IECEC-89*, Vol.4, pp. 2087-2095, Washington, USA, August 1989.
- [Ferreira06] Ferreira C.J., Van Bussel G.J.W., Van Kuik G.A.M., “An analytical method to predict the variation in performance of an H-Darrieus in skewed flow and its experimental validation” *Proc. European Wind Energy Conference*, pp. 1-6, Athens, Greece, 2006.
- [Ferreira08] Ferreira C.J., Van Bussel G.J.W., Scarano F., Van Kuik G.A.M., “PIV visualization of dynamic stall VAWT and blade load determination”, *Proc. 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, pp. 1-13, Reno, USA, January 2008.
- [Ferreira09a] Ferreira C.J., Van Kuik G.A.M., Van Bussel G.J.W., Scarano F., “Visualization by PIV of dynamic stall on a vertical axis wind turbine”, *Experiments in Fluids*, Vol. 46, No. 1, pp. 97-108, January 2009.
- [Ferreira09b] Ferreira C.J., Dixon K., Hofemann C., Van Kuik G.A.M., Van Bussel G.J.W., “The VAWT in skew: stereo-PIV and vortex modeling”, *Proc. 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Florida, USA, January 2009.
- [Ferreira09c] Ferreira C.J., *The near wake of the VAWT: 2D and 3D views of the VAWT aerodynamics*. Doctoral Thesis, Delft University of Technology, 2009.
- [Fiedler09] Fiedler J., Tullis S., “Blade offset and pitch effects on a high solidity vertical axis wind turbine”, *Wind Engineering*, Vol. 33, No. 3, pp. 237–246, 2009.

- [Freitas08] Freitas A.W., *Controlo de passo de aerogeradores de baixa potência*, Master Dissertation, Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade do Porto, January 2008.
- [Gallizio09] Gallizio F., *Analytical and numerical vortex methods to model separated flows*, Doctoral Thesis, Politecnico di Torino, Université de Bordeaux, 2009.
- [Gao11] Gao J., Xiao Y., Liu J., Liang W., Chen C.L., “A survey of communication/networking in smart grids”, *Future Generation Computer Systems*, April 2011.
- [Glauert48] Glauert H., *The Elements of airfoil and airscrew theory*, 2nd Edition, Cambridge University Press, 1948.
- [Gomez10] Gomez C., Paradells J., “Wireless home automation networks: a survey of architectures and technologies”, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 48, No. 6, pp. 92-101, May 2010.
- [Gungor10] Gungor V.C., Lu B., Hancke G.P., ”Opportunities and challenges of wireless sensor networks in smart grid”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 10, pp. 3557-3564 , October 2010.
- [Gungor11] Gungor V.C., Sahin D., Kocak T., Ergut S., Buccella C., Cecati C., Hancke G.P., “Smart grid technologies: communication technologies and standards”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, November 2011.
- [Gupta08] Gupta R., Biswas A., Sharma K.K., “Comparative study of a three bucket Savonius rotor with a combined three bucket Savonius-three-bladed Darrieus rotor”, *Renewable Energy*, Vol. 33, No. 9, pp. 1974–1981, September 2008.

- [Hanzalek10] Hanzálek Z., Jurčík, P., “Energy efficient scheduling for cluster-tree wireless sensor networks with time-bounded data flows: application to IEEE 802.15.4/ZigBee”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 6, No. 3, pp. 438-450, August 2010.
- [Hirsch87] Hirsch H., Mandal A.C., “A cascade theory for the aerodynamic performance of Darrieus wind turbines”, *Wind Eng.*, Vol. 11, No. 3, pp.164–75, 1987.
- [Hossain07] Hossain A., Iqbal A.K., Rahman A., Arifin M., Abdullah N.H., “Design and construction of H-type vertical axis wind turbine”, *Proc. International Conference on Mechanical Engineering 2007 — ICME2007*, pp. 29-31, Dhaka, Bangladesh, December 2007.
- [Hwang10] Hwang K., Choi B., Kang S., “Enhanced self-configuration scheme for a robust Zigbee-based home automation”, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 56, no. 2, pp. 583–590, July 2010.
- [IEC05] IEC 61400-12-1, International Electrotechnical Commission, *Wind turbines-part 12-1: power performance measurements of electricity producing wind turbines*. Edition 2005-12, Geneva, Switzerland, 2005.
- [IEC06a] IEC 61400-2, International Electrotechnical Commission, *Wind turbines-part 2: Design requirements for small wind turbines*. Edition 2006-03, Geneva, Switzerland, 2006.
- [IEC06b] IEC 61400-11, International Electrotechnical Commission, *Wind turbine generator systems-part 11: acoustic noise measurement techniques*. Edition 2:2002 consolidated with amendment 1:2006, Geneva, Switzerland, 2006.
- [IEC10] International Electrotechnical Commission (IEC), *IEC smart grid standardization roadmap*, IEC SMB Smart Grid Strategic Group (Smart Grid 3), Edition 1.0, June 2010.

- [IEEE11] Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), *IEEE P2030 draft guide for smart grid interoperability of energy technology and information technology operation with the electric power system, and end-use applications and loads*, Institute of Electrical and Electronic Engineers - IEEE P2030, January 2011.
- [Islam08] Islam M., Ting D., Fartaj A., “Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, No. 4, pp. 1087–1109, May 2008.
- [Iwayemi11] Iwayemi P., Zhou A., “Developing Zigbee deployment guideline under wifi interference for smart grid applications”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 2, No. 1, pp. 110-120, Mar. 2011.
- [Jianwu09] Jianwu Z., Lu Z., “Research on distance measurement based on RSSI of ZigBee”, *Proc. ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management — CCCM 2009*, vol. 3, pp. 210-212, August 2009.
- [Kapadia11] Kapadia A., Myers S., Wang X., Fox G., “Toward securing sensor clouds”, *Proc. International Conference on Collaboration Technologies and Systems — CTS*, pp. 280-289, July 2011.
- [Kirke11] Kirke B.K., Lazauskas L., “Limitations of fixed pitch Darrieus hydrokinetic turbines and the challenge of variable pitch”, *Renewable Energy*, Vol. 36, pp. 893-897, 2011.
- [Kirke91] Kirke B.K., Lazauskas L., “Enhancing the performance of vertical axis wind turbine using a simple variable pitch system”, *Wind Engineering*, Vol. 15, pp. 187-195, 1991
- [Kirke98] Kirke B.K., *Evaluation of self-starting vertical axis wind turbines for stand-alone applications*, Doctoral Thesis, School of Engineering Griffith University, April 1998.

- [Laaksonen10] Laaksonen H.J., “Protection principles for future microgrids”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 25, No. 12, pp. 2910-2918, December 2010.
- [Lapin75] Lapin E.E., Theoretical performance of vertical axis wind turbines, *Proc. The Winter Annual Meeting*, pp. 1-11, Houston, USA, 1975.
- [Larsen75] Larsen H.C., “Summary of a vortex theory for the cyclogiro”, *Proc. 2nd US national conferences on wind engineering research*, Colorado State University. Vol. 8, pp. 1–3, 1975.
- [Lasseter11] Lasseter R.H., Eto J.H., Schenkman B., Stevens J., Vollkommer H., Klapp D., Linton E., Hurtado H., Roy J., “CERTS microgrid laboratory test bed”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 26, No. 1, pp. 325-332, January 2011.
- [Mañana11] Mañana M., “Small wind energy systems, state of the art and new challenges”, *Proc. International Conference on Renewable Energies and Power Quality — ICREPQ’11*, Gran Canaria, Spain, April 2011.
- [Manwell02] Manwell, J.F., McGowan, J.G., Rogers, A.L., *Wind energy explained theory, design and application*, John Wiley & Sons; 2002.
- [Melício10] Melício R., *Modelos dinâmicos de sistemas de conversão de energia eólica ligados à rede eléctrica*, Doctoral Thesis, School of Electrotechnical Engineering University of Beira Interior, January 2010.
- [Melo12] Melo R.R., Neto A.S., “Integral analysis of rotors of a wind generator”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 7, pp. 4809-4817 , September 2012.
- [Mertens03] Mertens S., Van Kuik G., Van Bussel G., “Performance of an H-Darrieus in the skewed flow on a roof”, *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 125, No.4, pp. 433-440, 2003.

- [Mohsenian10] Mohsenian A., Garcia A., “Coordination of cloud computing and smart power grids”, *Proc. IEEE International Conference on Smart Grid Communications — SmartGridComm*, pp. 368-372, Gaithersburg, USA, October 2010.
- [Muller09] Müller G., Jentsch M.F., Stoddart E., “Vertical axis resistance type wind turbines for use in buildings”, *Renewable Energy*, Vol. 34, No. 5, pp. 1407-1412, May 2009.
- [Muraca75] Muraca R.J., Stephens M.V., Dagenhart J.R., *Theoretical performance of cross-wind axis turbines with results for a catenary vertical axis configuration*. NASA TMX-72662, USA, 1975.
- [Nikkhajoei09] Nikkhajoei H., Lasseter R.H., “Distributed generation interface to the CERTS microgrid”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 24, No. 3, pp. 1598-1608, July 2009.
- [NIST10] National Institute of Standards and Technology (USA), *NIST framework and roadmap for smart grid interoperability standards*, U.S. Department of Commerce — NIST Office of the National Coordinator for Smart Grid Interoperability, Release 1.0, January 2010.
- [Nobile11] Nobile R., Vahdati M., Barlow J., Mewburn A., “Dynamic stall for a vertical axis wind turbine in a two-dimensional study”, *Proc. World Renewable Energy Congress*, pp. 4225-4232, Linköping, Sweden, 2011.
- [Noll80] Noll R.B., Ham N.D., “Analytical evaluation of the aerodynamic performance of a high-reliability vertical-axis wind turbine”, *Proc. AWEA Nation Conference*, pp. 106-113, Pittsburgh, USA, 1980.
- [Olson09] Olson D., Visser K., *Self-starting contra-rotating vertical axis wind turbine for home heating applications*, Clarkson University Defy Convention, 2009.

- [Paraschivoiu81] Paraschivoiu I., *Double-multiple streamtube model for Darrieus in turbines*, In NASA. Lewis Research Center Wind Turbine Dyn., pp. 19-25, Canada, May 1981.
- [Paraschivoiu83a] Paraschivoiu I., Delclaux F., Fraunie P., Beguier C., “Aerodynamic analysis of the Darrieus rotor including secondary effects”, *Journal of Energy*, Vol. 7, No. 5, pp. 416–21, 1983.
- [Paraschivoiu83b] Paraschivoiu I., Delclaux F., “Double multiple streamtube model with recent improvements”, *Journal of Energy*, Vol. 7, pp. 250–5, 1983.
- [Paraschivoiu88] Paraschivoiu I., “Double-multiple streamtube model for studying vertical-axis wind turbines”, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 4, No. 4, pp. 370-377, 1988.
- [Paraschivoiu02] Paraschivoiu I., Saeed F., Desobry V., “Prediction capabilities in vertical-axis wind turbine aerodynamics“, *Proc. The World Wind Energy Conference and Exhibition 2002*, Berlin, Germany, July 2002.
- [Paraschivoiu09a] Paraschivoiu I., *Wind turbine design with emphasis on Darrieus concept*, 1st ed. Canada: Polytechnic International Press; December 2009.
- [Paraschivoiu09b] Paraschivoiu I., Trifu O., Saeed F., “H-Darrieus wind turbine with blade pitch control”, *Hindawi International Journal of Rotating Machinery*, Vol. 2009, pp. 1-7, April 2009.
- [Parikh10] Parikh P.P., Kanabar M.G., Sidhu T.S., “Opportunities and challenges of wireless communication technologies for smart grid applications”, *Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting 2010*, pp. 1-7, Minneapolis, USA, September 2010.

- [Polyak11] Polyák A., “The intelligent energy”, *Proc. IEEE 3rd International Symposium on Exploitation of Renewable Energy Sources — EXPRES*, pp. 113-115, Budapest, Hungary, April 2011.
- [Potter09] Potter C.W., Archambault A., Westrick K., “Building a smarter smart grid through better renewable energy information”, *Proc. IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition — PSCE'09*, Seattle, USA, pp. 1-5, April 2009.
- [Read80] Read S., Sharpe D.J., “An extended multiple streamtube theory for vertical axis wind turbines”, *Proc. 2nd BWEA Workshop*, pp. 65-72, Cranfield, UK, April 1980.
- [Savonius29] Savonius S.J., “Rotor adapted to be driven by wind or flowing water”, US Patent no. 1 697 574, August, 1929.
- [Schellekens11] Schellekens G., Battaglini A., Finlay C., Fürstenwerth D., Lilliestam J., Patt A., Schmidt P., *Moving towards 100% renewable electricity in Europe & North Africa by 2050*, PricewaterhouseCoopers — Evaluation Progress in 2010, May, 2011.
- [Shahraeini10] Shahraeini M., Javidi M.H., Ghazizadeh M.S., “A new approach for classification of data transmission media in power systems”, *Proc. International Conference on Power System Technology — POWERCON*, pp. 1-7, Hangzhou, China, October 2010.
- [Shan11] Shan Q., Glover I.A., Atkinson R.C., Bhatti S.A., Portugues I.E., Moore P.J., Rutherford R., Vieira M., Marcus A., Souza B.A., “Estimation of impulsive noise in an electricity substation”, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 53, No. 3, pp. 653-663, August 2011.

- [Sharpe77] Sharpe D.J., *A theoretical and experimental study of the Darrieus vertical axis wind turbine*. School of Mechanical, Aeronautical & Production Engineering, Kingston Polytechnic Research Report, October, 1977.
- [Silva11a] Silva G., *Desenvolvimento de uma turbina eólica de eixo vertical*, Master Dissertation, School of Aeronautical Engineering, Instituto Superior Técnico, July 2011.
- [Silva11b] Silva L.F., Branquinho O.C., Assumpção R.M., “Mobility impact on IEEE 802.15.4 network through a simulation platform”, *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 9, No. 5, pp. 655-662, September 2011.
- [Singh09] Singh T., Vara P.K., “Smart metering the clouds”, *Proc. IEEE 18th International Workshops on Enabling Technologies: Infrastructures for Collaborative Enterprises*, pp. 66-71, Groningen, Netherlands, July 2009.
- [Snyder09] Snyder B., Kaiser M.J., “A comparison of offshore wind power development in Europe and the U.S.: patterns and drivers of development”, *Appl. Energy*, vol. 86, No. 10, pp. 1845-1856, October 2009.
- [Spera09] Spera D.A., *Wind turbine technology: fundamental concepts of wind turbine*, 2nd ed. ASME Press, American Society of Mechanical Engineers, June 2009.
- [Stannard07] Stannard N., Bumby J.R., “Performance aspects of mains connected small-scale wind turbines”, *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 1, No. 2, pp. 348-356, March 2007.
- [Strickland75] Strickland J.H., *The Darrieus turbine: a performance prediction model using multiple streamtubes*, Sandia Laboratories, Albuquerque, 1975.

- [Strickland81a] Strickland J.H., Webster B., Nguyen T., *A vortex model of the Darrieus turbine: an analytical and experimental study*, Sandia Laboratories Report SAND81-7917, 1981.
- [Strickland81b] Strickland J.H., *A vortex model of the Darrieus turbine: an analytical and experimental study*, Sandia Laboratories Report SAND79-7058, February 1981.
- [Strickland87] Strickland J.H., *VAWT stochastic wind simulator*, Sandia Laboratories Report SAND87-0501, April 1987.
- [Suzuki08] Suzuki M., “An experimental vertical-axis wind turbine system with Bellshion blades”, *JEC Magazine*, No. 40, May 2008.
- [Takao09a] Takao M., Kuma H., Maeda T., Kamada Y., Oki M., Minoda A., “A straight-bladed vertical axis wind turbine with a directed guide vane row — Effect of guide vane geometry on the performance”, *Journal of Thermal Science*, Volume 18, No. 1, pp 54-57, 2009
- [Takao09b] Takao M., Maeda T., Takita H., Kamada Y., Saito Y., Toshimitsu K., “Experimental study of a straight-bladed vertical axis wind turbine with a directed guide vane row”, *Proc. 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering ASME 2009*, Honolulu, USA, June 2009.
- [Templin74] Templin R.J., *Aerodynamic performance theory for the NRC vertical-axis wind turbine*, N.A.E. Report LTR-LA-190, June 1974.
- [Ullah07] Ullah, N.R., Chalmers, G.; Thiringer, T., Karlsson, D., “Operation of wind energy installations during power network disturbances”, *Proc. IEEE International Conference on Electric Machines & Drives — IEMDC'07*, Vol. 2, pp. 1396-1400, Antalya, Turkey, May 2007.

- [Underwooda07] Underwooda C.P., Ramachandranb J., Giddingsa R.D., Alwana Z., “Renewable-energy clusters for remote communities”, *Applied Energy*, Vol. 84, No. 6, pp. 579–598, June 2007.
- [Seed10] Seed Studio Works, Seed Ultrasonic Sensor, [http://www.seedstudio.com/wiki/Ultra\\_Sonic\\_range\\_measurement\\_module](http://www.seedstudio.com/wiki/Ultra_Sonic_range_measurement_module), May 2010.
- [Vasquez10] Vasquez J.C., Guerrero J.M., Miret J., Castilla M., Vicuña L.G., “Hierarchical control of intelligent microgrids”, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, Vol. 4, No. 4, pp. 23-29, December 2010
- [Wakui05] Wakui T., Tanzawa Y., Hashizume T., Nagao T., “Hybrid configuration of Darrieus and Savonius rotors for stand-alone wind turbine generator”, *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 150, No. 4, pp. 13-22, 2005.
- [Wang11] Wang M.Q., Gooi H.B., “Spinning reserve estimation in microgrids”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 26, No. 3, 1164-1174, August 2011.
- [Webb07] Webb A., *The viability of domestic wind turbines for urban Melbourne*, Alternative Technology Association - Sustainability Victoria, Australia, June 2007.
- [Wei10] Tong W., *Wind power generation and wind turbine design*, WIT Press, Boston, USA, 2010.
- [Williges10] Williges K., Lilliestam J., Patt A., “Making concentrated solar power competitive with coal: The costs of a European feed-in tariff”, *Energy Policy*, Vol. 38, No. 6, pp. 3089–3097, June 2010.
- [Wilson74] Wilson R.E., Lissaman P.B.S., *Applied aerodynamics of wind power machines*, Oregon State University, May, 1974.
- [Wilson80] Wilson R.E., “Wind-turbine aerodynamics”. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 5, No. 3-4, pp. 357–72, May 1980.

- [Wilson81] Wilson R.E., Walker S.N., *Fixed-wake analysis of the Darrieus rotor*, Sandia Laboratories Report SAND81-7026, July 1981.
- [Yi11] Yi P., Iwayemi A., Zhou C., “Developing ZigBee deployment guideline under wifi interference for smart grid applications”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 2, No. 1, pp. 110-120, March 2011.
- [Yuriyama10] Yuriyama M., Kushida T., “Sensor-cloud infrastructure - physical sensor management with virtualized sensors on cloud computing”, *Proc. 13th International Conference on Network-Based Information Systems — NBIS2010*, pp. 1-8, Takayama, Japan, November 2010.
- [Zhang04] Zhang J., *Numerical modeling of vertical axis wind turbine (VAWT)*, Master Dissertation, School of Mechanical Engineering - Technical University of Denmark, December 2004.
- [Zhou12] Zhou L., Rodrigues J., Oliveira L., “QoE-driven power scheduling in smart grid: architecture, strategy, and methodology”, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 50, No. 5, pp. 136-141, May 2012.
- [ZigBee07a] ZigBee Alliance, *Zigbee and wireless frequency coexistences*, ZigBee Alliance White Paper, June 2007.
- [ZigBee07b] ZigBee Alliance, *ZigBee: The choice for energy management and efficiency*, ZigBee Alliance White Paper, June 2007.
- [ZigBee07c] ZigBee Alliance, *ZigBee enables smart buildings of the future today*, ZigBee Alliance White Paper, April 2007.
- [ZigBee10] ZigBee Alliance, *Understanding ZigBee gateway: how Zigbee extends an IP network*, ZigBee Alliance White Paper, September 2010.
- [ZigBee12] ZigBee Alliance, *New ZigBee PRO feature: green power*, ZigBee Alliance White Paper, December 2012.



---

**Contactos:**

Universidade de Évora  
**Instituto de Investigação e Formação Avançada - IIFA**  
Palácio do Vimioso | Largo Marquês de Marialva, Apart. 94  
7002-554 Évora | Portugal  
Tel: (+351) 266 706 581  
Fax: (+351) 266 744 677  
email: [iifa@uevora.pt](mailto:iifa@uevora.pt)