

# IMPLEMENTAÇÃO E COMPARAÇÃO DE PROCESSOS DE MEDIÇÃO DA CURVA DE POTÊNCIA DE UM AEROGERADOR

Alberto João Nunes  
1131398

**2018**  
Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Mecânica





# IMPLEMENTAÇÃO E COMPARAÇÃO DE PROCESSOS DE MEDIÇÃO DA CURVA DE POTÊNCIA DE UM AEROGERADOR

Alberto João Nunes  
1131398

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Professor Doutor Carlos Miguel Pereira da Silva Santos.

**2018**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Mecânica





# JÚRI

## **Presidente**

Engenheira Isabel Maria Garcia Sarmiento Pereira  
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

## **Orientador**

Doutor Carlos Miguel Pereira da Silva Santos  
Professor Adjunto convidado, Instituto Superior de Engenharia do Porto

## **Arguente**

Doutor Luís Tiago Paiva  
Investigador Pós-Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



## AGRADECIMENTOS

Quero agradecer:

Aos meus pais pela aposta na minha formação académica, pelo apoio em todos os momentos da minha vida, pelo carinho constante e pelos valores que sempre me transmitiram.

À minha esposa e à minha filha, pelo apoio, pelo amor e confiança permanentes.

Ao meu amigo e colega Francisco Gomes da Silva (ISEP), por me ter dado a oportunidade de reavivar gostos adormecidos pela Engenharia.

Ao meu tutor, Doutor Carlos Silva Santos, pelo desafio que me colocou, pela disponibilidade em me orientar, criticar, corrigir e em dar-me sugestões relevantes durante a orientação deste trabalho.

A ti, Mãe, dedico esta tese.

Alberto Nunes



## **PALAVRAS-CHAVE**

Energia eólica; Calibração do local; Medição da curva de potência; IEC 61400-12-1.

## **RESUMO**

O verdadeiro desempenho de um aerogerador é de difícil quantificação devido à natureza caótica e variável dos ventos. Para atenuar esta dificuldade, a indústria recorre a um processo designado «calibração do local», que tem vindo a ser refinado com sucessivas edições das normas IEC que o regem.

Apresenta-se aqui, uma implementação do processo de calibração do local, segundo a mais recente edição da norma IEC que inclui o efeito da estabilidade atmosférica no desempenho dos aerogeradores.

Os resultados são produzidos para um parque eólico real, na Turquia, comparando-se os resultados obtidos pelos métodos indicados na atual norma IEC 61400-12-1:2017 e pela norma anterior IEC 61400-12-1:2005.

A norma de 2017, alterando de forma significativa a anterior de 2005, traz uma nova metodologia, que ao incluir mais fatores de influência do vento sobre a turbina, procura que os resultados do processo, que conduz à medição da curva de potência, se aproximem mais da realidade.

O objetivo desta tese é o de averiguar o impacto destes fatores adicionais, algo ainda pouco explorado na literatura devido ao fato da nova norma ser ainda recente.

Os resultados mostram diferenças significativas entre os métodos utilizados, tendo o do método da regressão linear, sido o que mais se aproximou do esperado.



**KEYWORDS**

*Wind energy; Site calibration; Wind Turbine power curve measurement; IEC 61400-12-1.*

**ABSTRACT**

The true performance of a wind turbine is difficult to quantify due to the chaotic and variable nature of the wind. In order to alleviate this difficulty, the industry uses a process called 'Site Calibration' which has been refined with successive editions of the IEC standards that govern it.

An implementation of the site calibration process is presented here, according to the most recent edition of the IEC standard, which takes into account the effect of atmospheric stability on the performance of wind turbines.

The results are produced for a real wind farm, in Turkey, comparing the results obtained by the methods indicated in the current standard IEC 61400-12-1:2017 and the previous standard IEC 61400-12-1:2005.

The 2017 standard, significantly altering the previous one of 2005, brings a new methodology that, by taking into account more factors of influence of the wind on the turbine, seeks to improve the accuracy of power curve measurements.

It is the objective of this thesis to investigate the impact of these factors, an aspect which has as yet received scant interest in published literature due to the young age of the new IEC standard.

The results show significant differences between the methods used and the one that most approached to the expected result, was the most recent method of the linear regression.



## LISTA DE SÍMBOLOS, UNIDADES E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

IEC	International Electrotechnical Commission
REWS	Velocidade do vento equivalente do rotor
RM	Mastro meteorológico de referência
RSD	Dispositivo de medição remota
TM	Mastro meteorológico temporário

### Lista de Unidades

K	Graus Kelvin (temperatura absoluta)
kg/m <sup>3</sup>	Quilogramas por metro cúbico (densidade)
m	Metro (altura / altitude)
m/s	Metro por segundo (velocidade)
m <sup>2</sup>	Metro quadrado (área)
mbar	Milibar (pressão barométrica)
Pa	Pascal (pressão barométrica)
W	Watt (potência elétrica)
W/m <sup>2</sup>	Watt por metro quadrado (densidade de potência)

### Lista de Símbolos

$\rho$	Densidade do ar
$\alpha$	Expoente de corte do vento
$\bar{d}$	Valor médio do resíduo
$A$	Área de varrimento do rotor
$A$	Fator de escala (distribuição de Weibull)
$Ac$	Parâmetro de auto-consistência ou consistência interna
$b$	Coeficiente linear da reta
$D$	Diâmetro do rotor
$d$	Valor do resíduo
$d_{STD}$	Desvio padrão
$f$	Graus de liberdade na calibração do local
$f(WD, \alpha)$	Fator de correção para o método da matriz
$h$	Altura

---

$H$	Altura do solo ao centro do rotor
$k$	Fator de forma (distribuição de Weibull)
$k$	Subconjunto de dados no processo estatístico de validação cruzada
$m$	Coefficiente angular ou declive da reta
$N$	Número de dados de 10 minutos
$P$	Potência de saída normalizada
$p$	Pressão barométrica
$P_v$	Potência do vento
$R$	Raio da área circular de varrimento do rotor
$r$	Coefficiente de correlação da regressão
$R^2$	Coefficiente de determinação da regressão
$S_{SC}$	Incerteza estatística do tipo A
$T$	Temperatura
$v, U$	Velocidade do ar
$V_{RM}$	Velocidade do vento no mastro meteorológico de referência
$V_{TM}$	Velocidade do vento no mastro meteorológico temporário
$V_{Turb\_medida}$	Velocidade prevista no local da turbina
$V_{Turb\_medida}$	Velocidade medida no local da turbina
$WD$	Fatia de direção do vento
$Z$	Altitude

---

## GLOSSÁRIO DE TERMOS

---

<i>Wind shear</i>	Tensão de corte do vento
<i>HH (hub height)</i>	Altura do solo ao centro do rotor da turbina
<i>k-fold cross validation</i>	Método estatístico das k-amostras

---



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – CIRCULAÇÃO GERAL ATMOSFÉRICA	33
FIGURA 2 – A FORMAÇÃO DO VENTO COMO RESULTADO DE DIFERENÇAS DE TEMPERATURA	34
FIGURA 3 – DURAÇÃO DE UMA CAMPANHA EXPERIMENTAL	35
FIGURA 4 – DENSIDADE ESPECTRAL DO VENTO DE VAN DER HOVEN	36
FIGURA 5 – ESCALAS DE TEMPO E DE ESPAÇO DO MOVIMENTO ATMOSFÉRICO [17]	37
FIGURA 6 – GRÁFICO TÍPICO DA VELOCIDADE DO VENTO NUM CURTO PERÍODO DE TEMPO [17]	38
FIGURA 7 – ESCOAMENTO NUMA MONTANHA [15]	38
FIGURA 8 – COMPORTAMENTO DO VENTO SOB A INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DO TERRENO	39
FIGURA 9 – VENTOS DIÁRIOS DE VALES E DE MONTANHAS [17]	39
FIGURA 10 – VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO (CAPA LIMITE) COM A ALTURA SOBRE O TERRENO, SEGUNDO A LEI EXPONENCIAL DE HELLMAN. [11]	40
FIGURA 11 – INFLUÊNCIA DO RELEVO NO PERFIL DO VENTO [20]	40
FIGURA 12 – PERFIL DO VENTO [14]	41
FIGURA 13 – TÍPICAS CORRENTES DE VENTO EM TORNO DE UM OBSTÁCULO [16]	41
FIGURA 14 – EQUILÍBRIO ESTÁVEL E INSTÁVEL [19]	43
FIGURA 15 – DENSIDADE DE POTÊNCIA DISPONÍVEL NO VENTO	44
FIGURA 16 – DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL	45
FIGURA 17 – CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL E FUNÇÃO CUMULATIVA	46
FIGURA 18 – ANEMÓMETRO DE COPO COM CATA-VENTO	49
FIGURA 19 – ANEMÓMETRO SÓNICO	50
FIGURA 20 – APARELHOS DE MEDIÇÃO INSTALADOS NUM MASTRO METEOROLÓGICO	50
FIGURA 21 – LIDAR (RSD)	50
FIGURA 22 – SODAR (RSD)	50
FIGURA 23 – PATAMARES DE MEDIÇÕES POR LIDAR	51
FIGURA 24 – CALIBRAÇÃO DO LOCAL	56
FIGURA 25 – MEDIÇÃO DA CURVA DE POTÊNCIA	56
FIGURA 26 – ORGANIGRAMA DE CALIBRAÇÃO DO LOCAL [1]	60
FIGURA 27 – ROSA-DOS-VENTOS	62
FIGURA 28 – MASTROS METEOROLÓGICOS PARA CALIBRAÇÃO DO LOCAL EM TERRENOS COMPLEXOS E SUBSEQUENTE MEDIÇÃO DE POTÊNCIA DE UM AEROGERADOR	62
FIGURA 29 – MASTROS METEOROLÓGICOS PARA CALIBRAÇÃO DO LOCAL EM TERRENOS COMPLEXOS E SUBSEQUENTE MEDIÇÃO DA CURVA DE POTÊNCIA DE DOIS AEROGERADORES	63
FIGURA 30 – MASTRO METEOROLÓGICO	64
FIGURA 31 – CONFIGURAÇÃO DE MEDIÇÃO DE DESEMPENHO SEM A CALIBRAÇÃO DO LOCAL [10]	64
FIGURA 32 – ALTURAS DE MEDIÇÃO DE CORTE DO VENTO PARA O CÁLCULO DO REWS [1]	69
FIGURA 33 – ÁREA DE VARRIMENTO DO ROTOR DIVIDIDA EM SEGMENTOS	69
FIGURA 34 – GEOMETRIA DE CÁLCULO DE SEGMENTOS	71
FIGURA 35 – RELAÇÃO DE VELOCIDADES REWS/HH VS VELOCIDADES HH NO PERÍODO DE MEDIÇÕES	73

FIGURA 36 – RELAÇÃO DE VELOCIDADES REWS/HH VS EXPOENTES DE CORTE NO PERÍODO DE MEDIÇÕES	73
FIGURA 37 – GRÁFICO DE DISPERSÃO DO EXPOENTE DE CORTE EM FUNÇÃO DA HORA DO DIA (MASTRO TEMPORÁRIO)	75
FIGURA 38 – GRÁFICO DE DISPERSÃO DO EXPOENTE DE CORTE EM FUNÇÃO DA DIREÇÃO DO VENTO (MASTRO TEMPORÁRIO)	75
FIGURA 39 – GRÁFICO DE DISPERSÃO DO EXPOENTE DE CORTE EM FUNÇÃO DA HORA DO DIA (MASTRO DE REFERÊNCIA)	75
FIGURA 40 – GRÁFICO DE DISPERSÃO DO EXPOENTE DE CORTE EM FUNÇÃO DA DIREÇÃO DO VENTO (MASTRO DE REFERÊNCIA)	75
FIGURA 41 – GRÁFICO DE DISPERSÃO DO EXPOENTE DE CORTE EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO (MASTRO TEMPORÁRIO)	76
FIGURA 42 – GRÁFICO DE DISPERSÃO DA VELOCIDADE DO VENTO EM FUNÇÃO DA HORA DO DIA (MASTRO TEMPORÁRIO)	76
FIGURA 43 – GRÁFICO DE DISPERSÃO DO EXPOENTE DE CORTE EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO (MASTRO DE REFERÊNCIA)	76
FIGURA 44 – GRÁFICO DE DISPERSÃO DA VELOCIDADE DO VENTO EM FUNÇÃO DA HORA DO DIA (MASTRO DE REFERÊNCIA)	76
FIGURA 45 – CORTE DO VENTO VERSUS MOMENTO DO DIA [1]	77
FIGURA 46 – CORTE DO VENTO VERSUS MOMENTO DO DIA	78
FIGURA 47 – EXPOENTE DE CORTE DO VENTO DO MASTRO RM EM RELAÇÃO AO DO MASTRO TM	78
FIGURA 48 – CORTE DO VENTO VERSUS MOMENTO DO DIA	79
FIGURA 49 – EXPOENTE DE CORTE DO VENTO DO MASTRO RM EM RELAÇÃO AO DO MASTRO TM	79
FIGURA 50 – CORRELAÇÃO ENTRE VELOCIDADES DO VENTO DO MASTRO RM E DO MASTRO TM, PARA VENTOS DE 251° A 260°	80
FIGURA 51 – MÉTODO DE VALIDAÇÃO CRUZADA (K-FOLD CROSS VALIDATION)	85
FIGURA 52 – CONTROLO DA CONVERGÊNCIA	90
FIGURA 53 – CURVA DE POTÊNCIA TÍPICA DE UMA EÓLICA (ADAPTADA) [17]	92
FIGURA 54 – CURVA DE POTÊNCIA MEDIDA	94
FIGURA 55 – CORTE DE VENTO DIÁRIO PARA TMREAL E RMREAL	98
FIGURA 56 – CORTE DE VENTO DIÁRIO PARA RM=2*RMREAL	98
FIGURA 57 – CORTE DE VENTO DIÁRIO PARA TM=RMREAL	98
FIGURA 58 – CORRELAÇÃO DE CORTE DE VENTO PARA TM=RMREAL	98
FIGURA 59 – CORRELAÇÃO DE CORTE DE VENTO PARA RM E TM REAIS	99
FIGURA 60 – CORRELAÇÃO DE CORTE DE VENTO PARA RM=2*RM	99
FIGURA 61 – CORRELAÇÃO DE VELOCIDADES PARA RM=2*RM	99
FIGURA 62 – CORRELAÇÃO DE VELOCIDADES PARA RM E TM REAIS	99
FIGURA 63 – VISTA SUDOESTE DO LOCAL	104
FIGURA 64 – VISTA OESTE DO LOCAL	104
FIGURA 65 – VISTA ESTE DO LOCAL (GOOGLE EARTH)	104
FIGURA 66 – VISTA OESTE DO LOCAL (GOOGLE EARTH)	104
FIGURA 67 – PERFIL DE RELEVO DA POSIÇÃO DA TURBINA E DO MASTRO RM (GOOGLE EARTH)	104
FIGURA 68 – HISTOGRAMA DE VELOCIDADES VÁLIDAS NO MASTRO DE REFERÊNCIA RM	105

FIGURA 69 – HISTOGRAMA DE VELOCIDADES VÁLIDAS NO MASTRO TEMPORÁRIO TM	105
FIGURA 70 – ROSA-DOS-VENTOS PARA O MASTRO DE REFERÊNCIA RM	107
FIGURA 71 – ROSA-DOS-VENTOS PARA O MASTRO TEMPORÁRIO TM	107
FIGURA 72 – EXPOENTE DE CORTE VS DIREÇÃO DO VENTO NO MASTRO DE REFERÊNCIA	107
FIGURA 73 – EXPOENTE DE CORTE VS DIREÇÃO DO VENTO NO MASTRO TEMPORÁRIO	107
FIGURA 74 – EXPOENTE DE CORTE VS VELOCIDADE DO VENTO NO MASTRO DE REFERÊNCIA	107
FIGURA 75 – EXPOENTE DE CORTE VS VELOCIDADE DO VENTO NO MASTRO TEMPORÁRIO	107
FIGURA 76 – EXPOENTE DE CORTE VS HORA DO DIA NO MASTRO DE REFERÊNCIA RM	108
FIGURA 77 – EXPOENTE DE CORTE VS HORA DO DIA NO MASTRO TEMPORÁRIO TM	108
FIGURA 78 – DISTRIBUIÇÃO DO EXPOENTE DE CORTE DIÁRIO	108
FIGURA 79 – VELOCIDADE DO VENTO VS HORA DO DIA NO MASTRO DE REFERÊNCIA	108
FIGURA 80 – VELOCIDADE DO VENTO VS HORA DO DIA NO MASTRO TEMPORÁRIO	108
FIGURA 81 – EXPOENTE DE CORTE DIURNO NO MASTRO DE REFERÊNCIA	109
FIGURA 82 – EXPOENTE DE CORTE NOTURNO NO MASTRO DE REFERÊNCIA	109
FIGURA 83 – EXPOENTE DE CORTE DIURNO NO MASTRO TEMPORÁRIO	109
FIGURA 84 – EXPOENTE DE CORTE NOTURNO NO MASTRO TEMPORÁRIO	109
FIGURA 85 – ROSA-DOS-VENTOS PARA PERÍODOS DIURNOS	109
FIGURA 86 – ROSA-DOS-VENTOS PARA PERÍODOS NOTURNOS	109
FIGURA 87 – CORRELAÇÃO ENTRE TENSÕES DE CORTE NOS DOS DOIS MASTROS METEOROLÓGICOS	112
FIGURA 88 – CORRELAÇÃO ENTRE VELOCIDADES HH DOS DOIS MASTROS METEOROLÓGICOS	112
FIGURA 89 – GRÁFICO DE REGRESSÃO NA DIREÇÃO DE 70°	114
FIGURA 90 – GRÁFICO DE REGRESSÃO NA DIREÇÃO DE 270°	114
FIGURA 91 – CONVERGÊNCIA DE DADOS NA DIREÇÃO 250°	119
FIGURA 92 – CONVERGÊNCIA DE DADOS NA DIREÇÃO 260°	119
FIGURA 93 – CONVERGÊNCIA DE DADOS NA DIREÇÃO 270°	119
FIGURA 94 – CONVERGÊNCIA DE DADOS NA DIREÇÃO 280°	119
FIGURA 95 – CONVERGÊNCIA DE DADOS NA DIREÇÃO 290°	119
FIGURA 96 – CONVERGÊNCIA DE DADOS NA DIREÇÃO 300°	119
FIGURA 97 – RELAÇÃO DE VELOCIDADES E CORTE DE VENTO NAS DIREÇÕES DE 40° A 60°	127
FIGURA 98 – RELAÇÃO DE VELOCIDADES E CORTE DE VENTO NAS DIREÇÕES DE 70° A 90°	127
FIGURA 99 – RELAÇÃO DE VELOCIDADES E CORTE DE VENTO NAS DIREÇÕES DE 270° A 290°	127
FIGURA 100 – RELAÇÃO DE VELOCIDADES E CORTE DE VENTO NAS DIREÇÕES DE 300° E 310°	127
FIGURA 101 – RELAÇÃO DE VELOCIDADES E CORTE DE VENTO NAS DIREÇÕES DE 100°, 250° E 260°	127
FIGURA 102 – CONVERGÊNCIA DE DADOS NA DIREÇÃO DE 60°	134
FIGURA 103 – CONVERGÊNCIA DE DADOS NA DIREÇÃO DE 80°	134
FIGURA 104 – CONVERGÊNCIA DE DADOS NA DIREÇÃO DE 100°	134
FIGURA 105 – CONVERGÊNCIA DE DADOS NA DIREÇÃO DE 260°	134
FIGURA 106 – CONVERGÊNCIA DE DADOS NA DIREÇÃO DE 280°	134
FIGURA 107 – CONVERGÊNCIA DE DADOS NA DIREÇÃO DE 300°	134
FIGURA 108 – COEFICIENTE DE POTÊNCIA (MÉTODO DA REGRESSÃO)	144
FIGURA 109 – POTÊNCIAS LIMITE (MÉTODO DA REGRESSÃO)	144
FIGURA 110 – POTÊNCIAS MÉDIAS E CURVA DE POTÊNCIA (MÉTODO DA REGRESSÃO)	144
FIGURA 111 – COEFICIENTE DE POTÊNCIA (MÉTODO DA MATRIZ)	146

---

FIGURA 112 – POTÊNCIAS LIMITES (MÉTODO DA MATRIZ)	146
FIGURA 113 – POTÊNCIAS MÉDIAS E CURVA DE POTÊNCIA (MÉTODO DA MATRIZ)	146
FIGURA 114 – COEFICIENTE DE POTÊNCIA (MÉTODO DA NORMA IEC DE 2005)	148
FIGURA 115 – POTÊNCIAS LIMITE (MÉTODO DA NORMA IEC DE 2005)	148
FIGURA 116 – POTÊNCIAS MÉDIAS E CURVA DE POTÊNCIA (MÉTODO DA NORMA IEC DE 2005)	148
FIGURA 117 – CURVA DE POTÊNCIA MEDIDA (PELO MÉTODO DA REGRESSÃO)	150
FIGURA 118 – CURVA DE POTÊNCIA MEDIDA (PELO MÉTODO DA MATRIZ)	150
FIGURA 119 – CURVA DE POTÊNCIA MEDIDA (PELA NORMA IEC DE 2005)	150
FIGURA 120 – CURVA MEDIDA PELA NORMA IEC DE 2005 VS CURVA GARANTIDA	152

## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – VISÃO GERAL DAS CONFIGURAÇÕES DE MEDIÇÃO DE VENTO PARA MEDIÇÕES DA CURVA DE POTÊNCIA [1]	48
TABELA 2 – VISÃO GERAL DAS CONFIGURAÇÕES DE MEDIÇÃO DE VENTO PARA MEDIÇÕES DA CURVA DE POTÊNCIA [1] (CONT.)	49
TABELA 3 – CONFIGURAÇÕES DA MEDIDA DA VELOCIDADE DO VENTO SEGUNDO A NORMA [1]	61
TABELA 4 – ORGANIGRAMA DO PROCESSO DE APLICAÇÃO DAS VÁRIAS NORMALIZAÇÕES [1]	66
TABELA 5 – EFEITO DO $\alpha$ NA ESTIMATIVA DA DENSIDADE DE POTÊNCIA DO VENTO A DIFERENTES ALTURAS	68
TABELA 6 – EXEMPLO DE CÁLCULO DO REWS	72
TABELA 7 – RÁCIOS MÉDIOS DE VELOCIDADE ENTRE MASTROS POR CORTE DE VENTO E DIREÇÃO	81
TABELA 8 – NÚMERO DE DADOS POR CORTE DE VENTO E DIREÇÃO	81
TABELA 9 – CORREÇÕES DE FLUXO DE VENTO	82
TABELA 10 – RÁCIOS DE CORREÇÃO POR K-TRANCHES (MÉTODO DA MATRIZ)	87
TABELA 11 – INCERTEZA TOTAL CATEGORIA A (MÉTODO DA MATRIZ)	87
TABELA 12 – COEFICIENTES DE CORREÇÃO POR K-TRANCHES (MÉTODO DA REGRESSÃO)	87
TABELA 13 – INCERTEZA TOTAL CATEGORIA A (MÉTODO DA REGRESSÃO)	87
TABELA 14 – CONTROLO DA CORRELAÇÃO LINEAR PARA O MÉTODO DA REGRESSÃO	91
TABELA 15 – INCERTEZAS SUPLEMENTARES DEVIDAS ÀS VARIAÇÕES NAS FATIAS ADJACENTES	92
TABELA 16 – ESQUEMA DE COMBINAÇÃO DE MATRIZES PARA AVALIAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO MATLAB®	97
TABELA 17 – VALIDAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO	99
TABELA 18 – RÁCIOS DO PROCESSO DA MATRIZ NA CONDIÇÃO C4	100
TABELA 19 – RÁCIOS DO PROCESSO DA MATRIZ NA CONDIÇÃO C1	100
TABELA 20 – RÁCIOS DO PROCESSO DA MATRIZ NA CONDIÇÃO C3	100
TABELA 21 – COEFICIENTES DO PROCESSO DA REGRESSÃO NA CONDIÇÃO C4	101
TABELA 22 – COEFICIENTES DO PROCESSO DA REGRESSÃO NA CONDIÇÃO C1	101
TABELA 23 – COEFICIENTES DO PROCESSO DA REGRESSÃO NA CONDIÇÃO C2	101
TABELA 24 – CONSISTÊNCIA INTERNA NA DIREÇÃO 60° E EXPOENTE DE 0,10 (MATRIZ) – CONDIÇÃO C4	102
TABELA 25 – CONSISTÊNCIA INTERNA NA DIREÇÃO 60° E EXPOENTE DE 0,10 (MATRIZ) – CONDIÇÃO C1	102
TABELA 26 – CONSISTÊNCIA INTERNA NA DIREÇÃO 60° E EXPOENTE DE 0,10 (MATRIZ) – CONDIÇÃO C2	102
TABELA 27 – CONSISTÊNCIA INTERNA NA DIREÇÃO 90° (REGRESSÃO) – CONDIÇÃO C4	103
TABELA 28 – CONSISTÊNCIA INTERNA NA DIREÇÃO 90° (REGRESSÃO) – CONDIÇÃO C1	103
TABELA 29 – CONSISTÊNCIA INTERNA NA DIREÇÃO 90° (REGRESSÃO) – CONDIÇÃO C3	103
TABELA 30 – CONFIGURAÇÃO DAS MATRIZES DE DADOS TRATADOS	105
TABELA 31 – HORÁRIOS DO NASCER E PÔR-DO-SOL NA TURQUIA NO PERÍODO DE RECOLHA DE DADOS	110
TABELA 32 – REGRESSÕES NAS FATIAS DE DIREÇÃO VALIDADAS, DE 40° A 100°	113
TABELA 33 – REGRESSÕES NAS FATIAS DE DIREÇÃO VALIDADAS, DE 250° A 310°	113
TABELA 34 – EXCERTO DOS VALORES DO RESIDUAL DE CALIBRAÇÃO E DO PARÂMETRO DE CONSISTÊNCIA INTERNA (REGRESSÃO)	116
TABELA 35 – INCERTEZA DE CATEGORIA A (REGRESSÃO)	117
TABELA 36 – INCERTEZA TIPO A POR DIREÇÃO VÁLIDA NAS 10 K-TRANCHES (REGRESSÃO)	117

TABELA 37 – COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DAS K-TRANCHES (REGRESSÃO)	118
TABELA 38 – VERIFICAÇÃO DA CONVERGÊNCIA PELA ANÁLISE DOS RESÍDUOS	120
TABELA 39 – VARIAÇÃO DA CORREÇÃO ENTRE TRANCHES	121
TABELA 40 – VALIDAÇÃO DAS DIREÇÕES DO VENTO NO MÉTODO DA MATRIZ	125
TABELA 41 – MATRIZ DE QUANTIDADES POR ELEMENTO DE DIREÇÃO/EXPOENTE	126
TABELA 42 – MATRIZ DE RÁCIOS DE VELOCIDADES ENTRE MASTROS, RESULTANTE DA APLICAÇÃO DO MÉTODO DA MATRIZ	128
TABELA 43 – EXCERTO DE VALORES DO RESIDUAL DE CALIBRAÇÃO E DO PARÂMETRO DE CONSISTÊNCIA INTERNA	131
TABELA 44 – RÁCIO DE CORREÇÃO EM CADA K-TRANCHE	132
TABELA 45 – INCERTEZA DE CATEGORIA A (DIREÇÃO/EXPOENTE)	133
TABELA 46 – VARIAÇÃO DA CORREÇÃO ENTRE TRANCHES	135
TABELA 47 – DIREÇÕES VALIDADAS PELO MÉTODO DA NORMA IEC DE 2005	137
TABELA 48 – VALORES DE ALGUNS RÁCIOS POR DIREÇÃO, PELA NORMA IEC DE 2005	138
TABELA 49 – TABELA DE RÁCIOS NÃO CORRIGIDA	139
TABELA 50 – TABELA DE RÁCIOS CORRIGIDA	139
TABELA 51 – POTÊNCIAS MÉDIAS POR FATIA DE VELOCIDADE (MÉTODO DA REGRESSÃO)	143
TABELA 52 – POTÊNCIAS MÉDIAS POR FATIA DE VELOCIDADE (MÉTODO DA MATRIZ)	145
TABELA 53 – POTÊNCIAS MÉDIAS POR FATIA DE VELOCIDADE (MÉTODO DA NORMA IEC DE 2005)	147
TABELA 54 – RESULTADOS DA COMPARAÇÃO DOS TRÊS MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO DO LOCAL	151
TABELA 55 – CURVAS MEDIDAS VERSUS CURVA DO FABRICANTE	152

## Índice

1	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	29
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. ENQUADRAMENTO .....	33
2.1	Características dos ventos e influência sobre o desempenho dos aerogeradores .....	33
2.1.1	O vento .....	33
2.1.2	Características gerais dos ventos.....	36
2.1.3	Orografia, Rugosidade e Obstáculos.....	38
2.1.4	Turbulência .....	42
2.1.5	Estabilidade da atmosfera.....	42
2.1.6	Energia extraída do vento .....	43
2.1.7	Distribuição de probabilidade de Weibull.....	45
2.2	Norma IEC série 61400.....	46
2.2.1	Subconjunto de normas IEC 61400-12.....	47
2.2.2	A norma IEC 61400-12-1:2017 (ed.2).....	47
2.3	Aparelhos utilizados na medição do vento .....	49
3	METODOLOGIA.....	55
3.1	Calibração do local .....	57
3.1.1	Procedimento de calibração do local segundo a norma IEC de 2005 .....	57
3.1.2	Procedimento de calibração do local segundo a norma IEC de 2017 .....	58
3.2	Medição e recolha de dados da velocidade e direção do vento.....	61
3.3	Tratamento dos dados recolhidos .....	65
3.4	Correção do corte de vento (com leituras REWS disponíveis).....	66
3.5	Variação da velocidade vertical do vento - Expoente de corte do vento .....	67
3.6	O cálculo da REWS (velocidade de vento equivalente do rotor) .....	68
3.6.1	Exemplo de cálculo da REWS.....	72
3.7	Análise .....	74
3.8	Avaliação da importância do corte do vento e o método de correção a utilizar .....	76
3.9	Construção das tabelas de trabalho nos métodos de calibração do local.....	80
3.9.1	Para o método da matriz de direções vs expoentes.....	80

3.9.2	Para o método da regressão .....	82
3.10	Cálculo da velocidade estimada de vento .....	82
3.11	Valores residuais e de auto-consistência .....	83
3.12	Incertezas na calibração do local .....	84
3.12.1	Incerteza de calibração do local do tipo A.....	85
3.12.2	Incerteza de calibração do local do tipo B.....	88
3.13	Incertezas combinadas.....	89
3.14	Controlo da qualidade e incertezas suplementares .....	90
3.14.1	Verificação da convergência para os métodos da matriz e da regressão .....	90
3.14.2	Verificação da correlação para o método da regressão linear .....	90
3.14.3	Alteração da correção entre fatias adjacentes de direção do vento .....	91
3.15	Determinação da curva de potência medida do aerogerador .....	92
<b>4</b>	<b>COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO DO LOCAL PELAS NORMATIVAS DE 2005 E 2017.....</b>	<b>97</b>
4.1	Verificação da programação em Matlab® .....	97
4.1.1	Confirmação pelos expoentes de corte .....	98
4.1.2	Confirmação pela correlação das velocidades .....	99
4.1.3	Confirmação pelos rácios (processo da matriz) e pelos coeficientes (processo da regressão linear) .....	100
4.1.4	Confirmação pelo parâmetro de auto-consistência (processo da matriz e da regressão linear) .....	102
<b>4.2</b>	<b>Descrição do local .....</b>	<b>104</b>
<b>4.3</b>	<b>Dados resultantes do tratamento das medições obtidas nos mastros meteorológicos .....</b>	<b>105</b>
4.4	Resultados pelo Método da Regressão Linear .....	112
4.4.1	Verificação da correlação entre as tensões de corte do vento nos dois mastros meteorológicos .....	112
4.4.2	Cálculos das regressões em cada fatia de 10° de direção .....	112
4.4.3	Cálculos adicionais – valor residual de calibração e parâmetro de consistência interna .....	115
4.4.4	Cálculo das incertezas suplementares .....	117
4.4.5	Controlo da convergência .....	119
4.4.6	Verificação da correlação pela análise dos resíduos .....	120
4.4.7	Variação da correção entre fatias.....	121
4.5	Resultados pelo Método da Matriz de direções / expoentes de corte .....	124

4.5.1	Verificação da correlação entre as tensões de corte do vento nos dois mastros meteorológicos .....	124
4.5.2	Tabelas de rácios para a utilização do método da matriz.....	124
4.5.3	Cálculos adicionais – valor residual de calibração e parâmetro de consistência interna .....	130
4.5.4	Cálculo das incertezas suplementares .....	132
4.5.5	Controlo da convergência .....	133
4.5.6	Variação da correção entre fatias.....	135
4.6	Resultados pela norma IEC de 2005 .....	137
4.6.1	Construção da tabela de rácios para correção dos fluxos .....	137
<b>4.7</b>	<b>Medição da curva de potência .....</b>	<b>141</b>
4.7.1	Gráficos resultantes da aplicação do método da regressão linear .....	143
4.7.2	Gráficos resultantes da aplicação do método da matriz de direções/ expoentes .....	145
4.7.3	Gráficos resultantes da aplicação da norma IEC de 2005 .....	147
4.7.4	Gráficos de curvas de potência medida .....	150
4.8	Comparação dos métodos 4.4, 4.5 e 4.6.....	151
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO.....</b>	<b>155</b>
5.1	Conclusões.....	155
5.2	Trabalho futuro.....	157
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....</b>	<b>161</b>
<b>7</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>165</b>
7.1	Tratamento de dados medidos RM e TM .....	165
7.2	Agrupar momentos RM e TM .....	166
7.3	Divisões da área de varrimento RM e TM.....	168
7.4	Cálculo da REWS RM e TM .....	171
7.5	Avaliação do shear e gráficos .....	174
7.6	Fatores de correção pelo método da matriz.....	176
7.7	Coefficientes de correção pelo método da regressão .....	178
7.8	Incetezas pelo método da matriz .....	180
7.9	Incetezas pelo método da regressão.....	183

---

7.10	Controlo de convergência pelo método da matriz.....	187
7.11	Controlo da convergência pelo método da regressão.....	188
7.12	Norma IEC 2005 .....	189
7.13	Potência medida pelo método da matriz.....	193
7.14	Potência medida pelo método da regressão .....	196

# INTRODUÇÃO E OBJETIVOS



## 1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A energia eólica, extraída de escoamentos atmosféricos, é abundante, renovável, limpa e muito disponível. Esta energia é produzida por aerogeradores, nos quais a força do vento é captada por pás ligadas a um veio que aciona um gerador elétrico. Os aerogeradores convertem a energia cinética contida no vento em energia elétrica.

O conhecimento da produção real da energia produzida nos aerogeradores é de fulcral necessidade para os promotores dos parques eólicos, o que originou o aparecimento de normas que através de procedimentos de medição de velocidades dos ventos, permitem aos promotores / construtores dos parques adquirir dados sobre o desempenho dos equipamentos instalados, permitindo-lhes comparar a produção real com a produção estimada pelo fornecedor das turbinas eólicas.

Através da instalação de dois mastros meteorológicos, um colocado no local de referência e o outro colocado no local de instalação da futura turbina eólica, fazem-se medições do vento para determinar uma relação de velocidades nos dois locais. Esta relação de velocidades permitirá, aquando da turbina instalada, estimar a velocidade do vento que incide sobre ela e medir o seu desempenho energético.

A velocidade do vento está sempre flutuando o que faz com que a energia disponível varie continuamente. Em terrenos planos, a velocidade do vento medida no local de referência é aproximadamente a mesma velocidade que atinge a turbina. Mas em terrenos de orografia acentuada o mesmo não acontece. O vento que atinge a turbina eólica é afetado pelas características topográficas do terreno o que significa que na turbina eólica está presente um outro vento.

A norma IEC 61400-12-1:2017 descreve dois métodos de «calibração do local», cuja finalidade é quantificar os efeitos provocados nos fluxos de ar pela orografia do local.

Pretende-se com esta dissertação descrever e implementar as etapas que conduzem à «calibração do local» de instalação de aerogeradores e à posterior elaboração da curva de potência medida, tendo como documento de base a norma IEC 61400-12-1:2017. Os resultados obtidos são posteriormente comparados com os resultados obtidos com a versão anterior da norma. Esta comparação não foi ainda alvo de publicação, pelo que se considera que os resultados aqui apresentados serão de grande utilidade para a indústria eólica.

Os resultados são obtidos por programação em código Matlab®, realizada por módulos, de forma a ser utilizada como ferramenta de análise gráfica e numérica, para dados recolhidos de um qualquer parque eólico, para as versões existentes da normativa IEC.



**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

**ENQUADRAMENTO**



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. ENQUADRAMENTO

### 2.1 Características dos ventos e influência sobre o desempenho dos aerogeradores

#### 2.1.1 O vento

É usual a utilização da rima “O vento é o ar em movimento” para nos referirmos ao movimento horizontal próprio do ar atmosférico.

Mas os movimentos do ar, também podem ser verticais, ou quase verticais, e então chamam-se correntes.

Os ventos não possuem a mesma intensidade em todos os pontos do planeta. Também não possuem a mesma direção e o mesmo sentido.

As massas de ar movimentam-se devido à diferença de pressão que existe entre as diferentes latitudes, como resultado da diferença de calor absorvido do sol pela terra, o que provoca que o ar se desloque das zonas de altas pressões para as zonas de baixas pressões.

Ao alcançar altitudes maiores, o ar quente que estava subindo, arrefece ficando mais pesado e descendo novamente, dando continuidade ao ciclo. Esta dinâmica, associada às variações de latitude, dá origem às células de circulação atmosféricas.

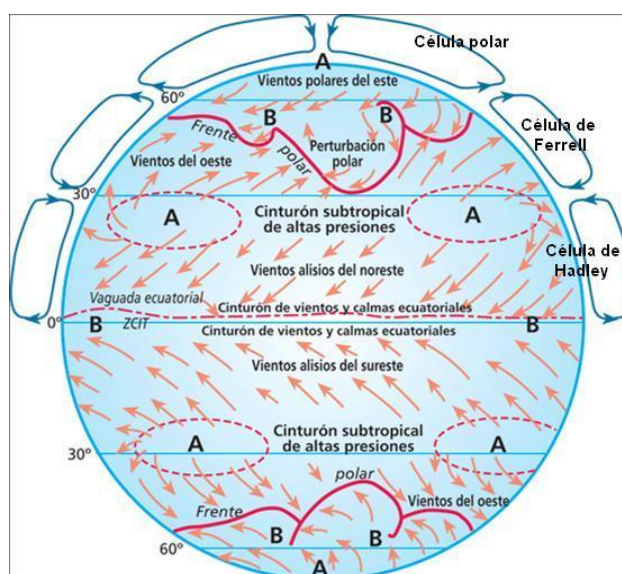


Figura 1 – Circulação geral atmosférica  
(fonte [cambioclimaticoenergia.blogspot.com](http://cambioclimaticoenergia.blogspot.com))

Na Figura 1 estão representados os três tipos principais de células de circulação atmosférica: as células de Hadley, as células de Ferrel e as células polares.

Na **Célula de Hadley**, também conhecida por **Célula Tropical**, o ar circula em direção à Linha do Equador em baixas altitudes e regressa aos trópicos nas elevadas altitudes, com o predomínio de ventos alísios e contra-alísios.

Na **Célula de Ferrel**, também conhecida como **Célula de Latitudes Médias**, o ar movimenta-se em direção aos polos, onde arrefece e regressa para as faixas tropicais. Os ventos são predominantes de oeste e sopram em direção oposta aos ventos alísios.

Por fim, na **Célula Polar**, os ventos deslocam-se dos polos em direção aos trópicos, onde aquecem e regressam novamente às zonas polares. Os ventos são polares de leste e carregam sempre muita humidade, baixas temperaturas e elevada pressão atmosférica.

As variações de temperatura são, pois, o mecanismo básico que controla a circulação das massas de ar no planeta. O ar mais frio é mais denso e desce, enquanto o ar quente é mais leve e sobe (Figura 2).

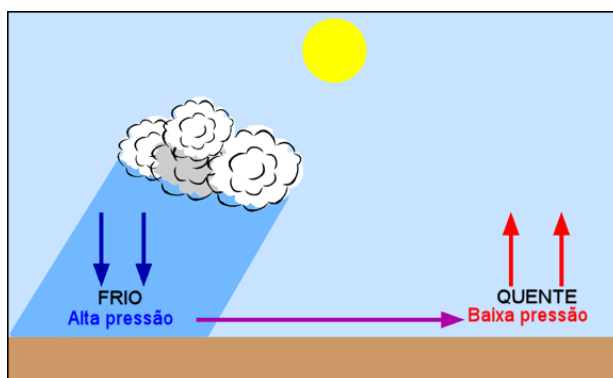


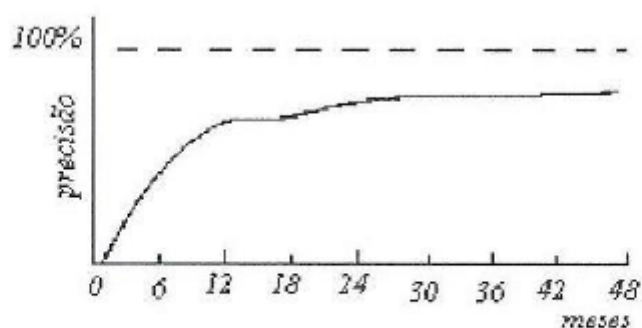
Figura 2 – A formação do vento como resultado de diferenças de temperatura (fonte pt.slideshare.net - adaptado)

O conhecimento geral dos ventos a nível regional não é, por si só, suficiente para uma correta utilização e instalação de máquinas acionadas pelo vento, pois existem fatores que modificam o regime geral e que devem ser tidos em conta no momento da concretização de um projeto eólico [12].

Por regra, os deslocamentos verticais são pequenos em relação aos deslocamentos horizontais, pelo que se pode considerar que a direção de deslocamento do vento é sensivelmente horizontal, sendo determinada e referida através do ângulo que faz com uma direção fixa que se convencionou ser o Norte geográfico.

O vento pode ser considerado como um vetor definido por uma grandeza que alia velocidade e direção. A magnitude do vento é a velocidade escalar. A direção do vento é expressa em graus, medidos no sentido dos ponteiros do relógio, e representado por intermédio de uma rosa-de-ventos. No sistema internacional, a velocidade do vento é expressa em metros por segundo (m/s) [13].

A medição da velocidade e direção do vento é uma condição imprescindível para a correta caracterização do escoamento atmosférico num dado local. Estas medições são realizadas através de campanhas experimentais de medição nos locais onde se pretende instalar os parques eólicos durante um tempo que permita a recolha de dados representativos das condições de vento no local. Quanto mais extenso o período de medição, menores serão as incertezas associadas à variabilidade temporal do escoamento atmosférico (Figura 3).



**Duração de uma campanha experimental vs precisão nas estimativas. Fonte: Marques da Silva et al., 1986**

Figura 3 – Duração de uma campanha experimental

Os ventos atmosféricos ocorrem em diferentes escalas e cada uma delas possui características próprias.

Enquanto a variação ano a ano na velocidade média anual do vento (variação anual e sazonal), permanece difícil de prever, as variações da velocidade do vento durante o ano, podem ser bem caracterizadas em termos de uma distribuição de probabilidade. Verificou-se que a distribuição de Weibull fornece uma boa representação da variação da velocidade do vento ao longo de um ano, em muitos locais típicos.

Em escalas de tempo mais curtas do que as mudanças sazonais, as variações da velocidade do vento são um pouco mais aleatórias e menos previsíveis. No entanto, essas variações contêm padrões definidos. O conteúdo de frequência dessas variações, normalmente atinge o pico em torno de 4 ou mais dias. Estas são as variações "sinópticas", que estão associadas a padrões climáticos de grande escala, como áreas de alta e de baixa pressão associadas a frentes meteorológicas, à medida que se movem pela superfície da Terra.

Seguindo o espectro de frequências para frequências ainda mais elevadas, muitas localizações apresentam um pico diurno distinto, com uma frequência de 24 h. Isso geralmente é causado por efeitos térmicos locais. [6].

A Figura 4, numa escala temporal, faz a representação espectral do vento, ou seja, a medida da energia cinética associada à componente horizontal da velocidade do vento (Van der Hoven – 1957).

Podem ser observados três picos de energia. O pico esquerdo mostra a concentração de energia num período de 2 a 10 dias, associado, como atrás referido, a movimentos de ar em grande escala, como anticiclones, superfícies frontais e fenómenos de mesoescala. O pico do meio, de baixa intensidade de variação, mostra a concentração de energia devida a variações diárias associadas a aquecimentos diversificados e o pico da direita, de segundos a poucos minutos, é relativo a variações temporais curtas e relacionado à turbulência causada por efeitos topográficos, pela rugosidade do terreno, e por obstáculos no local.

Ente o pico do meio e o da direita, o espectro apresenta uma zona conhecida como «janela espectral», caracterizada por uma diminuição de energia e uma distribuição de frequência constante

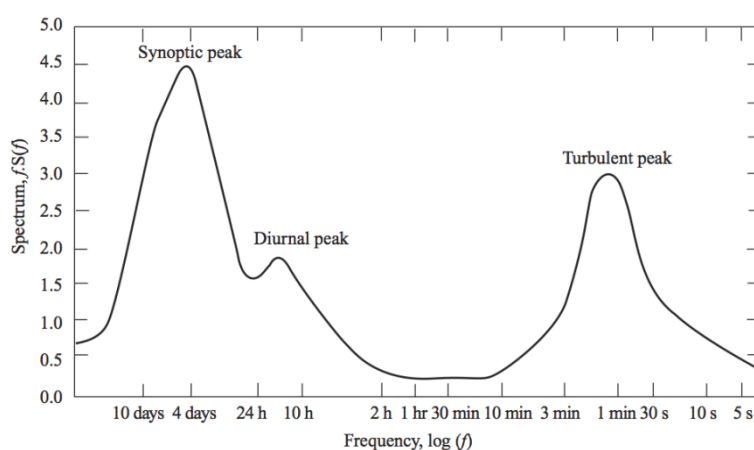


Figura 4 – Densidade espectral do vento de Van der Hoven  
(fonte: aulas do Eng.º Carlos Silva – ISEP)

### 2.1.2 Características gerais dos ventos

Movimentos atmosféricos variam no tempo (segundos a meses) e no espaço (centímetros a milhares de quilómetros). A Figura 5 resume as variações no tempo e no espaço do movimento atmosférico aplicado à energia eólica. As variações no espaço são geralmente dependentes da altura acima do solo e das condições geográficas globais e locais.

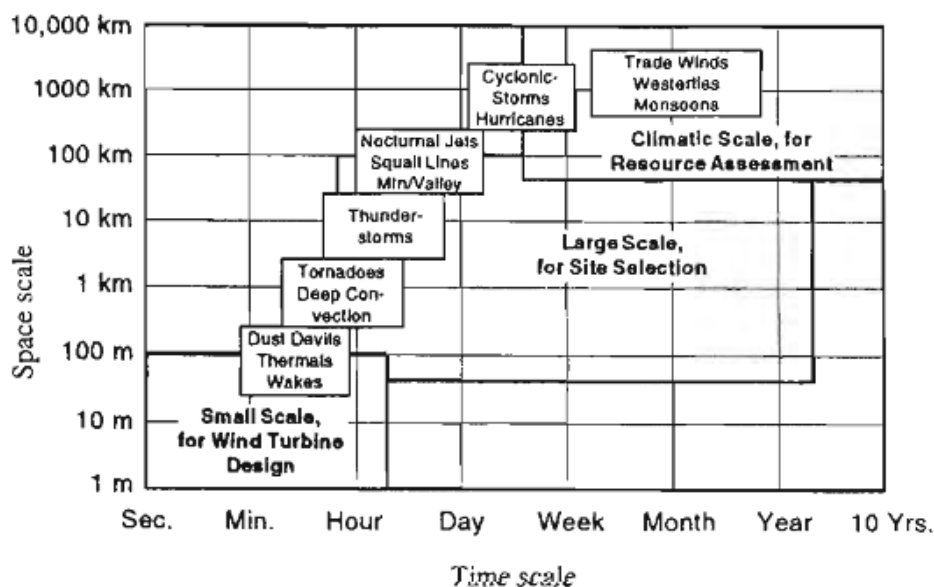


Figura 5 – Escalas de tempo e de espaço do movimento atmosférico [17]

Seguindo a prática convencional, as variações da velocidade do vento no tempo podem ser divididas nas seguintes categorias:

- **Plurianual**  
Variações plurianuais na velocidade do vento ocorrem ao longo de escalas de tempo maiores do que um ano. Elas podem ter um grande efeito na produção de turbinas eólicas a longo prazo.
- **Anual**  
Variações significativas na velocidade média sazonal ou mensal do vento são comuns na maior parte do mundo.
- **Diurno**  
Este tipo de variação da velocidade do vento deve-se ao aquecimento diferencial da superfície da terra, durante o ciclo de radiação diário. As variações diárias na radiação solar são responsáveis pelas variações diurnas do vento em latitudes temperadas, em áreas relativamente planas. As maiores mudanças diurnas geralmente ocorrem na primavera e no verão, e as menores no inverno, devido às variações no fluxo radiativo solar. Além disso, a variação diurna na velocidade do vento depende da localização e altitude acima do nível do mar. Por exemplo, em altitudes elevadas acima do terreno circundante, como montanhas ou cordilheiras, o padrão diurno pode ser muito diferente.
- **Curto prazo (rajadas e turbulência - Figura 6)**  
Variações de curto prazo geralmente significam variações ao longo dos intervalos de tempo de 10 minutos ou menos.

Para aplicações de energia eólica, as flutuações de turbulência no fluxo de vento necessitam de ser quantificadas para o desenho da turbina com base na carga máxima e previsão de fadiga, excitações estruturais, controle e operação do sistema e qualidade de energia.

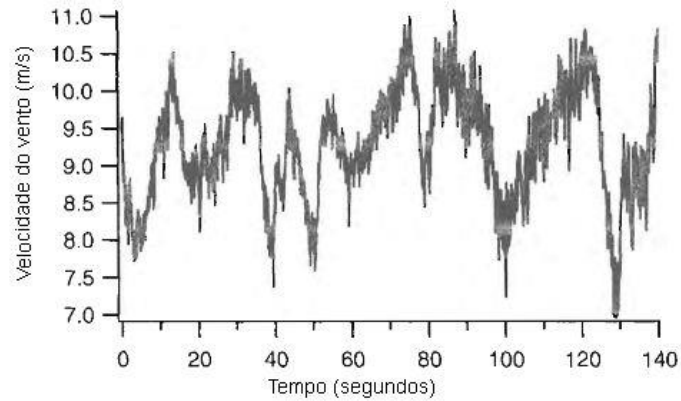


Figura 6 – Gráfico típico da velocidade do vento num curto período de tempo [17]

### 2.1.3 Orografia, Rugosidade e Obstáculos

São três os principais fatores da topografia que afetam o vento: a orografia, a rugosidade e os obstáculos.

#### Orografia

A orografia é a parte da geografia física que se dedica à descrição do relevo do terreno. Através das suas representações cartográficas (os mapas), é possível visualizar e estudar o relevo de uma região.

No que diz respeito ao escoamento atmosférico de um dado local, a orografia vem a ser um dos elementos mais importantes da sua caracterização, tendo em conta a sua elevada dependência da complexidade do terreno em análise.

As montanhas, depressões, vales e “gargantas” podem alterar as características do escoamento atmosférico de diferentes formas. Como exemplo, mostra-se na Figura 7 a variação da aceleração do vento sobre uma montanha, devido a efeitos mecânicos e, na Figura 8, o comportamento do vento sob a influência das características do terreno.

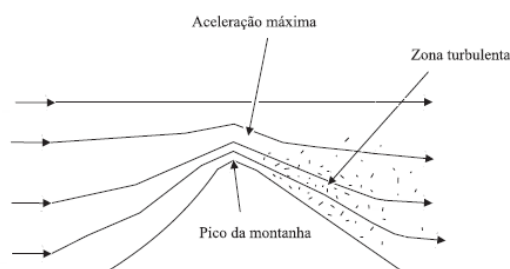


Figura 7 – Escoamento numa montanha [15]

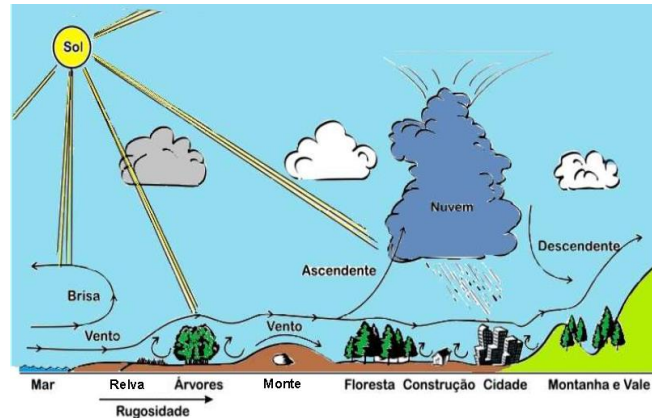


Figura 8 – Comportamento do vento sob a influência das características do terreno  
(Fonte: Atlas Eólico do Brasil, 1998) [3]

Outro exemplo de circulação de ventos, em vales e montanhas devida a efeitos térmicos, é mostrado na Figura 9.

Durante o dia, o ar mais quente da encosta da montanha eleva-se e substitui o ar frio mais pesado, acima dele. A direção inverte-se à noite, enquanto o ar frio escorre pelas encostas e fica estagnado no chão do vale.

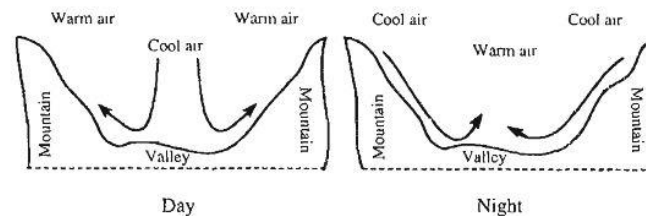


Figura 9 – Ventos diários de vales e de montanhas [17]

A região da camada limite atmosférica que se estende até uma altura de cerca de 100 metros, chamada de camada superficial, é a zona de interesse para a indústria eólica. Nesta zona, o perfil de velocidade do vento é afetado de forma acentuada, não só pelas condições da topografia do terreno, mas também pela rugosidade aerodinâmica do solo, pela presença de obstáculos e pela estabilidade térmica [5][14].

Aumentando a altura, aumenta também, proporcional e drasticamente, a velocidade do vento. Este aumento é devido à tensão de corte do vento - "wind shear".

A Figura 10 e a Figura 11 representam a variação da velocidade do vento em função da altura, sobre o terreno, e nelas pode ser observada a menor energia disponível perto do solo, devido a uma velocidade do vento mais baixa, causada pela fricção entre o ar e a superfície.

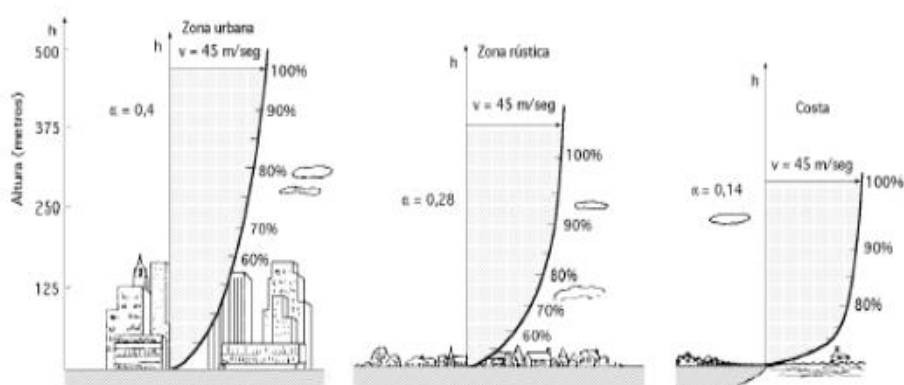


Figura 10 – Variação da velocidade do vento (capa limite) com a altura sobre o terreno, segundo a lei exponencial de Hellman. [11]

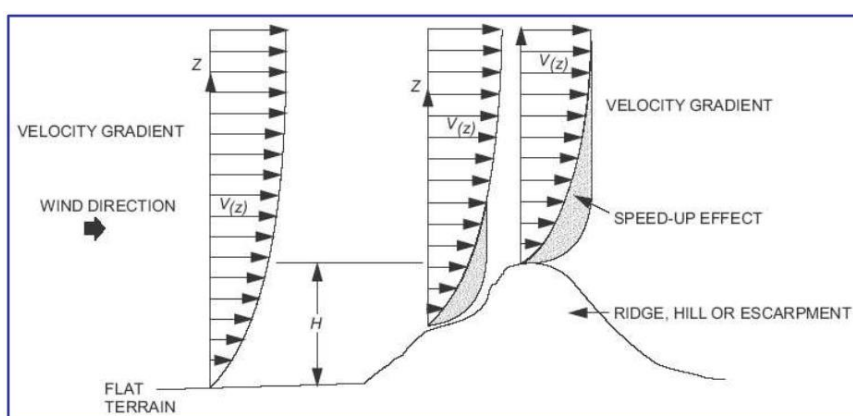


Figura 11 – Influência do relevo no perfil do vento [20]

Uma compreensão destes padrões de vento e outros efeitos locais, é importante para a avaliação de potenciais locais de energia eólica.

**Rugosidade**

A rugosidade de um terreno é o conjunto de elementos, árvores, arbustos, vegetação rasteira e pequenas construções, sobre a superfície do solo, que causa resistência na superfície terrestre à passagem do ar, podendo originar mudança da direção do vento e turbulências de pequena escala na superfície [13].

A rugosidade influencia de forma determinante o escoamento atmosférico junto ao solo e, por consequência, a energia disponível num dado local [15].

Por exemplo, quando o vento se desloca do mar (lado esquerdo da Figura 12) para a terra (lado direito da mesma figura), a turbulência aumenta e a velocidade do vento próximo ao solo diminui. Forma-se então uma camada-limite interna entre o vento turbulento e o vento laminar. Resultam daqui diferenças no perfil do vento, sendo mais vertical sobre o mar, que tem rugosidade mais baixa, e mais inclinado sobre a floresta, que tem rugosidade maior.

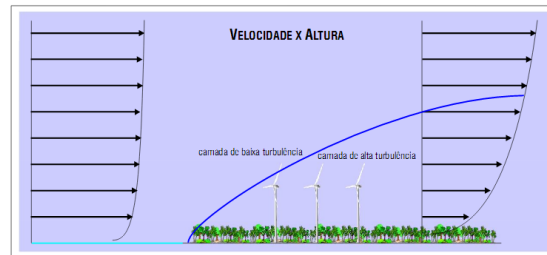


Figura 12 – Perfil do vento [14]

A rugosidade numa determinada superfície é calculada pela medida e distribuição dos elementos rugosos que contém.

No Atlas Eólico Europeu os terrenos são divididos em quatro classes de rugosidade, cada uma caracterizada pela rugosidade dos seus elementos.

A referência a cada tipo de terreno faz-se através da sua classe de rugosidades, sendo 0 para um terreno completamente aberto com superfície lisa e 4 para grandes cidades com edifícios altos e arranha-céus ou florestas, a partir do comprimento de rugosidade, medido em metros, que é a altura sobre o nível do solo onde a velocidade do vento, teoricamente, é zero.

### Obstáculos

Aquando das medições para mapeamento da rugosidade, é frequente existirem, junto do mastro anemométrico, elementos que causam obstrução ao escoamento atmosférico que, não podendo ser classificados como rugosidade, são designados de obstáculos. Os obstáculos podem ser de vários tipos: casas, depósitos de água, postos de vigia florestais, aglomerados de árvores ou mesmo grandes estruturas de pedra [13] e impedem a passagem das partículas de ar, alterando o perfil da velocidade.

Normalmente, quando se quer fazer um estudo quantitativo do desenvolvimento do escoamento, influenciado por obstáculos, como por exemplo, rochas de grande volume, conjunto de árvores altas ou construções civis, é habitual serem considerados blocos paralelepípedicos e um escoamento bidimensional, assim como a sua posição relativa em relação ao ponto de interesse e às suas dimensões. A Figura 13 identifica a separação da camada limite na aresta dianteira e, conseqüentemente, um perfil do escoamento turbulento a jusante, com zonas de recirculação [15].

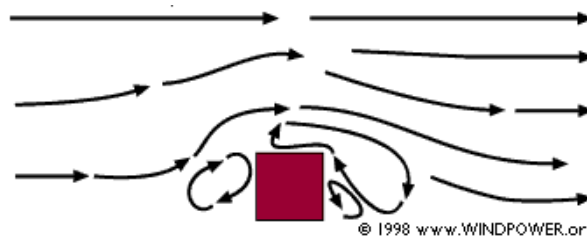


Figura 13 – Típicas correntes de vento em torno de um obstáculo [16]

#### 2.1.4 Turbulência

Turbulência refere-se a flutuações na velocidade do vento numa escala temporal relativamente pequena, tipicamente menor que cerca de 10 min.

Na Figura 4, o pico de energia do lado direito está relacionado com esta turbulência.

A turbulência é gerada principalmente por duas causas:

- a) "fricção" com a superfície da terra;
- b) efeitos térmicos.

A intensidade da turbulência depende portanto da rugosidade da superfície do solo e da altura acima da superfície. No entanto, também depende de características topográficas, como colinas ou montanhas, especialmente quando elas estão na direção do vento, além de mais características locais, como árvores ou edifícios. Depende ainda do comportamento térmico da atmosfera: por exemplo, se o ar próximo ao solo se aquece em um dia ensolarado, ele pode-se tornar flutuante o suficiente para se elevar através da atmosfera, causando um padrão de células de convecção que são parecidas a redemoinhos turbulentos de larga escala.

#### 2.1.5 Estabilidade da atmosfera

Uma característica particularmente importante da atmosfera é a sua estabilidade, ou seja, a tendência a resistir ao movimento vertical ou a suprimir a turbulência existente. A estabilidade atmosférica é geralmente classificada como estável, neutra estável ou instável.

A estabilidade da atmosfera da Terra é governada pela distribuição vertical de temperatura, resultante do aquecimento ou arrefecimento da sua superfície, e a subsequente mistura convectiva do ar adjacente à superfície.

Quando falamos sobre estabilidade atmosférica, estamos-nos a referir a uma condição de equilíbrio.

O perfil vertical de temperatura – e portanto a estabilidade atmosférica – varia significativamente de estação para estação, de dia para dia e mesmo de hora para hora.

O conceito de estabilidade atmosférica é ilustrado, considerando o deslocamento para cima de um pequena parcela de ar, para uma altitude com uma pressão ambiente baixa.

Embora exista grande variabilidade na taxa de queda de temperatura do ar circundante com a altitude, pode-se assumir a taxa padrão de  $0,66^{\circ}\text{C}$  por 100 m. Por outro lado, um pequeno elemento de ar, ao ser levantado, arrefece adiabaticamente à taxa de  $1^{\circ}\text{C}$  por 100 m. Se a parcela de ar tiver a mesma temperatura que o ar circundante no início, depois de ter sido elevado 100 m, ela terá arrefecido mais rápido que o ar circundante e será  $0,34^{\circ}\text{C}$  mais fria do que a sua envolvente. O elemento de ar será mais denso e tenderá a retornar ao seu nível inicial. Este estado atmosférico é chamado de estável.

Para melhor compreensão desta condição de equilíbrio, tomemos o exemplo da ilustração da Figura 14.



Figura 14 – Equilíbrio estável e instável [19]

A rocha A, em repouso no vale, está em equilíbrio estável. Se esta rocha for empurrada para cima, ao longo da colina, ela rapidamente tenderá a voltar à sua posição inicial. Por outro lado, a rocha B, em repouso no topo da colina, está em equilíbrio instável, já que um leve empurrão a irá colocar distante da sua posição inicial.

Aplicando estes conceitos à atmosfera, o ar estará em equilíbrio estável, quando depois de levantado ou baixado, ele tende a regressar à sua posição inicial – ele resiste ao movimento ascendente ou descendente.

O ar que está em equilíbrio instável, quando submetido a um pequeno «empurrão», irá mover-se para longe da sua posição inicial, favorecendo-se assim, as correntes verticais de ar.

### 2.1.6 Energia extraída do vento

A potência do vento é a quantidade de energia mecânica contida no escoamento. E só parte desta energia é que é transferida para o aerogerador.

Ela é calculada pela equação (2.1):

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.1)$$

Sendo:

$P_v$  = potência extraída ao vento, em W

$\rho$  = densidade do ar, em  $\text{kg}/\text{m}^3$

$A$  = área circular de varrimento do rotor, em  $\text{m}^2$

$v$  = velocidade do vento, em  $\text{m}/\text{s}$

Desta expressão, pode-se concluir que a potência disponível é fortemente dependente da velocidade do vento. Quando esta duplica, a potência aumenta oito vezes, enquanto, duplicando a área de varrimento pelas pás da turbina, o aumento é somente de duas vezes.

Inversamente, se a velocidade do vento diminuir para metade, a potência tem um decréscimo de 87,5%.

A expressão anterior também pode ser escrita em função da área, ficando assim definida a densidade ou fluxo de potência ( $\frac{P_v}{A}$  em  $W/m^2$ ),

$$\frac{P_v}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (2.2)$$

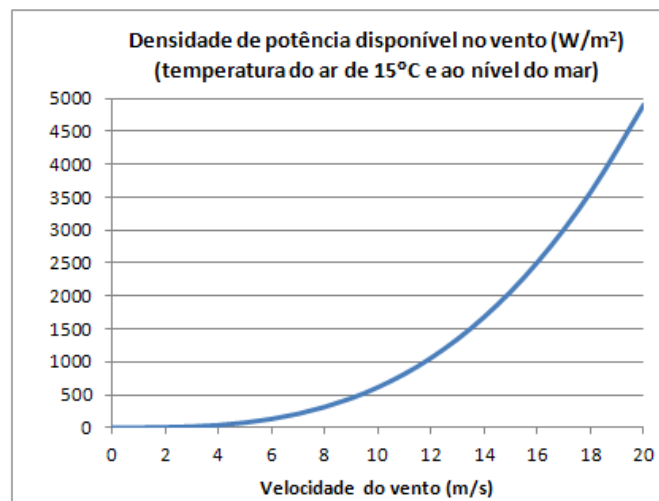


Figura 15 – Densidade de potência disponível no vento

A equação (2.1) indica a potência disponível no vento na ausência da turbina e fica representada graficamente na Figura 15.

Esta potência não pode ser totalmente convertida em potência mecânica no veio da turbina, pois, para tal acontecer, o ar, após atravessar o plano das pás, teria que ter uma velocidade nula, o que não acontece.

Através de conceitos da Mecânica dos Fluidos, é demonstrável a existência de um valor máximo teórico para o rendimento de conversão da energia do vento em energia mecânica, em cerca de 59,3%. Este valor é conhecido como «Limite de Betz».

### 2.1.7 Distribuição de probabilidade de Weibull

O estudo da viabilidade técnico-económica para a implementação de sistemas eólicos necessita do conhecimento da velocidade média do vento do local, além de outras grandezas que definem a distribuição desta velocidade no espaço e no tempo.

A determinação do potencial eólico, só é considerada válida, se o registo de dados acontecer de forma contínua e por períodos longos, de pelo menos um ano. Estes dados são registados em intervalos de 10 minutos, o que, no final, torna impraticável o tratamento de todos os registos, sendo necessária a utilização de modelos probabilísticos que sumariam estatisticamente os dados analisados.

Estes modelos estatísticos utilizam a distribuição de probabilidade de Weibull.

A função de distribuição de Weibull é definida por dois parâmetros: o fator de forma ( $k$ ) e o fator de escala ( $A$ ).

O fator de escala, com dimensões de velocidade, está relacionado com a velocidade média do vento e indica o quão ventoso, em média, é o fluxo de vento.

O fator de forma, adimensional, indica o quão alto é o vértice da curva de distribuição. Isto é, se as velocidades do vento tenderem a estar próximas a um certo valor, a curva terá um alto fator  $k$  e será de vértice mais elevado.

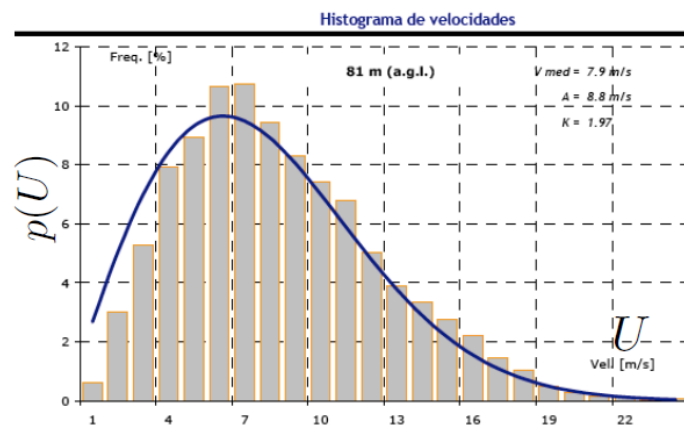


Figura 16 – Distribuição de Weibull  
(ISEP - MEM – aulas do Eng.º Carlos Silva Santos)

A linha a azul da Figura 16 é o resultado da aplicação da equação de distribuição de Weibull, equação (2.3), para cada valor de velocidade  $U$ , indicando-nos a probabilidade de ocorrência de ventos nessa velocidade.

$$p(U) = \left(\frac{k}{A}\right) \cdot \left(\frac{U}{A}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{U}{A}\right)^k} \quad (2.3)$$

O valor do integral  $p(U)$  entre 0 e  $U$ , dá-nos a probabilidade de ocorrência de ventos com velocidades iguais ou inferiores a  $U$ , traduzindo-se na equação da função cumulativa, equação (2.4), representada pela linha a vermelho na Figura 17,

$$F(U) = 1 - e^{-\left(\frac{U}{A}\right)^k} \quad (2.4)$$

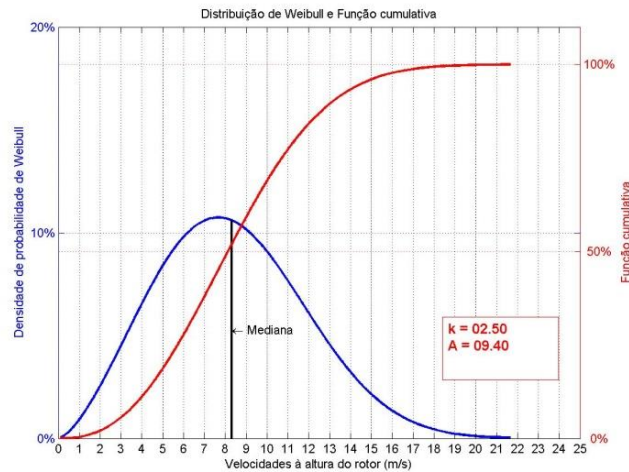


Figura 17 – Curvas de Distribuição de Weibull e Função cumulativa

## 2.2 Norma IEC série 61400

A Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC - *International Electrotechnical Commission*), fundada em 1906, é uma organização de normalização nas áreas elétricas, eletrónicas e de tecnologias relacionadas.

As Normas Internacionais da IEC baseiam-se no consenso de muitos peritos, provenientes de indústrias, órgãos governamentais, associações e universidades de diferentes países por todo o mundo.

Quando estes profissionais chegam a um consenso, os Comitês Nacionais da IEC (um por cada país membro) votam e a IEC publica a Norma Internacional. Este processo específico de elaboração faz únicas as Normas Internacionais da IEC e dá-lhes uma ampla relevância.

A IEC é uma das três organizações globais (IEC, ISO – International Organization for Standardization e ITU – International Telecommunication Union) que desenvolvem as Normas Internacionais para o mundo, garantindo que se encaixam e complementam. [7] [8]

O conjunto de normas IEC 61400 cobre um leque de requisitos, desde as condições do local até à produção das turbinas e sua implementação, criado para garantir que as turbinas eólicas sejam adequadamente projetadas contra possíveis danos, que podem surgir durante o seu tempo de vida útil. Os padrões referidos nestas normas vão desde

as condições do local, antes da construção do parque eólico, até aos componentes da turbina (testes, montagem e operação).

A primeira norma deste conjunto surgiu em 1995, como resultado do trabalho desenvolvido na certificação internacional sobre este assunto. [9]

As turbinas eólicas são um capital de risco, dado que, normalmente são adquiridas antes de estarem montadas e exploradas. Por este motivo, algumas das normas deste conjunto IEC 61400 referem procedimentos técnicos a serem verificados por entidades independentes, como uma necessidade ao cumprimento dos acordos comerciais requeridos pelo processo de financiamento da montagem das turbinas eólicas.

O desempenho de uma turbina eólica traduz a capacidade de produção de energia elétrica da turbina para determinadas condições de vento.

A curva de potência de uma turbina eólica é o indicador dessa produção de energia em função da velocidade do vento e, deste modo, é um dos principais parâmetros na estimativa de produção de energia.

Expectativas de produção de energia são definidas e negociadas para minimizar o risco financeiro. O fornecedor da turbina, normalmente, assegura uma garantia através da curva de potência da sua turbina eólica. Os procedimentos de verificação de desempenho e as garantias de curva de potência são definidos nos contratos de fornecimento da turbina. Após o comissionamento do parque eólico, o teste de verificação é usado para demonstrar que o desempenho da turbina está dentro dos níveis de aceitação e incerteza contratualizados. O teste também pode ser realizado mais tarde, durante a operação do parque eólico, a fim de acompanhar e quantificar possíveis alterações no desempenho das turbinas eólicas.

### 2.2.1 Subconjunto de normas IEC 61400-12

Este subconjunto de normas define a metodologia para a avaliação do desempenho de turbinas eólicas de eixo horizontal e dele fazem parte as normas IEC 61400-12-1 e IEC 61400-12-2, que especificam um procedimento para medir as características de desempenho de energia de uma única turbina eólica, de qualquer tipo ou tamanho, ligada à rede de energia elétrica.

### 2.2.2 A norma IEC 61400-12-1:2017 (ed.2)

Por esta norma, procede-se à determinação da curva de potência das turbinas eólicas de produção de eletricidade.

É constituída pelos anexos de A a R, sendo o Anexo C – Procedimento da calibração do local – parte do objeto desta tese.

Importantes alterações em relação à 1ª edição, publicada em 2005 [2] [10]:

- Definição adicional de velocidade do vento (REWS – Rotor Equivalent Wind Speed).

- Utilização de dispositivos de medição remota no solo (RSD).
- Tratamento específico sobre a tensão de corte de vento, vértice de vento, intensidade de turbulência, fluxo inclinado, entre outros, que são frequentemente usados para filtrar dados para garantias.
- Anexo de calibração do local, completamente revisto.
- Componentes adicionais de incerteza.
- Novos requisitos para instalação de instrumentos.

A Tabela 1, publicada nesta normativa, indica as configurações aceites na medição do vento para a medição da curva de potência e encaminha para os respetivos capítulos.

Tabela 1 – Visão geral das configurações de medição de vento para medições da curva de potência [1]

Configuração da medição do vento	Mastro meteorológico à altura do rotor e dispositivos de teledeteção em todas as alturas	Mastro meteorológico abaixo da altura do rotor e dispositivos de teledeteção a todas as alturas	Mastro meteorológico acima da altura do rotor	Mastro meteorológico à altura do rotor
Aplicação típica	Grandes eólicas em terreno plano (ver anexo B)	Grandes eólicas em terreno plano (ver anexo B)	Pequenas e grandes eólicas em qualquer tipo de terreno	Pequenas e grandes eólicas em qualquer tipo de terreno
Captadores de medição do vento	Capítulo 7, itens 2.3 e 2.5	Capítulo 7, itens 2.3 e 2.5	Capítulo 7, itens 2.3 e 2.4	Capítulo 7, item 2.3
Procedimento de normalização para a determinação da curva de potência climática específica	Massa volúmica do ar, corte do vento Capítulo 9, itens 1.5 e 1.3.4	Massa volúmica do ar, corte do vento Capítulo 9, itens 1.5 e 1.3.4	Massa volúmica do ar, corte do vento Capítulo 9, itens 1.5 e 1.3.4	Massa volúmica do ar Capítulo 9, item 1.5
Incerteza suplementar devida à ausência de medições de corte do vento	Nenhuma incerteza suplementar ligada à cobertura das alturas de medição. Anexo E, capítulo 11, Item 2.2	Nenhuma incerteza suplementar ligada à cobertura das alturas de medição. Anexo E, capítulo 11, Item 2.2	Nenhuma incerteza suplementar ligada à cobertura das alturas de medição. Anexo E, capítulo 11, Item 2.2	Incerteza bruta suplementar para as grandes eólicas ligadas à ausência de medições do corte de vento vertical. Anexo E, capítulo 11, Item 2.2

Tabela 2 – Visão geral das configurações de medição de vento para medições da curva de potência [1] (cont.)

Configuração da medição do vento	Mastro meteorológico à altura do rotor e dispositivos de teledeteção em todas as alturas	Mastro meteorológico abaixo da altura do rotor e dispositivos de teledeteção a todas as alturas	Mastro meteorológico acima da altura do rotor	Mastro meteorológico à altura do rotor
Procedimentos de normalização facultativos	Turbulência, desvio da trajetória do vento e ângulo de fluxo ascendente. Capítulo 9, itens 1.6 e 1.4	Turbulência, desvio da trajetória do vento e ângulo de fluxo ascendente. Capítulo 9, itens 1.6 e 1.4	Turbulência, desvio da trajetória do vento e ângulo de fluxo ascendente. Capítulo 9, itens 1.6 e 1.4 Distorção de fluxo ao nível do mastro meteorológico. Capítulo 9, item 1.2 Calibração do local. Anexo C	Turbulência e ângulo de fluxo ascendente. Capítulo 9, item 1.6 Calibração do local. Anexo C.

### 2.3 Aparelhos utilizados na medição do vento

Nos mastros meteorológicos são instalados anemômetros e cata-ventos para a leitura da velocidade e da direção do vento. Na Figura 18 e na Figura 19 mostram-se dois dos vários tipos destes aparelhos existentes no mercado.



Figura 18 – Anemômetro de copo com cata-vento



Figura 19 – Anemómetro sónico



Figura 20 – Aparelhos de medição instalados num mastro meteorológico



Figura 21 – LiDAR (RSD)



Figura 22 – SoDAR (RSD)

A Figura 21 mostra um aparelho de medição remota (“Remote Sensing Device”) que faz uso da tecnologia ainda recente, conhecida por LiDAR – **L**ight **D**etection **A**nd **R**anging.

Este sistema transmite e deteta feixes de luz e, quando utilizado na calibragem do local, mede a direção e velocidade do vento em tempo real, em cada altura da área de varrimento das pás da turbina, selecionando a parametrização ótima em função das condições atmosféricas (Figura 23).

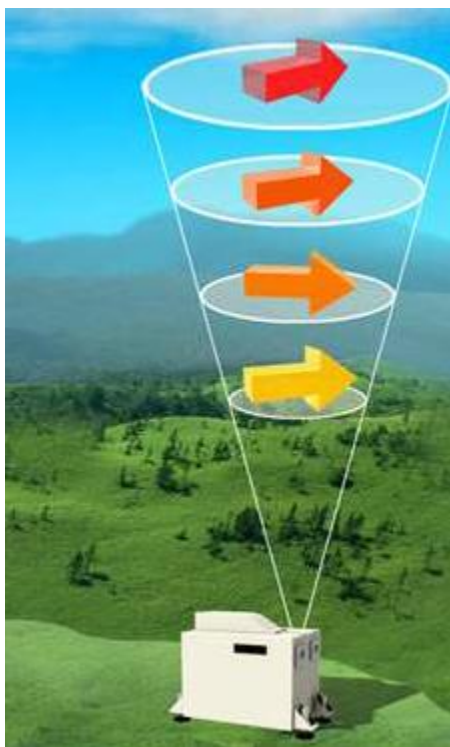


Figura 23 – Patamares de medições por LiDAR  
(adaptado de [www.eugcc-cleanenergy.net](http://www.eugcc-cleanenergy.net))

A Figura 22 mostra um outro aparelho de medição remota, de tecnologia anterior à LiDAR, e muito utilizado como instrumento meteorológico na leitura do perfil de vento, através da emissão de ondas sonoras refletidas por aerossóis, conhecido como SoDAR – **S**ound **D**etection **A**nd **R**anging ou Acoustic Echo Sounders (AES). É usado na medição da velocidade do vento a diferentes alturas acima do solo.

O aparelho emite para a atmosfera pequenos impulsos sonoros em frequências definidas na vertical e nos quatro pontos cardeais. Parte deste som é refletido nas heterogeneidades do ar em movimento, sendo analisado e convertido pelo sistema. A frequência das ondas refletidas relaciona-se com a velocidade dos aerossóis por efeito de Doppler, permitindo a medição do perfil de velocidade.

Tanto o SoDAR como o LiDAR oferecem medições complementares às tradicionais, obtidas nos mastros meteorológicos, de velocidade vertical do vento e da turbulência.

Contudo, preocupações relativas à calibração destes aparelhos, em comparação com os anemómetros, têm impedido a sua utilização como única fonte de recolha de dados sobre o recurso eólico, sobretudo em terreno complexo.



# METODOLOGIA



### 3 METODOLOGIA

A equação (2.1) diz-nos que a potência extraída do vento varia com o cubo da sua velocidade, pelo que a energia elétrica gerada pela fonte eólica é muito sensível às variações na velocidade do vento, o que, do ponto de vista económico, torna extremamente importante uma boa análise deste recurso eólico.

A qualidade e a precisão das medições do vento nos mastros meteorológicos e a qualidade das correlações entre estes mastros e a extrapolação vertical da velocidade do vento são de extrema importância.

Uma outra fonte de risco está associada à qualidade tecnológica das turbinas eólicas.

A estimativa de produção energética pode estar muito bem realizada, do ponto de vista da caracterização do vento, mas o rendimento da máquina pode ficar aquém do esperado, levando a quebras nas receitas previstas da venda da energia produzida.

Torna-se pois fulcral, caracterizar detalhadamente o local de instalação das eólicas, recorrendo a dados obtidos por medições realizadas no próprio local, assim como assegurar que as turbinas funcionam com a eficiência planeada.

Podemos considerar três fases no processo que conduzirá à determinação da curva de potência medida de um aerogerador.

Na primeira fase, seleciona-se o melhor local para a construção do parque eólico.

É um trabalho que envolve múltiplas tarefas, como por exemplo: a análise do terreno através de mapas topográficos e/ou cartas militares e visitas ao local, a análise do recurso de ventos através de mapas específicos, como o Atlas Europeu de Ventos, a análise de dados meteorológicos, a identificação de distâncias entre turbinas, as condições favoráveis na construção de acessos e estruturas eólicas, entre outros. Nesta fase escolhe-se o modelo da turbina que irá ser instalada.

Numa segunda fase, procede-se à caracterização detalhada do local onde se pretende quantificar e maximizar a energia, assim como limitar os aspetos adversos do vento na turbina.

Assim, com o potencial eólico definido na primeira etapa, avança-se para a campanha de medição do vento, onde se dá especial atenção, não só às velocidades do vento e às suas direções predominantes, mas também à existência de obstáculos que possam limitar os setores de direção predominante do vento, como por exemplo, a vegetação ou a localização futura de outras turbinas eólicas.

Este processo designado como *Calibração do Local*, inicia-se com a instalação dos mastros meteorológicos (Figura 24) e tem como objetivo o de quantificar o efeito que a orografia exerce na medição da curva de potência. As *nuances* do relevo e os obstáculos podem provocar diferenças sistemáticas entre o vento medido no mastro

meteorológico de referência e o vento medido no mastro meteorológico localizado no local onde a turbina irá ser montada.

Esta relação entre a velocidade do vento do mastro meteorológico de referência e a velocidade do vento na posição da turbina, também pode ser afetada por mudanças na estabilidade atmosférica e / ou no perfil de corte.



Figura 24 – Calibração do local  
(adaptado de Meridian Energy Limited)

O resultado da calibração do local é uma tabela de correções para todas as direções do vento no setor de medição e uma estimativa da incerteza dessas correções.

Com este processo, pretende-se produzir uma «função de transferência» entre dois pontos que permita, mais tarde (Figura 25), determinar a velocidade do vento num ponto (na turbina) a partir do vento medido no outro ponto (mastro de referência).

Na última fase, já com a turbina instalada e a funcionar, é registada a produção real de energia que é comparada com a produção garantida pelo fabricante, de forma a analisar a produção elétrica do aerogerador.

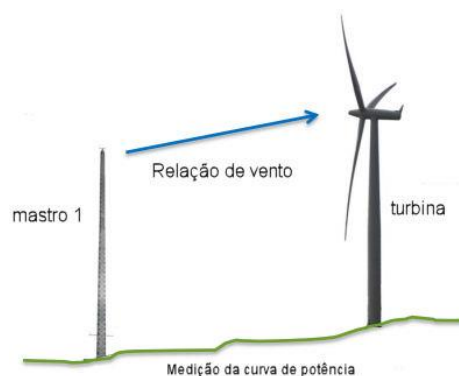


Figura 25 – Medição da curva de potência  
(adaptado de Meridian Energy Limited)

Este processo designa-se *Medição da Curva de Potência*.

Este trabalho foca-se nas duas últimas fases.

### 3.1 Calibração do local

A calibração do local e a medição da curva de potência devem ser realizadas nas mesmas estações do ano, isto porque ao longo do ano haverá mudanças na rugosidade do terreno, devido a alterações na vegetação na área de teste, ou outras mudanças de rugosidade, causadas diretamente por diferentes características da superfície sazonal (água / terra vs. gelo / terra, neve, plantações, etc.).

Vários fatores podem afetar a calibração do local, sendo os mais importantes o terreno, a localização do mastro meteorológico e as condições meteorológicas.

#### 3.1.1 Procedimento de calibração do local segundo a norma IEC de 2005

São requeridos, para este procedimento, dois mastros meteorológicos, dois anemómetros, um cata-vento e um sistema de registo e armazenamento de dados. Um dos mastros é colocado na posição de referência e o outro na posição da futura turbina.

Cada um contém um anemómetro instalado no topo, de forma a evitar a esteira da torre onde está instalado. O cata-vento é instalado no mastro de referência. No mastro, no local da turbina, a posição do anemómetro tem de ser a mais próxima possível da altura do rotor da futura turbina.

Nesta versão da norma, os dados recolhidos pelos anemómetros e cata-vento, ordenados em fatias de direção de vento de 10°, no mínimo, eram filtrados com a anulação dos que correspondessem a avarias dos aparelhos de medição, dos que estivessem fora do(s) setor(es) de medição, dos que tivessem velocidades de vento inferiores a 4 m/s e superiores a 16 m/s e dos medidos em condições atmosféricas que justificassem a sua exclusão.

No mínimo, o conjunto de dados recolhidos teria que corresponder a 24 horas de dados por cada fatia de direção de vento válida, com 6 horas de velocidades de vento acima de 8 m/s e 6 horas de velocidades de vento inferiores a 8 m/s.

A norma aconselha ainda, a eliminação das direções de vento dos setores de medição quando os fatores de correção de fluxo se alteram em mais de 2% entre os setores vizinhos.

Da tabela resultante, eram feitas as médias dos fatores de correção do fluxo devido ao terreno (razão entre as velocidades do vento no mastro de localização da turbina e as velocidades do vento do mastro de referência) para cada setor direcional.

Desta norma, IEC 61400-12-1 de 2005, resultava portanto uma tabela de fatores de correção de fluxo para todas as direções do vento no setor de medição e uma

estimativa da incerteza dos fatores de medição. Por exemplo, se todas as direções fossem válidas, obtinham-se 36 rácios ( $360^\circ/10^\circ$ ) entre a velocidade no local da turbina e a no mastro de referência (fatores de correção).

Estas correções de fluxos eram complementadas com incertezas de categorias A e B (item 3.12 deste trabalho) dos anexos D e E desta norma IEC de 2005.

### 3.1.2 Procedimento de calibração do local segundo a norma IEC de 2017

De acordo com esta norma IEC, deve ser realizada uma medição de calibração no local onde a turbina eólica vai ser erguida, se o terreno se classificar como «complexo», conforme os requisitos estabelecidos no anexo B da própria norma.

Para calibrar o local, devem ser erguidos dois mastros meteorológicos, o permanente ou de referência (RM) e o temporário ou provisório (TM), na posição da futura turbina, para determinar os fatores de correção setoriais (Figura 28) e ambos os mastros devem ter a mesma geometria a fim de se obter o mesmo efeito sobre os sensores de medições.

Para este procedimento é exigido como mínimo, a realização de medidas da velocidade do vento à altura do rotor, da direção do vento na proximidade da altura do rotor e do corte do vento nos dois mastros meteorológicos.

O período de ensaios deve ser suficientemente longo de maneira a ser produzida uma base estatística de dados, significativa, ao longo de toda a gama de velocidades de vento no local.

A grande diferença desta norma para a de 2005 reside no facto de considerar todo o fluxo horizontal de energia cinética do vento sobre toda a área de varrimento das pás da turbina, resultando um valor energético mais preciso sobre o rotor da turbina. Daqui a necessidade de cada mastro ter pelo menos dois anemómetros.

Na normativa de 2005, considerava-se como suficiente o fluxo de energia cinética que incidia diretamente sobre o centro do rotor da turbina, como a energia necessária para a medição da curva de potência. Ou seja, não contabilizava a variação da velocidade do vento em altura.

O método de medição do desempenho de potência usado nesta nova norma IEC de 2017 é baseado na definição da curva de potência que expressa a potência produzida versus a velocidade do vento e que representa efetivamente o fluxo de energia cinética no vento que flui através da área varrida do rotor.

Esta normativa indica dois processos de avaliação na calibração do local, sendo a escolha função da verificação da importância ou não do fator de corte, na correlação da velocidade do vento entre os mastros de referência e o temporário. Esta

importância é validada se existirem mais de 25% de valores do fator de corte superiores a 0,25.

Quando tal acontece, a avaliação do local deve ser realizada usando o método da matriz de direção do vento / expoentes de corte, em que as correções de fluxo do vento consistem numa matriz de fatias de direção e de corte de vento, onde um único fator de correção da taxa de velocidade do vento é calculado para cada elemento da matriz. É obrigatória a existência mínima de 144 dados por fatia direcional (que corresponde a 24 horas de recolha de leituras) com 6 horas de velocidades inferiores a 8 m/s e outras 6 horas com velocidades superiores a 8 m/s. Deverá existir, também, um mínimo 3 medições por fatia de direção/corte.

Em caso contrário, usa-se o método da regressão linear, onde as correções de fluxo de vento consistem em determinar uma reta de regressão com um declive e um valor de interceção para cada direção do vento. É conveniente que o quadrado do coeficiente de correlação,  $R^2$ , seja superior a 0,95 para cada direção de vento. Neste método, somente é exigido haver as 144 horas de dados por setor de direção, com 6 horas de velocidades inferiores a 8 m/s e outras 6 horas com velocidades superiores a 8 m/s.

Estes procedimentos são realizados considerando a velocidade do vento à altura do rotor da turbina eólica, podendo ser utilizada também, a definição da velocidade equivalente do rotor (REWS), em ambos os mastros.

De assinalar o facto de esta norma limitar a utilização de aparelhos de medição remota (RSD) a terrenos não complexos ou planos para testes de desempenho de potência, devido a esta tecnologia assumir que o volume de ar analisado tem um fluxo horizontal constante.

Na Figura 26 apresenta-se o organigrama de preparação e análise do processo de calibração do local, segundo a atual normativa, e que começa com a escolha do modelo de turbina que irá ser instalada e com a escolha do local de instalação do mastro de referência. O modelo de turbina dita a que altura do solo está o seu rotor e consequentemente, a altura a que ficará instalado um dos anemómetros; a escolha do local de instalação do mastro de referência dita os setores de vento a medir.

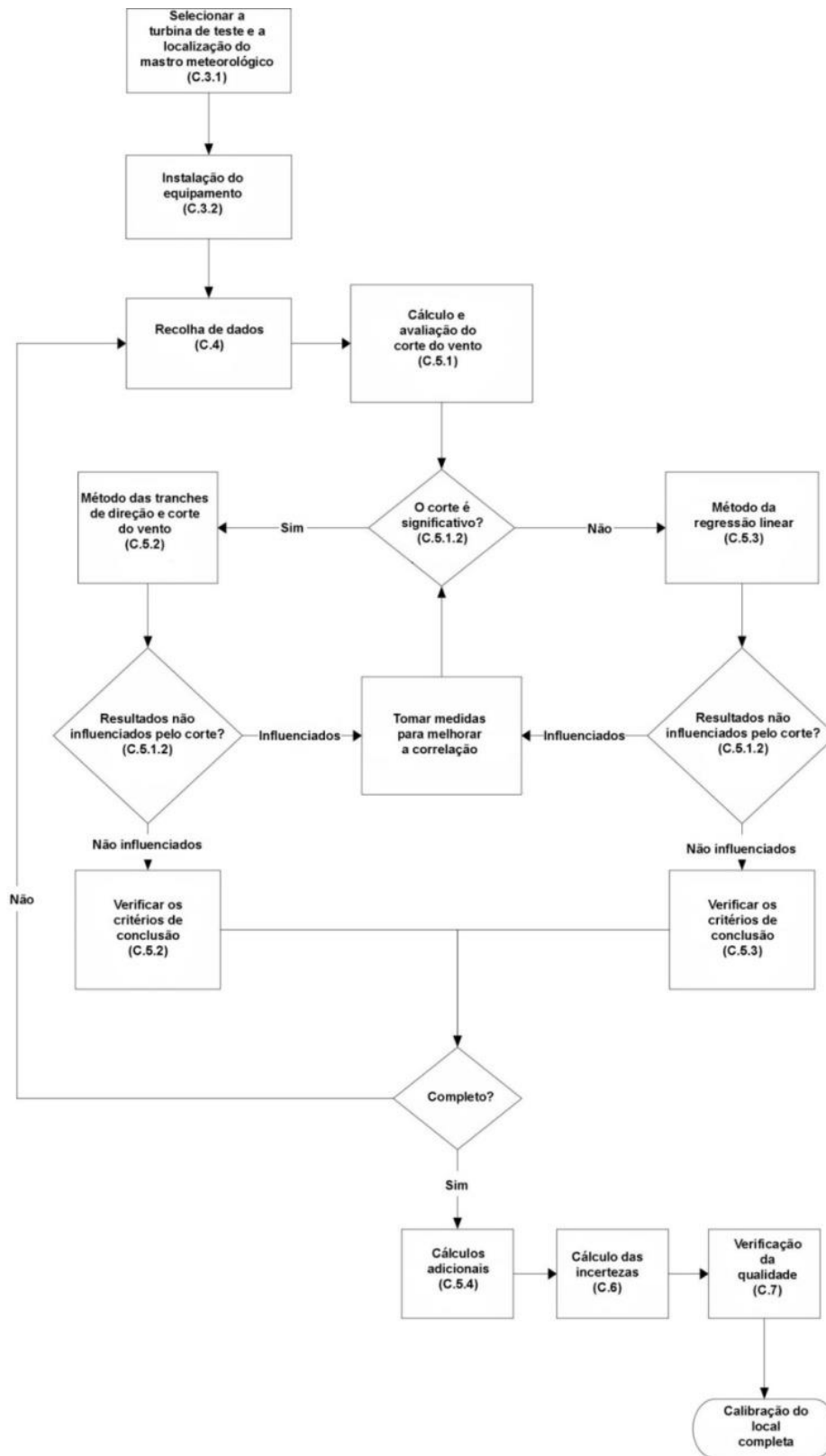


Figura 26 – Organigrama de calibração do local [1]

### 3.2 Medição e recolha de dados da velocidade e direção do vento

É fundamental identificar a existência de obstruções que provocam perturbações no vento, como construções e/ou vegetação, bem como as perturbações no vento causadas sobre uma turbina por uma outra turbina (efeito de esteira – o vento após passar pela turbina é mais turbulento e tem menor energia).

Os setores de direção do vento nestas condições devem ser removidos do estudo do desempenho da turbina.

O anexo A da atual norma reflete este tema.

A velocidade do vento, à altura do rotor da eólica (*hub height*), corresponde à definição por defeito da velocidade do vento e deve ser sempre medida e utilizada [1].

Nestas medições são usados anemómetros que podem estar ou não em utilização conjunta com aparelhos de medição remota (LiDAR ou SoDAR) - Tabela 3.

A normativa IEC 61400-12-1:2017 dedica o Anexo L à aplicação da tecnologia de teledeteção. Esta normativa limita as medições da velocidade do vento, nas seguintes configurações:

Tabela 3 – Configurações da medida da velocidade do vento segundo a norma [1]

Medida da velocidade do vento	HH <sup>(*)</sup>	HH <sup>(*)</sup>	REWS <sup>(**)</sup>	REWS <sup>(**)</sup>
Tipo de terreno	Não complexo	Complexo	Não complexo	Complexo
Mastro meteorológico à altura do rotor	Configuração admissível	Configuração admissível		
Mastro meteorológico à altura do rotor + RSD <sup>(***)</sup>	Configuração admissível	Configuração admissível	Configuração admissível	
RSD <sup>(***)</sup> + mastro meteorológico a uma altura diferente da do rotor	Configuração admissível		Configuração admissível	
Mastro meteorológico cobrindo alturas superiores à altura do rotor em +2/3 R	Configuração admissível	Configuração admissível	Configuração admissível	Configuração admissível

<sup>(\*)</sup> HH – Altura do rotor; <sup>(\*\*)</sup> REWS – Velocidade do vento equivalente do rotor; <sup>(\*\*\*)</sup> RSD – Aparelhos de medição remota.

A altura do rotor é a distância do solo até ao centro do rotor e indica quão alta está a turbina do chão, não incluindo o comprimento da pá da turbina.

Esta recomendação implica custosas instalações de monitorização em mastros muito altos.

Uma opção para medir o vento a alturas maiores à do centro do rotor, é utilizar aparelhos de medição remota da velocidade e direção do vento. Contudo, a utilização destes aparelhos está confinada a terrenos planos.

Os dados de direção e velocidade do vento são medidos continuamente, numa frequência não inferior a 1 registo por segundo, a par dos dados de temperatura, pressão e humidade do ar, mas estes com uma frequência de pelo menos 1 minuto. Esta medição é feita em simultâneo, nos dois mastros meteorológicos (Figura 28) por altura de medição, resultando num agrupamento em tabela, em que estes dados são

apresentados em valores médios intervalados em períodos de 10 minutos no tempo total da campanha de medição.

Também é usual obter-se a «rosa-dos-ventos» (um histograma polar da direção do vento), da qual se apresenta um exemplo na Figura 27.

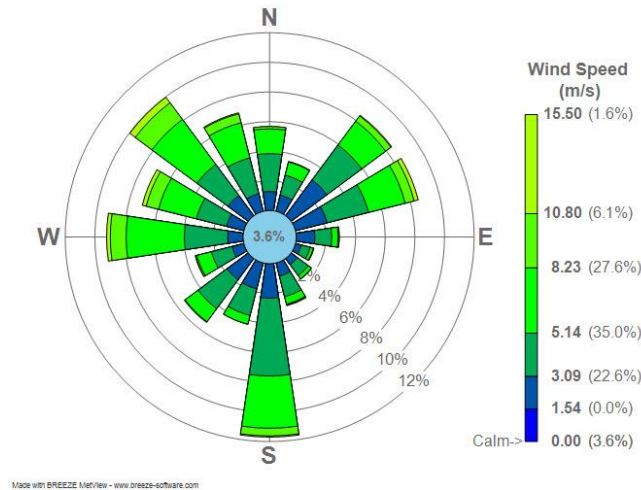


Figura 27 – Rosa-dos-ventos  
(<https://nn.wikipedia.org/wiki/Vindrose>)

O mastro meteorológico de referência deve ser o mastro meteorológico utilizado posteriormente, para a medição da curva de potência.

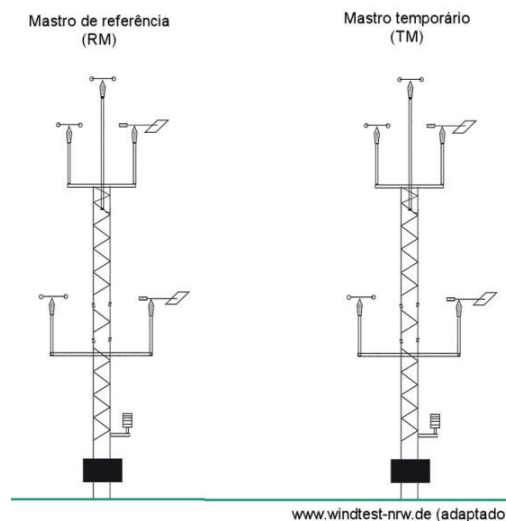


Figura 28 – Mastros meteorológicos para calibração do local em terrenos complexos e subsequente medição de potência de um aerogerador

Casos há em que o mesmo mastro de referência faz par com dois mastros temporários, permitindo a medição posterior da curva de potência de dois aerogeradores (Figura 29).

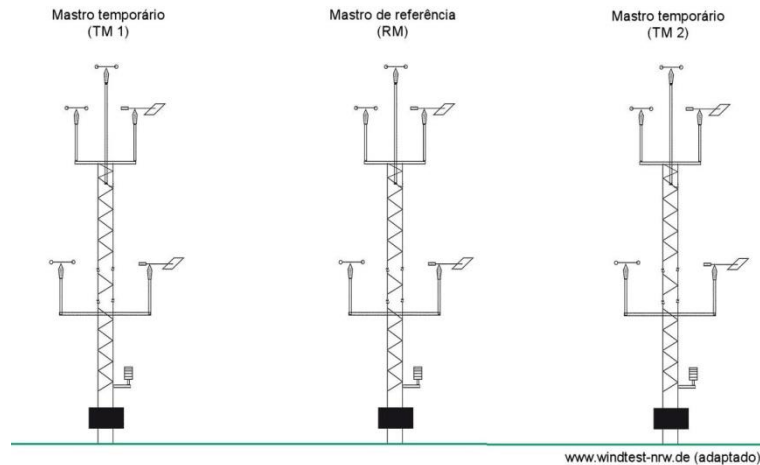


Figura 29 – Mastros meteorológicos para calibração do local em terrenos complexos e subsequente medição da curva de potência de dois aerogeradores

O local do teste deve ser avaliado quanto a fontes de distorção do fluxo de vento, a fim de:

- decidir sobre a posição do mastro meteorológico;
- definir um setor de medição adequado;
- estimar a correção de fluxo apropriada;
- avaliar a incerteza para direção do fluxo de vento.

É pois de muita importância, a escolha do local de posicionamento dos equipamentos de medição, pois pretende-se que as medições sejam o menos possível afetadas pela presença de obstáculos.

Dita esta norma que o mastro de referência deve ser colocado a uma distância compreendida entre 2 a 4 vezes o diâmetro do rotor da turbina, recomendando uma distância de 2,5 vezes o diâmetro do rotor.

A finalidade desta limitação tem a ver com o fato de, se os aparelhos estiverem muito próximos da turbina, as medições serem influenciadas por ela. Se estiverem demasiado afastados, a correlação da velocidade do vento com a potência de saída da turbina ficará reduzida.

O mastro meteorológico que representa o aerogerador deve ser localizado o mais próximo possível do local onde irá ser instalada a turbina eólica, não excedendo a distância ao eixo central da torre eólica, de 0,2 vezes a altura do solo ao rotor.

Na maioria dos casos, a localização mais apropriada para o equipamento de medição de vento, será no lado de barlavento do aerogerador, na direção a partir da qual se espera que o vento venha durante o teste. No entanto, às vezes, pode ser mais apropriado colocar o equipamento de medição de vento próximo à turbina eólica na medida em que as condições de vento serão mais semelhantes, por exemplo, para uma turbina eólica localizada numa cordilheira [1].

Os mastros meteorológicos são, geralmente, torres treliçadas ou tubulares, ancoradas por espias, de forma a minimizar o impacto do escoamento sem comprometer a segurança da estrutura. A sua finalidade (Figura 30) é suportar os principais instrumentos de medição atmosférica e de vento, necessários para a medição do desempenho de potência:

- Anemómetros;
- Cata-ventos;
- Sensores de temperatura e humidade;
- Sensor de pressão atmosférica.

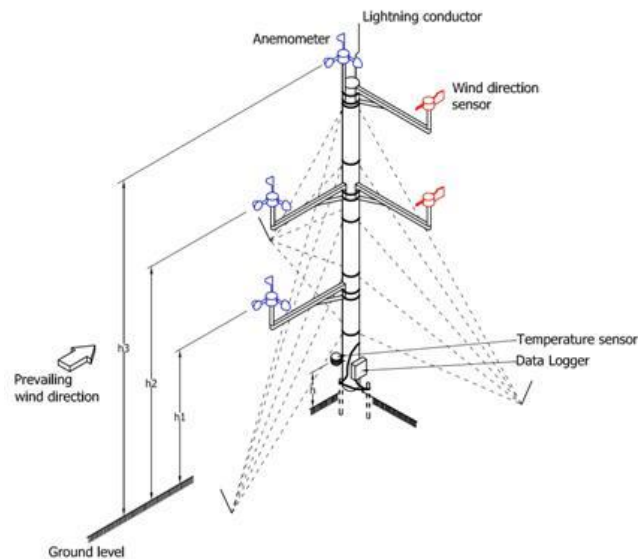


Figura 30 – Mastro meteorológico  
(<http://green-power.com.pl>)

Na situação em que o terreno obedece aos critérios de «terreno não complexo», o que significa que é um terreno plano, a norma não exige a calibração do local.

A configuração de uma medição de desempenho de energia, sem a calibração do local, pode ser observada na Figura 31.

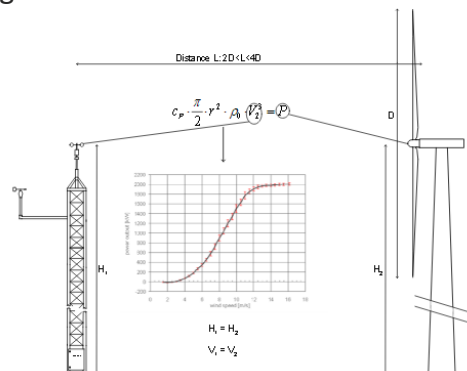


Figura 31 – Configuração de medição de desempenho sem a Calibração do Local [10]

### 3.3 Tratamento dos dados recolhidos

Os intervalos de 10 minutos consecutivos, com a velocidade média e o seu desvio padrão e as velocidades mínima e máxima, serão sujeitos a uma filtragem, com a finalidade de garantir que os dados a tratar corresponderão a dados de operação normal da turbina.

São retirados os dados referentes a tempos em que ocorram avarias dos aparelhos de medição e de registo, e os que correspondam a temperaturas inferiores a 2°C (Temperaturas baixas podem inibir o bom funcionamento dos aparelhos de medição).

Também são eliminados os momentos em que as direções de vento ficam fora do setor de medição, em que as velocidades do vento, medidas no mastro temporário, são inferiores a 4 m/s e superiores a 16 m/s (considera-se que a produção da turbina à potência nominal não é útil para a medição da curva, porque se torna independente da velocidade), e noutras condições atmosféricas particulares que possam ter influência no resultado da calibração do local.

Os dados filtrados nos dois mastros ficam ainda sujeitos a um tratamento de simultaneidade, de maneira a garantir que o momento da leitura num deles existe também no outro.

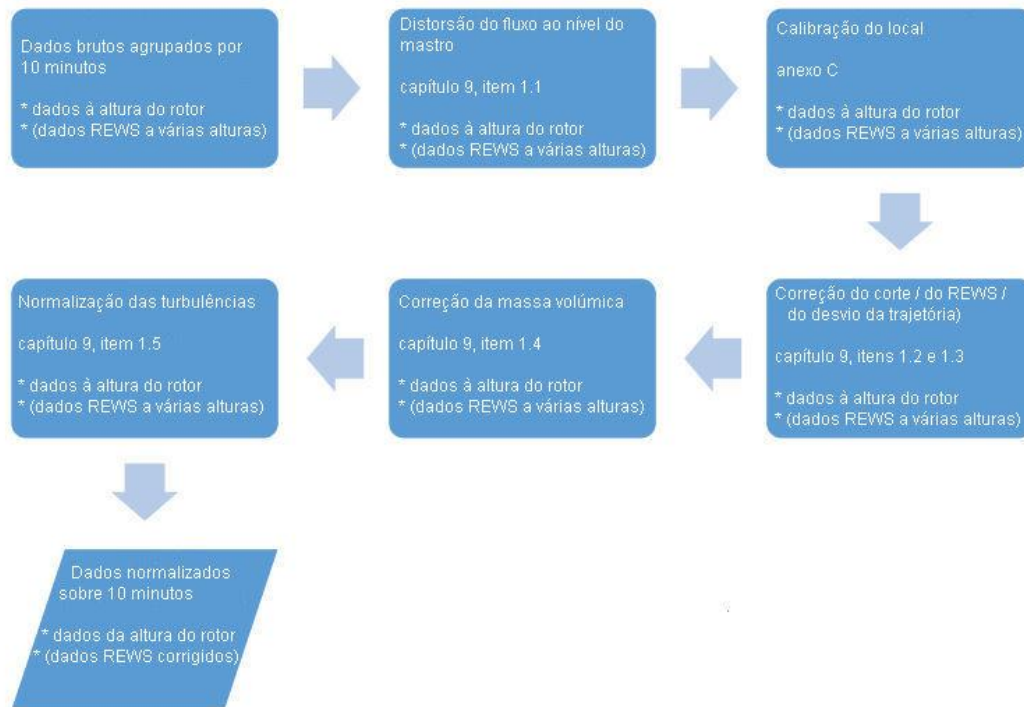
Os dados de temperatura, pressão atmosférica e humidade, a existirem, são tratados em tabela à parte.

A norma IEC 2017 refere no seu capítulo 9, processos de normalização destes dados, cuja função é a de melhorar a precisão dos resultados por meio de formulações concretas para cada variável:

- Correção da distorção do fluxo ao nível do mastro meteorológico pelos anemómetros instalados lateralmente.
- Correção do corte do vento (havendo dados REWS disponíveis).
- Correção do desvio da trajetória do vento.
- Normalização da massa volúmica do ar.
- Normalização das turbulências.

O organigrama que se apresenta na Tabela 4 reflete as várias normalizações:

Tabela 4 – Organigrama do processo de aplicação das várias normalizações [1]



IEC

### 3.4 Correção do corte de vento (com leituras REWS disponíveis)

Se a velocidade do vento sobre a área de varrimento do rotor da turbina eólica for constante, a velocidade do vento à altura do rotor será representativa da velocidade do vento sobre todo o rotor da turbina eólica e o seu uso será justificado. No entanto, esta suposição pode não ser representativa para grandes turbinas eólicas. Quanto maior for a área de varrimento da turbina, maior será a variação do vento em altura, sendo necessária a introdução de correções que levem em consideração a velocidade do vento à altura do rotor e as variações introduzidas pelo corte do vento sobre o rotor da turbina eólica. São assim definidas três grandezas para ajudar a caracterizar as variações do corte do vento ao longo da área de varrimento do rotor da turbina eólica:

- A velocidade do vento equivalente do rotor (REWS).
- O fator de correção do corte do vento.
- A velocidade do vento corrigida pelo corte do vento.

### 3.5 Variação da velocidade vertical do vento - Expoente de corte do vento

Um parâmetro importante na caracterização do recurso eólico é a variação da velocidade horizontal do vento com a altura acima do solo. É de esperar que a velocidade horizontal do vento seja zero na superfície da Terra e aumente com a altura, na camada limite atmosférica [17].

Esta variação da velocidade do vento, com a elevação, é chamada perfil vertical da velocidade do vento ou corte vertical do vento. Na engenharia ligada à energia eólica, a determinação do corte vertical do vento é um importante parâmetro de projeto, uma vez que condiciona a produtividade de uma turbina e pode influenciar fortemente a vida útil das pás do aerogerador.

Por vezes não existem dados disponíveis, sendo necessário fazerem-se algumas estimativas a partir de velocidades do vento medidas a determinada altura. Isso requer uma equação que preveja a velocidade do vento a uma outra altura, em termos da velocidade medida a uma altura mais baixa.

A mais comum e simples equação para a variação da velocidade do vento,  $V(h)$  com altura  $h$ , é conhecida como a lei de potência (*power law*).

$$\frac{V(h_1)}{V(h_{ref})} = \left( \frac{h_1}{h_{ref}} \right)^\alpha \quad (3.1)$$

Nesta equação,  $h_{ref}$  é a altura conhecida e  $h_1$  é a altura que se pretende estimar. O expoente  $\alpha$ , é determinado empiricamente, variando com a altura, a hora do dia, a estação do ano, a natureza do terreno, a velocidade do vento e a temperatura.

Sob certas condições,  $\alpha$  é igual a  $\frac{1}{7}$ , indicando uma correspondência entre perfis de vento e fluxo sobre placas planas (Prandtl), o que foi confirmado por muitas medições em todo o mundo.

Na prática, o expoente  $\alpha$  é uma quantidade altamente variável.

O seguinte exemplo enfatiza a importância da variação do valor do expoente  $\alpha$ .

Considere-se que a velocidade do vento à altura de 10 metros ( $V_{10}$ ) é de 5 m/s.

A Tabela 5 mostra valores de velocidade a 30 m para diferentes valores de  $\alpha$ . Inclui-se igualmente valores da densidade de potência, assumindo  $\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$ .

O impacto do valor de  $\alpha$  é notório em ambas as quantidades.

Tabela 5 – Efeito do  $\alpha$  na estimativa da densidade de potência do vento a diferentes alturas

	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 1/7$	$\alpha = 0,2$	$\alpha = 0,3$
$V_{30}$ (m/s)	5,58	5,85	6,23	6,95
$P_v/A$ (W/m <sup>2</sup> )	106,5	122,6	148,0	205,8
% de incremento acima dos 10 m	62,0	86,6	125,3	213,2

O corte do vento é portanto proporcional à variação em altura da velocidade do vento e é caracterizado pelo expoente de corte ( $\alpha$ ), que por sua vez é definido pela lei da potência.

O parâmetro  $\alpha$  é usado na calibração do local, como uma medida da grandeza do corte do vento.

### 3.6 O cálculo da REWS (velocidade de vento equivalente do rotor)

A velocidade do vento, e portanto a sua energia cinética, não é igual em toda a área de varrimento das pás da turbina, pelo que considerar somente a velocidade do vento à altura do rotor, pode não ser representativo da soma da energia cinética sobre o rotor. A *velocidade de vento equivalente do rotor* surge como sendo a velocidade do vento correspondente ao fluxo de energia cinética que atravessa a área de varrimento do rotor, tendo em conta a tensão de corte vertical do vento.

Notas referentes a esta metodologia (ver Figura 32):

- A velocidade do vento à altura do rotor é a velocidade por defeito e tem que ser sempre medida e reportada;
- A inclusão da REWS implica que existam medições na metade superior do rotor, até pelo menos  $H+2/3R$  ( $H$  é a altura do solo ao centro do rotor e  $R$  é o raio da área de varrimento do rotor), o que introduz a opção de se utilizar sensores RSD (Remote Sensing Devices) combinados com um mastro meteorológico;
- Há que medir o maior número possível de pontos, no mínimo de 3, incluindo ao nível do rotor (nível de altura  $a$ ), entre  $H-R$  e  $H-2/3R$  (nível de altura  $b$ ), e um outro entre  $H+R$  e  $H+2/3R$  (nível de altura  $c$ ). Caso não haja estas medições, podem ser estimados pela rugosidade do terreno ou com apoio no Estudo de Recurso Eólico previamente realizado.

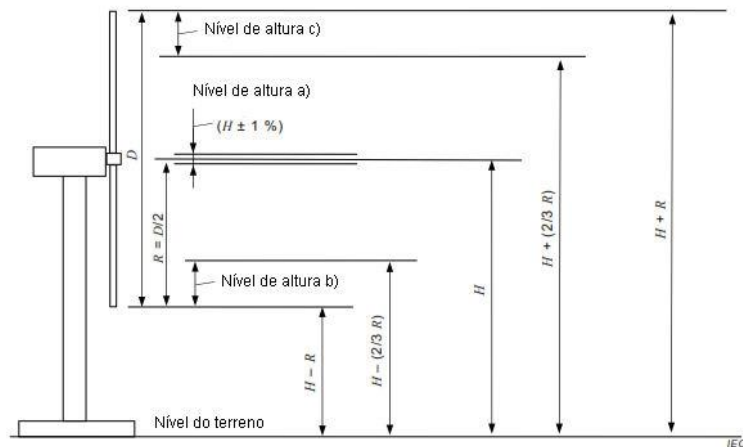


Figura 32 – Alturas de medição de corte do vento para o cálculo do REWS [1]

A definição da REWS é dada pela equação (3.2):

$$v_{eq} = \left( \sum_{i=1}^{n_h} v_i^3 \cdot \frac{A_i}{A} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.2)$$

Sendo:

$n_h$  – o número disponível de medições em altura;

$v_i$  – a velocidade medida à altura  $i$ ;

$A$  – a área de varrimento total do rotor;

$A_i$  – a área do  $i^{\text{º}}$  segmento (Figura 33).

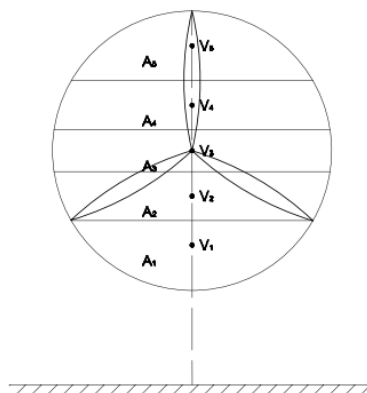


Figura 33 – Área de varrimento do rotor dividida em segmentos

Como se deduz da equação (3.2), a REWS é a velocidade que proporcionaria a mesma potência do vento se este fosse constante ao longo do rotor (i.e. se  $\alpha$  fosse zero). Quanto mais afastado o valor de  $\alpha$  estiver de zero, mais o valor da REWS diferirá da velocidade do vento.

Os segmentos (com as áreas  $A_i$  - Figura 33) devem ser escolhidos de tal forma que, a linha de separação horizontal entre dois segmentos, se encontre no meio dos dois pontos de velocidade medidos.

A normativa sugere que as superfícies dos segmentos sejam deduzidas com ajuda às equações (3.3) e (3.4):

$$A_i = \int_{h_i}^{h_{i+1}} c(h)dh = g_{h_{i+1}} - g_{h_i} \quad (3.3)$$

$$g(h) = (h - H)\sqrt{R^2 - (h - H)^2} + R^2 \tan^{-1}\left(\frac{h - H}{\sqrt{R^2 - (h - H)^2}}\right) \quad (3.4)$$

Sendo:

$c(h)$  – largura da parcela à altura  $h$ ;

$h_i$  – a altura da linha  $i$  de separação do segmento ( $H-R < h_i < H+R$ ), numerado na mesma ordem que  $v_i$ ;

$R$  – raio da área de varrimento;

$H$  – altura do rotor.

As áreas  $A_i$  dos segmentos  $i$  podem ser determinadas fazendo uso de cálculos geométricos - Figura 34.

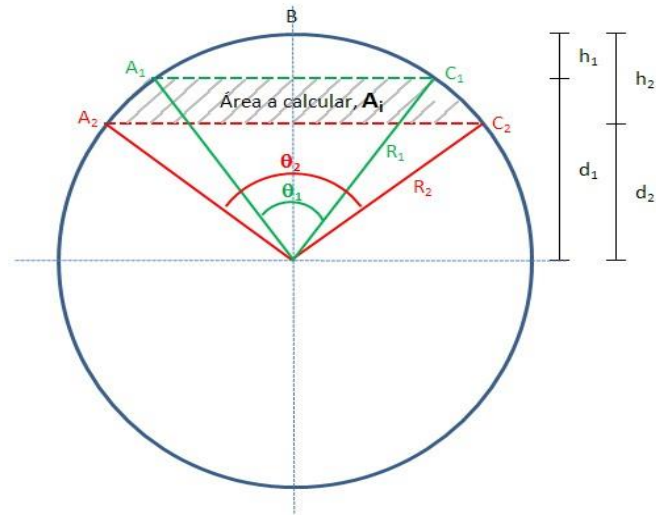


Figura 34 – Geometria de cálculo de segmentos

$$d_1 = R - h_1 \text{ e } d_2 = R - h_2 \quad (3.5)$$

$$R = R_1 = R_2 \quad (3.6)$$

$$\theta_1 = 2 \cos^{-1} \left( \frac{d_1}{R} \right) \quad (3.7)$$

$$\theta_2 = 2 \cos^{-1} \left( \frac{d_2}{R} \right) \quad (3.8)$$

$$A_1 = \frac{R^2}{2 (\theta_1 - \sin \theta_1)} \quad (3.9)$$

$$A_2 = \frac{R^2}{2 (\theta_2 - \sin \theta_2)} \quad (3.10)$$

$$\text{Área a calcular } A_i = A_2 - A_1 \quad (3.11)$$

O somatório das áreas  $A_i$  será igual à área de varrimento  $\left( \frac{\pi D^2}{4} \right)$ .

### 3.6.1 Exemplo de cálculo da REWS

Considera-se, para o exemplo, uma turbina eólica com diâmetro de rotor de 100 m, com uma altura do solo ao rotor de 85 m e velocidades do vento em intervalos de 1 m em altura. O cálculo é realizado usando o método geométrico atrás referido.

Tabela 6 – Exemplo de cálculo do REWS

	altura da leitura i	velocidade do vento	altura limite inferior do segmento	altura limite superior do segmento	área do segmento	ponderação do segmento	(*)
i	(m)	$V_i$ (m/s)	$h_i$ (m)	$h_{i+1}$ (m)	$A_i$ (m <sup>2</sup> )	(%)	
101	135,00	7,37	134,50	135,00	4,71	0,06	0,24
96	130,00	7,29	129,50	130,50	43,57	0,55	2,15
91	125,00	7,20	124,50	125,50	59,99	0,76	2,86
86	120,00	7,12	119,50	120,50	71,41	0,91	3,28
81	115,00	7,02	114,50	115,50	80,00	1,02	3,53
76	110,00	6,93	109,50	110,50	86,60	1,10	3,67
71	105,00	6,83	104,50	105,50	91,65	1,17	3,72
66	100,00	6,72	99,50	100,50	95,39	1,21	3,69
61	95,00	6,62	94,50	95,50	97,98	1,25	3,61
56	90,00	6,50	89,50	90,50	99,50	1,27	3,48
51	85,00	6,38	84,50	85,50	100,00	1,27	3,31
47	81,00	6,35	80,50	81,50	99,68	1,27	3,25
42	76,00	6,31	75,50	76,50	98,36	1,25	3,14
37	71,00	6,26	70,50	71,50	96,00	1,22	3,00
32	66,00	6,21	65,50	66,50	92,50	1,18	2,82
27	61,00	6,16	60,50	61,50	87,72	1,12	2,61
22	56,00	6,10	55,50	56,50	81,46	1,04	2,35
17	51,00	6,02	50,50	51,50	73,32	0,93	2,04
12	46,00	5,75	45,50	46,50	62,57	0,80	1,51
7	41,00	5,61	40,50	41,50	47,48	0,60	1,06
6	40,00	5,57	39,50	40,50	43,57	0,55	0,96
1	35,00	5,39	35,00	35,50	4,71	0,06	0,09

(\*)  $V_i^3 \cdot \frac{A_i}{A}$ , sendo A o valor da área de varrimento do rotor

A ponderação do segmento representa o peso de cada área no integral numérico.

O valor da REWS é calculado somando os valores da coluna (\*) e elevando o resultado a  $\frac{1}{3}$ , conforme a equação (3.2).

Este método geométrico é o usado nesta tese, para o cálculo dos valores da REWS, com as velocidades em cada parcela de área calculadas pela equação (3.1) a partir das medições a 2 alturas nos mastros meteorológicos.

Usando o método geométrico descrito, calculou-se os valores das velocidades REWS, que se mostram em função das velocidades à altura do rotor, no período de recolha de dados, o que pode ser visto no gráfico da Figura 35 e da Figura 36. As velocidades médias resultantes do cálculo pelo método REWS e as velocidades médias medidas de HH, no período, são respetivamente de 7,26 m/s e de 7,27 m/s, com o desvio padrão de REWS/HH de 0,012 e diferença máxima (REWS-HH) de 1,29 m/s.

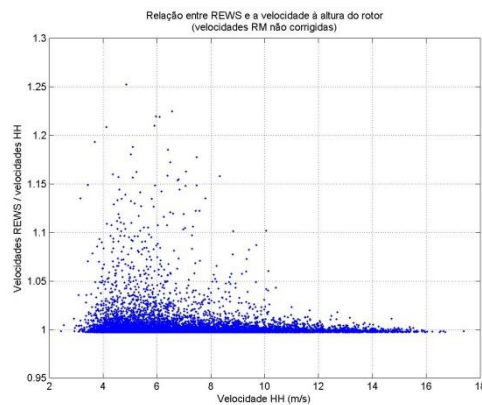


Figura 35 – Relação de velocidades REWS/HH vs velocidades HH no período de medições

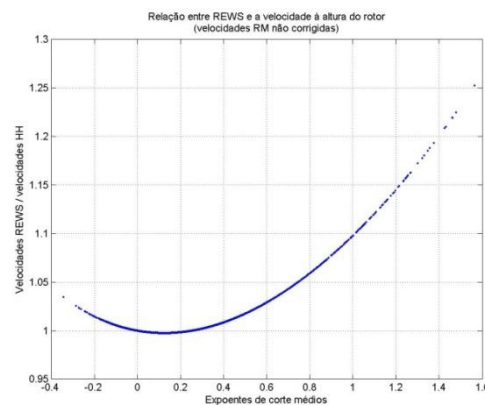


Figura 36 – Relação de velocidades REWS/HH vs expoentes de corte no período de medições

Pela Figura 35 verifica-se que nas velocidades menores é onde a relação REWS/HH tem maior importância, diminuindo com o aumento das velocidades. Ou seja, para velocidades mais pequenas, o método REWS consegue captar uma maior fatia de energia sobre o rotor. Isto sugere também que o fator de corte é, como seria de esperar, mais alto para velocidades mais baixas.

A Figura 36 mostra o aumento da influência do fator corte com o aumento da proporção entre os dois tipos de velocidades.

### 3.7 Análise

Após realizada a rejeição de dados, a primeira etapa do processo de calibração do local consiste em avaliar as condições de corte do local.

Para tal, executam-se os seguintes cálculos para cada ponto de 10 minutos:

- A relação entre a velocidade REWS do vento medida no mastro temporário e a velocidade REWS do vento no mastro de referência, ambas à altura do rotor.
- O expoente de corte nos dois mastros, calculado com a lei de potência.
- O momento do dia, usando um sistema horário de 24 horas.

O método de análise deverá depender da importância do corte do vento, pelo que devem ser gerados gráficos de dispersão, para ambos os mastros, com a base de dados filtrados, como por exemplo:

- Gráficos de dispersão do expoente de corte do vento em função da hora (Figura 37 e Figura 39).
- Gráficos de dispersão do expoente de corte do vento em função da direção do vento (Figura 38 e Figura 40).
- Gráficos de dispersão do expoente de corte do vento em função da velocidade do vento (Figura 41 e Figura 43).
- Gráficos de dispersão da velocidade do vento em função da hora (Figura 42 e Figura 44).

É conveniente utilizar a hora do dia com alguma precaução, pois os horários locais do nascer e do pôr-do-sol, têm uma forte influência na estabilidade atmosférica.

Em geral, para um conjunto de dados longos e latitudes mais altas, a correlação entre o nascer do sol e a hora do dia, torna-se bastante fraca. Para um local onde esses efeitos ocorrem, os expoentes de corte observados durante o dia serão baixos, desde que o sol aqueça o solo, causando turbulência e mistura, e serão maiores à noite. Portanto, uma ampla gama de expoentes de corte, bem como uma considerável variação de expoentes de corte entre dia e noite, podem ser observados nesses locais.

Alguns exemplos de gráficos de dispersão.

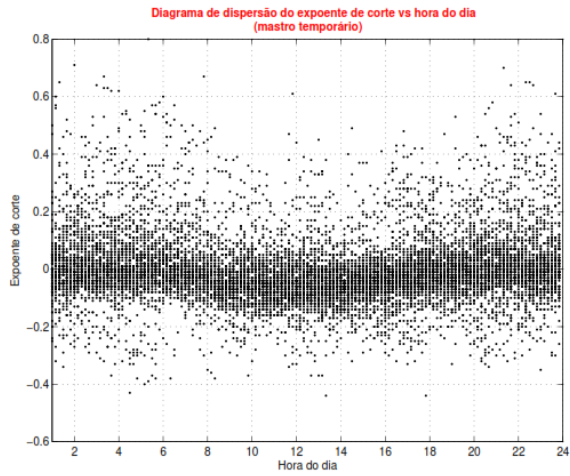


Figura 37 – Gráfico de dispersão do expoente de corte em função da hora do dia (mastro temporário)

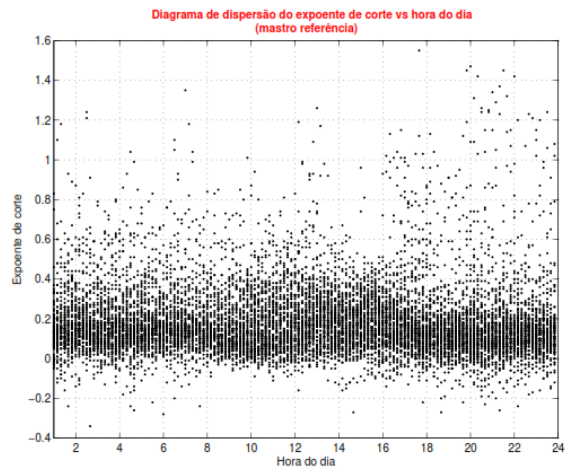


Figura 39 – Gráfico de dispersão do expoente de corte em função da hora do dia (mastro de referência)

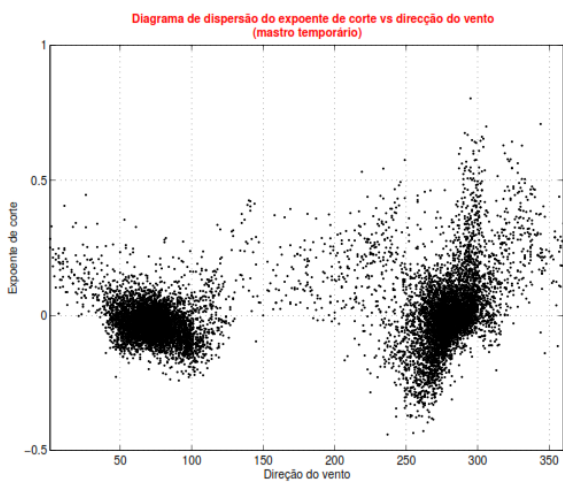


Figura 38 – Gráfico de dispersão do expoente de corte em função da direção do vento (mastro temporário)

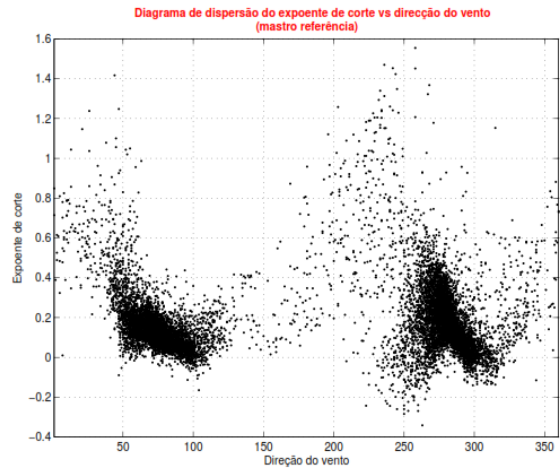


Figura 40 – Gráfico de dispersão do expoente de corte em função da direção do vento (mastro de referência)

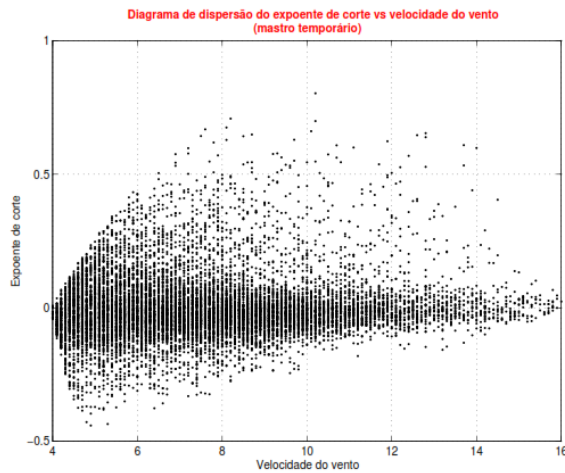


Figura 41 – Gráfico de dispersão do expoente de corte em função da velocidade do vento (mastro temporário)

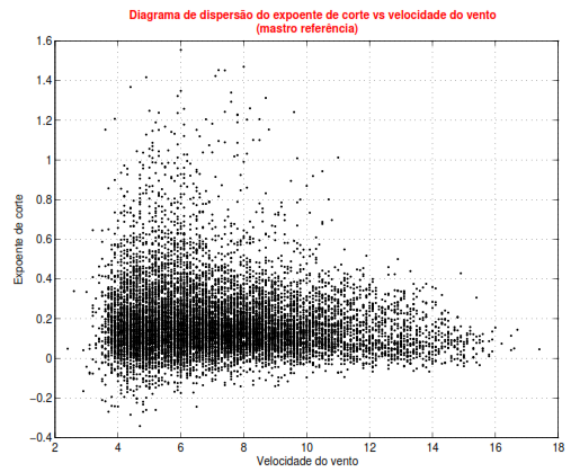


Figura 43 – Gráfico de dispersão do expoente de corte em função da velocidade do vento (mastro de referência)

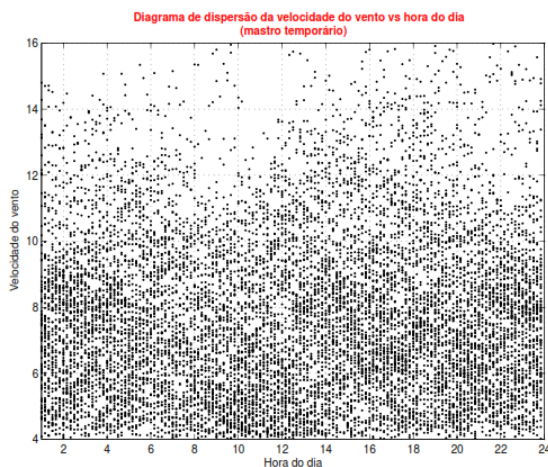


Figura 42 – Gráfico de dispersão da velocidade do vento em função da hora do dia (mastro temporário)

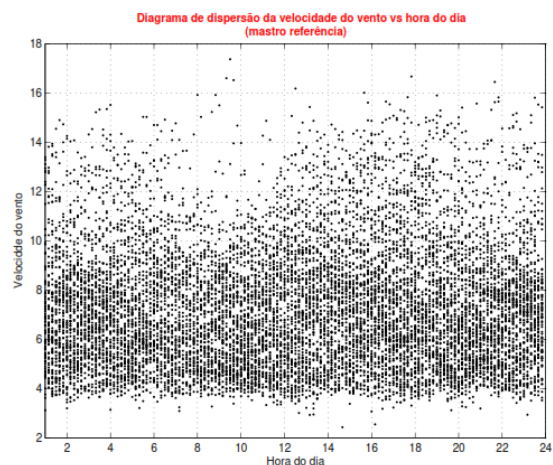


Figura 44 – Gráfico de dispersão da velocidade do vento em função da hora do dia (mastro de referência)

### 3.8 Avaliação da importância do corte do vento e o método de correção a utilizar

Independentemente da estabilidade atmosférica, o corte do vento deve ser considerado como um fator importante, se mais de 25% dos registos medidos apresentarem um expoente de corte superior a 0,25. Para medirmos esta quantidade

de expoentes de corte, torna-se necessária a existência de uma boa correlação entre os expoentes de corte dos dois mastros de medição.

Caso não exista uma correlação entre o corte nos dois mastros, torna-se necessário fazer correções de maneira a que ela ocorra.

Uma possibilidade é a de separar os dados por momentos diurnos e por momentos noturnos. É frequente que dados não correlacionados ocorram em locais onde existe uma diferença significativa de altura entre os mastros, associado a fatores de corte elevados, o que é fortemente dependente da hora do dia (ciclos diurno e noturno de estabilidade atmosférica).

Esta filtragem possibilita a exclusão dos cortes elevados que ocorrem durante a noite, reduzindo o setor de medição e considerando direções com as mesmas condições de fluxo.

Também é de considerar que esta filtragem por tempo seja produzida por estações do ano. Mas outros métodos podem ser utilizados, desde que se obtenham dados suficientemente correlacionados.

A avaliação do impacto dos filtros aplicados, pode ser analisada através dos gráficos atrás mencionados.

Da Figura 45 à Figura 47 apresentam-se modelos de gráficos que permitem avaliar a importância e a correlação do corte de vento e a correlação das velocidades entre mastros.

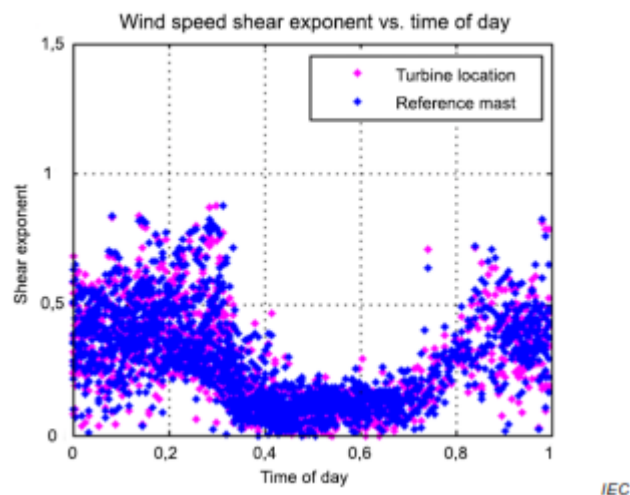


Figura 45 – Corte do vento versus momento do dia [1]  
(Exemplo da norma IEC 61400-12-1)

A Figura 45 permite-nos observar que o corte do vento é elevado no período noturno e leve no diurno. É uma situação típica para um local que apresenta um ciclo diurno de estabilidade atmosférica. À noite, a atmosfera forma camadas térmicas que inibem a turbulência e causam corte de vento alto (regime estável). Durante o dia, o sol aquece o solo, fazendo com que haja mais mistura. Como resultado, o perfil de velocidade do vento é mais uniforme e a turbulência é maior (regime instável).

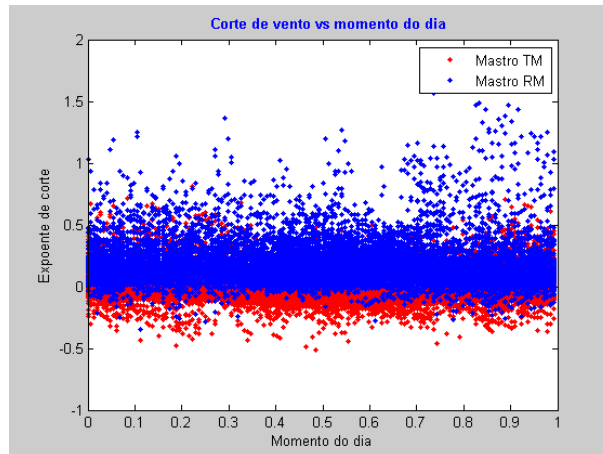


Figura 46 – Corte do vento versus momento do dia

Para comparação, mostra-se na Figura 46, um outro caso onde o expoente de corte varia pouco ao longo do dia.

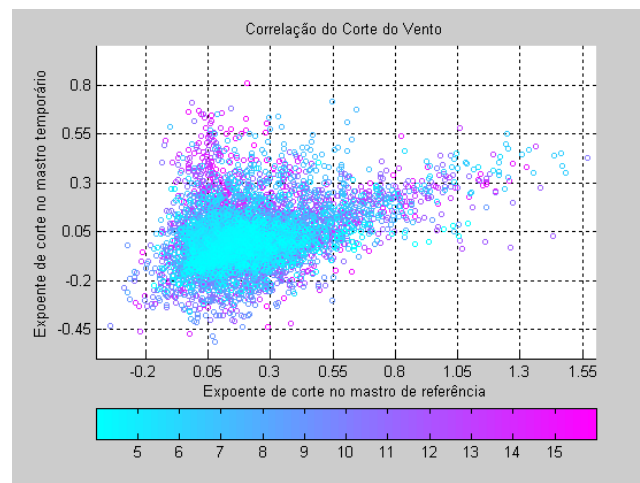


Figura 47 – Expoente de corte do vento do mastro RM em relação ao do mastro TM  
A barra colorida refere-se à velocidade do vento (m/s)

A Figura 47 mostra uma nuvem compacta de pontos de relação entre os cortes de vento nos dois mastros, numa ampla gama de valores de corte no mastro de referência entre -0,1 e 0,5, o que nos dá uma ideia do intervalo de valores esperado para o expoente de corte no mastro temporário. Para valores de corte acima de 0,6 no mastro de referência, o valor esperado de corte no mastro temporário encontra-se melhor definido.

Um outro exemplo pode ser observado na Figura 48, onde se verifica que o corte do vento ao nível do mastro de referência é significativamente diferente do corte de vento ao nível do mastro temporário, pelo que é razoável esperar-se que a relação entre velocidades do vento à altura do rotor seja influenciada pelas variações do perfil de corte do vento.

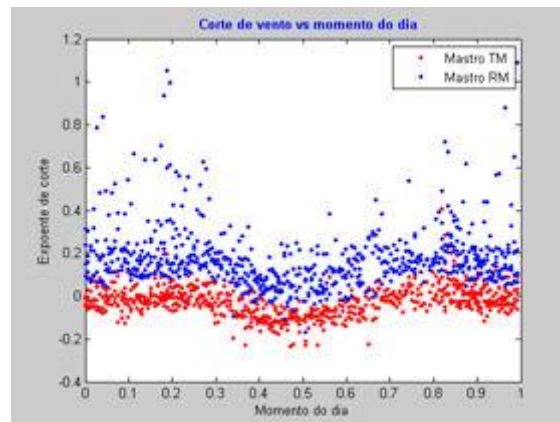


Figura 48 – Corte do vento versus momento do dia

Já a Figura 49 mostra fraca correlação para os valores de corte de vento superiores a 0,30. O corte de vento ao nível do mastro meteorológico de referência, para valores de corte de vento superiores a 0,30, não é um bom indicador de como poderá ser o corte de vento no mastro temporário.

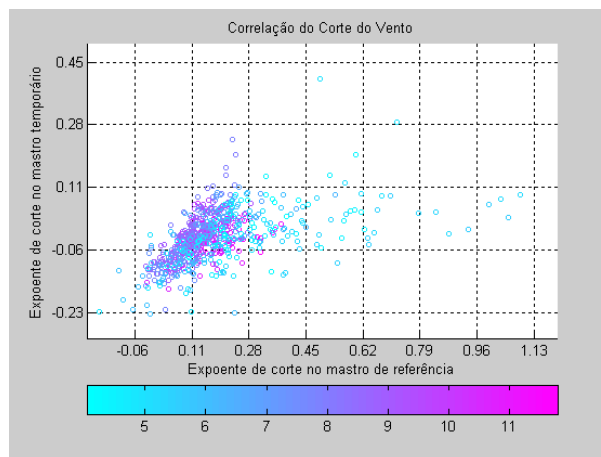


Figura 49 – Expoente de corte do vento do mastro RM em relação ao do mastro TM  
A barra colorida refere-se à velocidade do vento (m/s)

Utilizando gráficos de correlação por fatias de direção entre as velocidades do mastro de referência e as do mastro provisório, como por exemplo o da Figura 50, pode-se avaliar o nível de correlação entre velocidades.

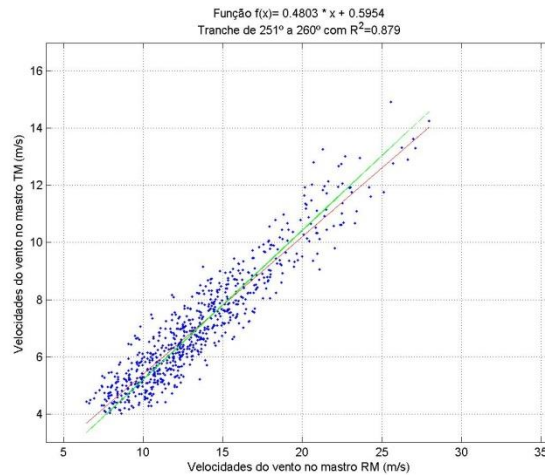


Figura 50 – Correlação entre velocidades do vento do mastro RM e do mastro TM, para ventos de 251° a 260°  
(A linha verde corresponde à regressão linear forçada a passar pela origem)

### 3.9 Construção das tabelas de trabalho nos métodos de calibração do local

Sendo dois os métodos indicados pela norma IEC de 2017 na correção das velocidades registadas para a calibração do local, a decisão de utilizar um método ou o outro é função da análise da importância do fator de corte do vento.

Se o fator de corte do vento for dado como importante, o método a utilizar na calibração do local é o método da matriz de direções de vento vs expoentes de corte. Caso contrário, utiliza-se o método da regressão linear simples.

#### 3.9.1 Para o método da matriz de direções vs expoentes

Após a obtenção da correlação dos dados, tomam-se os dados do mastro de referência e agrupam-se em conjuntos de direções e de corte do vento. As direções são fatiadas em grupos de 10° e os expoentes de corte em grupos de 0,05, dando origem a duas matrizes.

Para cada conjunto de dados que cai nestes intervalos de direção e corte, é registada numa das matrizes a média das razões de velocidade simultâneas nos dois mastros ( $V_{TM}/V_{RM}$ ) e na outra matriz, são registados o número de registos que cai dentro desses intervalos.

O total de dados por cada direção terá que ser superior a 144 (24 horas de dados) e cada elemento da matriz terá que ter mais de 3 dados.

Também, para cada direção, deverão existir pelo menos 6 horas de dados com velocidades do vento superiores a 8 m/s e igual número de horas para as inferiores a 8

m/s. Contudo, qualquer elemento direção/corte da matriz é aceite como válido se tiver mais de 36 dados, independentemente se a direção a que pertence cumpre ou não, os critérios atrás enunciados.

A Tabela 7 fornece, em exemplo, os fatores de correção médios de fluxo ditados por este método de calibração do local e a Tabela 8, o respetivo número de dados por fatia. Os elementos da Tabela 7 que têm um número de dados inferiores a 3 são excluídos.

Tabela 7 – Rácios médios de velocidade entre mastros por corte de vento e direção

		Fatias de direções do vento						
		250	260	270	280	290	300	310
Fatias de expoentes de corte	0,20	1,140	1,076	1,046	1,028	1,021	1,023	1,293
	0,25	1,074	1,072	1,015	1,027	1,009	1,108	1,148
	0,30	1,096	1,059	1,032	1,020	1,011	1,074	1,107
	0,35	1,050	1,054	1,031	1,024	0,985	EXC	1,083
	0,40	1,197	1,074	1,025	1,001	1,085	1,026	1,108
	0,45	EXC	1,066	1,027	1,027	0,975	EXC	1,194
	0,50	1,047	0,974	1,063	1,064	0,947	1,051	EXC
	0,55	1,168	1,122	1,022	1,042	EXC	EXC	EXC
	0,60	1,228	0,979	1,096	1,029	EXC	EXC	EXC
	0,65	1,178	1,092	1,096	EXC	EXC	EXC	EXC
	0,70	1,211	1,133	1,010	EXC	EXC	EXC	EXC
0,75	EXC	EXC	EXC	EXC	EXC	EXC	EXC	

Tabela 8 – número de dados por corte de vento e direção

		Fatias de direções do vento						
		250	260	270	280	290	300	310
Fatias de expoente de corte	0,20	6	31	94	273	188	33	5
	0,25	5	26	93	282	128	11	3
	0,30	8	17	75	208	67	12	4
	0,35	3	17	80	133	27	2	3
	0,40	5	13	46	81	12	5	3
	0,45	2	7	38	34	5	1	4
	0,50	7	9	25	12	3	3	2
	0,55	8	12	13	9	1	0	1
	0,60	4	5	7	6	2	2	2
	0,65	4	5	4	0	0	1	0
	0,70	4	5	3	2	0	1	0
0,75	2	2	0	0	0	0	0	

### 3.9.2 Para o método da regressão

Aqui, os dados são agrupados em direções de vento intervalados em 10° e, para cada intervalo, é aplicada uma regressão linear simples dos mínimos quadrados, com a velocidade do vento do mastro temporário, como variável dependente, e a velocidade do vento do mastro de referência, como variável independente. Como consequência, cada grupo de 10° de direção de vento terá a sua representação sob a forma de uma reta, com um declive e uma ordenada na origem dos eixos - Tabela 9.

Cada grupo de direção de vento terá que ter um mínimo de 24 horas de registos, ou seja, 144 dados, ter 6 horas de registos com velocidades inferiores a 8 m/s e outras 6 horas com velocidades superiores a 8 m/s, ou seja, um mínimo de 36 dados em cada intervalo.

É muito conveniente que exista uma boa distribuição de velocidades em cada grupo de direções de vento para se obter a melhor correlação, sendo recomendável a presença, na matriz de dados, de velocidades de vento de pelo menos 11 m/s. O nível de ajuste é avaliado a partir do coeficiente de determinação da regressão,  $R^2$ . O coeficiente de determinação indica quanto da variação na variável dependente está a ser explicada pela variação na variável independente.

Tabela 9 – Correções de fluxo de vento

Direção do vento (°)	250	260	270	280	290	300	310
Coeficiente angular (m)	1,12	0,96	0,96	0,97	0,96	0,81	0,93
Coeficiente linear (b)	0,01	0,60	0,50	0,40	0,57	7,77	0,76
$R^2$	0,85	0,88	0,93	0,94	0,93	0,84	0,88
número de dados	230	717	1552	1257	1024	508	192

### 3.10 Cálculo da velocidade estimada de vento

Determinados os coeficientes a aplicar na correção do fluxo, ou seja, conhecida a função de transferência, podemos avançar para o cálculo da estimativa da velocidade no local da turbina eólica, utilizando as medições do vento no mastro de referência, o que deve ser feito usando a base de dados filtrada.

Para o método da matriz, é aplicado o seguinte cálculo (equação (3.12)):

$$V_{Turb\_prevista} = f(WD, \alpha) * V_{RM} \quad (3.12)$$

Com:

$V_{Turb\_prevista}$  – velocidade prevista do vento no local de montagem da turbina eólica.

$f(WD, \alpha)$  – correção do escoamento determinado pelo método da matriz.

$WD$  – fatia de direção de vento.

$\alpha$  – fatia de expoente de corte de vento.

$V_{RM}$  – velocidade do vento no mastro meteorológico de referência.

A título de exemplo, e regressando à Tabela 7, vamos considerar que temos a velocidade 8 m/s, medida no mastro de referência na direção de 280° e que esta velocidade “encaixa” na fatia de expoente de 0,50.

Desta tabela retiramos o valor de 1,064 como fator  $f(WD, \alpha)$  a aplicar sobre a velocidade de 8 m/s

A velocidade prevista no local da turbina ( $V_{Turb\_prevista}$ ), no mesmo momento da ocorrência da velocidade de 8 m/s, será de  $8 \times 1,064 \text{ m/s} = 8,51 \text{ m/s}$ .

Para o método da regressão, é aplicada a equação (3.13) da regressão linear:

$$V_{Turb\_prevista} = m * V_{RM} + b \quad (3.13)$$

Sendo:

$V_{Turb\_prevista}$  – velocidade prevista do vento no local de montagem da turbina eólica.

$m$  – coeficiente angular ou declive da reta resultante da aplicação da regressão.

$b$  – coeficiente linear da reta resultante da aplicação da regressão.

Também a título de exemplo, mas agora regressando à Tabela 9, vamos considerar que temos o mesmo valor de velocidade 8 m/s, medida no mastro de referência, e também na direção de 280°.

Desta tabela retiramos o valor do coeficiente angular ( $m$ ) e o valor do coeficiente linear ( $b$ ), respetivamente 0,97 e 0,40 e aplicamos a equação (3.13), com o valor da velocidade  $V_{RM}$  de 8 m/s. A velocidade estimada ( $V_{Turb\_prevista}$ ) será de  $0,97 * 8 + 0,40 \text{ m/s} = 8,16 \text{ m/s}$ .

### 3.11 Valores residuais e de auto-consistência

Para averiguar a qualidade dos resultados da calibração do local (com qualquer dos métodos), deve ser ainda calculado, para cada grupo de dados de 10 minutos, um residual de calibração, que corresponde à diferença entre a velocidade prevista no local de instalação da eólica e a velocidade medida do vento no mesmo local, de acordo com a equação (3.14).

$$residual = V_{Turb\_prevista} - V_{Turb\_medida} \quad (3.14)$$

Este erro residual deve ser complementado por um parâmetro de consistência interna ou auto-consistência, equação (3.15), também para cada intervalo simultâneo de 10 minutos de dados, dividindo a velocidade prevista no local de instalação da turbina eólica pela velocidade do vento medida no mesmo local.

Para cada momento, e utilizando os dados resultantes do método de calibração, é feita uma tabela contendo os valores residuais e de auto-consistência, de maneira a visualizar possíveis desvios significativos na velocidade prevista calculada.

$$\text{auto consistência} = \frac{V_{Turb\_prevista}}{V_{Turb\_medida}} \quad (3.15)$$

### 3.12 Incertezas na calibração do local

Incertezas são uma medida da confiabilidade de um resultado.

A incerteza de medição é um parâmetro não negativo, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos à grandeza que se pretende medir [18].

Na medição do vento, as incertezas são um indicador do grau em que os dados de medição refletem o acontecimento real.

São considerados dois grupos de incertezas, referenciados como incerteza de categoria A e incerteza de categoria B.

A avaliação de Tipo A da incerteza-padrão é o método de avaliação da incerteza pela análise estatística de uma série de observações. Neste caso, a incerteza-padrão é o desvio-padrão que decorre de um procedimento de cálculo da média ou de uma análise de regressão apropriada.

A avaliação de Tipo B da incerteza-padrão é o método de avaliação da incerteza por outros meios que não os da análise estatística de uma série de observações. Neste caso, a avaliação da incerteza padrão é baseada noutro conhecimento científico.

Ou seja:

As de categoria A referem-se às incertezas resultantes da utilização das medições realizadas, e são estas as incertezas calculadas nesta dissertação.

As de categoria B referem-se às incertezas resultantes da utilização dos equipamentos usados na medição e recolha dos dados meteorológicos, ficando o seu cálculo para um trabalho futuro.

### 3.12.1 Incerteza de calibração do local do tipo A

Deve ser calculada com a ajuda da validação cruzada em  $k$ -amostras de dados.

Resumidamente, o método de validação cruzada ( $k$ -fold cross validation) consiste em dividir o conjunto total de dados em  $k$  subconjuntos do mesmo tamanho.

Cada um dos  $k$  subconjuntos criados é testado pelos outros  $k-1$  subconjuntos.

Este processo realiza-se  $k$  vezes, alternando de forma circular o subconjunto em teste - Figura 51.

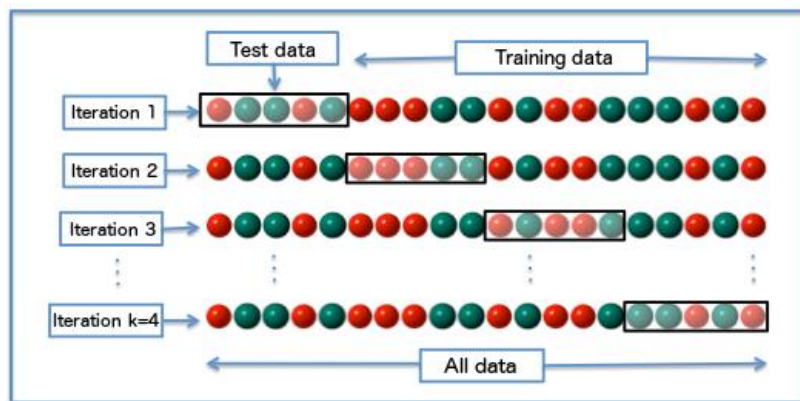


Figura 51 – Método de validação cruzada ( $k$ -fold cross validation)  
([http:// en.wikipedia.org](http://en.wikipedia.org))

No final das  $k$  iterações, calcula-se a precisão do modelo.

Neste trabalho, os dados filtrados são divididos em  $k=10$  amostras de igual número de dados em função da direção.

É usado o valor de  $k=10$  para que haja uma probabilidade maior de haver informações suficientes nos conjuntos restantes, para cobrir a faixa de velocidades de vento presentes no conjunto de dados que está a ser avaliado; no entanto, outros valores de  $k$  são permitidos, desde que  $k \geq 2$ .

Para cada amostra (da amostra 1 à 10), as correções são feitas usando um dos dois métodos atrás referidos (o da matriz ou o da regressão), mas utilizando unicamente as 9 outras amostras. As correções de calibração do local são usadas para calcular a velocidade do vento prevista no local da turbina eólica, usando as velocidades do vento medidas no mastro de referência para uma amostra.

As velocidades do vento previstas na localização da turbina eólica para uma amostra, são comparadas com as velocidades do vento medidas no local da turbina eólica para essa amostra, de acordo com os parâmetros de residual e de consistência interna, já definidos (equações (3.14) e (3.15)).

A incerteza estatística tipo A, para cada amostra, é determinada pela equação (3.16).

$$S_{SC,k} = d_{std,k} \cdot \frac{\sqrt{N_k - 1}}{\sqrt{f \cdot N_k}} \quad (3.16)$$

$$d_{std,k} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (d_{j,k} - \bar{d}_k)^2}{N_k - 1}} \quad (3.17)$$

Com:

$S_{SC,k}$  – incerteza estatística do tipo A para uma amostra k.

$d_{std,k}$  – desvio padrão dos resíduos da calibração do local para uma amostra k.

$N_k$  – número de dados na amostra k.

$f$  – número de graus de liberdade na calibração do local, ou seja, é a diferença entre o número de períodos de 10 minutos incluídos na calibração do local e o número total de parâmetros do algoritmo de calibração do local:

- para o método das fatias (subsetores de largura 10°),  $f=N_k-1*n$ .

- para os métodos da regressão linear (inclinação e desvio),  $f=N_k-2*n$ .

- n – números de setores de direção de vento.

$d_{j,k}$  – valor do resíduo do j-ésimo período de 10°, da amostra k.

$\bar{d}_k$  – valor médio dos resíduos na amostra k.

A incerteza total da categoria A (equação (3.18)) é a raiz quadrada da soma dos quadrados das incertezas, calculada para cada amostra e dividida pela raiz quadrada de k (k=10).

$$S_{SC} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k S_{SC,i}^2}{k}} \quad (3.18)$$

Os cálculos em cada tranche k são feitos sobre o número de elementos dessa k-tranche, por momento e direção, resultando na média de cada um dos parâmetros calculados.

A Tabela 10 e a Tabela 11 são o exemplo com 4 das 10 k-tranches deste processo com o método da matriz, com uma precisão do modelo de 97,7%. A Tabela 10, para cada direção e k-tranche, mostra o número de elementos das outras 9 k-tranches e as médias dos seus rácios.

Tabela 10 – Rácios de correção por k-tranches (método da matriz)

Direções	k-tranche 5		k-tranche 6		k-tranche 7		k-tranche 8	
	Nº dados	Rácios	Nº dados	Rácios	Nº dados	Rácios	Nº dados	Rácios
250	138	1,102	145	1,119	161	1,124	151	1,127
260	279	1,065	287	1,069	299	1,069	315	1,070
270	709	1,051	749	1,046	717	1,038	782	1,035
280	1540	1,046	1556	1,042	1482	1,036	1554	1,031
290	1263	1,043	1271	1,039	1177	1,034	1224	1,028
300	913	1,038	897	1,034	891	1,028	899	1,024
310	229	1,056	251	1,052	257	1,049	256	1,046

Tabela 11 – Incerteza total categoria A (método da matriz)

	k-tranche5	k-tranche6	k-tranche7	k-tranche8
Número de dados da k-tranche	1203	1203	1202	1203
Desvio padrão residual m/s	0,816	1,018	0,777	0,768
Incerteza estatística categoria A	0,024	0,029	0,022	0,022
Valor absoluto da média dos resíduos m/s	0,278	0,207	0,069	0,084
Incerteza total de categoria A = 0.0230 m/s				

A Tabela 12 e a Tabela 13 são também o exemplo da aplicação da validação cruzada em k amostras de dados, mas agora com o método da regressão e em 3 k-tranches. A precisão do modelo é de 97,8%.

Tabela 12 – Coeficientes de correção por k-tranches (método da regressão)

Direções	k-tranche 5				k-tranche 6				k-tranche 7			
	Nº dados	m	b	R <sup>2</sup>	Nº dados	m	b	R <sup>2</sup>	Nº dados	m	b	R <sup>2</sup>
250	138	1,085	0,005	88%	145	1,110	-0,014	89%	161	1,124	-0,030	89%
260	279	1,015	0,215	89%	287	1,032	0,154	87%	299	1,033	0,152	84%
270	709	0,975	0,505	92%	749	0,961	0,520	90%	717	0,931	0,625	90%
280	1540	0,958	0,635	93%	1556	0,955	0,630	92%	1482	0,951	0,584	93%
290	1263	0,967	0,564	93%	1271	0,965	0,563	93%	1177	0,960	0,587	93%
300	913	0,930	0,897	92%	897	0,924	0,934	92%	891	0,914	0,999	91%
310	229	0,905	1,077	90%	251	0,899	1,104	90%	257	0,935	0,888	89%

Tabela 13 – Incerteza total categoria A (método da regressão)

	k-tranche5	k-tranche6	k-tranche7
Número de dados da k-tranche	1203	1203	1202
Desvio padrão residual m/s	0,784	0,940	0,711
Incerteza estatística categoria A	0,022	0,027	0,020
Valor absoluto da média dos resíduos m/s	0,281	0,174	0,005
Incerteza total de categoria A = 0.0219 m/s			

### 3.12.2 Incerteza de calibração do local do tipo B

Este grupo de incertezas não é tratado nesta dissertação. Faz-se somente um resumo do mesmo.

Na avaliação da incerteza padrão da Categoria B devem ser consideradas como independentes as seguintes avaliações:

- *Calibração dos anemómetros* – esta incerteza deve ser valorada do resultado das calibrações. Quando a calibração dos anemómetros dos dois mastros meteorológicos é realizada segundo o mesmo procedimento e em iguais circunstâncias, então as incertezas estimadas estão correlacionadas entre si, e pode ser utilizada a magnitude de uma das incertezas de calibração. Caso contrário, haverá que considerar incertezas adicionais independentes.

- *Característica operacional do anemómetro* - a incerteza operacional padrão do medidor de vento no mastro meteorológico que representa a turbina eólica, deve ser levada em conta nos cálculos da incerteza de calibração do local. Dependendo das diferenças nas condições ambientais durante a medição da curva de potência, em comparação com a calibração do local, pode ser necessário um aumento na incerteza das características operacionais.

- *Efeitos de instalação* - as incertezas de instalação do anemómetro padrão no mastro meteorológico de referência e no anemómetro no mastro meteorológico representando a turbina eólica, devem ser levadas em conta na avaliação da incerteza da turbina eólica e na avaliação da incerteza na calibração do local.

- *Sistema de aquisição de dados* - a incerteza padrão na velocidade do vento, devido ao sistema de aquisição de dados, deve ser estimada pelos Anexos D e E desta normativa.

### 3.13 Incertezas combinadas

Nesta dissertação, a complexidade do tratamento destas incertezas não é tratada.

Os componentes das categorias A e B da incerteza devem ser considerados como independentes uns dos outros, com o propósito de avaliar a incerteza combinada da calibração do local.

Os anexos D e E da normativa desenvolvem o tratamento das diferentes incertezas consideradas.

Fica, contudo, uma breve abordagem matemática do cálculo necessário, mencionado no anexo E da normativa, pela equação (3.19).

$$u_{AEP}^2 = N_h^2 \left( \sum_{i=1}^N f_i^2 (S_{P,i}^2 + C_{V,i}^2 S_{SC,i}^2) + \left( \sum_{i=1}^N f_i \sqrt{u_{P,i}^2 + C_{V,i}^2 u_{V,i}^2 + C_{T,i}^2 u_{T,i}^2 + C_{B,i}^2 u_{B,i}^2 + C_{RH,i}^2 u_{RH,i}^2 + C_{V,i}^2 u_{M,i}^2} \right)^2 \right) \quad (3.19)$$

$u_{AEP}$  – Incerteza AEP (produção Anual de Energia). É o que se pretende calcular.

$N_h$  – N° de horas num ano (8760 h). Transforma-se a incerteza em energia.

$N$  – N° de fatias.

$\sum_{i=1}^N$  – Muitos componentes variam com a velocidade do vento, pelo que a combinação é realizada em todas as posições da curva de potência.

$f_i$  – Ocorrência relativa de cada fatia de velocidade do vento (para levar em consideração a distribuição da velocidade do vento a longo prazo).

$S_{P,i}^2 + C_{V,i}^2 S_{SC,i}^2$  – Incertezas da categoria A. Incertezas estatísticas baseadas nos dados. Devido à dispersão estatística, não leva em conta possíveis desvios.

$u_{P,i}^2 + C_{V,i}^2 u_{V,i}^2 + C_{T,i}^2 u_{T,i}^2 + C_{B,i}^2 u_{B,i}^2 + C_{RH,i}^2 u_{RH,i}^2 + C_{V,i}^2 u_{M,i}^2$  – Incertezas da categoria B. Refletem o potencial desvio devido à instrumentação e à metodologia.

### 3.14 Controlo da qualidade e incertezas suplementares

#### 3.14.1 Verificação da convergência para os métodos da matriz e da regressão

Faremos a verificação de convergência para cada fatia de direção de vento, usando o parâmetro de auto-consistência (equação (3.15)). É útil construir um gráfico representativo da média acumulada do parâmetro de consistência interna em relação ao número de horas por fatia de direção do vento. Deve-se verificar que as médias acumuladas convergem dentro de 0,5% da média final para 16 horas de dados, ou 25% do número total de pontos de dados nesse intervalo (o que for maior).

Se esses critérios não forem atendidos, outras ações, como uma filtragem adicional, poderão ser aplicadas para tentar corrigir a não convergência.

A Figura 52 mostra um gráfico de verificação da convergência.

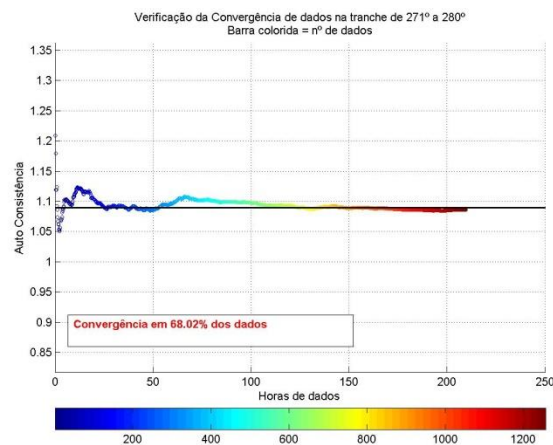


Figura 52 – Controlo da convergência

#### 3.14.2 Verificação da correlação para o método da regressão linear

Através da elaboração de uma tabela com dados referentes à qualidade da correlação dos resíduos para cada tranche de direção do vento, avalia-se a robustez desta correlação a partir do coeficiente de correlação linear.

A Tabela 14 é um exemplo deste processo.

Tabela 14 – Controle da correlação linear para o método da regressão

Direção (°)	Valor de R <sup>2</sup>	Valor absoluto da média dos resíduos (m/s)	Desvio padrão residual (m/s)	Coefficiente de correlação linear, r
260	0,88	0,00	0,70	0,94
270	0,94	0,00	0,62	0,97
280	0,94	0,00	0,68	0,97
290	0,93	0,00	0,82	0,96
300	0,84	0,00	1,02	0,91
310	0,89	0,00	0,78	0,94

O coeficiente de correlação linear ( $r$ ) é uma medida para o grau de associação entre duas variáveis. O valor de  $r$  está sempre entre -1 e 1, inclusive. Se o valor estiver próximo de +1 ou de -1, indica a existência provável de correlação significativa entre as variáveis.

### 3.14.3 Alteração da correção entre fatias adjacentes de direção do vento

Recomenda-se que as fatias de direção do vento dos setores de medição sejam eliminadas quando as correções de fluxo mudarem em mais de 2% entre as fatias vizinhas. Se a fatia não for eliminada, a incerteza correspondente deve ser incrementada. O Anexo E da atual normativa contém toda a informação correspondente. Isto é avaliado aplicando o método do parâmetro de consistência interna (equação (3.15)), da seguinte maneira:

- Fatiar as direções em intervalos de 10° e calcular as correções de fluxo ditadas pela calibração do local (método da matriz – equação (3.12) ou o método da regressão – equação (3.13));
- Deslocar os fatores de correção de fluxo por um setor de direção, de modo que os fatores sejam aplicados à fatia de direção adjacente de vento (superior e inferior);
- Usando os fatores de correção deslocados na etapa anterior e os dados da calibração do local, calcular a velocidade prevista do vento no local do mastro provisório para cada período de 10 min, e de seguida calcular o parâmetro de consistência interna com a equação (3.15);
- Calcular a média do parâmetro da auto-consistência para cada fatia de direção do vento.

A Tabela 15 é um exemplo deste processo.

Tabela 15 – Incertezas suplementares devidas às variações nas fatias adjacentes

Direção	Varição da consistência interna das fatias (à esquerda)	Varição da consistência interna das fatias (à direita)	Incerteza suplementar (Categoria B)
(°)	---	---	(%)
260	---	0,99	Anexo E
270	<b>1,03</b>	1,02	Anexo E
280	1,02	1,02	Anexo E
290	1,02	1,01	Anexo E
300	<b>1,03</b>	<b>1,03</b>	Anexo E
310	1,01	---	Anexo E

Neste exemplo, é nas fatias de direção de 270° e de 300°, onde existe a maior variação da razão entre velocidades previstas e medidas. Como os valores da tabela são similares em todas as fatias de direção, é válido fazer-se o incremento da incerteza em vez da sua exclusão.

### 3.15 Determinação da curva de potência medida do aerogerador

A potência de saída de uma turbina eólica varia com a velocidade do vento e cada turbina eólica possui uma curva de desempenho de potência característica. Com esta curva, é possível prever a produção de energia de uma turbina eólica, sem considerar os detalhes técnicos dos vários componentes. A curva de potência fornece a potência elétrica em função da velocidade do vento na altura do rotor.

A Figura 53 apresenta um exemplo de uma curva de potência para uma turbina eólica hipotética.

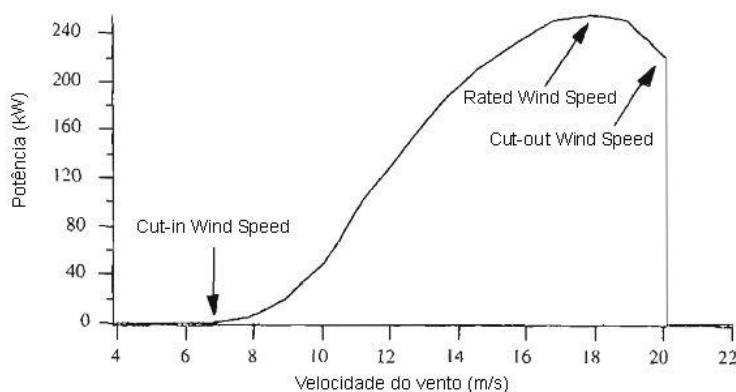


Figura 53 – Curva de potência típica de uma eólica (adaptada) [17]

O desempenho de um determinado gerador de turbina eólica pode ser relacionado por três pontos-chave na escala de velocidade:

- Velocidade mínima de funcionamento (Cut-in Wind Speed): a velocidade mínima do vento a partir da qual a máquina começará a fornecer energia útil.
- Velocidade nominal do vento (Rated Wind Speed): a velocidade do vento em que a potência nominal (geralmente a potência máxima do gerador elétrico) é atingida.
- Velocidade máxima de funcionamento (Cut-out Wind Speed): velocidade máxima do vento à qual a turbina pode fornecer energia (geralmente limitada por restrições de segurança).

A determinação da curva medida de potência do aerogerador, só acontece após a campanha de medição e a calibração do local estarem concluídas e depois da turbina eólica estar em funcionamento no local onde se encontrava o mastro temporário.

As medições do vento continuam a ser feitas no mastro de referência, enquanto se mede simultaneamente a produção da turbina.

Com as novas medições da velocidade do vento do mastro de referência e com as medições do débito de potência elétrica da turbina eólica, procede-se aos cálculos da curva medida de potência que será comparada com a curva de produção dada pelo fabricante.

A curva de potência medida deve ser realizada em função da velocidade prevista do vento à altura do rotor, fazendo uso da velocidade equivalente do rotor (REWS), se o cálculo existir.

Há que considerar que, fazendo uso só da velocidade prevista sobre o rotor, o nível de incerteza aumenta, dado que não haverá conhecimento de um outro qualquer parâmetro que afete as condições do vento. Daqui a importância da utilização da REWS, pois tem em conta os efeitos da tensão de corte vertical do vento, do desvio da trajetória do vento e também da intensidade de turbulência (em energia eólica, é quantificada pela razão entre o desvio padrão da velocidade e a velocidade média do vento).

A curva de potência medida é determinada pela aplicação do “método dos intervalos”, com velocidades em intervalos de 0,5 m/s e segundo as seguintes equações:

$$V_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} V_{n,i,j} \quad (3.20)$$

$$P_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} P_{n,i,j} \quad (3.21)$$

Em que:

$V_i$  = velocidade média e normalizada do vento no intervalo  $i$ .

$V_{n,ij}$  = velocidade normalizada do vento do conjunto de dados  $j$  no intervalo  $i$ .

$P_i$  = potência de saída média e normalizada no intervalo  $i$ .

$P_{n,ij}$  = potência de saída normalizada do conjunto de dados  $j$  no intervalo  $i$ .

$N_i$  = número de dados de 10 minutos no intervalo  $i$ .

O resultado da aplicação destas duas fórmulas é uma curva de potência medida, similar à da Figura 54.

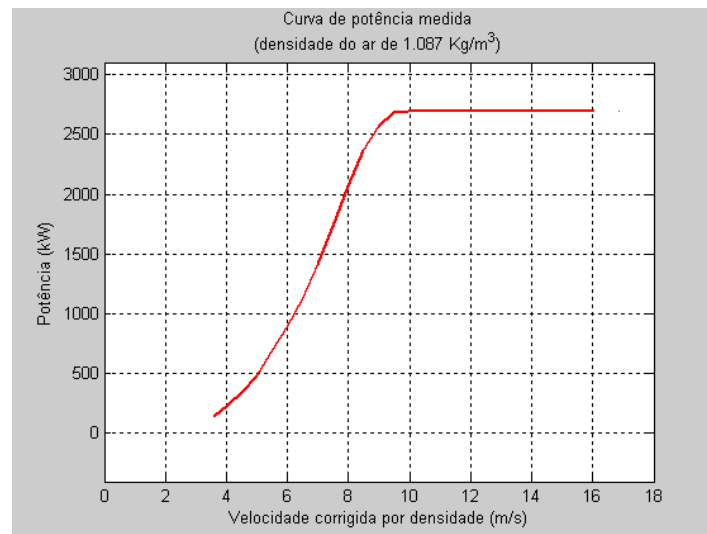


Figura 54 – Curva de potência medida

**COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE  
CALIBRAÇÃO DO LOCAL PELAS  
NORMATIVAS DE 2005 E 2017**



## 4 COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO DO LOCAL PELAS NORMATIVAS DE 2005 E 2017

Neste capítulo utilizam-se os métodos de calibração do local acima descritos para, utilizando medições do vento recolhidos num parque eólico na Turquia e fornecidas pela empresa Megajoule, comparar os resultados de calibração do local e medição da curva de potência, usando as duas normas IEC.

A metodologia foi executada recorrendo à programação em linguagem Matlab®, totalizando 8.838 linhas de código escrito. Os módulos mais importantes podem ser lidos no capítulo «Anexos», deste trabalho.

### 4.1 Verificação da programação em Matlab®

A verificação de que a programação realizada em código Matlab® fornece resultados confiáveis, foi realizada substituindo os valores das medições de um mastro pelos do outro, considerando o esquema da Tabela 16 e analisados os respetivos resultados.

Tabela 16 – Esquema de combinação de matrizes para avaliação da programação Matlab®

Velocidades RM iguais ao dobro das velocidades RM reais Velocidades TM iguais às TM reais	Condição c1
Velocidades RM iguais às velocidades TM reais Velocidades TM iguais às TM reais	Condição c2
Velocidades RM iguais às velocidades RM reais Velocidades TM iguais às RM reais	Condição c3
Velocidades TM reais Velocidades RM reais	Condição c4

### 4.1.1 Confirmação pelos expoentes de corte

Os expoentes de corte resultantes foram analisados por comparação com os obtidos da utilização dos valores reais (c4), sendo o resultado mostrado na Tabela 17.

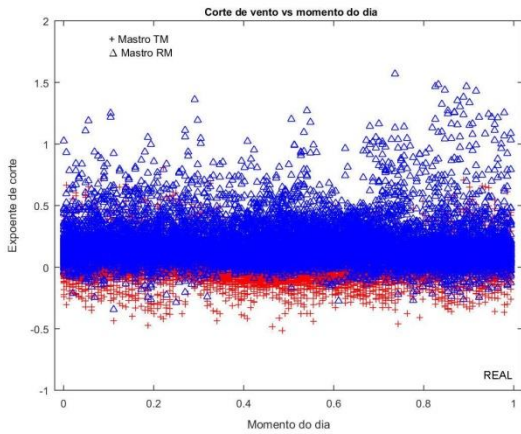


Figura 55 – Corte de vento diário para TMreal e RMreal

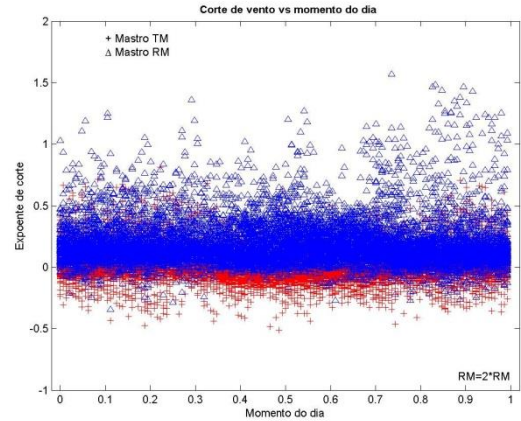


Figura 56 – Corte de vento diário para RM=2\*RMreal

A Figura 55 (c4) e a Figura 56 (c1) confirmam o esperado, que os valores de corte sejam iguais nas duas condições para os dois mastros. Sendo as velocidades multiplicadas por uma constante em toda a altura da área de varrimento do rotor, o valor dos fatores de corte não se altera.

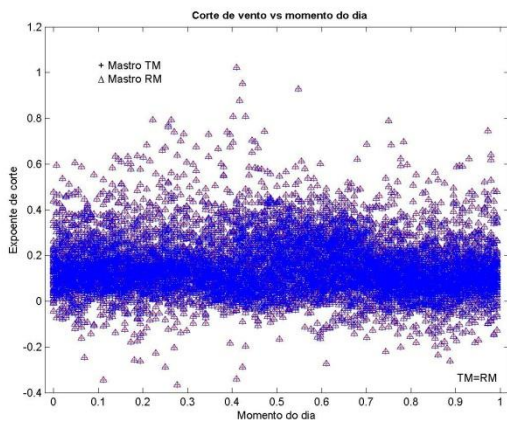


Figura 57 – Corte de vento diário para TM=RMreal

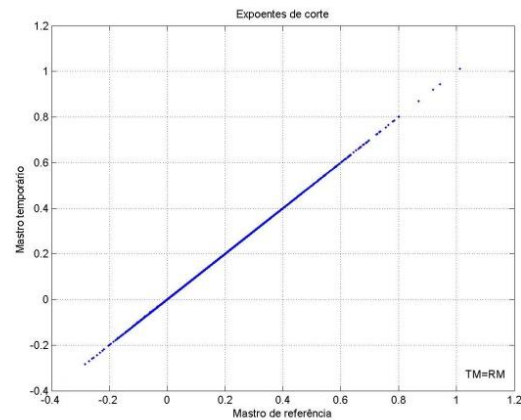


Figura 58 – Correlação de corte de vento para TM=RMreal

Para a condição de velocidades iguais nos dois mastros (c2 e c3), é de esperar que os valores de corte sejam coincidentes em ambos os mastros, que é o que se constata na Figura 57 e se confirma pela Figura 58.

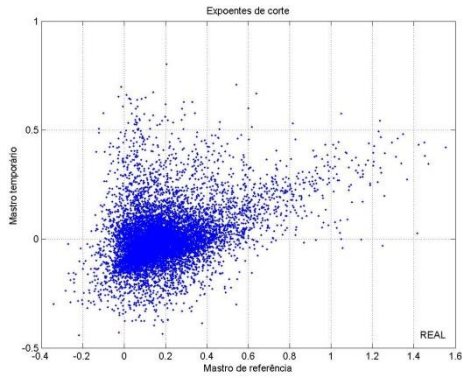


Figura 59 – Correlação de corte de vento para RM e TM reais

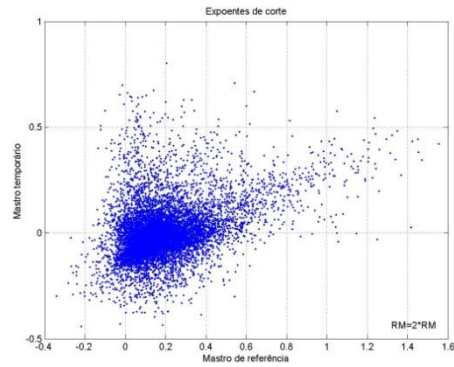


Figura 60 – Correlação de corte de vento para RM=2\*RM

A Figura 59 (c4) e a Figura 60 (c1) têm a nuvem de expoentes de corte iguais, como esperado.

Estas duas figuras, para todo o período de medição, confirmam o resultado da Figura 55 e da Figura 56.

A Tabela 17 resume as igualdades esperadas e confirmadas.

Tabela 17 – Validação da programação

Condição c1		Condição c2		Condição c3		Condição c4	
TM	RM	TM	RM	TM	RM	TM	RM

Cores iguais correspondem a expoentes de corte iguais

#### 4.1.2 Confirmação pela correlação das velocidades

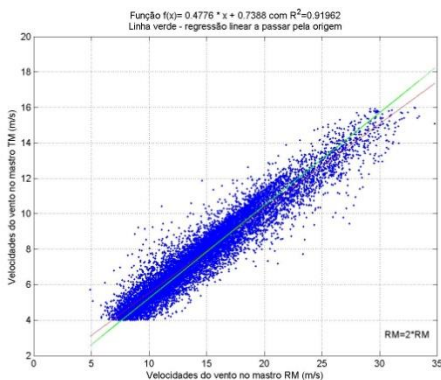


Figura 61 – Correlação de velocidades para RM=2\*RM

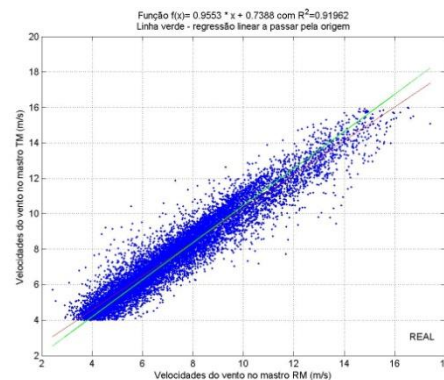


Figura 62 – Correlação de velocidades para RM e TM reais

O declive da reta de cor vermelha da Figura 62 (c4), com os valores reais de velocidade nos dois mastros, é o dobro do declive da reta da mesma cor na Figura 61 (c1), porque

as velocidades de RM são substituídas pelo dobro das velocidades RM real. Como é de esperar, os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) são iguais.

#### 4.1.3 Confirmação pelos rácios (processo da matriz) e pelos coeficientes (processo da regressão linear)

Sendo o rácio calculado pela relação entre a velocidade TM e a RM, ao se duplicar a velocidade RM, o rácio passa a ser metade do da Tabela 18, estando este resultado da programação explícito na Tabela 19. Já, ao se igualarem as velocidades, o rácio terá que ser igual à unidade - Tabela 20.

Tabela 18 – rácios do processo da matriz na condição c4

<b>c4</b>	<b>60</b>	<b>70</b>	<b>80</b>	<b>90</b>	<b>270</b>	<b>280</b>	<b>290</b>	<b>300</b>	<b>310</b>
<b>-0,05</b>	1,08	1,07	1,02	1,01	1,08	1,05	1,07	1,07	1,05
<b>0,00</b>	1,07	1,08	1,06	1,03	1,10	1,09	1,04	1,01	1,04
<b>0,05</b>	1,10	1,10	1,08	1,05	1,05	1,05	1,01	0,99	1,02
<b>0,10</b>	1,12	1,11	1,09	1,06	1,03	1,02	1,00	1,03	1,01
<b>0,15</b>	1,12	1,11	1,10	1,06	1,03	1,01	0,99	1,06	1,07
<b>0,20</b>	1,12	1,11	1,09	1,06	1,04	0,99	0,99	1,06	1,19

Tabela 19 – rácios do processo da matriz na condição c1

<b>c1</b>	<b>60</b>	<b>70</b>	<b>80</b>	<b>90</b>	<b>270</b>	<b>280</b>	<b>290</b>	<b>300</b>	<b>310</b>
<b>-0,05</b>	0,54	0,54	0,51	0,51	0,54	0,52	0,53	0,54	0,52
<b>0,00</b>	0,53	0,54	0,53	0,52	0,55	0,55	0,52	0,50	0,52
<b>0,05</b>	0,55	0,55	0,54	0,52	0,52	0,53	0,51	0,50	0,51
<b>0,10</b>	0,56	0,55	0,55	0,53	0,52	0,51	0,50	0,52	0,50
<b>0,15</b>	0,56	0,56	0,55	0,53	0,52	0,51	0,49	0,53	0,53
<b>0,20</b>	0,56	0,56	0,55	0,53	0,52	0,50	0,49	0,53	0,60

Tabela 20 – rácios do processo da matriz na condição c3  
(Os valores nulos correspondem a elementos excluídos)

<b>c3</b>	<b>60</b>	<b>70</b>	<b>80</b>	<b>90</b>	<b>270</b>	<b>280</b>	<b>290</b>	<b>300</b>	<b>310</b>
<b>-0,05</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>0,00</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>0,05</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>0,10</b>	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>0,15</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>0,20</b>	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabela 21 – Coeficientes do processo da regressão na condição c4

<b>c4</b>									
Direção (°)	60	70	80	90	270	280	290	300	310
Declive (m)	1,12	1,12	1,10	1,05	0,96	0,97	0,96	0,81	0,93
Coefficiente linear (b)	-0,03	-0,07	-0,14	-0,04	0,49	0,40	0,57	1,78	0,76
R <sup>2</sup>	0,98	0,98	0,98	0,98	0,93	0,94	0,93	0,84	0,88

Tabela 22 – Coeficientes do processo da regressão na condição c1

<b>c1</b>									
Direção (°)	60	70	80	90	270	280	290	300	310
Declive (m)	0,56	0,56	0,55	0,53	0,48	0,48	0,48	0,40	0,47
Coefficiente linear (b)	-0,03	-0,07	-0,14	-0,04	0,49	0,40	0,57	1,78	0,76
R <sup>2</sup>	0,98	0,98	0,98	0,98	0,93	0,94	0,93	0,84	0,88

Tabela 23 – Coeficientes do processo da regressão na condição c2

<b>c2</b>									
Direção (°)	60	70	80	90	270	280	290	300	310
Declive (m)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Coefficiente linear (b)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
R <sup>2</sup>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Duplicando as velocidades RM, é de esperar que o declive da reta da regressão seja metade, em relação ao das velocidades reais da Tabela 21, mas que o coeficiente linear da reta seja igual - Tabela 22.

No caso de velocidades iguais, a reta de regressão conduz a um declive unitário com um coeficiente linear nulo - Tabela 23.

#### 4.1.4 Confirmação pelo parâmetro de auto-consistência (processo da matriz e da regressão linear)

A auto-consistência (ou consistência interna) é uma forma de medida baseada na correlação entre diferentes elementos do mesmo teste. Ela mede se os diversos itens, medidos no mesmo modelo geral, produzem resultados semelhantes.

Para o processo da matriz, toma-se aleatoriamente a fatia de direção de vento de 60° e expoente de corte de 0,10, com 282 leituras, para verificar a funcionalidade desta fase de programação. Transportam-se aleatoriamente 5 elementos consecutivos, para a Tabela 24, a Tabela 25 e a Tabela 26

Tabela 24 – Consistência interna na direção 60° e expoente de 0,10 (matriz) – condição c4

<b>c4</b>			
Vprevista	Vmedida	Residual	Auto-consistência
7,95	7,19	0,763	1,106
7,70	6,96	0,739	1,106
4,25	3,84	0,408	1,106
4,58	4,14	0,440	1,106
5,22	4,72	0,501	1,106

Tabela 25 – Consistência interna na direção 60° e expoente de 0,10 (matriz) – condição c1

<b>c1</b>			
Vprevista	Vmedida	Residual	Auto-consistência
7,95	14,37	-6,422	0,553
7,70	13,92	-6,221	0,553
4,25	7,68	-3,431	0,553
4,58	8,28	-3,700	0,553
5,22	9,45	-4,221	0,553

Tabela 26 – Consistência interna na direção 60° e expoente de 0,10 (matriz) – condição c2

<b>c2</b>			
Vprevista	Vmedida	Residual	Auto-consistência
6,50	6,50	0,000	1,000
5,10	5,10	0,000	1,000
4,70	4,70	0,000	1,000
9,22	9,22	0,001	1,000
4,86	4,86	0,000	1,000

Fica validada a programação pela verificação da uniformidade dos valores da consistência interna, em cada uma das tabelas, e pelo residual nulo e consistência unitária, na Tabela 26.

Para o processo da regressão, opta-se pela fatia de direção de 90° e transporta-se igual número de elementos aleatórios consecutivos, para a Tabela 27, a Tabela 28 e a Tabela 29.

Tabela 27 – Consistência interna na direção 90° (regressão) – condição c4

Vturb_prevista	Vturb_medida	Vrm_medida	Residual	Consistência interna
4,70	4,30	4,51	0,405	1,094
4,73	4,35	4,53	0,377	1,087
5,19	5,16	4,97	0,034	1,007
5,43	5,26	5,20	0,172	1,033
5,28	5,23	5,06	0,050	1,010
5,45	5,21	5,22	0,245	1,047

Tabela 28 – Consistência interna na direção 90° (regressão) – condição c1

Vturb_prevista	Vturb_medida	Vrm_medida	Residual	Consistência interna
4,70	4,30	9,01	0,405	1,094
4,73	4,35	9,07	0,377	1,087
5,19	5,16	9,94	0,034	1,007
5,43	5,26	10,40	0,172	1,033
5,28	5,23	10,11	0,050	1,010
5,45	5,21	10,43	0,245	1,047

Tabela 29 – Consistência interna na direção 90° (regressão) – condição c3

Vturb_prevista	Vturb_medida	Vrm_medida	Residual	Consistência interna
5,99	5,99	5,99	0,000	1,000
5,52	5,52	5,52	0,000	1,000
4,51	4,51	4,51	0,000	1,000
5,03	5,03	5,03	0,000	1,000
4,41	4,41	4,41	0,000	1,000
4,17	4,17	4,17	0,000	1,000

Os valores de residual e de consistência interna para a condição c4 e para a condição c1, têm o mesmo valor, pois, pela equação (3.14) e equação (3.15), os valores considerados para o cálculo são os relativos a «Vturb». Na Tabela 29, condição c3, com velocidades «Vturb» iguais, é de esperar residuais nulos e consistências unitárias. Resulta da análise dos resultados, o equilíbrio de valores de auto-consistência, pelo que se considera a programação Matlab® validada.

## 4.2 Descrição do local

O local das medições é um terreno complexo, localizado numa cordilheira no sul da Turquia, de orientação nor-noroeste - su-sudeste, de vertentes escarpadas de pouca rugosidade, com vegetação baixa e dispersa. Por razões de confidencialidade, não se identificará com mais detalhe a sua localização, nem o modelo de aerogerador.

A turbina (e o mastro temporário TM, antes dela) está instalada na linha de cumeeada, a uma cota de 1.293 m e o mastro de referência RM, instalado à cota de 1.262 m, a sudoeste da turbina e a uma distância de 213 m.



Figura 63 – Vista Sudoeste do local

Fonte Megajoule



Figura 64 – Vista Oeste do local

Fonte Megajoule



Figura 65 – Vista Este do local (Google Earth)



Figura 66 – Vista Oeste do local (Google Earth)



Figura 67 – Perfil de relevo da posição da turbina e do mastro RM (Google Earth)

### 4.3 Dados resultantes do tratamento das medições obtidas nos mastros meteorológicos

De cada um dos dois mastros meteorológicos instalados no local e no período de 6 meses, foram registadas medições de velocidades dos ventos nas alturas de 85 metros, correspondentes à altura do rotor da futura eólica e à altura inferior da área de varrimento, a 35 metros do solo. Em ambos os mastros, foram também registadas as direções do vento.

Estes dados foram filtrados num dos módulos de programação, eliminando os erros de leituras dos aparelhos de medição de ambos os mastros, e as velocidades inferiores a 4 m/s e superiores a 16 m/s do mastro TM. São depois comparados os momentos da medição em cada mastro nas duas alturas e também comparados os momentos em ambos os mastros. Excluíram-se os dados que não apresentaram simultaneidade. A Tabela 30 resume esta etapa e da Figura 70 à Figura 86 representam-se os valores tratados em diferentes vertentes.

Tabela 30 – Configuração das matrizes de dados tratados

	DadosIniciais	LinhasErro	DadosSemErro	VelEliminadas	DadosFinais
Mastro RM a 35m	22.826	1.717	21.109	0	21.109
Mastro RM a 85m	22.826	1.717	21.109	0	21.109
Mastro TM a 35m	22.679	1.435	21.244	8.582	12.662
Mastro TM a 85m	22.679	1.435	21.244	8.270	12.974

Nº de dados no Mastro TM a 35m = 12.662      Nº de dados no Mastro RM a 35m = 21.109  
 Nº de dados no Mastro TM a 85m = 12.974      Nº de dados no Mastro RM a 85m = 21.109

Encontradas 12.221 datas iguais

Encontradas 21.109 datas iguais

#### Momentos iguais nos dois mastros

Matrizes TM inicialmente com 12.221 elementos, ficam com 12.027 elementos  
 Matrizes RM inicialmente com 21.109 elementos, ficam com 12.027 elementos

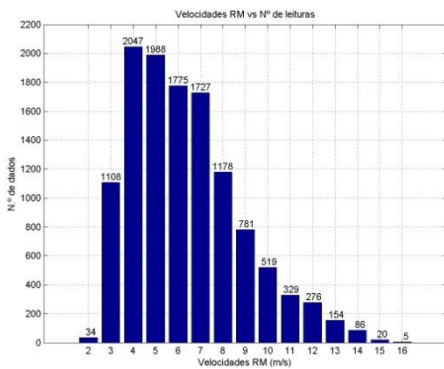


Figura 68 – Histograma de velocidades válidas no mastro de referência RM

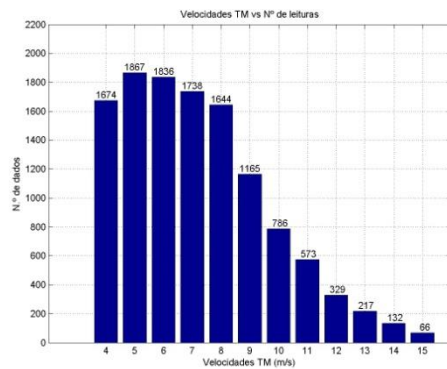


Figura 69 – Histograma de velocidades válidas no mastro temporário TM

Extrato do código MATLAB<sup>®</sup> criado para a execução do tratamento de dados.

```

% Filtrar os valores de erro
rd=1;
rv=1;
for m=1:ndados
if dmatriz(m,3)==99.99 % linha de erro de leitura
rmatriz(rd)=dmatriz(m,7);
rd=rd+1;
else
tmatriz(rv,:)=dmatriz(m,:);
rv=rv+1;
end
end
I=tmatriz(:,2)==0; % procura direções de vento em 0 graus
tmatriz(I,2)=360; % e altera para 360 graus
%Filtrar velocidades de 4 a 16 m/s do MASTRO TEMPORÁRIO
if strcmp(strdirnome(1:2), 'TM')
rd=1;
rv=1;
for m=1:nfldados
if tmatriz(m,3)<4 || tmatriz(m,3)>16 % velocidades fora de limites
rvmatriz(rd)=tmatriz(m,7);
rd=rd+1;
else
vtmmatriz(rv,:)=tmatriz(m,:); % matriz sem as linhas de velocidade
rv=rv+1;
end
end
end
% Agrupar datas das matizes
indexados=cell(numlinhas,1);
H=vtmmatriz1{1,1}(:,7);
for ii = 2:numlinhas
[~,index1,index2] = intersect(H,vtmmatriz1{ii,1}(:,7));
aa1=vtmmatriz1{ii-1,1}(index1,:);
aa2=vtmmatriz1{ii,1}(index2,:);
vtmmatriz1{ii-1,1}={};
vtmmatriz1{ii,1}={};
vtmmatriz1{ii-1}=aa1;
vtmmatriz1{ii}=aa2;
H=vtmmatriz1{ii,1}(:,7);
indexados{ii-1}=index1;
indexados{ii}=index2;
end

```

As rosas-de-ventos, feitas com as direções dos ventos e com as velocidades a elas associadas, mostram que os ventos que varrem o local são predominantes de Oeste e Noroeste (Figura 70 e Figura 71).

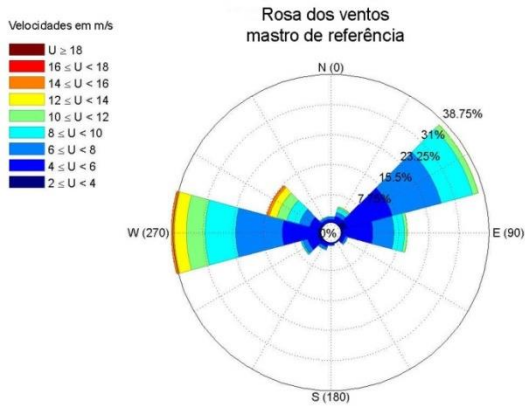


Figura 70 – Rosa-dos-ventos para o mastro de referência RM

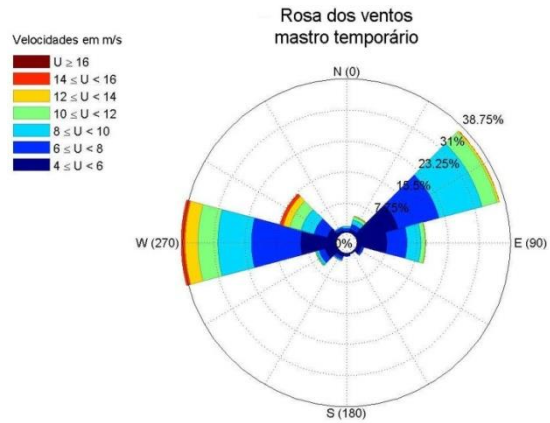


Figura 71 – Rosa-dos-ventos para o mastro temporário TM

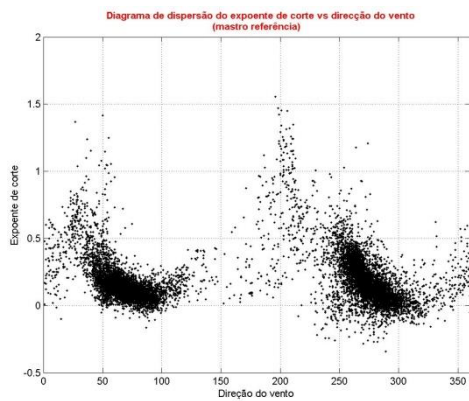


Figura 72 – Expoente de corte vs direção do vento no mastro de referência

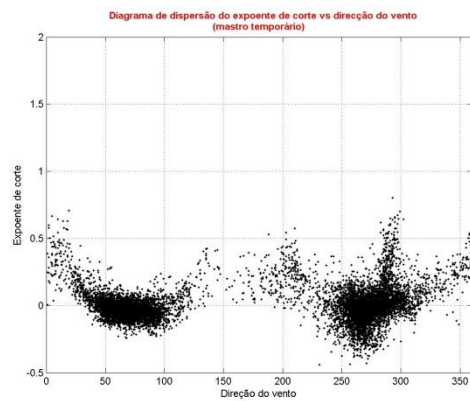


Figura 73 – Expoente de corte vs direção do vento no mastro temporário

O valor do expoente de corte diminui com o aumento da velocidade, e sendo a nuvem de expoentes bastante horizontal entre as direções 50° e 100° (Figura 72 e Figura 73), permite intuir uma predominância de velocidades de vento mais uniformes, para este intervalo de direções em ambos os mastros. A Figura 74 e a Figura 75 complementam esta observação.

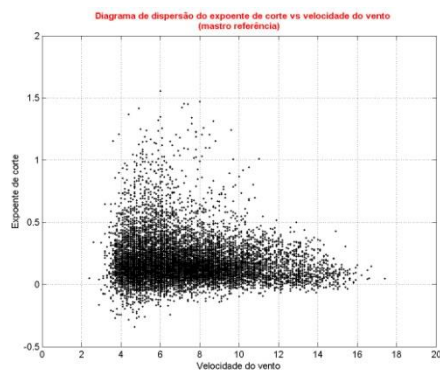


Figura 74 – Expoente de corte vs velocidade do vento no mastro de referência

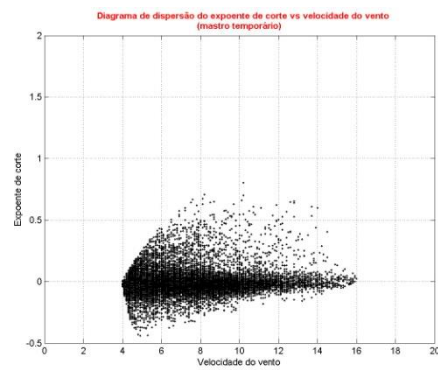


Figura 75 – Expoente de corte vs velocidade do vento no mastro temporário

A Figura 76 e a Figura 77 mostram que, ao longo do dia, o perfil de velocidades não é muito variável.

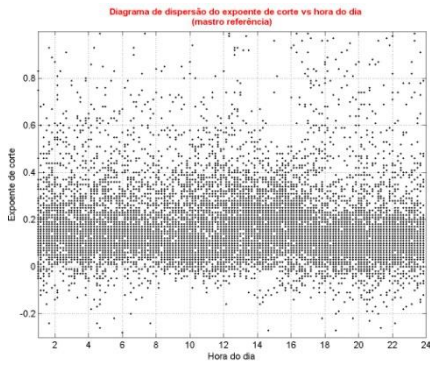


Figura 76 – Expoente de corte vs hora do dia no mastro de referência RM

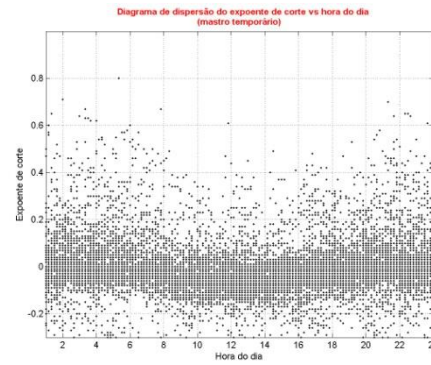


Figura 77 – Expoente de corte vs hora do dia no mastro temporário TM

Na Figura 78 sobrepõem-se as nuvens de expoentes de corte dos dois mastros, para melhor comparação. Constata-se que o perfil é, por norma, mais vertical no mastro TM. O local em estudo é de estabilidade atmosférica uniforme ao longo do dia, verificável na Figura 78. Esta figura encontra-se dividida em momentos diurnos e noturnos nos dois mastros, da Figura 81 à Figura 86.

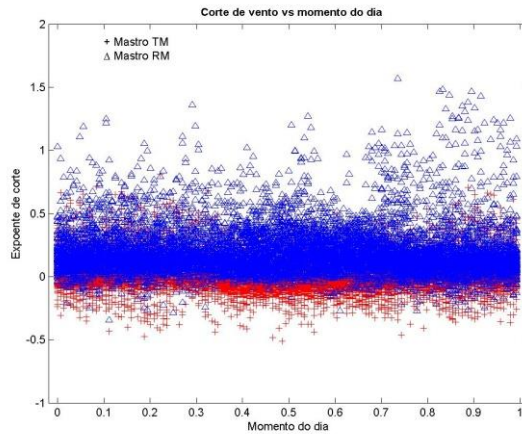


Figura 78 – Distribuição do expoente de corte diário

A velocidade do vento, ao longo dos dias de medições, não apresenta um ciclo diurno marcado, como se observa pela Figura 79 e pela Figura 80, mas variando de direção entre os períodos diurnos e noturnos, observável na Figura 85 e na Figura 86.

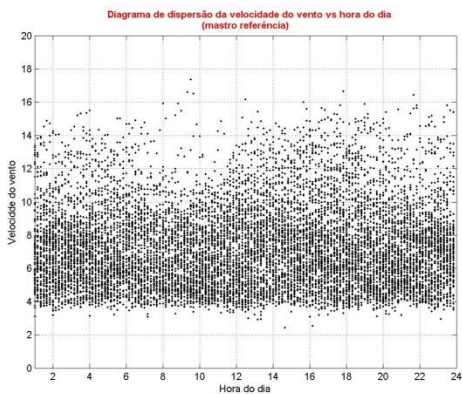


Figura 79 – Velocidade do vento vs hora do dia no mastro de referência

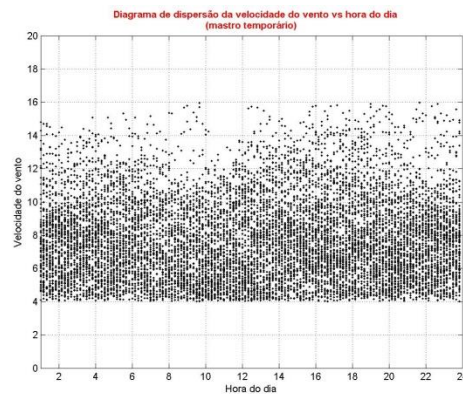


Figura 80 – Velocidade do vento vs hora do dia no mastro temporário

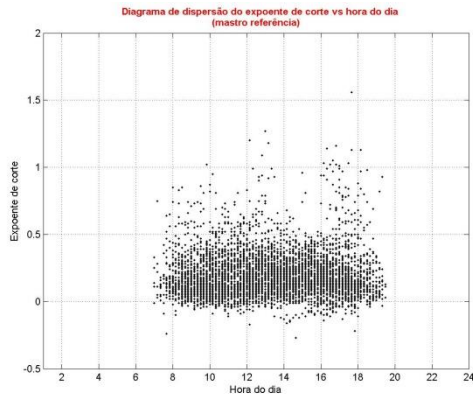


Figura 81 – Expoente de corte diurno no mastro de referência

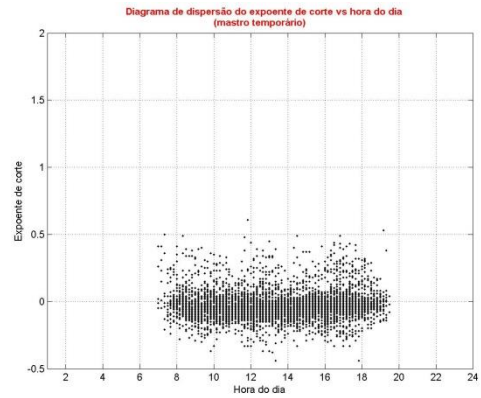


Figura 83 – Expoente de corte diurno no mastro temporário

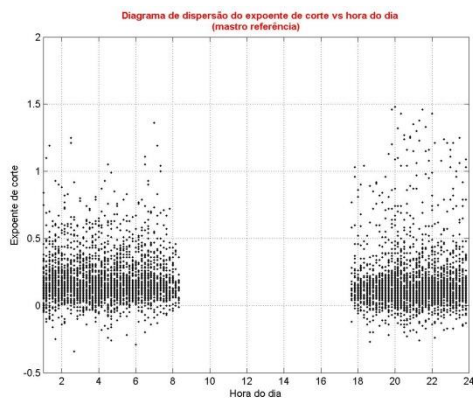


Figura 82 – Expoente de corte noturno no mastro de referência

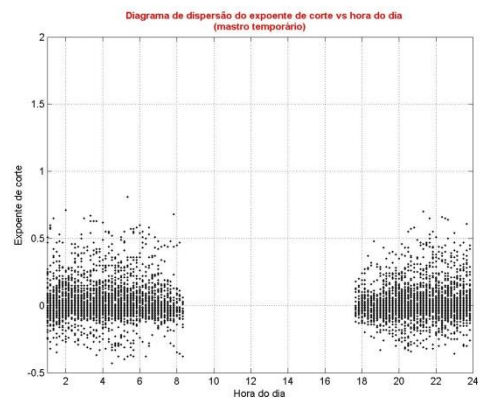


Figura 84 – Expoente de corte noturno no mastro temporário

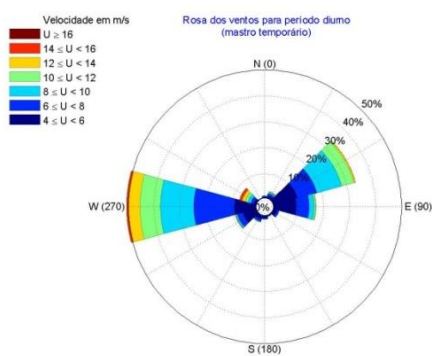


Figura 85 – Rosa-dos-ventos para períodos diurnos

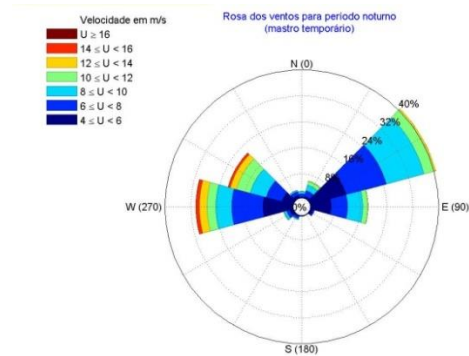


Figura 86 – Rosa-dos-ventos para períodos noturnos

Da contagem do número de expoentes de corte no mastro de referência, resulta que a percentagem de valores de expoente de corte superiores a 0,25 é inferior a 25%, pelo que se considera o expoente de corte sem impacto no processo de calibração do local.

Os gráficos referentes aos períodos diurnos e noturnos foram executados considerando os horários de nascer-do-sol e do pôr-do-sol diários, para o período de medições, na Turquia.

A Tabela 31 é um excerto da matriz utilizada.

Tabela 31 – Horários do nascer e pôr-do-sol na Turquia no período de recolha de dados

(<https://www.timeanddate.com/sun/turkey/>)

		MESES (Out a Abr)							
DIAS DO MÊS	1	Nascer do sol	7:00	7:34	8:09	8:28	8:15	7:37	6:47
		Pôr-do-sol	18:46	18:00	17:36	17:45	18:20	18:55	19:29
	2	Nascer do sol	7:01	7:35	8:10	8:29	8:14	7:36	6:45
		Pôr-do-sol	18:45	17:59	17:36	17:46	18:21	18:56	19:30
	3	Nascer do sol	7:02	7:36	8:11	8:29	8:13	7:34	6:43
		Pôr-do-sol	18:43	17:58	17:36	17:47	18:22	18:57	19:31
	4	Nascer do sol	7:03	7:37	8:12	8:29	8:12	7:33	6:42
		Pôr-do-sol	18:41	17:56	17:35	17:48	18:23	18:58	19:32
	5	Nascer do sol	7:04	7:39	8:13	8:29	8:11	7:31	6:40
		Pôr-do-sol	18:40	17:55	17:35	17:49	18:25	18:59	19:33
	6	Nascer do sol	7:05	7:40	8:13	8:29	8:10	7:30	6:38
		Pôr-do-sol	18:38	17:54	17:35	17:50	18:26	19:01	19:34
	7	Nascer do sol	7:06	7:41	8:14	8:29	8:09	7:28	6:37
		Pôr-do-sol	18:37	17:53	17:35	17:51	18:27	19:02	19:35
	8	Nascer do sol	7:07	7:42	8:15	8:28	8:08	7:26	6:35
		Pôr-do-sol	18:35	17:52	17:35	17:52	18:28	19:03	19:36
	9	Nascer do sol	7:08	7:43	8:16	8:28	8:06	7:25	6:34
		Pôr-do-sol	18:33	17:51	17:35	17:53	18:30	19:04	19:37
	10	Nascer do sol	7:09	7:45	8:17	8:28	8:05	7:23	6:32
		Pôr-do-sol	18:32	17:50	17:35	17:54	18:31	19:05	19:38
	11	Nascer do sol	7:10	7:46	8:18	8:28	8:04	7:22	6:30
		Pôr-do-sol	18:30	17:49	17:35	17:55	18:32	19:06	19:39
	12	Nascer do sol	7:11	7:47	8:19	8:28	8:03	7:20	6:29
		Pôr-do-sol	18:29	17:48	17:35	17:56	18:33	19:07	19:40
	13	Nascer do sol	7:12	7:48	8:20	8:27	8:02	7:18	6:27
		Pôr-do-sol	18:27	17:47	17:36	17:57	18:35	19:08	19:42
	14	Nascer do sol	7:13	7:49	8:20	8:27	8:00	7:17	6:26
		Pôr-do-sol	18:25	17:46	17:36	17:58	18:36	19:09	19:43
	15	Nascer do sol	7:14	7:50	8:21	8:27	7:59	7:15	6:24
		Pôr-do-sol	18:24	17:45	17:36	17:59	18:37	19:11	19:44

Extrato do código MATLAB<sup>®</sup> criado para a preparação da matriz diurna, para a execução deste módulo.

```

% importar dados dos nascer e por-do-sol da Turquia
delimiter=';';
headerlines=2;
dados = importdata('nascer_por_sol_turquia.dat', delimiter,
headerlines);
tabela=dados.data;
%=====
M=matrizRMTMajustada;
M1=M{2,1};
M2=M1-fix(M1/1e8)*1e8; % mes+dia+hora
data=M{2,1};
k=fix(data./1e4);
hora=data-k.*1e4;
k1=fix(k./1e2);
dia=k-k1.*1e2;
k2=fix(k1./1e2);
mes=k1-k2.*1e2;
mes_dia_hora=horzcat(num2str(mes),num2str(dia),num2str(hora));
%=====
% procurar o dia e o mes na tabela
for i=1:12 % mes
coluna=i;
for ii=1:31 % dia
dia=ii;
linha1=dia*2-1;% nascer do sol
linha2=dia*2;% por do sol
% filtrar momento dia
inf=tabela(linha1,coluna); % nascer do sol
s=sprintf('%02d',i);% mês
s1=sprintf('%02d',ii);% dia
s2=sprintf('%04d',inf);% hora
limite_inf=horzcat(s,s1,s2);
sup=tabela(linha2,coluna); % por do sol
s2=sprintf('%04d',sup);% hora
limite_sup=horzcat(s,s1,s2);
l1=str2double(limite_inf);
l2=str2double(limite_sup);
for iii=1:length(M2)
if M2(iii)>=l1 && M2(iii)<=l2
M2(iii)=1000;
end
end
end
end

```

## 4.4 Resultados pelo Método da Regressão Linear

### 4.4.1 Verificação da correlação entre as tensões de corte do vento nos dois mastros meteorológicos

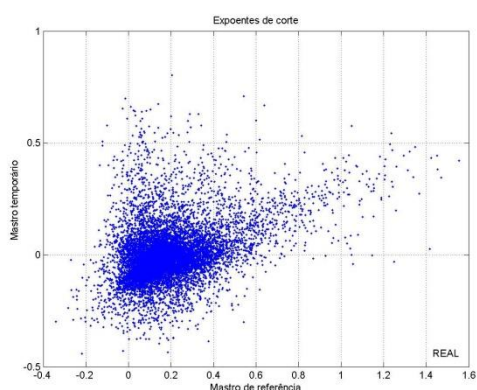


Figura 87 – Correlação entre tensões de corte nos dos dois mastros meteorológicos

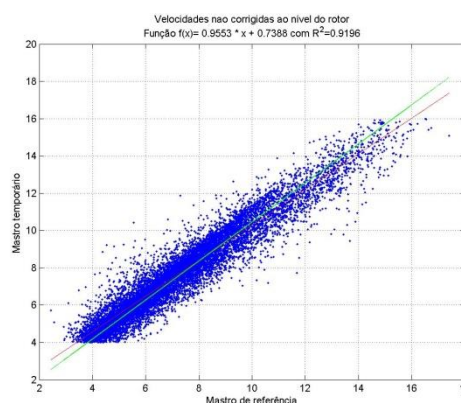


Figura 88 – Correlação entre velocidades HH dos dois mastros meteorológicos

Pelo gráfico da Figura 87, verificamos que entre mastros existe uma dispersão de valores de corte, e em consequência de velocidades de vento, o que pode ter a sua justificação na localização do mastro de referência abaixo da cota do mastro temporário, numa zona onde é provável que aconteça o efeito de túnel, com a aceleração dos ventos em direção ao topo da colina, onde está instalado o mastro temporário. Contudo, e pela Figura 88, observa-se que existe uma boa correlação entre as velocidades medidas à altura do rotor nos dois mastros de medição. A figura e o declive da reta de regressão sugerem uma aceleração do vento do mastro RM para o mastro TM.

### 4.4.2 Cálculos das regressões em cada fatia de 10° de direção

A Tabela 32 e a Tabela 33 contêm as regressões lineares executadas nas fatias de direção do vento. São também utilizadas para refletir a validação de dados, imposta pela norma, em número de dados totais e de velocidades por direção.

Em cada direção, há velocidades de até pelo menos 11 m/s.

Tabela 32 – Regressões nas fatias de direção validadas, de 40° a 100°

Direção do vento (°)	40	50	60	70	80	90	100
Coeficiente angular (m)	1,03	1,10	1,12	1,12	1,11	1,05	1,03
Coeficiente linear (b)	0,65	0,12	-0,03	-0,07	-0,14	-0,04	-0,07
R <sup>2</sup>	0,97	0,99	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
Nº de dados	152	475	1073	1534	1147	700	338
Nº de velocidades de [4 a 8] m/s	76	161	438	606	542	379	234
Nº de velocidades de ]8 a 16] m/s	76	314	635	928	605	321	104
Desvio padrão residual m/s	0,37	0,28	0,26	0,29	0,31	0,30	0,29
Velocidade máxima m/s	13,86	16,42	15,15	15,04	14,32	14,68	16,01

Tabela 33 – Regressões nas fatias de direção validadas, de 250° a 310°

Direção do vento (°)	250	260	270	280	290	300	310
Coeficiente angular (m)	1,12	0,96	0,96	0,97	0,96	0,81	0,93
Coeficiente linear (b)	0,01	0,60	0,50	0,40	0,57	1,77	0,76
R <sup>2</sup>	0,85	0,88	0,93	0,94	0,93	0,84	0,88
Nº de dados	230	717	1552	1257	1024	508	192
Nº de velocidades de [4 a 8] m/s	161	488	754	503	263	234	126
Nº de velocidades de ]8 a 16] m/s	69	229	798	754	761	274	66
Desvio padrão residual m/s	0,75	0,70	0,61	0,68	0,82	1,02	0,78
Velocidade máxima m/s	15,54	14,47	15,77	17,13	16,72	15,01	14,69

A norma é ambígua relativamente ao limite a utilizar na condição do número de velocidades inferior e superior a 8 m/s. Nesta tese, toma-se a velocidade de 8 m/s como pertencente ao intervalo de 4 a 8 m/s.

Apresentam-se na Figura 89 e na Figura 90, dois dos gráficos correspondentes às regressões validadas, o da direção do vento a 70° e o de 270° por possuírem maior número de dados, e que nos permitem uma observação da correlação em toda a faixa de velocidades.

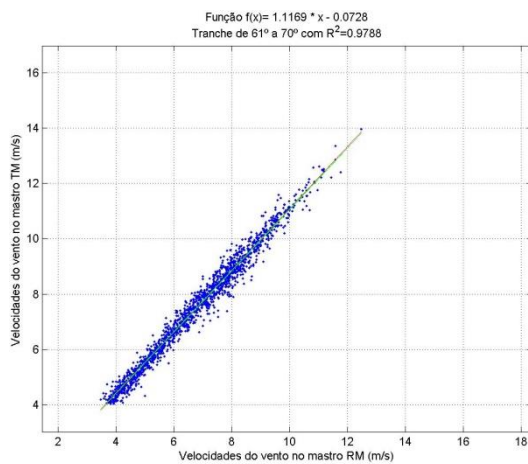


Figura 89 – Gráfico de regressão na direção de 70°

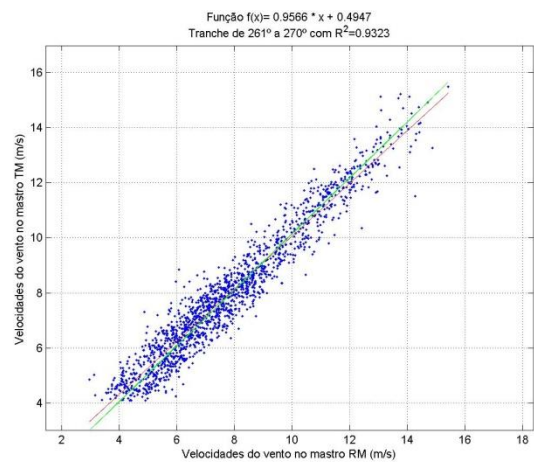


Figura 90 – Gráfico de regressão na direção de 270°

Extrato do código Matlab® correspondente ao cálculo das regressões.

```
% ponto C.5.3 normativa / método da regressão linear
fig(conta_fig,1)=figure;
[f,f1]=fit(xIn,yIn,'poly1');
m=f.p1;
b=f.p2;
r=f1.rsquare;
rmse=f1.rmse;
m1=num2str(round(cell2mat({f.p1})*10000)/10000);
b1=round(cell2mat({f.p2})*10000)/10000;
c1=num2str(indices_dirtm{i,2});
c2=num2str(indices_dirtm{i,2}+9);
r1=num2str(round(cell2mat({f1.rsquare})*10000)/10000);
if abs(b1)==b1
sinal='+ ';
else
sinal='- ';
end
% linha de regressão a passar na origem
b2=xIn\yIn;
plot(xIn,xIn*b2,'--','Color','g');
Vturb_predicted(1:a,i)=rmmatriz_vel_dir(1:a,i).*m+b;% velocidades RM
corrigidas
v1=sum(Vturb_predicted(1:a,i)<=8);% n° de velocidades inferiores ou
iguais a 8 m/s
v2=sum(Vturb_predicted(1:a,i)>8);% n° de velocidades superiores a 8
m/s
vmin=min(Vturb_predicted(1:a,i));
vmax=max(Vturb_predicted(1:a,i));
regressao(1,i)=indices_dirtm{i,2}; % valor início da direção da
tranche
regressao(2,i)=m; % declive
```

```
regressao(3,i)=b1; % coeficiente linear
regressao(4,i)=r; % valor de R quadrado
regressao(5,i)=a; % n° de dados na tranche
regressao(6,i)=v1; % n° de velocidades entre [4 e 8] na tranche
regressao(7,i)=v2; % n° de velocidades entre ]8 e 16] na tranche
regressao(8,i)=rmse; % desvio padrão residual
regressao(9,i)=vmax; % velocidade máxima na tranche
regressao(10,i)=(regressao(5,col)>=144 & ...
regressao(6,i)>=36 & regressao(7,col)>=36);
end
end
```

#### 4.4.3 Cálculos adicionais – valor residual de calibração e parâmetro de consistência interna

Para cada momento válido dos dados registados, e utilizando a regressão linear atrás calculada, determinaram-se as velocidades previstas no local do mastro temporário. Para cada uma destas velocidades, calculou-se o valor residual de calibração pela equação (3.14) e o parâmetro de consistência interna pela equação (3.15). Estes parâmetros são utilizados para avaliar a existência ou não de variações significativas no cálculo da velocidade prevista no local do mastro temporário.

Da observação das tabelas resultantes, em toda a sua extensão, não se verificaram desvios na auto-consistência, pelo que a conclusão é a de que o modelo da regressão linear produz resultados semelhantes para cada elemento de velocidade corrigida.

A Tabela 34 é um excerto do resultado destes cálculos.

Tabela 34 – Excerto dos valores do residual de calibração e do parâmetro de consistência interna (regressão)

Medido			Método da regressão linear				
$V_{TM}$	$V_{RM}$	$\phi_{RM}$	m	b	$V_{prevista}$	residual	auto-consistência
m/s	m/s	°	---	---	m/s	m/s	---
7,08	6,31	60	1,120	-0,030	7,04	-0,0437	0,9938
7,10	6,35	60	1,120	-0,030	7,08	-0,0190	0,9973
6,65	5,88	60	1,120	-0,030	6,55	-0,0951	0,9857
6,03	5,31	60	1,120	-0,030	5,92	-0,1108	0,9816
6,10	5,43	60	1,120	-0,030	6,05	-0,0531	0,9913
4,51	4,38	70	1,120	-0,070	4,82	0,3074	1,0681
4,15	3,98	70	1,120	-0,070	4,37	0,2169	1,0522
5,23	4,96	70	1,120	-0,070	5,46	0,2283	1,0436
5,18	4,78	70	1,120	-0,070	5,27	0,0906	1,0175
4,84	4,52	70	1,120	-0,070	4,97	0,1330	1,0275
4,56	4,41	80	1,100	-0,140	4,73	0,1737	1,0381
4,37	4,17	80	1,100	-0,140	4,46	0,0918	1,0210
4,42	4,17	80	1,100	-0,140	4,46	0,0371	1,0084
4,70	4,50	80	1,100	-0,140	4,83	0,1363	1,0290
5,25	5,01	80	1,100	-0,140	5,39	0,1493	1,0285
6,03	5,80	270	0,960	0,490	6,04	0,0136	1,0023
6,25	6,10	270	0,960	0,490	6,33	0,0719	1,0115
5,07	4,92	270	0,960	0,490	5,20	0,1354	1,0267
6,03	6,27	270	0,960	0,490	6,49	0,4597	1,0763
6,79	6,71	270	0,960	0,490	6,91	0,1167	1,0172
6,90	6,41	280	0,970	0,400	6,60	-0,2946	0,9573
7,40	6,55	280	0,970	0,400	6,74	-0,6601	0,9108
7,48	6,74	280	0,970	0,400	6,92	-0,5571	0,9255
6,38	5,66	280	0,970	0,400	5,88	-0,5058	0,9207
5,98	5,58	280	0,970	0,400	5,80	-0,1803	0,9699
8,31	8,60	290	0,960	0,570	8,78	0,4643	1,0559
9,24	8,84	290	0,960	0,570	9,01	-0,2374	0,9743
9,44	9,26	290	0,960	0,570	9,41	-0,0236	0,9975
9,94	9,49	290	0,960	0,570	9,63	-0,3078	0,9690
9,39	8,84	290	0,960	0,570	9,01	-0,3748	0,9601

#### 4.4.4 Cálculo das incertezas suplementares

O cálculo da incerteza da calibração do local de categoria A, refere-se à incerteza resultante da utilização dos valores das medições realizadas.

Da aplicação do método de validação cruzada nas 10 amostras de dados (ver item 3.12.1), resulta a incerteza associada aos valores das medições com um peso de 1,7%. Deste cálculo resultam a Tabela 35 e a Tabela 36.

Tabela 35 – Incerteza de categoria A (regressão)

	k-tranche 1	k-tranche 2	k-tranche 3	k-tranche 4	k-tranche 5
Nº de dados da k-tranches	1203	1203	1203	1202	1203
Desvio padrão residual (m/s)	0,5487	0,5458	0,5983	0,5190	0,5989
Incerteza estatística categoria A (m/s)	0,0160	0,0159	0,0174	0,0151	0,0175
Valor absoluto da média dos resíduos (m/s)	0,0627	0,0796	0,0211	0,1413	0,1352
	k-tranche 6	k-tranche 7	k-tranche 8	k-tranche 9	k-tranche 10
Nº de dados da k-tranches	1203	1202	1203	1203	1202
Desvio padrão residual (m/s)	0,6620	0,5591	0,5356	0,6846	0,6621
Incerteza estatística categoria A	0,0193	0,0163	0,0156	0,0200	0,0193
Valor absoluto da média dos resíduos (m/s)	0,0178	0,0087	0,0078	0,0154	0,0162
Incerteza total de categoria A = 0,017 m/s					

Tabela 36 – Incerteza tipo A por direção válida nas 10 k-tranches (regressão)

Direção (°)	Nº de leituras	Desvio padrão (m/s)	Incerteza A (m/s)
40	152	0,3693	0,0300
50	457	0,2815	0,0129
60	1073	0,2645	0,0081
70	1534	0,2885	0,0074
80	1147	0,3081	0,0091
90	700	0,2991	0,0113
100	338	0,2912	0,0159
250	230	0,7450	0,0492
260	717	0,6983	0,0261
270	1552	0,6145	0,0156
280	1257	0,6770	0,0191
290	1024	0,8197	0,0256
300	508	1,0231	0,0454
310	192	0,7800	0,0564

Na Tabela 35, o desvio padrão residual foi calculado pela equação (3.17) e está associado aos resíduos calculados pela equação (3.14). A incerteza estatística foi calculada fazendo uso da equação (3.16) e a incerteza total foi determinada pela equação (3.18).

Para cada uma destas direções válidas e respetivas k-tranches é calculado um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) pela regressão em cada k-tranche, o que nos permite avaliar o respetivo grau de relação.

Este processo é mostrado na Tabela 37 onde se consideram somente as direções comuns nas k-tranches e onde se constata valores de  $R^2$  que, não sendo os ideais ( $\geq 0,95$ ), são aceitáveis como indicador positivo da existência de correlação.

A coluna com o número de dados contabiliza o total de dados da direção, nas outras 9 k-tranches.

Tabela 37 – Coeficiente de correlação das k-tranches (regressão)

Direções comuns	k-tranche 1		k-tranche 2		k-tranche 3		k-tranche 4		k-tranche 5	
	Nº dados	$R^2$	Nº dados	$R^2$	Nº dados	$R^2$	Nº dados	$R^2$	Nº dados	$R^2$
260°	678	0,93	682	0,93	655	0,93	658	0,92	646	0,92
270°	1436	0,93	1485	0,93	1389	0,93	1499	0,93	1376	0,93
280°	1171	0,93	1228	0,92	1135	0,92	1223	0,93	1161	0,93
290°	922	0,93	953	0,94	936	0,94	991	0,94	957	0,94
300°	471	0,94	433	0,93	463	0,93	453	0,92	475	0,91
310°	169	0,91	160	0,91	168	0,91	182	0,90	151	0,90
Direções comuns	k-tranche 6		k-tranche 7		k-tranche 8		k-tranche 9		k-tranche 10	
	Nº dados	$R^2$	Nº dados	$R^2$	Nº dados	$R^2$	Nº dados	$R^2$	Nº dados	$R^2$
260°	644	0,92	650	0,91	654	0,90	601	0,87	585	0,86
270°	1416	0,92	1331	0,93	1468	0,92	1306	0,92	1262	0,92
280°	1156	0,92	1074	0,92	1149	0,93	1022	0,94	994	0,94
290°	975	0,93	933	0,94	941	0,94	817	0,94	791	0,93
300°	445	0,91	478	0,88	471	0,88	455	0,86	428	0,85
310°	184	0,90	183	0,89	190	0,90	189	0,89	152	0,88

As incertezas de categoria B, que se referem às incertezas ligadas ao funcionamento, à calibração e à montagem dos aparelhos de medição e outras, não são tratadas neste texto.

### 4.4.5 Controlo da convergência

No item anterior foram calculados os parâmetros de consistência interna. As médias acumuladas deste parâmetro são relacionados com o número de horas em cada fatia de direção. Desta relação, resultam gráficos de convergência em que os dados devem satisfazer a condição de convergência de  $\pm 0,5\%$  da média final para 16 horas de dados, ou em 25% do número total de dados na fatia de direção (Figura 91 à Figura 96).

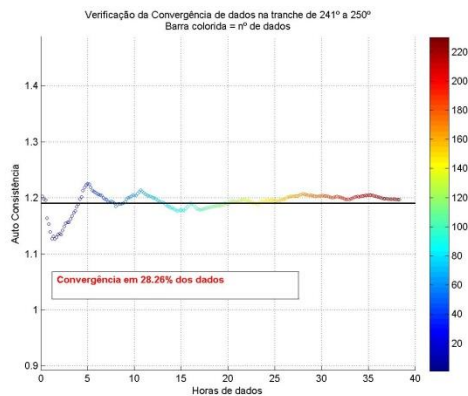


Figura 91 – Convergência de dados na direção 250°

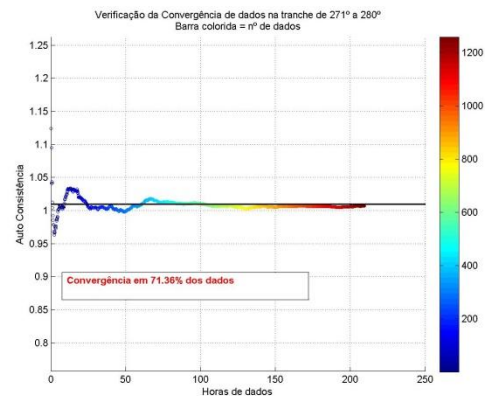


Figura 94 – Convergência de dados na direção 280°

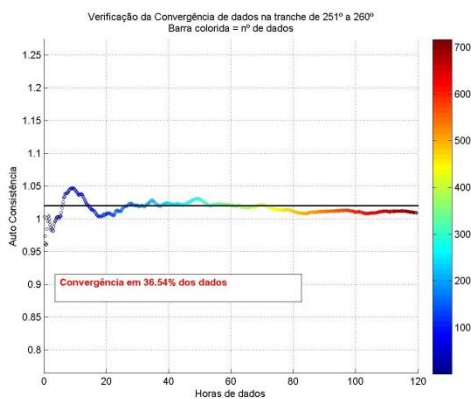


Figura 92 – Convergência de dados na direção 260°

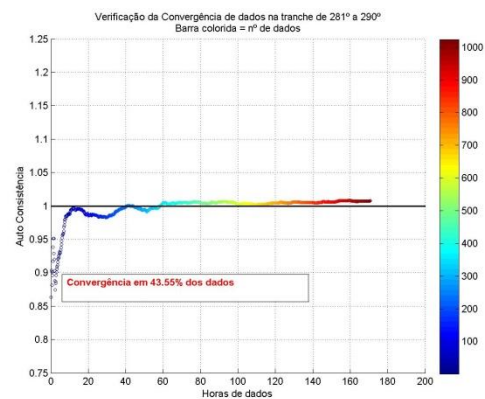


Figura 95 – Convergência de dados na direção 290°

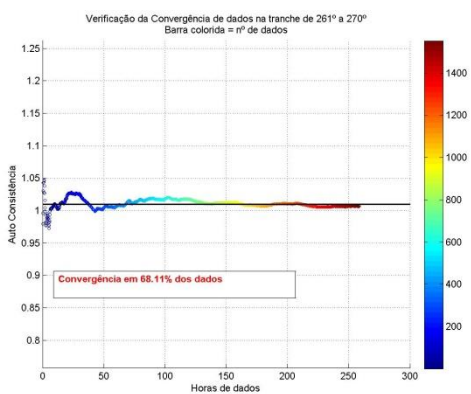


Figura 93 – Convergência de dados na direção 270°

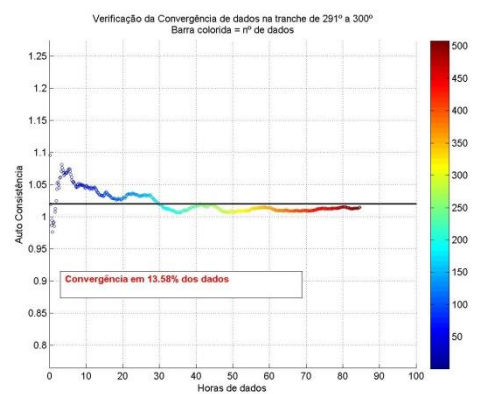


Figura 96 – Convergência de dados na direção 300°

A convergência para a direção de vento de 300° - Figura 96, não cumpre com o requisito dos 25% de dados convergentes, sendo necessária uma ação de correção, como por exemplo uma filtragem de dados suplementar nesta direção, podendo mesmo excluir-se esta fatia em caso de provocar algum tipo de problema na medição da curva de potência.

#### 4.4.6 Verificação da correlação pela análise dos resíduos

Para a análise dos resíduos, faz-se uso de um coeficiente de correlação estatístico, o coeficiente linear de Pearson ( $r$ ), que mede a robustez e a direção da relação linear entre duas variáveis. Quanto mais o valor de  $r$ , se aproximar de +1 ou de -1, mais forte é a probabilidade de existir uma correlação entre essas duas variáveis. O somatório dos valores de resíduo, no grupo de dados em análise, deverá ser nulo, indicando que não existem valores residuais anormais.

A Tabela 38 é o reflexo desta verificação.

Tabela 38 – Verificação da convergência pela análise dos resíduos

Direção (°)	Nº de dados	Valor de $R^2$	Valor absoluto da média dos resíduos (m/s)	Desvio padrão residual (m/s)	Coefficiente de correlação linear ( $r$ )
40	152	0.98	0.00	0.37	0.99
50	475	0.99	0.00	0.28	0.99
60	1073	0.99	0.00	0.26	0.99
70	1534	0.98	0.00	0.29	0.99
80	1147	0.98	0.00	0.31	0.99
90	700	0.98	0.00	0.30	0.99
100	338	0.99	0.00	0.29	0.99
260	717	0.88	0.00	0.70	0.94
270	1552	0.94	0.00	0.62	0.97
280	1257	0.94	0.00	0.68	0.97
290	1024	0.93	0.00	0.82	0.96
300	508	0.84	0.00	1.02	0.91
310	192	0.89	0.00	0.78	0.94

#### 4.4.7 Variação da correção entre fatias

Do explicado no item 3.14.3, resulta a Tabela 39.

Tabela 39 – Variação da correção entre tranches

Direção	Variação da consistência interna das fatias (à esquerda)	Variação da consistência interna das fatias (à direita)	Incerteza suplementar
(°)	---	---	(%)
40	---	0,97	Anexo E
50	0,99	0,98	Anexo E
60	0,99	0,99	Anexo E
70	0,99	0,98	Anexo E
80	1,02	0,98	Anexo E
90	1,04	1,01	Anexo E
100	1,04	---	Anexo E
260	---	1,00	Anexo E
270	1,02	1,02	Anexo E
280	1,02	1,03	Anexo E
290	1,01	1,01	Anexo E
300	1,03	1,01	Anexo E
310	1,04	---	Anexo E

As fatias de direção de 40°, 90°, 100°, 280°, 300° e 310°, por terem valores inferiores a 0,98 e/ou superiores a 1,02, caso não sejam eliminadas, terão que ter um incremento da incerteza suplementar correspondente.

Extrato do código Matlab® correspondente ao cálculo das incertezas suplementares.

```
% incerteza estatística da calibração do local para cada tranche de
dados
for i=1:36
if regressao(5,i)>=144 && regressao(6,i)>=36 && regressao(7,i)>=36
% self consistency parameter
self=dados_c(:)./dados_l(:); % fórmula (C.3) - pág 342
% residual
residual=dados_c(:)-dados_l(:);
end
end
for i=1:36
ano=fix(tabela(:,1)./1e8);
mes=fix(m./1e6);
```

```

tabela_ord(:,4)=fix(tabela_ord(:,1)./1e8);% coluna com anos
tabela_ord(:,5)=fix(m./1e6);% coluna com meses
tabela_ord(:,6)=fix(m./1e4);% coluna com dias
tabela_ord(:,7)=fix(m./1e2);% coluna com horas
tabela_ord(:,8)=fix(m);% coluna com minutos
for ii=1:n
tabela_ord(ii,9)=round(10/60*ii*100)/100;% tempo acumulado arredondado
a 2 casas decimais
end
%média acumulada do parâmetro de consistência interna
for ii=1:n
tabela_ord(ii,10)=sum(tabela_ord(1:ii,3))/ii;
end
% verificação da convergência
limite_sup=media+media*.005;
limite_inf=media-media*.005;
conta_self=sum(tabela_ord(:,10)>=limite_inf &
percent=conta_self/n*100;
end
end
% tabela com R quadrado para cada tranche (tabela C.3)
n=sum(regressao(5,:)>=144);
for i=1:36
media_residual=abs(mean(matriz_residual(1:n,i)));
Xi=tmmatriz_vel_dir_cor(1:n,i);
Yi=tmmatriz_vel_dir(1:n,i);
numer1=n*sum(Xi.*Yi);
numer2=sum(Xi)*sum(Yi);
numer3=numer1-numer2;
denom1=n*sum(Xi.^2)-sum(Xi)^2;
denom2=n*sum(Yi.^2)-sum(Yi)^2;
denom3=sqrt(denom1)*sqrt(denom2);
r=numer3/denom3;
end
end
% itens C.6 e C.7 - Incerteza da calibração do local
% ----- construção das k=10 tranches -----
% ----- C.6.1 Incerteza de calibração do local -----
for i=1:n_dados
rews(i,8)=regressao(2,indice);% declive
rews(i,9)=regressao(3,indice);% coeficiente linear
rews(i,10)=rews(i,3)*rews(i,8)+rews(i,9);% velocidades corrigida
(Vturb_predicted)
rews(i,11)=rews(i,10)-rews(i,4);% residual
rews(i,12)=rews(i,10)/rews(i,4); % self_consistency_parameter
end
m_quant(indice,i)=soma;
m_maior8(indice,i)=sum(t(ii:ii+soma-1,2)>8);
m_menor8(indice,i)=sum(t(ii:ii+soma-1,2)<=8);
m_velmax(indice,i)=max(t(ii:ii+soma-1,2));
% n° de dados >= 144 (24 horas de dados)
% n° de velocidades de 4 a 8 m/s >= 36 (6 horas de dados)
% n° de velocidades de 8 a 16 m/s >= 36 (6 horas de dados)
if soma>=144 && m_menor8(indice,i)>=36 && m_maior8(indice,i)>=36;
xIn=t(ii:ii+soma-1,2);
yIn=t(ii:ii+soma-1,3);
[f,f1]=fit(xIn,yIn,'poly1');

```

```

m_declive(indice,i)=f.p1;
m_coef(indice,i)=f.p2;
m_r2(indice,i)=f1.rsquare;
m_tranches_validas{indice,i}=m_tranches_dir(indice,i);
else
m_declive(indice,i)=-100;
m_coef(indice,i)=-100;
m_r2(indice,i)=-100;
m_tranches_validas{indice,i}='excl';
end
end
end
% item C.6.1
catA_ktranche=(regressao(1,j)+9)';% direções nas k-tranches
n_dir=numel(catA_ktranche); % n° de direções por k-tranche
for i=1:n_dir
for ii=1:10
% procura as células das outras 9 k-tranches
I= rews(:,7)~=ii;% procura as linhas das outras 9 k-tranches
I1=find(rews(I,5)==catA_ktranche(i,1));% procura as linhas das outras
k-tranches com direção i
catA_ktranche(i,coluna(ii))=numel(I1);% n° de dados
xIn=rews(I1,3);
yIn=rews(I1,4);
[f,f1]=fit(xIn,yIn,'poly1');
catA_ktranche(i,coluna(ii))=f.p1;% declive
catA_ktranche(i,coluna(ii))=f.p2;% coeficiente linear
catA_ktranche(i,coluna(ii))=f1.rsquare;% R quadrado
end
end
% cálculo das incertezas C.6.1.1 e C.6.1.2
for i=1:10
I=find(rews(:,7)==i);% procura a linha de cada k-tranche
% n° de dados na k-tranche
incerteza(1,i)=sum(m_quant(:,i));
% desvio padrao residual (m/s)
incerteza(2,i)=nanstd(rews(I,16));% desvio padrao residual para cada
% incerteza estatistica categoria A (método da regressão)
% graus de liberdade
% f=total de elementos de cada k-tranche - 2 * n° de direções
f=incerteza(1,i)-2*n_dir;
incerteza(3,i)=incerteza(2,i)*sqrt(incerteza(1,i)-
1)/sqrt(f*incerteza(1,i));
incerteza(4,i)=abs(nanmean(rews(I,16)));% valor absoluto da média dos
residuos, ignorando os NaN
end
% incerteza total de categoria A (m/s)
incerteza_total=sqrt(sum(incerteza(3,:).^2)/10);

```

## 4.5 Resultados pelo Método da Matriz de direções / expoentes de corte

### 4.5.1 Verificação da correlação entre as tensões de corte do vento nos dois mastros meteorológicos

Verificação já efetuada no item 4.4.1.

### 4.5.2 Tabelas de rácios para a utilização do método da matriz

Este método, utilizado no caso em que existe influência do fator corte, faz uso de matrizes cujas entradas são as direções de vento fatiadas em intervalos de  $10^\circ$  e os expoentes de corte fatiados em intervalos de 0,05.

A construção das matrizes necessárias é descrita no item 3.9.1.

Da filtragem executada, resulta a validação das direções do vento entre  $40^\circ$  e  $100^\circ$  e entre  $250^\circ$  e  $310^\circ$ , expostas na Tabela 40 e na Tabela 41.

Tabela 40 – Validação das direções do vento no método da matriz

Fatia	Direções		N° de vel Totais ---	N° de vel [4 a 8] ---	N° de vel ]8 a 16] ---	0=Não válida 1=Válida 2=Incompleta
	de [°]	a [°]				
1	1	10	51	48	2	0
2	11	20	52	45	0	0
3	21	30	101	81	17	0
4	31	40	152	88	58	1
5	41	50	475	262	197	1
6	51	60	1073	746	268	1
7	61	70	1534	1067	407	1
8	71	80	1147	837	269	1
9	81	90	700	531	153	1
10	91	100	338	264	65	1
11	101	110	104	97	4	0
12	111	120	83	76	6	0
13	121	130	31	28	3	0
14	131	140	20	20	0	0
15	141	150	8	8	0	0
16	151	160	6	5	0	0
17	161	170	10	9	0	0
18	171	180	19	19	0	0
19	181	190	32	31	1	0
20	191	200	50	48	1	0
21	201	210	81	67	12	0
22	211	220	71	49	10	0
23	221	230	50	31	7	0
24	231	240	79	54	3	0
25	241	250	230	190	19	2
26	251	260	717	540	148	1
27	261	270	1552	911	615	1
28	271	280	1257	613	624	1
29	281	290	1024	311	693	1
30	291	300	508	183	307	1
31	301	310	192	128	55	1
32	311	320	107	83	19	0
33	321	330	50	39	10	0
34	331	340	36	35	0	0
35	341	350	37	33	2	0
36	351	360	50	41	9	0

Tabela 41 – Matriz de quantidades por elemento de direção/expoente

Faixas de expoentes de corte	Faixas de direções de vento (°)																																							
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350	360				
-0,34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
-0,30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
-0,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0,20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0,15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0,10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,00	2	1	0	0	14	40	73	148	158	88	12	4	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,05	3	2	0	1	21	96	308	423	256	117	27	15	1	0	1	0	1	3	6	1	1	0	0	1	5	21	12	62	194	321	152	42	7	9	7	3	7	3	0	
0,10	2	3	0	1	41	279	583	382	167	67	29	20	6	3	0	1	0	0	1	2	0	0	1	3	7	35	127	312	192	46	15	10	5	8	6	7	6	7	0	
0,15	3	1	1	3	92	302	376	129	52	19	21	15	3	5	3	1	0	3	2	5	3	0	0	2	8	52	226	296	85	29	10	5	4	5	5	10	10	0	0	
0,20	8	3	2	14	85	172	127	31	13	11	8	19	6	0	2	0	2	0	5	0	3	0	1	5	15	68	314	172	43	15	6	2	2	4	3	7	0	0		
0,25	5	8	1	8	56	66	33	7	1	0	2	8	4	2	0	0	1	2	0	4	0	1	1	3	12	104	336	63	20	5	4	1	0	0	3	9	0	0		
0,30	4	4	4	19	46	43	10	2	1	0	0	1	1	2	1	0	0	3	0	3	0	5	3	9	19	116	201	34	17	2	0	3	4	0	3	2	0	0		
0,35	4	7	4	24	39	24	7	1	0	0	0	0	3	3	0	1	1	0	0	2	2	4	9	16	103	114	18	5	1	2	0	0	0	2	3	0	0	0		
0,40	6	4	7	11	22	15	0	0	0	0	0	0	5	3	2	0	0	1	2	2	2	6	5	5	16	80	54	9	4	0	0	0	0	1	1	2	0	0		
0,45	3	5	9	13	17	7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2	5	2	3	19	40	19	10	5	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	
0,50	2	5	9	13	9	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	4	4	3	8	23	21	5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	
0,55	4	3	15	14	9	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	5	5	8	5	12	16	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,60	5	0	12	7	6	4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	3	4	0	3	6	13	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
0,65	0	2	10	4	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	10	1	2	5	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0,70	0	2	8	5	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	6	6	1	5	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,75	0	0	11	5	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	2	4	2	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,80	0	0	5	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	1	4	1	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,85	0	0	1	4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	6	2	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,90	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,95	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,00	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	8	2	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,05	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,10	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,15	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,20	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,25	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,35	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,40	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTALS	51	52	101	152	475	1073	1534	1147	700	338	104	83	31	20	8	6	10	19	32	50	81	71	50	79	230	717	1552	1257	1024	508	192	107	50	36	37	50	0	0		

Na Tabela 41, representa-se a amarelo os elementos válidos da matriz, após a aplicação das condições de filtragem. Os restantes elementos são recusados por dados insuficientes, ou no elemento da matriz ou na fatia de direção.

Os elementos validados devem ser verificados no intuito de ser aferir a necessidade, ou não, de melhorar a correlação entre eles (Figura 97 à Figura 100).

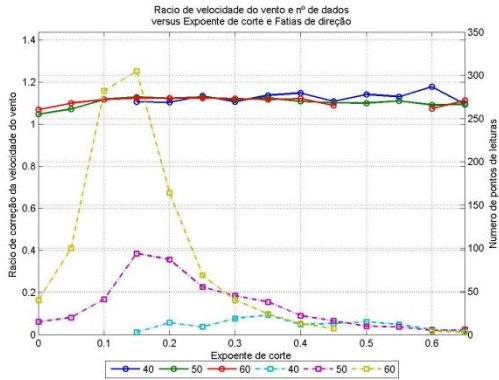


Figura 97 – Relação de velocidades e corte de vento nas direções de 40° a 60°

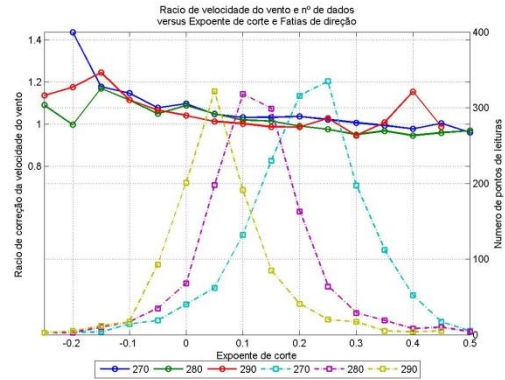


Figura 99 – Relação de velocidades e corte de vento nas direções de 270° a 290°

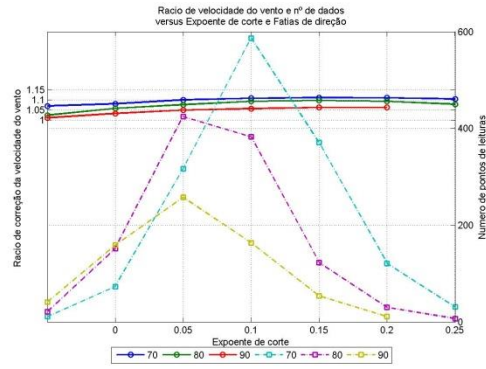


Figura 98 – Relação de velocidades e corte de vento nas direções de 70° a 90°

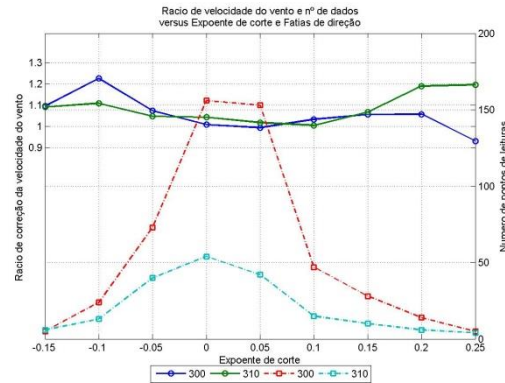


Figura 100 – Relação de velocidades e corte de vento nas direções de 300° e 310°

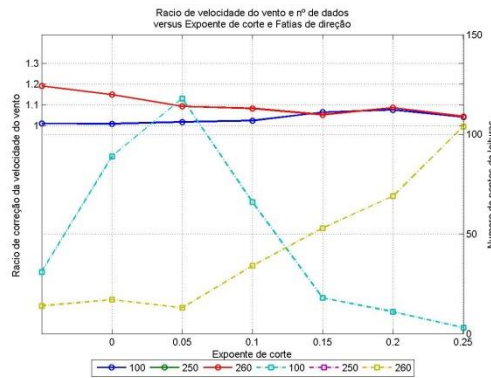


Figura 101 – Relação de velocidades e corte de vento nas direções de 100°, 250° e 260°

Nos gráficos anteriores, as linhas a cheio representam a relação média entre o rácio calculado e o expoente de corte associado, nas direções do vento representadas por uma das cores. As linhas a tracejado representam a relação entre o número de pontos e o expoente médio, para cada direção do vento. Em todos os gráficos, as linhas do rácio de correção apresentam uniformidade, não havendo necessidade de qualquer correção complementar.

A validação final dos elementos da matriz de rácios pode agora ser feita, usando a matriz de quantidades e tendo em conta o imposto pela norma, no que respeita aos elementos da fatia de expoente na direção de 250°. Nenhum dos elementos desta fatia de direção tem as 6 horas de dados (36 registos), pelo que esta fatia de direção é anulada.

As coordenadas destes elementos de matriz validada, serão as utilizadas para a determinação da velocidade prevista no local de instalação da turbina eólica.

A matriz de rácios fica, assim, como se mostra na Tabela 42.

Tabela 42 – Matriz de rácios de velocidades entre mastros, resultante da aplicação do método da matriz

		Fatias de direções de vento (°)																										
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350	360		
Fatias de expoentes de corte	-0,34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	-0,30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-0,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,091	1,137	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-0,20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,438	0,999	1,176	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-0,15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,219	1,178	1,170	1,245	1,096	1,090	0	0	0	0	0	0	0
	-0,10	0	0	0	0	0	0	0	0	1,020	0	0	0	0	0	1,195	1,148	1,115	1,115	1,225	1,109	0	0	0	0	0	0	0
	-0,05	0	0	0	0	0	1,082	1,071	1,025	1,013	1,011	0	0	0	0	1,192	1,079	1,051	1,067	1,074	1,047	0	0	0	0	0	0	0
	0,00	0	0	0	0	1,047	1,070	1,081	1,058	1,033	1,011	0	0	0	0	1,151	1,098	1,091	1,042	1,008	1,043	0	0	0	0	0	0	0
	0,05	0	0	0	0	1,073	1,101	1,101	1,077	1,050	1,018	0	0	0	0	1,093	1,049	1,050	1,015	0,995	1,018	0	0	0	0	0	0	0
	0,10	0	0	0	0	1,118	1,118	1,108	1,093	1,058	1,025	0	0	0	0	1,085	1,034	1,022	1,003	1,039	1,006	0	0	0	0	0	0	0
	0,15	0	0	0	1,107	1,129	1,124	1,113	1,099	1,064	1,064	0	0	0	0	1,055	1,035	1,017	0,989	1,043	1,067	0	0	0	0	0	0	0
	0,20	0	0	0	1,104	1,124	1,124	1,111	1,093	1,061	1,076	0	0	0	0	1,087	1,035	0,991	0,985	1,066	1,190	0	0	0	0	0	0	0
	0,25	0	0	0	1,138	1,127	1,127	1,104	1,079	0	1,041	0	0	0	0	1,044	1,024	0,976	1,029	0,931	1,197	0	0	0	0	0	0	0
	0,30	0	0	0	1,110	1,118	1,118	1,108	0	0	0	0	0	0	0	1,057	1,010	0,955	0,947	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,35	0	0	0	1,134	1,124	1,118	1,086	0	0	0	0	0	0	0	1,048	0,994	0,969	1,009	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,40	0	0	0	1,135	1,108	1,123	0	0	0	0	0	0	0	0	1,033	0,974	0,946	1,154	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,45	0	0	0	1,117	1,100	1,089	0	0	0	0	0	0	0	0	1,030	1,009	0,959	0,987	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,50	0	0	0	1,151	1,102	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,018	0,960	0,992	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,55	0	0	0	1,119	1,108	1,096	0	0	0	0	0	0	0	0	0,992	1,062	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,60	0	0	0	1,185	1,090	1,072	0	0	0	0	0	0	0	0	1,045	0,967	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,65	0	0	0	1,093	1,093	1,112	0	0	0	0	0	0	0	0	1,081	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0,70	0	0	0	1,111	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0,75	0	0	0	1,100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0,80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0,85	0	0	0	1,150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0,90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0,95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Extrato do código MATLAB<sup>®</sup> criado para a preparação das matrizes deste módulo.

```

% grupagem por direções com intervalos de 10°
for i=1:10:360
b=round(i/10)+1;
tabela_racios_TM_RM(b,1)=i;% limite inferior da tranche
tabela_racios_TM_RM(b,2)=i+9;% limite superior da tranche
tabela_racios_TM_RM(b,3)=fix((i+i+9)/2); % valor intermédio da tranche
num_vel1=sum(matrizorddir(a,6)>=4 & matrizorddir(a,6)<=8);
num_vel2=sum(matrizorddir(a,6)>8 & matrizorddir(a,6)<=16);
% média dos racios
med_racio=mean(matrizorddir(a,7));
% verifica se fatia de direção é válida, não válida ou incompleta
if tabela_racios_TM_RM(b,4)<144
tabela_racios_TM_RM(b,10)=0;
elseif tabela_racios_TM_RM(b,5)<=36 || tabela_racios_TM_RM(b,6)<=36
tabela_racios_TM_RM(b,10)=2;
else
tabela_racios_TM_RM(b,10)=1;
end
end
% grupagem por expoente de corte com intervalos de 0.05 e por tranches
de direção de 10°
for i=1:colunas-1
y=1+fix((matrizordexp(i,5)+0.05)/0.05-a)+1;% indice do expoente na
matriz
x=1+(ceil(matrizordexp(i,2)/10)*10)/10;% indice das direções na matriz
mrm_quantidades(y,x)=mrm_quantidades(y,x)+1;
mrm_racios(y,x)=mrm_racios(y,x)+(matrizordexp(i,4)/matrizordexp(i,6));
% REWS TM / REWS RM
end
% se no bin expoente/direção o n° de dados for menor que 3 (6 horas)
% o bin é excluído.
for i=2:37
for ii=2:c
bin=mrm_quantidades(ii,i);
if bin<3
mrm_racios(ii,i)=0;
end
end
end
% soma colunas de quantidades
% se soma for inferior a 144, a direção é excluída na matriz:
for i=2:37
if mrm_quantidades(c+1,i)<=144
mrm_racios(2:end,i)=0;
end
end
% se fatia de direção incompleta, valida fatia de expoente se
% quantidade for superior a 6 horas = 36 dados
% procura as direções incompletas
I=tabela_racios_TM_RM(:,10)==2;
dir=tabela_racios_TM_RM(I,2);

% procura na tabela quantidades as direções incompletas e

```

```
% mantém ou anula a fatia de expoente
for i=1:n
for ii=2:c-1
if mrm_quantidades(ii,I)<36
mrm_quantidades(ii,I)=0;
rm_racios(ii,I)=0;
end
end
end
```

#### 4.5.3 Cálculos adicionais – valor residual de calibração e parâmetro de consistência interna

Para cada elemento da matriz de direção do vento / expoente de corte, foram calculadas as velocidades previstas no local do mastro temporário e, para cada uma destas velocidades, foi calculado o valor residual de calibração pela equação (3.14) e o parâmetro de consistência interna pela equação (3.15).

Com já referido anteriormente, as tabelas resultantes destes cálculos têm como finalidade avaliar a existência de variações significativas no cálculo da velocidade prevista no local do mastro temporário.

Para cada direção de vento versus expoente de corte, resulta uma tabela sobre a qual é feita a verificação da existência, ou não, de variações significativas no parâmetro de consistência interna.

Uma compilação destas tabelas é apresentada na Tabela 43.

Tabela 43 – Excerto de valores do residual de calibração e do parâmetro de consistência interna

Medido				Método da matriz direção/expoente			
$V_{TM}$	$V_{RM}$	$\alpha_{RM}$	$\phi_{RM}$	$f(WD, \alpha)$	$V_{prevista}$	residual	auto-consistência
m/s	m/s	---	°	---	m/s	m/s	---
6,02	5,31	0,25	60	1,0578	5,62	-0,3969	0,9340
7,22	6,38	0,40	60	1,0978	7,01	-0,2103	0,9709
6,55	5,83	0,25	60	1,0932	6,38	-0,1769	0,9730
6,70	6,06	0,30	60	1,0764	6,52	-0,1767	0,9736
6,54	6,07	0,15	60	1,0932	6,63	0,0926	1,0142
10,19	9,35	0,10	70	1,0441	9,76	-0,4309	0,9577
8,60	7,93	0,15	70	1,0829	8,58	-0,0198	0,9977
8,39	7,90	0,15	70	1,0441	8,25	-0,1403	0,9833
6,76	6,20	0,15	70	1,0099	6,26	-0,4961	0,9266
6,11	5,51	0,05	70	1,0073	5,55	-0,5595	0,9084
7,46	8,05	0,00	80	1,0441	8,41	0,9467	1,1269
8,51	8,03	0,00	80	1,0558	8,48	-0,0242	0,9972
7,29	6,94	0,15	80	1,0558	7,32	0,0338	1,0046
7,23	6,55	0,20	80	1,0073	6,60	-0,6302	0,9128
4,44	3,73	0,10	80	1,0045	3,75	-0,6949	0,8436
5,59	5,55	0,38	270	0,9309	5,17	-0,4239	0,9242
7,36	7,11	0,19	270	0,9947	7,07	-0,2811	0,9618
10,03	9,03	0,15	270	1,0334	9,33	-0,6960	0,9306
8,13	7,88	0,13	270	1,0334	8,14	0,0145	1,0018
9,41	9,13	0,18	270	0,9947	9,08	-0,3257	0,9654
11,40	11,07	0,20	280	1,0424	11,54	0,1436	1,0126
7,40	7,36	0,15	280	1,0087	7,42	0,0183	1,0025
5,53	5,23	0,20	280	0,9875	5,17	-0,3640	0,9342
10,24	10,64	0,15	280	1,0032	10,67	0,4285	1,0418
7,97	8,51	0,30	280	1,0032	8,54	0,5721	1,0718
13,08	12,98	0,10	290	1,1242	14,59	1,5153	1,1159
14,98	15,32	0,10	290	1,1012	16,87	1,8845	1,1258
15,22	14,56	0,10	290	1,1242	16,37	1,1464	1,0753
10,62	10,35	0,05	290	1,1242	11,63	1,0161	1,0957
8,11	8,23	0,15	290	1,1012	9,06	0,9517	1,1173

#### 4.5.4 Cálculo das incertezas suplementares

Para o cálculo da incerteza de categoria A, é aplicado o método de validação cruzada em 10 amostras de dados (ver item 3.12.1).

Para cada k-amostra é calculado o rácio de correção, usando os dados das restantes 9 k-amostras.

Com estes resultados, é determinado o valor da incerteza de categoria A, que indica a incerteza associada aos valores das medições da direção e velocidade do vento.

Os dados resultantes, para as direções de vento de 260° a 300°, apresentam-se na Tabela 44.

Tabela 44 – Rácio de correção em cada k-tranche

	k-tranche 1		k-tranche 2		k-tranche 3		k-tranche 4	
Direções	Nº dados	Rácios	Nº dados	Rácios	Nº dados	Rácios	Nº dados	Rácios
260°	678	1,060	682	1,058	655	1,057	658	1,056
270°	1436	1,064	1485	1,060	1389	1,058	1499	1,054
280°	1171	1,061	1228	1,058	1135	1,055	1223	1,052
290°	922	1,061	953	1,057	936	1,050	991	1,045
300°	471	1,061	433	1,054	463	1,045	453	1,038

	k-tranche 5		k-tranche 6		k-tranche 7	
Direções	Nº dados	Rácios	Nº dados	Rácios	Nº dados	Rácios
260°	646	1,051	644	1,051	650	1,049
270°	1376	1,048	1416	1,043	1331	1,035
280°	1161	1,047	1156	1,042	1074	1,036
290°	957	1,042	975	1,038	933	1,033
300°	475	1,033	445	1,026	478	1,021

	k-tranche 8		k-tranche 9		k-tranche 10	
Direções	Nº dados	Rácios	Nº dados	Rácios	Nº dados	Rácios
260°	654	1,048	601	1,047	585	1,050
270°	1468	1,031	1306	1,023	1262	1,021
280°	1149	1,031	1022	1,022	994	1,016
290°	941	1,028	817	1,017	791	1,014
300°	471	1,015	455	1,009	428	1,006

O número de dados contabiliza o total de dados das outras 9 k-tranches e o rácio é a média dos rácios dessas 9 k-tranches.

Tabela 45 – Incerteza de categoria A (direção/expoente)

	k-tranche1	k-tranche2	k-tranche3	k-tranche4	k-tranche5
N° de dados da k-tranche	1203	1203	1203	1202	1203
Desvio padrão residual (m/s)	0,5689	0,4823	0,6396	0,4812	0,5947
Incerteza estatística categoria A (m/s)	0,0165	0,0140	0,0185	0,0140	0,0172
Valor absoluto da média dos resíduos (m/s)	0,1040	0,0113	0,0721	0,1425	0,1070
	k-tranche6	k-tranche7	k-tranche8	k-tranche9	k-tranche10
N° de dados da k-tranche	1203	1202	1203	1203	1202
Desvio padrão residual (m/s)	0,6882	0,6037	0,5300	0,6856	0,6989
Incerteza estatística categoria A	0,0199	0,0175	0,0154	0,0199	0,0203
Valor absoluto da média dos resíduos (m/s)	0,0340	0,0204	0,0036	0,0848	0,0381

Incerteza total de categoria A = 0,017 m/s

Nesta Tabela 45, o desvio padrão residual foi calculado pela equação (3.17) e está associado aos resíduos calculados pela equação (3.14). A incerteza estatística foi calculada fazendo uso da equação (3.16) e a incerteza total foi determinada pela equação (3.18).

O grau de confiança sobre as medições recolhidas e validadas é de 98,3%.

As incertezas de categoria B, que se referem às incertezas ligadas ao funcionamento, à calibração e à montagem dos aparelhos de medição e outras, não são tratadas neste texto.

#### 4.5.5 Controlo da convergência

O controlo da convergência é verificado por gráficos que relacionam o parâmetro de consistência interna e o número de horas de dados, em cada fatia de direção. A convergência deve acontecer no intervalo de  $\pm 0,5\%$  da média final para um período de 16 horas de dados, ou em 25% do número total de dados na fatia de direção (da Figura 102 à Figura 107).

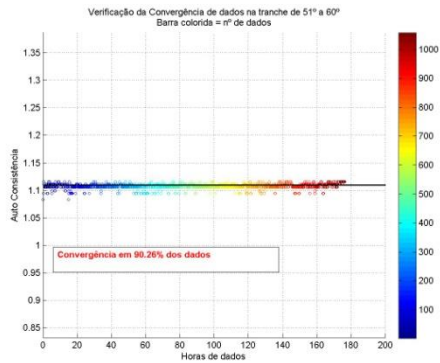


Figura 102 – Convergência de dados na direção de 60°

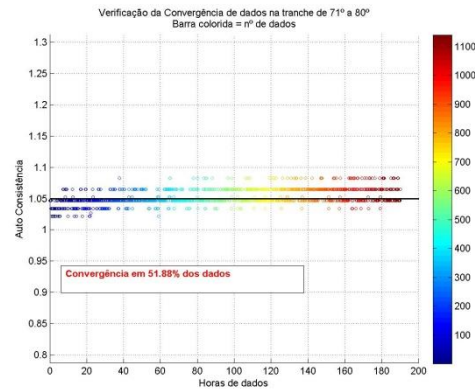


Figura 103 – Convergência de dados na direção de 80°

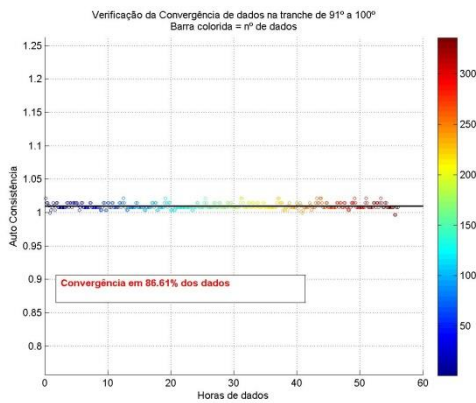


Figura 104 – Convergência de dados na direção de 100°

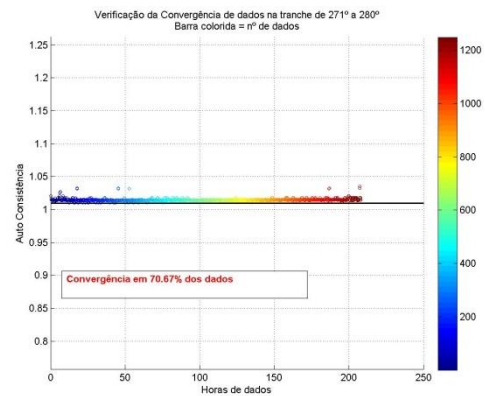


Figura 106 – Convergência de dados na direção de 280°

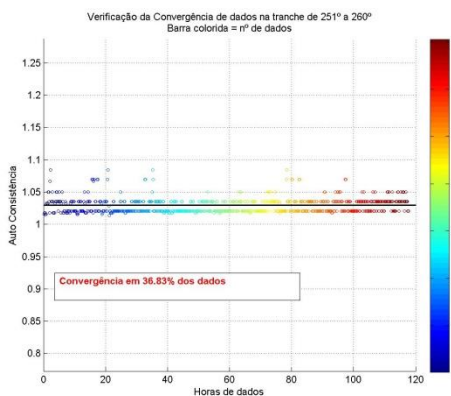


Figura 105 – Convergência de dados na direção de 260°

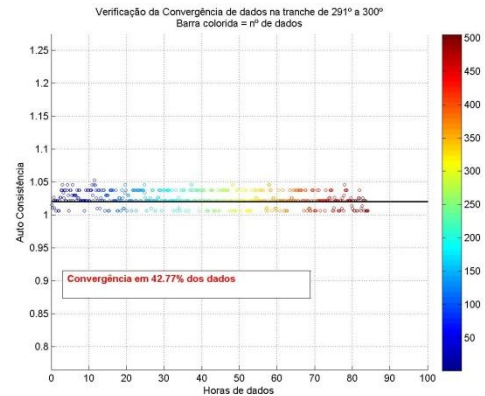


Figura 107 – Convergência de dados na direção de 300°

Os requisitos de convergência, para pelo menos 25% dos dados, são cumpridos para todas as direções. Em caso de um incumprimento com os requisitos necessários da convergência, seria necessária uma correção ou a eliminação desta fatia de direção, caso provocasse algum tipo de problema na execução da curva de potência.

#### 4.5.6 Variação da correção entre fatias

Do explicado no item 3.14.3, resulta a Tabela 46.

Tabela 46 – Variação da correção entre tranches

Direção	Variação da consistência interna das fatias (à esquerda)	Variação da consistência interna das fatias (à direita)	Incerteza suplementar
(°)	---	---	(%)
40	---	0,98	Anexo E
50	0,98	0,99	Anexo E
60	0,98	0,98	Anexo E
70	0,99	0,97	Anexo E
80	1,01	0,98	Anexo E
90	1,03	1,00	Anexo E
100	1,04	---	Anexo E
260	---	0,99	Anexo E
270	1,03	1,02	Anexo E
280	1,02	1,02	Anexo E
290	1,02	1,01	Anexo E
300	1,03	1,03	Anexo E
310	1,01	---	Anexo E

As fatias de direção 70°, 90°, 100°, 270° e 300°, por terem valores inferiores a 0,98 e/ou superiores a 1,02, não sendo eliminadas, terão um incremento da incerteza suplementar.

Extrato do código Matlab<sup>®</sup> correspondente ao cálculo das incertezas suplementares.

```
% ponto C.6 - Incerteza da calibração do local - categorias A
% ----- construção das k=10 tranches -----
% ----- C.6.1 Incerteza de calibração do local -----
for i=1:n_dados
rews(i,8)=tabela_racios(indice,10);% ratio médio velTM/velRM
rews(i,9)=rews(i,3)*rews(i,8);% velocidades corrigida Vturb_predicted)
rews(i,10)=rews(i,9)-rews(i,4);% residual
rews(i,11)=rews(i,9)/rews(i,4); % self_consistency_parameter
end
% criar matriz com as direções de k-tranches
I=tabela_racios(:,11)==1;
catA_ktranche(:,1)=I.*tabela_racios(:,1).*10;
```

```

j=catA_ktranche;
catA_ktranche=j(I,:);% direções nas k-tranches
n_dir=numel(I); % n° de direções por k-tranche
for i=1:n_dir
for ii=1:10
vel_sup=m_maior8(I2,ii);
vel_inf=m_menor8(I2,ii);
vel_max=m_velmax(I2,ii);
end
end
for i=1:n_dados
% velocidade RM corrigida por k-tranche (Vturb_predicted)
rews(i,13)=rews(i,12)*rews(i,3);
% residual por k-tranche
rews(i,14)=rews(i,13)-rews(i,4);
% racio medio setor seguinte
rews(i,15)=catA_ktranche(I+1,coluna(ktranche));
% velocidade RM corrigida setor seguinte
rews(i,16)=rews(i,15)*rews(i,3);
% self_consistency_parameter setor seguinte
rews(i,17)=rews(i,16)/rews(i,4);
% residual setor seguinte
rews(i,18)=rews(i,16)-rews(i,4);
% racio medio setor anterior
rews(i,19)=catA_ktranche(I-1,coluna(ktranche));
% velocidade RM corrigida setor anterior
rews(i,20)=rews(i,19)*rews(i,3);
% self_consistency_parameter setor anterior
rews(i,21)=rews(i,20)/rews(i,4);
% residual setor anterior
rews(i,22)=rews(i,20)-rews(i,4);
end
% cálculo das incertezas C.6.1.1 e C.6.1.2 - categoria A
for i=1:10
incerteza(2,i)=nanstd(rews(I,14));% desvio padrao residual para cada
k-tranche (C.5), ignorando os NaN
% incerteza estatistica categoria A
% graus de liberdade
% f=total de elementos de cada k-tranche - 1 * n° de direções
f=incerteza(1,i)-n_dir;
incerteza(3,i)=incerteza(2,i)*sqrt(incerteza(1,i)-
1)/sqrt(f*incerteza(1,i));
incerteza(4,i)=abs(nanmean(rews(I,14)));% valor absoluto da média dos
residuos, ignorando os NaN
end
% incerteza total de categoria A (m/s)
incerteza_total=sqrt(sum(incerteza(3,:).^2)/10);
% tabela C.4 - incerteza suplementar devido às variações das tranches
for i=1:n_dir
var_cor(i,2)=mean(rews(I1,21));% média self consistency parameter
setor anterior com direção de catA_ktranche
var_cor(i,3)=mean(rews(I1,17));% média self consistency parameter
setor seguinte com direção de catA_ktranche
end

```

## 4.6 Resultados pela norma IEC de 2005

Para comparação de resultados com a versão anterior da norma, foi implementado, também, o procedimento da IEC 61400-12-1 de 2005.

### 4.6.1 Construção da tabela de rácios para correção dos fluxos

O cálculo dos rácios para a correção dos fluxos foi feito com o auxílio de uma matriz ordenada por direções do vento fatiadas em grupos de 10° e contendo os dados medidos e filtrados, i.e. com a exclusão de velocidades menores que 4 m/s e superiores a 16 m/s e dos dados erróneos.

No item 3.1.1 explica-se o processo de filtragem de dados.

Resulta daqui a Tabela 47 com a validação das direções de vento nos setores de 40° a 100° e de 260° a 310°.

Tabela 47 – Direções validadas pelo método da norma IEC de 2005

Direções (°)	Dados totais	V≤8 m/s	V>8 m/s	Direções (°)	Dados totais	V≤8 m/s	V>8 m/s
10	48	46	2	190	30	30	0
20	56	56	0	200	47	47	0
30	98	84	14	210	84	80	4
40	147	94	53	220	73	63	10
50	440	253	187	230	46	41	5
60	1052	782	270	240	78	74	4
70	1523	1112	411	250	222	205	17
80	1186	901	285	260	663	531	132
90	717	556	161	270	1543	936	607
100	349	280	69	280	1282	652	630
110	108	102	6	290	1026	338	688
120	83	77	6	300	543	204	339
130	32	31	1	310	203	141	62
140	23	23	0	320	107	88	19
150	8	8	0	330	49	39	10
160	6	6	0	340	37	37	0
170	10	10	0	350	38	37	1
180	18	18	0	360	52	42	10

Para todos os momentos destas direções validadas, são calculados os rácios e fatiadas as velocidades em intervalos de 0,5 m/s, o que dá origem a uma matriz da qual se apresenta, na Tabela 48, um excerto para algumas das direções de 40°, 60°, 280° e 300°.

Tabela 48 – Valores de alguns rácios por direção, pela norma IEC de 2005

Fatias de direção (°)	Velocidades rotor RM (m/s)	Velocidades rotor TM (m/s)	Rácio	Fatias de velocidade RM (m/s)
40	12,47	13,52	1,084	13,5
40	10,18	11,11	1,091	11,0
40	8,86	9,57	1,080	9,5
40	9,78	10,50	1,073	10,5
40	8,99	10,27	1,142	10,5
40	9,75	10,84	1,112	11,0
40	10,79	11,79	1,093	12,0
40	10,42	11,71	1,124	11,5
60	9,10	10,20	1,120	10,0
60	9,07	10,04	1,107	10,0
60	9,54	10,40	1,090	10,5
60	8,52	9,51	1,116	9,5
60	8,49	9,28	1,093	9,5
60	7,92	9,01	1,138	9,0
60	8,01	8,72	1,089	8,5
60	8,07	9,07	1,123	9,0
280	4,05	4,63	1,144	4,5
280	5,20	4,40	0,847	4,5
280	4,46	4,53	1,016	4,5
280	6,14	5,08	0,827	5,0
280	5,25	5,69	1,085	5,5
280	5,07	5,63	1,111	5,5
280	6,85	7,27	1,062	7,5
280	8,41	8,62	1,026	8,5
300	11,31	10,99	0,971	11,0
300	11,81	11,01	0,932	11,0
300	12,03	12,69	1,055	12,5
300	10,52	10,64	1,011	10,5
300	9,66	9,61	0,995	9,5
300	7,52	6,83	0,908	7,0
300	6,38	6,77	1,061	7,0
300	5,52	5,42	0,981	5,5

Sobre as direções validadas e com as velocidades fatiadas em intervalos de 0,5 m/s, cria-se a tabela de rácios de correção do fluxo (Tabela 49).

Tabela 49 – Tabela de rácios não corrigida

		Velocidades fatiadas em 0,5 m/s												
		4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10
Direções fatiadas em 10 °	40	NaN	1,303	1,283	1,160	1,191	1,108	1,116	1,173	1,135	1,155	1,155	1,105	1,119
	50	1,070	1,131	1,115	1,069	1,125	1,142	1,164	1,084	1,167	1,107	1,119	1,119	1,128
	60	1,148	1,130	1,145	1,113	1,149	1,126	1,071	1,090	1,106	1,095	1,103	1,119	1,092
	70	1,048	1,100	1,044	1,086	1,066	1,123	1,089	1,074	1,124	1,088	1,107	1,093	1,112
	80	1,002	1,016	0,984	1,032	1,023	1,046	1,066	1,093	1,069	1,076	1,068	1,085	1,082
	90	1,007	0,997	0,966	1,050	1,038	1,048	1,067	1,089	1,054	1,033	1,095	1,038	1,048
	100	0,975	0,983	0,975	0,977	1,049	1,054	1,016	0,998	1,041	1,077	1,015	1,061	1,045
	260	0,891	1,132	1,039	1,009	1,166	1,081	1,121	1,147	1,049	1,090	1,129	1,091	1,059
	270	0,951	1,057	1,016	0,933	1,033	1,060	1,058	1,069	1,019	1,049	0,975	0,991	1,004
	280	0,952	0,938	0,955	0,897	0,938	0,972	0,933	0,995	1,000	0,986	0,984	0,975	1,010
	290	1,098	0,928	1,041	0,972	1,004	0,879	1,162	1,060	1,022	0,947	0,997	1,019	1,016
300	1,077	1,192	1,231	0,984	1,153	0,981	0,918	0,913	0,978	0,919	0,918	1,020	0,967	
310	0,988	1,088	1,146	1,012	1,035	0,919	1,100	1,018	0,993	1,038	0,973	1,043	1,052	

		Velocidades fatiadas em 0,5 m/s											
		10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5	15	15,5	16
Direções fatiadas em 10 °	40	1,107	1,131	1,149	1,084	NaN	1,070	1,084	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
	50	1,126	1,100	1,106	1,127	1,120	1,116	1,117	1,106	1,125	1,123	1,120	NaN
	60	1,134	1,137	1,124	1,154	1,131	NaN	1,127	1,119	NaN	NaN	NaN	NaN
	70	1,105	1,097	1,100	1,097	1,134	1,103	1,145	1,110	NaN	NaN	NaN	NaN
	80	1,076	1,076	1,102	1,110	1,066	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
	90	1,045	1,073	1,063	1,053	1,089	1,050	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
	100	1,033	1,031	1,037	1,039	1,044	NaN	NaN	NaN	NaN	1,056	NaN	NaN
	260	1,035	1,061	1,056	1,101	1,066	1,061	1,057	NaN	NaN	1,165	NaN	NaN
	270	0,973	1,021	1,024	1,013	0,998	1,021	1,004	1,017	1,042	1,066	1,005	NaN
	280	1,014	1,025	1,020	1,042	0,981	0,968	1,005	0,991	0,980	1,041	0,990	NaN
	290	0,988	1,003	1,029	1,020	0,953	1,068	1,044	1,012	1,030	1,012	1,038	1,060
300	1,010	1,077	1,019	0,929	1,004	1,021	1,024	1,029	1,065	0,932	0,974	0,966	
310	1,077	1,096	1,173	1,221	0,881	1,181	0,980	1,033	1,004	NaN	NaN	NaN	

Eliminando os elementos em que a correção do fluxo se altera em mais de 2%, ficamos com a tabela final de rácios (Tabela 50).

Tabela 50 – Tabela de rácios corrigida

		Velocidades fatiadas em 0,5 m/s												
		4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10
Direções fatiadas em 10 °	40	NaN	1,303	NaN	NaN	NaN	1,108	NaN	NaN	1,135	1,155	NaN	1,105	1,119
	50	NaN	1,131	NaN	NaN	1,125	1,142	NaN	NaN	NaN	1,107	1,119	1,119	1,128
	60	1,148	1,130	NaN	NaN	1,149	NaN	1,071	1,090	1,106	1,095	1,103	1,119	NaN
	70	NaN	NaN	NaN	1,086	NaN	NaN	1,089	NaN	NaN	1,088	1,107	1,093	1,112
	80	1,002	NaN	NaN	1,032	1,023	1,046	1,066	1,093	1,069	1,076	1,068	1,085	1,082
	90	1,007	NaN	NaN	1,050	1,038	1,048	1,067	NaN	1,054	NaN	NaN	1,038	1,048
	100	0,975	0,983	0,975	NaN	1,049	NaN	1,016	NaN	NaN	NaN	NaN	1,061	1,045
	260	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	1,121	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	1,059
	270	NaN	NaN	NaN	NaN	1,033	1,060	1,058	NaN	1,019	NaN	0,975	0,991	NaN
	280	0,952	0,938	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0,995	1,000	0,986	0,984	NaN	1,010
	290	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0,997	1,019	1,016
300	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0,918	NaN	NaN	0,919	NaN	NaN	NaN	
310	NaN	NaN	NaN	1,012	NaN	NaN	NaN	1,018	NaN	NaN	NaN	1,043	1,052	

		Velocidades fatiadas em 0,5 m/s											
		10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5	15	15,5	16
Direções fatiadas em 10 °	40	1,107	1,131	NaN	NaN	NaN	1,070	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
	50	1,126	1,100	1,106	1,127	1,120	1,116	1,117	1,106	1,125	1,123	NaN	NaN
	60	1,134	1,137	1,124	1,154	NaN	NaN	1,127	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
	70	1,105	1,097	1,100	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
	80	1,076	1,076	1,102	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
	90	1,045	1,073	1,063	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
	100	1,033	1,031	1,037	1,039	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
	260	1,035	1,061	NaN	NaN	1,066	1,061	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
	270	NaN	1,021	1,024	1,013	0,998	1,021	1,004	1,017	1,042	NaN	NaN	NaN
	280	1,014	1,025	1,020	NaN	0,981	NaN	1,005	0,991	NaN	NaN	NaN	NaN
	290	0,988	1,003	1,029	NaN	NaN	1,068	NaN	1,012	1,030	1,012	1,038	NaN
300	NaN	NaN	NaN	NaN	1,004	1,021	1,024	NaN	NaN	NaN	0,974	NaN	
310	1,077	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	1,033	NaN	NaN	NaN	NaN	

Extrato do código Matlab<sup>®</sup> correspondente ao cálculo dos rácios.

```
% Site Calibration normativa de 2005
% contagem de dados nas fatias de direção e seleção das direções
válidas
for i=10:10:360 % de 10° a 360° m/s de 10° em 10°
n=i/10;
bin(n,1)=i;% fatia de direção de 10°
bin(n,2)=sum(I); % total de dados na fatia de direção
bin(n,3)=sum(rmmatriz(I,4)<=8); % total de vel <= 8 m/s na direção
bin(n,4)=sum(rmmatriz(I,4)>8); % total de vel > 8 m/s na direção
end
% exclusão dos setores de direção com dados de v<=8 e v>8 menores a 6h
% e dos setores de direção com menos de 24 horas de dados
% 6 horas de dados = 36 leituras
% 24 horas de dados = 144 leituras
I=bin(:,2)<144 | bin(:,3)<36 | bin(:,4)<36;
bin(I,:)=NaN;
% criar matriz com os setores de direções válidos
rm(:,1)=rmmatriz(:,6);% direções em fatias de 10°
rm(:,2)=rmmatriz(:,4);% velocidades rotor RM
rm(:,3)=rmmatriz(:,7);% velocidades rotor TM
rm(dir_sim,5)=rm(dir_sim,3)./rm(dir_sim,2);% racio de velocidades
% construção da tabela da variação de rácios entre setores vizinhos
% por direção
% exclusão do elemento se diferença maior a 0.02
var_racios(var_racios>0.02)=NaN;% exclui os elementos superiores a
0.02
```

## 4.7 Medição da curva de potência

Para os cálculos que conduzirão ao gráfico da medição da curva de potência, são necessárias medições do vento no mastro meteorológico de referência e as medições da produção energética da própria turbina. Este conjunto de dados é registado em simultâneo.

São utilizados dados fornecidos pela empresa Megajoule e referentes a uma turbina instalada no parque eólico na Turquia, de potência nominal de 2.850 kW.

A estes dados, foram retirados os valores erróneos, as direções do vento foram fatiadas em grupos de 10° e foram anuladas as fatias com menos de 30 minutos de dados. Foi também confirmada a simultaneidade entre dados.

As velocidades do vento sobre o rotor do mastro de referência foram corrigidas através da matriz de rácios e normalizadas pela densidade corrigida do ar no local, de 1.020 kg/m<sup>3</sup>, sendo divididas em grupos de 0,5 m/s.

Para o cálculo da densidade do ar, faz-se uso da temperatura do ar e da altitude do local e utiliza-se a equação (4.1) e a equação (4.2) [21] [6].

### a) Pressão atmosférica em função da altitude

$$p = 101,325 \times (1 - 2,25577 \times 10^{-5} \times Z)^{5,2559} \quad (4.1)$$

Com:

$p$  – pressão barométrica (kPa)

$Z$  – altitude do local (m)

### b) Densidade do ar em função da pressão barométrica

$$\rho = 1,225 \times \left( \frac{288,15}{T} \right) \times \left( \frac{p}{1013,3} \right) \quad (4.2)$$

Com:

$\rho$  – densidade do ar (kg/m<sup>3</sup>)

$p$  – pressão barométrica (mbar)

$T$  – temperatura absoluta (°K)

Com as médias das velocidades normalizadas e com as médias das potências medidas na turbina nestas velocidades, e por aplicação dos métodos de calibração do local abordados (o da matriz, o da regressão e o da norma IEC de 2005), elaboram-se as tabelas de potências médias por fatia de velocidades, Tabela 51, Tabela 52 e Tabela 53 e os gráficos da Figura 108 à Figura 110, da Figura 111 à Figura 113 e da Figura 114 à Figura 116.

O coeficiente de potência indica com que eficiência o aerogerador converte a energia do vento em energia elétrica - Figura 108, Figura 111 e Figura 114.

Na Figura 109, na Figura 112 e na Figura 115 compactam-se e relacionam-se pelos respectivos métodos, os dados normalizados das potências máximas, médias e mínimas, com as velocidades previstas na turbina.

Na Figura 110, na Figura 113 e na Figura 116, com as potências elétricas médias, constrói-se a curva de potência da turbina em cada método.

São estas as curvas que serão comparadas com a curva de potência garantida pelo fabricante.

## 4.7.1 Gráficos resultantes da aplicação do método da regressão linear

Tabela 51 – Potências médias por fatia de velocidade (método da regressão)

Velocidades fatiadas (m/s)	Número de dados ---	Média velocidades normalizadas (m/s)	Potência média (kW)	Cp ---
4,5	96	4,25	27,93	0,11
5,0	131	4,76	84,32	0,24
5,5	161	5,25	189,83	0,38
6,0	184	5,77	336,75	0,48
6,5	241	6,27	469,08	0,51
7,0	299	6,75	609,72	0,53
7,5	307	7,24	780,93	0,53
8,0	409	7,74	984,62	0,54
8,5	351	8,26	1251,08	0,55
9,0	392	8,77	1455,63	0,53
9,5	352	9,24	1633,92	0,51
10,0	337	9,75	1822,51	0,48
10,5	277	10,24	2113,33	0,47
11,0	207	10,74	2280,93	0,44
11,5	184	11,24	2447,73	0,40
12,0	126	11,75	2614,83	0,37
12,5	125	12,23	2696,01	0,33
13,0	99	12,76	2773,86	0,30
13,5	95	13,26	2793,31	0,26
14,0	97	13,75	2812,06	0,24
14,5	93	14,24	2837,28	0,20
15,0	82	14,76	2846,68	0,18
15,5	56	15,25	2854,91	0,16
16,0	47	15,72	2854,11	0,15

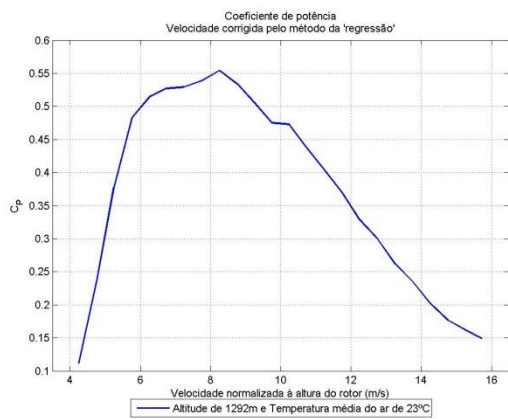


Figura 108 – Coeficiente de potência (método da regressão)

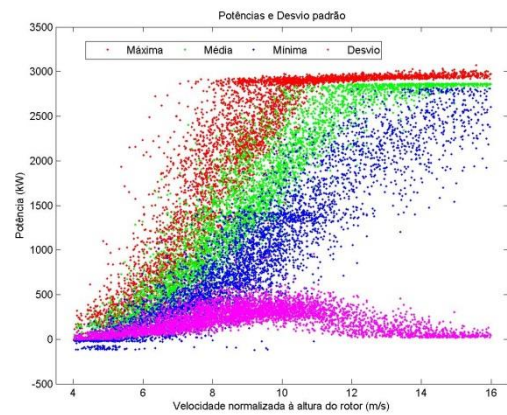


Figura 109 – Potências limite (método da regressão)

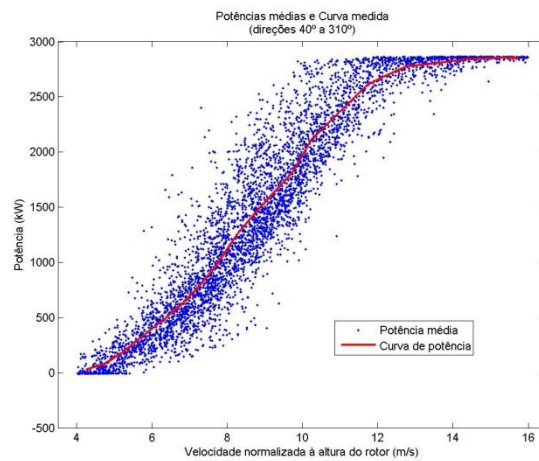


Figura 110 – Potências médias e curva de potência (método da regressão)

## 4.7.2 Gráficos resultantes da aplicação do método da matriz de direções/ expoentes

Tabela 52 – Potências médias por fatia de velocidade (método da matriz)

Velocidades fatiadas (m/s)	Número de dados ---	Média velocidades normalizadas (m/s)	Potência média (kW)	Cp ---
4,5	75	4,26	51,18	0,15
5,0	120	4,75	97,91	0,21
5,5	131	5,24	175,86	0,29
6,0	165	5,77	323,12	0,39
6,5	239	6,26	470,15	0,45
7,0	268	6,75	561,34	0,43
7,5	285	7,26	753,04	0,46
8,0	359	7,74	921,83	0,47
8,5	367	8,25	1146,84	0,48
9,0	413	8,74	1391,87	0,49
9,5	383	9,25	1620,50	0,48
10,0	331	9,75	1795,84	0,46
10,5	271	10,24	2055,95	0,45
11,0	232	10,74	2258,08	0,43
11,5	173	11,22	2409,81	0,40
12,0	117	11,73	2553,47	0,37
12,5	100	12,24	2656,79	0,34
13,0	101	12,77	2747,73	0,31
13,5	89	13,24	2778,19	0,28
14,0	82	13,73	2797,28	0,25
14,5	76	14,24	2816,37	0,23
15,0	50	14,73	2840,76	0,21
15,5	61	15,23	2847,12	0,19
16,0	70	15,74	2854,58	0,17

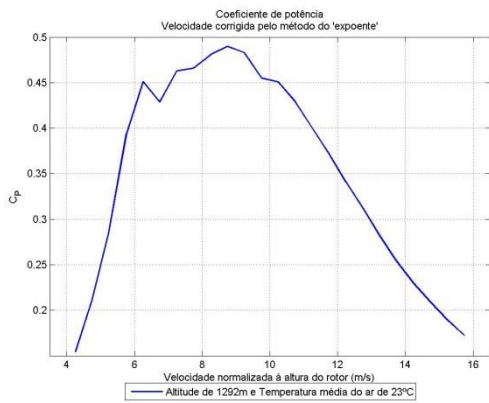


Figura 111 – Coeficiente de potência (método da matriz)

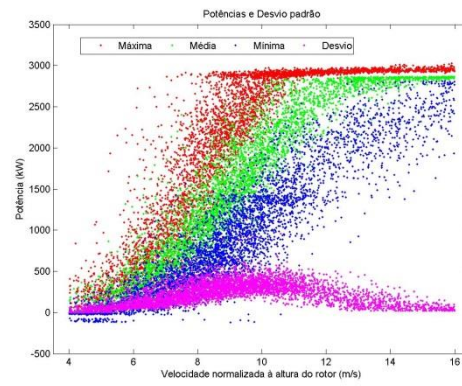


Figura 112 – Potências limites (método da matriz)

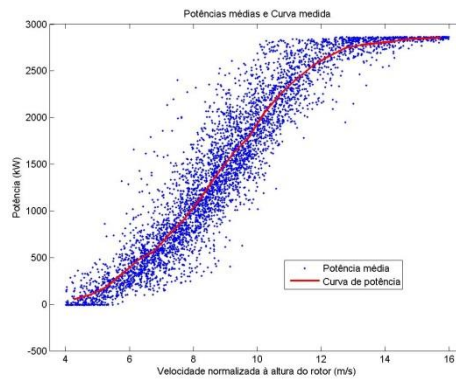


Figura 113 – Potências médias e curva de potência (método da matriz)

## 4.7.3 Gráficos resultantes da aplicação da norma IEC de 2005

Tabela 53 – Potências médias por fatia de velocidade (método da norma IEC de 2005)

Velocidades fatiadas (m/s)	Número de dados ---	Média velocidades normalizadas (m/s)	Potência média (kW)	Cp ---
5,0	5	4,94	106,50	0,21
5,5	30	5,24	248,36	0,41
6,0	0	---	---	---
6,5	24	6,39	588,63	0,53
7,0	117	6,70	482,47	0,38
7,5	111	7,29	772,21	0,47
8,0	435	7,79	1047,14	0,52
8,5	304	8,16	1236,36	0,54
9,0	110	8,67	1457,67	0,53
9,5	183	9,35	1688,48	0,49
10,0	247	9,69	1865,26	0,48
10,5	230	10,23	2126,25	0,47
11,0	97	10,81	2230,19	0,42
11,5	152	11,21	2328,26	0,39
12,0	36	11,63	2353,75	0,35
12,5	40	12,26	2586,04	0,33
13,0	25	12,81	2724,29	0,31
13,5	20	13,15	2796,97	0,29
14,0	71	13,78	2784,67	0,25
14,5	43	14,18	2816,17	0,23
15,0	21	14,78	2817,08	0,21
15,5	7	15,38	2844,95	0,18

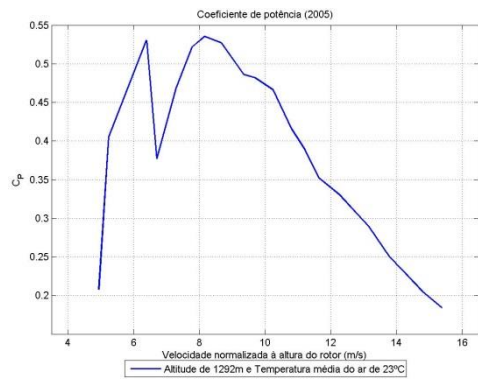


Figura 114 – Coeficiente de potência (método da norma IEC de 2005)

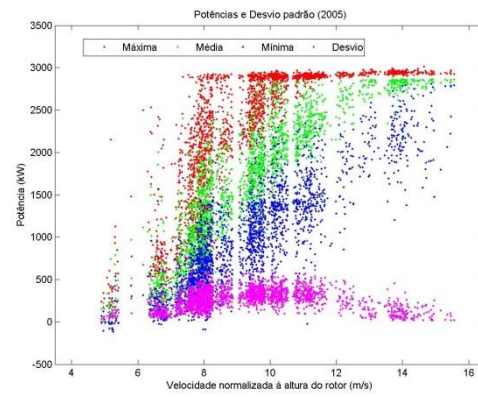


Figura 115 – Potências limite (método da norma IEC de 2005)

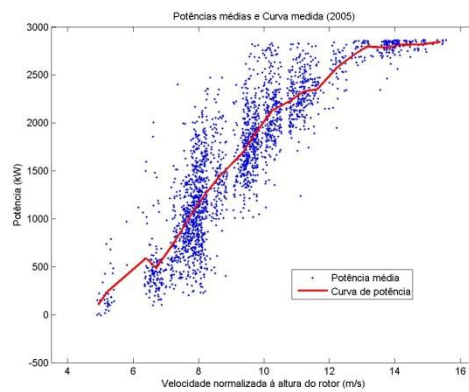


Figura 116 – Potências médias e curva de potência (método da norma IEC de 2005)

### Extrato do código Matlab<sup>®</sup> correspondente ao cálculo da curva de potência

```

dados = importdata('dados_potencia_medida_turbina.txt', delimiter,
headerlines);
% importar dados da produção dada pelo fabricante
fab = importdata('turbina.dat', delimiter, headerlines);
% filtra por erro -999.99 os dados da potência medida da tubina
% e filtra os erro de direção 999
for i=1:N
if matriz(i,6)==999 % filtra direções
end
if matriz(i,2)==-999.99 % filtra potências
end
end
% fatiar as direções de 10° em 10°
matriz(:,8)=ceil(matriz(:,6)./10).*10;
% filtra por número de dados na tranche (normativa)
I=matriz(:,9)<3; % para eliminar tranche com número de dados < a 3
% corrigir as velocidades Hub RM
for i=1:N
matriz(i,10)=m*matriz(i,7)+b; % correção da velocidade pela regressao
else
matriz(i,10)=NaN; % fatia de direção não válida
end
end
% velocidades normalizadas com a altitude
% é usada a fórmula geral da correção da densidade
% em função da altitude e da temperatura
KPa=101.325*(1-2.25577*10^(-5)*altitude)^5.2559;
mbar=KPa*10;
ro_cor=1.225*(288.15/(273.15+temperatura))*(mbar/1013.3);
% velocidade normalizada pela densidade corrigida
% potência à densidade extrapolada
fabrica(:,2)=fab.data(:,i1)-(d1-d2).*(fab.data(:,i1)-
fab.data(:,i2))./(d1-d3);
% Coeficiente de potência medida
Cp=(vel_fatias(i,5)*1000)./(0.5*ro_cor*area_varrimento*vel_fatias(i,4)
.^3);
end
% Filtra por número de dados na fatia
I=vel_fatias(:,2)<=3;

```

#### 4.7.4 Gráficos de curvas de potência medida

A Figura 117, a Figura 118 e a Figura 119 são o resultado de todo o trabalho atrás realizado. Com estes gráficos, compara-se a produção medida com a garantida pelo fabricante, ficando-se a saber se a turbina eólica tem produzido a energia que é expectável que produza.

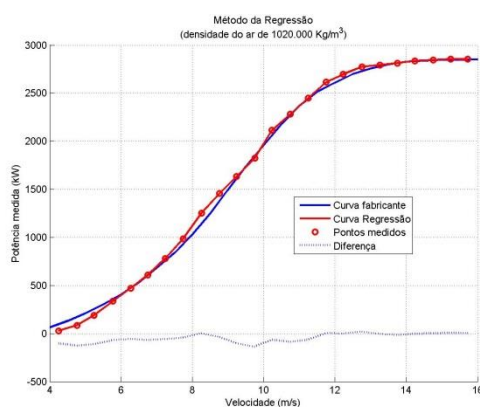


Figura 117 – Curva de potência medida (pelo método da regressão)

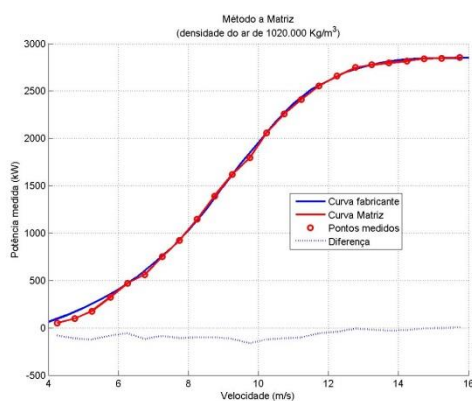


Figura 118 – Curva de potência medida (pelo método da matriz)

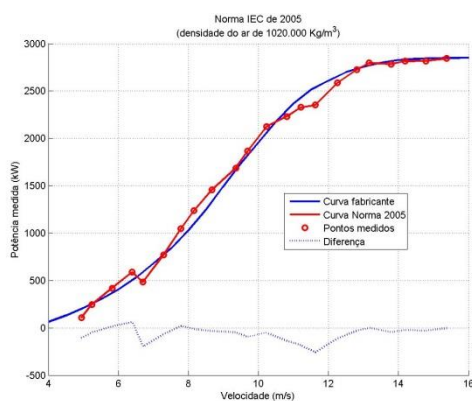


Figura 119 – Curva de potência medida (pela norma IEC de 2005)

#### 4.8 Comparação dos métodos 4.4, 4.5 e 4.6.

A comparação entre a potência medida e a garantida é conseguida comparando a área sob cada uma das curvas, como referido em 4.7.4. Com este propósito e fazendo uso de uma folha de cálculo em Excel® utilizou-se um método de integração numérica. Nos cálculos realizados é utilizada a média das velocidades em cada intervalo de 0,5 m/s com o critério  $V_i - 0,25 < V_i \leq V_i + 0,25$ .

A comparação dos resultados obtidos, traduzidos nas áreas das curvas de potência medidas nos três métodos, faz-se na Tabela 54 e na Tabela 55.

Tabela 54 – Resultados da comparação dos três métodos de calibração do local

	Regressão	Matriz	Norma de 2005	Fábrica
<b>Calibração do local</b>				
Dados iniciais	12.027	12.027	12.027	-----
Dados válidos	10.899	9.269	5.960	-----
Tempo equivalente aos dados válidos (dias)	76	64	41	-----
Direções válidas (°)	40 a 100 e 250 a 310	40 a 100 e 260 a 310	40 a 100 e 260 a 310	-----
Incerteza de categoria A (m/s)	0,017	0,017	-----	-----
<b>Medição da curva de potência</b>				
Dados iniciais	6.048	6.048	6.048	-----
Dados válidos	4.748	4.558	2.308	-----
Tempo equivalente aos dados válidos (dias)	33,0	31,7	16,0	-----
Velocidade mínima (m/s)	4,25	4,26	4,94	4,00
Velocidade máxima (m/s)	15,72	15,74	15,38	16,00
Potência mínima (kW)	27,9	51,2	106,5	62,6
Potência máxima (kW)	2854,1	2854,6	2845,0	2850,0

Tabela 55 – Curvas medidas versus curva do fabricante

Curvas medidas versus curva do fabricante	
	Área aproximada por integração
<b>Área sob curva "Norma de 2005"</b>	18.753
Área sob curva "Fábrica"	19.086
Diferença entre área medida e garantida	-333
<b>Diferença (%)</b>	<b>-1,7%</b>
<b>Área sob curva "Matriz"</b>	19.731
Área sob curva "Fábrica"	20.596
Diferença entre área medida e garantida	-865
<b>Diferença (%)</b>	<b>-4,2%</b>
<b>Área sob curva "Regressão"</b>	19.978
Área sob curva "Fábrica"	20.596
Diferença entre área medida e garantida	-618
<b>Diferença (%)</b>	<b>-3,0%</b>

Para aplicação dos critérios de medição da curva de potência pela norma IEC de 2005, os 16 dias de medições válidas são insuficientes. Somente 2.308 dados passaram os filtros impostos pela norma. Por este motivo, o valor encontrado para a diferença entre curvas não é um resultado satisfatório, o que se pode verificar pela Figura 120.

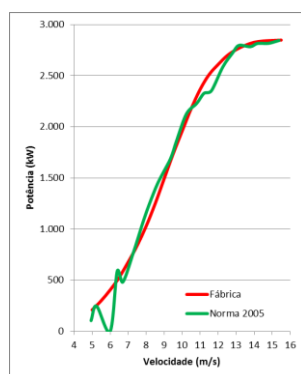


Figura 120 – Curva medida pela Norma IEC de 2005 vs curva garantida

Uma das fatias de velocidade que não aparece na matriz de cálculo que resulta da aplicação do método da norma IEC de 2005 é a de 6,0 m/s, pelo que para o cálculo da diferença entre curvas, interpolou-se as repetidas velocidade e potência médias. As curvas resultantes da aplicação dos 2 métodos da nova norma dão perdas de potência, com o método da matriz a afastar-se mais da curva do fabricante. Sendo o fator de corte considerado, pelo critério normativo, sem influência significativa, dos dois métodos, o da regressão, é o que fornece o resultado mais próximo do esperado.

**CONCLUSÕES E TRABALHO**

**FUTURO**



## 5 CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

### 5.1 Conclusões

A medição da curva de potência de um aerogerador requer que, previamente, se faça uma calibração do local.

Este processo requer a instalação de dois mastros meteorológicos, permitindo a recolha de dados suficientes para uma relação de velocidades do vento entre as duas localizações.

Nesta tese, implementaram-se três métodos de calibração do local e aplicaram-se à medição da curva de potência de uma turbina num parque eólico, na Turquia. Dois, segundo a nova normativa IEC 61400-12-1:2017, e um terceiro, segundo a versão anterior, de 2005.

A norma é ambígua relativamente aos limites a impor nos intervalos de dados válidos a tratar. A opção tomada nesta tese foi a de considerar os intervalos de dados abertos à esquerda e fechados à direita. Esta ação é incidente para os intervalos de velocidades, direções e expoentes de corte.

Com o processo de calibração do local completo, o mastro que está no local da turbina é retirado e uma turbina é instalada. Com a estimativa das velocidades do vento nesta localização e as medições de potência da turbina, obtém-se a curva de potência medida.

Os novos métodos estimaram uma curva de potência abaixo da curva garantida, o que está de acordo com o resultado esperado. A curva resultante do método da norma IEC 2005 aponta para uma ainda menor perda de potência. Inconsistências nos dados utilizados e/ou poucos dados recolhidos, podem explicar este resultado, o que induz a necessidade de se testarem os métodos implementados noutros casos teste.

Do explicado nesta tese, através dos múltiplos gráficos e tabelas, facilmente se conclui que o processo que conduz à elaboração da curva medida de potência, não é um processo simples.

A necessidade de múltiplas simulações e análises conferem um grau de complexidade elevado à obtenção dos fatores de correlação fiáveis entre o mastro de referência e a turbina.

A norma IEC de 2017, alterando de forma significativa a anterior de 2005, traz uma nova metodologia, que, ao ter em conta mais fatores de influência do vento sobre a

turbina, garante que os resultados do processo que conduz à medição da curva de potência, se aproximam mais da realidade.

Também fica demonstrado, que os novos métodos conseguem um maior aproveitamento de dados, o que indicia um tempo menor na recolha de dados representativos das características do vento no local.

Todo o processo descrito nesta tese conduz a um único propósito: o de aferir se a turbina produz, ou não, a energia elétrica que o fabricante da eólica garante.

Uma das condições iniciais impostas para a obtenção dos resultados desta tese, foi a utilização de um suporte informático que permitisse uma rápida obtenção de resultados, visto que iríamos trabalhar com bases de dados com um número significativo de registos.

A linguagem de programação escolhida para este trabalho foi a programação em código Matlab®.

Havia nesta escolha, um risco devido ao fato de esta linguagem me ser totalmente desconhecida. Contudo, o desafio foi amplamente gratificante e ultrapassado. Muita leitura e aprendizagem sobre este código culminaram numa programação modular intuitiva e que fica preparada para ser utilizada com os dados da medição do vento de um qualquer parque eólico, permitindo a análise gráfica e numérica da influência do vento sobre o rotor da turbina eólica.

## 5.2 Trabalho futuro

A primeira recomendação para trabalho futuro é a de se realizarem mais medições da curva noutros locais, para confirmar as conclusões acima elencadas.

Para além disso, é muito importante a contabilização das incertezas de medição, pois podem representar significativas variações na produção da energia elétrica.

As incertezas do tipo B, devido à sua complexidade matemática, exigiriam um tempo significativo que, a somar aos 7 meses da execução do propósito desta tese, prolongariam a conclusão deste texto muito para lá do tempo limite.

O anexo D da normativa atual faz referência a incertezas associadas a 13 parâmetros de medida, que englobam 67 componentes de incerteza, que incluem desde a potência elétrica à incerteza do sistema de aquisição de dados, passando pelas incertezas de todos os instrumentos de medição (de anemómetros a sensores de temperatura).

Neste trabalho de tese, e no respeitante ao cálculo das incertezas, só a do tipo A, relacionada com a variabilidade estatística na calibração do local, foi completada.

Também será de interesse executar-se, num trabalho futuro, a verificação da influência da estabilidade atmosférica em momentos diurnos e em momentos noturnos, e também por estações do ano.



**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES  
DE INFORMAÇÃO**



## 6 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

[1] – IEC (2017). Wind energy generation systems. Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines. IEC 61400-12-1 Edition 2

[2] – Dan Bernadett, Harald Mellinghoff (2017).  
Webinar\_UL\_IEC61400\_12\_1\_SEPT\_17\_FINAL.pdf

[3] – Ricardo Dutra. Energia Eólica, Princípios e Tecnologia. CRESEB

[4] – Prof. Alexandro Vladuro da Rocha (2014). Energia eólica, unidade II e III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Rio Grande do Norte.

[5] – Rui M.G. Castro (2005). Introdução à Energia Eólica. Instituto Superior Técnico de Lisboa.

[6] – Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi (2011). Wind Energy Handbook. John Wiley & Sons, Ld

[7] – Comisión Electrotécnica Internacional. (página consultada em junho de 2017).  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Comisi%C3%B3n\\_Electrot%C3%A9cnica\\_Internacional](https://es.wikipedia.org/wiki/Comisi%C3%B3n_Electrot%C3%A9cnica_Internacional)

[8] – Andressa Maia Lima, José Benedito Santos Melo, António Machado de Souza Neto (2017). Análise comparativa entre normas de projetos de aerogeradores. SIMEP.

[9] – IEC 61400 (página consultada em junho de 2017).  
[https://en.wikipedia.org/wiki/IEC\\_61400](https://en.wikipedia.org/wiki/IEC_61400)

[10] – Alexandre Delwart, Mathias Hoelzer. Validity check of numerical site calibration according to IEC 61400-12-1 ed.1 and Measnet PPMPv4. Windtest Ibérica SL.

[11] – Sergio Saúl Osuna Peraza (página pessoal). Energia Eólica.  
<http://www.profesaulosuna.com/data/files/ENERGIA%20RENOVABLES/EEOLICA/UNIEE.pdf>

[12] – Pedro Fernández Díez (1993). Energia eólica. Biblioteca sobre Ingeniería Energética.

- [13] – Catarina Salgado Casadinho (2014). Base de dados do potencial eólico em Portugal Continental. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- [14] – Electrobrás (2008). Estado de Alagoas – Atlas Eólico. Electrobrás.
- [15] – José Tor Jervell (2008). Estudo da influência das características do vento no desempenho de aerogeradores. Faculdade de Engenharia do Porto.
- [16] – WindPower Wiki. Danish Wind Industry Association. (consultado várias vezes)  
[http://www.windpower.org/en/knowledge/windpower\\_wiki.html](http://www.windpower.org/en/knowledge/windpower_wiki.html)
- [17] – J.J.Manwell, J.G.McGowam, A.L.Rogers (2002). Wind Energy Explained. University of Massachusetts (USA).
- [18] – Instituto Português de Acreditação - IPAC (2015). Avaliação da incerteza de medição em calibração.
- [19] – Adriane F. dos Santos e outros (2013). Estabilidade atmosférica e desenvolvimento de nuvens. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação do Brasil. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- [20] D. V. Kanellopoulos (2016). Site selection. International Hellenic University.
- [21] ASHRAE Fundamentals 2013. Ch01-Psychrometrics. ASHRAE.

**ANEXOS**



## 7 ANEXOS

### 7.1 Tratamento de dados medidos RM e TM

```

clc
clear
for k=1:numficheiros
    rmatriz=zeros(1,7);
    tmatriz=zeros(1,7);
    rvmatriz=zeros(1,7);
    vtmmatriz=zeros(1,7);
    delimiterIn=', ';
    headerlinesIn=4;
    strdirnome=char(nomeficheiros(k));
    strdirnome1=horzcat(diretorio, strdirnome);
    relatorio{k,2}=strdirnome;
    dados = importdata(strdirnome1, delimiterIn, headerlinesIn);
    nd=size(dados.data);
    ndados=nd(1);
    format bank
    dmatriz=dados.data;
    relatorio{k,1}=0;
    relatorio{k,3}=ndados;
    relatorio{k,6}=0;
    % Filtrar os valores de erro
    rd=1;
    rv=1;
    for m=1:ndados
        if dmatriz(m,3)==99.99
            rmatriz(rd)=dmatriz(m,7);
            rd=rd+1;
        else
            tmatriz(rv,:)=dmatriz(m,:);
            rv=rv+1;
        end
    end
    I=tmatriz(:,2)==0;
    tmatriz(I,2)=360;
    nfldados=ndados-(rd-1);
    nf2dados=nfldados;
    relatorio{k,4}=rd-1;
    relatorio{k,5}=nfldados;
    if strcmp(strdirnome(1:2), 'TM')
        relatorio{k,1}=1;
        rd=1;
        rv=1;
        for m=1:nfldados
            if tmatriz(m,3)<4 || tmatriz(m,3)>16
                rvmatriz(rd)=tmatriz(m,7);
                rd=rd+1;
            else
                vtmmatriz(rv,:)=tmatriz(m,:);
                rv=rv+1;
            end
        end
    end
    I=tmatriz(:,2)==0;
    tmatriz(I,2)=360;

```

```

        nf2dados=nf1dados-(rd-1);
        relatorio{k,6}=rd-1;
    relatorio{k,7}=nf2dados;
    matrizglobal{k,1}=strdirnome;
    matrizglobal{k,2}=tmatriz;
    if relatorio{k,1)==1
        matrizglobal{k,3}=vtmmatriz;
    else
        matrizglobal{k,3}='RM';
    end
end
end

```

## 7.2 Agrupar momentos RM e TM

```

% filtra os momentos de RM pelos momentos TM
diretorioatual=pwd;
cd (diretorio);
load (filename)
numlinhas=numel(matrizglobal)/3;
vtmmatriz1=cell(numlinhas,3);
relatorio=cell(numlinhas,6);
numlinhasmax=0;
nomegravamatriz=cell(2,1);
for u=1:2
    clear vtmmatriz1
    if u==1
        tipo='TM';
        k1=3;
    else
        tipo='RM';
        k1=2
    end
end
nf=0;
for k=1:numlinhas
    nome=matrizglobal{k,1};
    clear a1
    if nome(1:2)==tipo
        nf=nf+1;
        a1=matrizglobal{k,k1};
        vtmmatriz1{nf,1}=a1;
        vtmmatriz1{nf,2}=nome;
        vtmmatriz1{nf,3}=nf;% índice
    end
end
numlinhas=nf;
if numlinhasmax<nf
    numlinhasmax=nf;
end
[~,I] = sort(cellfun('length',vtmmatriz1(:,1)));
vtmmatriz1 = vtmmatriz1(I,:);
comp=cell(numlinhas,2);
for k=1:numlinhas
    comp{k,1}=length(vtmmatriz1{k,1});
    comp{k,2}=k;
end
emptyCells = cellfun('isempty', vtmmatriz1);
all(emptyCells,2);
vtmmatriz1(all(emptyCells,2),:) = [];
% ciclos de comparação de datas
indexados=cell(numlinhas,1);
%1ª passagem ...
H=vtmmatriz1{1,1}(:,7);
for ii = 2:numlinhas

```

```

clear index1 index2 aal aa2;
[~,index1,index2] = intersect(H,vtmmatriz1{ii,1}(:,7));
aal=vtmmatriz1{ii-1,1}(index1,:);
aa2=vtmmatriz1{ii,1}(index2,:);
vtmmatriz1{ii-1,1}={};
vtmmatriz1{ii,1}={};
vtmmatriz1{ii-1}=aal;
vtmmatriz1{ii}=aa2;
H=vtmmatriz1{ii,1}(:,7);
indexados{ii-1}=index1;
indexados{ii}=index2;
end
%2ª passagem (invertida) ...
H=vtmmatriz1{numlinhas,1}(:,7);
for ii = numlinhas-1:-1:1
clear index1 index2 aal aa2;
[~,index1,index2] = intersect(H,vtmmatriz1{ii,1}(:,7));
aal=vtmmatriz1{ii+1,1}(index1,:);
aa2=vtmmatriz1{ii,1}(index2,:);
vtmmatriz1{ii+1,1}={};
vtmmatriz1{ii,1}={};
vtmmatriz1{ii+1}=aal;
vtmmatriz1{ii}=aa2;
H=vtmmatriz1{ii,1}(:,7);
indexados{ii+1}=index1;
indexados{ii}=index2;
end
% Mostra relatorio no ecrã
clc
for k=1:numlinhasmax
fprintf('Número de dados em %s = %5.0f      Número de dados em %s = %5.0f
\n', relatorio{k,1},relatorio{k,2},relatorio{k,4},relatorio{k,5})
end
disp(' ')
fprintf('      Encontradas %d datas iguais      Encontradas %d datas iguais
\n', relatorio{1,3},relatorio{1,6});
disp(' ')
nomeficheiro=sort(nomegravamatriz);
nome=cell(2,1);
nome{1}=horzcat(nomeficheiro{1},'.mat');
nome{2}=horzcat(nomeficheiro{2},'.mat');
matrizRM = importdata (nome{1});
matrizTM = importdata (nome{2});
nelemRM=numel(matrizRM{2,1});
nelemTM=numel(matrizTM{2,1});
[~,ncolunas]=size(matrizRM);%
vtmmatriz1=vertcat(matrizTM,matrizRM);
vtmmatriz1(11,:)={'TM AJUSTADA'};
vtmmatriz1(16,:)={'RM AJUSTADA'};
% ciclos de comparação de datas
% index1 - TM || index2 - RM
[~,index1,index2] = intersect(vtmmatriz1{2,1},vtmmatriz1{7,1});
% index1 = TM
for ii = 1:ncolunas
for iii=2:5
clear a1
a1=vtmmatriz1{iii,ii}(index1,1);
vtmmatriz1{iii+10,ii}=a1;
end
end
% index2 = RM
for ii = 1:ncolunas
for iii=7:10
clear a1
a1=vtmmatriz1{iii,ii}(index2,1);
vtmmatriz1{iii+10,ii}=a1;
end
end

```

```

end
% colocar direções iguais nas duas alturas em cada mastros
dir1=vtmmatriz1{13,1};
dir2=vtmmatriz1{13,2};
z=length(dir1);
I=dir1==999.99;
if length(I)==z
    dir1=dir2;
else
    dir2=dir1;
end
vtmmatriz1{13,1}=dir1;
vtmmatriz1{13,2}=dir2;
dir1=vtmmatriz1{18,1};
dir2=vtmmatriz1{18,2};
z=length(dir1);
I=dir1==999.99;
if length(I)==z
    dir1=dir2;
else
    dir2=dir1;
end
vtmmatriz1{18,1}=dir1;
vtmmatriz1{18,2}=dir2;
matrizRMTMajustada=vtmmatriz1;

```

### 7.3 Divisões da área de varrimento RM e TM

```

clc
cd(diretorio);
load(filename);
for u=1:2
    if u==1
        matriz=matrizRMTMajustada(16:20,:); % RM
        matriz(1,:)=matrizRMTMajustada(6,:);
    else
        matriz=matrizRMTMajustada(11:15,:); % TM
        matriz(1,:)=matrizRMTMajustada(1,:);
    end
    [ndados,numalturas]=size(matriz);
    alturas.ficheiro=zeros(numalturas,1);
    for k=1:numalturas
        nome=char(matriz{1,k});
        alturas.ficheiro(k)=str2double(nome(3:4));
    end
    alturas.ficheiro=sort(alturas.ficheiro,'descend');
    alturas.rotorlido=alturas.ficheiro(1);
% divisões da área de varrimento do rotor
clc
% criar mapa de limites em altura para corte de vento
alturas.naareainf=[];
alturas.naareasup=[];
alturas.cortelimites=zeros(3,1);
alturas.cortelimites(1)=round(alturas.rotor-0.5*diametro);
alturas.cortelimites(2)=round(alturas.rotor);
alturas.cortelimites(3)=round(alturas.rotor+0.5*diametro);
if SimNao==1
    alturas.rotor=alturas.rotorlido;
    z=0;
    for s=numalturas:-1:2
        if alturas.ficheiro(s)>=alturas.cortelimites(1)
            z=z+1;
            alturas.naareainf(z)=alturas.ficheiro(s);

```

```

        end
    end
    numalturasareainf=z;
    if z==0
        diammaximo=fix(2*(alturas.rotor-alturas.ficheiro(numalturas)));
        fprintf('ALTURA MENOR, DA LEITURA REAL, SAI FORA DO LIMITE MÍNIMO
DA ÁREA DE VARRIMENTO DO ROTOR \n')
        fprintf('DIÂMETRO DA TURBINA, NO MÍNIMO, SERÁ DE %3.0f METROS
\n',diammaximo);
        fprintf(' \n');
        cd (diretorioatual);
        return
    end
else
    %altura ao rotor lida do ficheiro, não coincide com o valor do input
    th=0;
    for s=1:numalturas
        if alturas.ficheiro(s)>=round(alturas.rotor/1.01) &&
alturas.ficheiro(s)<=round(alturas.rotor*1.01)
            alturas.rotor=alturas.ficheiro(s);
            th=s;
            break
        end
    end
    if th==0
        fprintf('NÃO EXISTEM ALTURAS COINCIDENTES COM A ALTURA AO ROTOR ...
\n')
        fprintf(' \n');
        cd (diretorioatual);
        return
    end
    z=0;
    for s=numalturas:-1:th+1 %area inferior
        if alturas.ficheiro(s)>=alturas.cortelimites(1)
            z=z+1;
            alturas.naareainf(z)=alturas.ficheiro(s);
        end
    end
    numalturasareainf=z;
    if z==0
        diammaximo=2*(alturas.rotor-alturas.ficheiro(numalturas));
        fprintf('ALTURA MENOR, DA LEITURA REAL, SAI FORA DO LIMITE MÍNIMO
DA ÁREA DE VARRIMENTO DO ROTOR \n')
        fprintf('DIÂMETRO DA TURBINA, NO MÍNIMO, SERÁ DE %3.0f METROS
\n',diammaximo);
        fprintf(' \n');
        cd (diretorioatual);
        return
    end
    z=0;
    for s=1:th-1 %area superior
        if alturas.ficheiro(s)<=alturas.cortelimites(3)
            z=z+1;
            alturas.naareasup(z)=alturas.ficheiro(s);
        end
    end
    numalturasareasup=z;
end
divisoessup=divisoessup/2;
divisoessup=divisoessup;
%matrizdadosdivisoessup para os dados das N divisoes
matrizdadosdivisoessup=cell(6,divisoessup+1);
intervalodivisoessup=diametro/divisoessup;
s=0;
for k=0:intervalodivisoessup:diametro
    s=s+1;
    matrizdadosdivisoessup{1,s}=num2str(k+alturas.cortelimites(1));

```

```

end
%ordenação da matriz por ordem crescente
for k=1:numalturas
    [~,index]=sort(matriz(1,:));
end
    vtmordenada=matriz(:,index);
    nd=horzcat(alturas.naareainf,alturas.rotor,alturas.naareasup);
    v=0;
    posicao.alturas(1,:)=nd;
    posicao.alturarotor(1,1)=alturas.rotor;
    posicao.alturarotor(2,1)=round((diametro/2)/intervalodivisoese)+1;
    aal=cell(5,numalturas);
    for k=1:numalturas
        SimNao=0;
        for s=1: numel(nd)
            if isequal(vtmordenada{1,k}(3:4),num2str(nd(s)))
                SimNao=1;
            end
        end
        end
        if SimNao==1;
            v=v+1;
            aal{1,v}=vtmordenada{1,k};
            aal{2,v}=vtmordenada{2,k};
            aal{3,v}=vtmordenada{3,k};
            aal{4,v}=vtmordenada{4,k};
            aal{5,v}=vtmordenada{5,k};
        end
    end
    z=v+1;
    k=z;
    while numalturas>=z
        aal(:,k)=[];
        z=z+1;
    end
    vtmordenada=aal;
    numalturas=numel(vtmordenada)/5;
for k=1:numalturas
    nd=str2double(char(vtmordenada{1,k}(3:4)));% altura dos dados
    sd=round((nd-alturas.rotor+diametro/2)/intervalodivisoese)+1;
    posicao.alturas(2,k)=sd;
    matrizdadosdivisoese{2,sd}=vtmordenada{1,k};
    matrizdadosdivisoese{3,sd}=vtmordenada{2,k};
    matrizdadosdivisoese{4,sd}=vtmordenada{3,k};
    matrizdadosdivisoese{5,sd}=vtmordenada{4,k};
    matrizdadosdivisoese{6,sd}=vtmordenada{5,k};
end
%preenchimento area inferior da matrizdadosdivisoese
for z=1:numalturasareainf
    m1=matrizdadosdivisoese{5,posicao.alturas(2,z)};
    m2=matrizdadosdivisoese{5,posicao.alturarotor(2,1)};
    m3=posicao.alturas(1,z);
    m4=posicao.alturarotor(1,1);
    alfa=log10(m1./m2)/log10(m3/m4);
    if isempty(matrizdadosdivisoese{2,1})
        for k=1:posicao.alturas(2,1)-1
            m0=str2double(matrizdadosdivisoese(1,k));
            matrizdadosdivisoese{5,k}=m2.*(m0/m4).^alfa;
        end
    end
end
for k=posicao.alturas(2,z)+1:posicao.alturas(2,z+1)-1
    m0=str2double(matrizdadosdivisoese(1,k));
    matrizdadosdivisoese{5,k}=m2.*(m0/m4).^alfa;
end
end
% preenchimento area superior da matrizdadosdivisoese
[~,index]=find([posicao.alturas]== posicao.alturarotor(2,1));
if numalturasareasup ~= 0

```

```

for z=1:numalturasareasup %desde a posicao.alturarotor
    m1=matrizdadosdivisoess{5,posicao.alturas(2,index+z)};
    m2=matrizdadosdivisoess{5,posicao.alturarotor(2,1)};
    m3=posicao.alturas(1,index+z);
    m4=posicao.alturarotor(1,1);
    alfa=log10(m1./m2)/log10(m3/m4);
    for k=posicao.alturas(2,index+z-1)+1:posicao.alturas(2,index+z)-1
        m0=str2double(matrizdadosdivisoess(1,k));
        matrizdadosdivisoess{5,k}=m2.*(m0/m4).^alfa;
    end
end
for k=posicao.alturas(2,index+z)+1:divisoess+1
    m0=str2double(matrizdadosdivisoess(1,k));
    matrizdadosdivisoess{5,k}=m2.*(m0/m4).^alfa;
end
else
m1=matrizdadosdivisoess{5,posicao.alturas(2,index-1)};
m2=matrizdadosdivisoess{5,posicao.alturarotor(2,1)};
m3=posicao.alturas(1,index-1);
m4=posicao.alturarotor(1,1);
alfa=log10(m1./m2)/log10(m3/m4);
for k=posicao.alturas(2,index)+1:divisoess+1
    m0=str2double(matrizdadosdivisoess(1,k));
    matrizdadosdivisoess{5,k}=m2.*(m0/m4).^alfa;
end
end
end

```

## 7.4 Cálculo da REWS RM e TM

```

% ponto 9.1.3.2 - REWS
clc
diretorioatual=pwd;
cd(diretorio);
vtmmatriz1=importdata(filename);
%procura a posição da primeira leitura real
i=1;
while isempty(vtmmatriz1{3,i})
    i=i+1;
end
posicaoleiturasinf=i;
% para procurar a leitura real sobre o rotor
divisoess=numel(vtmmatriz1)/23;
numdatas=numel(vtmmatriz1{17,1});
i=fix(divisoess/2)-3;
while isempty(vtmmatriz1{2,i})
    i=i+1;
end
posicaoleiturasrotor=i;
alturarotor=str2double(vtmmatriz1{2,i}(3:4));
diametro=str2double(vtmmatriz1{1,divisoess})-str2double(vtmmatriz1{1,1});
raio=diametro/2;
%MATRIZES REWS (TM e RM)
matrizrewstm=cell(divisoess,14);
matrizrewsrm=cell(divisoess,14);
%preenchimento 1ª coluna com os numeros das divisoess RM e TM
for i=1:divisoess
    matrizrewstm{i,1}=num2str(divisoess+1-i);
    matrizrewsrm{i,1}=num2str(divisoess+1-i);
end
%preenchimento da coluna 2 com os intervalos de divisão da altura RM e TM
matrizrewstm(:,2)=vtmmatriz1(13,end:-1:1);
matrizrewsrm(:,2)=vtmmatriz1(13,end:-1:1);
%preenchimento 3ª coluna com a leitura da velocidade em cada altura RM e TM

```

```

matrizrewstm(:,3)=vtmmatrizl(17,end:-1:1);
matrizrewsrm(:,3)=vtmmatrizl(22,end:-1:1);
% preenchimento 4ª coluna com altura limite inferior do segmento z(i)
matrizrewstm{divisoos,4}=num2str(alturarotor-raio);
matrizrewsrm{divisoos,4}=num2str(alturarotor-raio);
for i=1:divisoos-1
    a=str2double(matrizrewstm(i,2));
    b=str2double(matrizrewstm(i+1,2));
    matrizrewstm{i,4}=num2str((a+b)/2);
    matrizrewsrm{i,4}=num2str((a+b)/2);
end
% preenchimento 5ª coluna com altura limite superior do segmento z(i+1)
matrizrewstm{1,5}=num2str(alturarotor+raio);
matrizrewsrm{1,5}=num2str(alturarotor+raio);
for i=2:divisoos
    matrizrewstm(i,5)=matrizrewstm(i-1,4);
    matrizrewsrm(i,5)=matrizrewsrm(i-1,4);
end
% preenchimento 6ª coluna com altura do segmento
for i=1:divisoos
    a=str2double(matrizrewstm(i,4));
    b=str2double(matrizrewstm(i,5));
    matrizrewstm{i,6}=num2str(b-a);
    matrizrewsrm{i,6}=num2str(b-a);
end
% preenchimento 7ª e 8ª coluna com altura da porção triangular (d) e (d+) -
apotema
a=raio;
for i=1:posicaoleiturasrotor-1
    a=a-(str2double(matrizrewstm(i,6)));
    matrizrewstm{i,7}=num2str(a);
    matrizrewsrm{i,7}=num2str(a);
    matrizrewstm{i,8}=num2str(abs(a));
    matrizrewsrm{i,8}=num2str(abs(a));
end
matrizrewstm{posicaoleiturasrotor,7}=num2str(0);
matrizrewsrm{posicaoleiturasrotor,7}=num2str(0);
matrizrewstm{posicaoleiturasrotor,8}=num2str(0);
matrizrewsrm{posicaoleiturasrotor,8}=num2str(0);
for i=posicaoleiturasrotor+1:divisoos
    a=a-(str2double(matrizrewstm(i-1,6)));
    matrizrewstm{i,7}=num2str(a);
    matrizrewsrm{i,7}=num2str(a);
    matrizrewstm{i,8}=num2str(abs(a));
    matrizrewsrm{i,8}=num2str(abs(a));
end
% preenchimento 9ª coluna com ângulo em radianos
for i=1:divisoos
    a=2*acos(str2double(matrizrewstm(i,8))/raio);
    matrizrewstm{i,9}=num2str(a);
    matrizrewsrm{i,9}=num2str(a);
end
%preenchimento da 10ª coluna com area
for i=1:divisoos
    a=str2double(matrizrewstm(i,9));
    a1=(raio^2/2)*(a-sin(a));
    matrizrewstm{i,10}=num2str(a1);
    matrizrewsrm{i,10}=num2str(a1);
end
%preenchimento da 11ª e 12ª coluna com area do segmento
matrizrewstm(1,11)=matrizrewstm(1,10);
matrizrewsrm(1,11)=matrizrewsrm(1,10);
matrizrewstm(1,12)=matrizrewstm(1,11);
matrizrewsrm(1,12)=matrizrewsrm(1,11);
for i=2:posicaoleiturasrotor-1
    a=str2double(matrizrewstm(i-1,10));
    a1=str2double(matrizrewstm(i,10));

```

```

matrizrewstm(i,11)=num2str(a1-a);
matrizrewsrm(i,11)=num2str(a1-a);
matrizrewstm(i,12)=num2str(abs(a1-a));
matrizrewsrm(i,12)=num2str(abs(a1-a));
end
a=str2double(matrizrewstm(posicaoleiturasrotor-1,10));
a1=str2double(matrizrewstm(posicaoleiturasrotor,10));
matrizrewstm(posicaoleiturasrotor,11)=num2str(2*(a1-a));
matrizrewsrm(posicaoleiturasrotor,11)=num2str(2*(a1-a));
matrizrewstm(posicaoleiturasrotor,12)=num2str(abs(2*(a1-a)));
matrizrewsrm(posicaoleiturasrotor,12)=num2str(abs(2*(a1-a)));
for i=posicaoleiturasrotor+1:divisoes-1
a=str2double(matrizrewstm(i,10));
a1=str2double(matrizrewstm(i+1,10));
matrizrewstm(i,11)=num2str(a1-a);
matrizrewsrm(i,11)=num2str(a1-a);
matrizrewstm(i,12)=num2str(abs(a1-a));
matrizrewsrm(i,12)=num2str(abs(a1-a));
end
matrizrewstm(divisoes,11)=matrizrewstm(divisoes,10);
matrizrewsrm(divisoes,11)=matrizrewsrm(divisoes,10);
matrizrewstm(divisoes,12)=matrizrewstm(divisoes,11);
matrizrewsrm(divisoes,12)=matrizrewsrm(divisoes,11);
areavarrimento=ceil(pi*diametro^2/4);
% VERIFICAÇÃO DE CÁLCULOS
% O SOMATÓRIO DA COLUNA 12 TEM QUE SER IGUAL À ÁREA DE VARRIMENTO
a=ceil(sum(str2double(matrizrewstm(:,12))));
a1=ceil(sum(str2double(matrizrewsrm(:,12))));
if areavarrimento ~= a || areavarrimento ~= a1
disp('ERRO NO PREENCHIMENTO DA TABELA !!!! \n');
fprintf('Area de varrimento %d, somatorio areas TM e RM %d, %d
\n',areavarrimento, a, a1);
return
%preenchimento da 13ª coluna com ponderação do segmento
for i=1:divisoes
a=str2double(matrizrewstm(i,12));
a1=str2double(matrizrewstm(i,12));
matrizrewstm(i,13)=num2str(a/areavarrimento*100);
matrizrewsrm(i,13)=num2str(a1/areavarrimento*100);
end
%preenchimento da 14ª coluna vseg
a=matrizrewsrm(:,12);
a1=str2double(a)/areavarrimento;
for i=1:divisoes
RM=matrizrewsrm(i,3).^3.*a1(i,1);
TM=matrizrewstm(i,3).^3.*a1(i,1);
matrizrewsrm(i,14)=RM;
matrizrewstm(i,14)=TM;
clear RM TM
end
%velocidades e vseg concatenadas
velrm_pos3=horzcat(matrizrewsrm(:,3)).';
veltm_pos3=horzcat(matrizrewstm(:,3)).';
veleqrm_pos14=horzcat(matrizrewsrm(:,14)).';
veleqtm_pos14=horzcat(matrizrewstm(:,14)).';
% inserir linha de datas
velrm_pos3(2:end+1,:) = velrm_pos3(1:end,:);
velrm_pos3(1,:) = vtmmatriz1{20,posicaoleiturasinf}(:);
veltm_pos3(2:end+1,:) = veltm_pos3(1:end,:);
veltm_pos3(1,:) = vtmmatriz1{15,posicaoleiturasinf}(:);
veleqrm_pos14(2:end+1,:) = veleqrm_pos14(1:end,:);
veleqtm_pos14(2:end+1,:) = veleqtm_pos14(1:end,:);
veleqtm_pos14(1,:) = vtmmatriz1{15,posicaoleiturasinf}(:);
% inserir coluna de alturas
velrm_pos3(:,2:end+1) = velrm_pos3(:,1:end);
velrm_pos3(2:end,1) = str2double(matrizrewsrm(1:end,2));

```

```

velrm_pos3(1,1)=0;
veltm_pos3(:,2:end+1) = veltm_pos3(:,1:end);
veltm_pos3(2:end,1) = str2double(matrizrewstm(1:end,2));
veltm_pos3(1,1)=0;
veleqrm_pos14(:,2:end+1) = veleqrm_pos14(:,1:end);
veleqrm_pos14(2:end,1) = str2double(matrizrewsrm(1:end,2));
veleqrm_pos14(1,1)=0;
veleqtm_pos14(:,2:end+1) = veleqtm_pos14(:,1:end);
veleqtm_pos14(2:end,1) = str2double(matrizrewstm(1:end,2));
veleqtm_pos14(1,1)=0;
% cálculo do REWS - célula (1,15)
somarm=cell(numdatas,1);
somatm=cell(numdatas,1);
for i=1:numdatas
    somarm(i,1)=num2cell(sum(veleqrm_pos14(2:end,i+1)).^(1/3));
    somatm(i,1)=num2cell(sum(veleqtm_pos14(2:end,i+1)).^(1/3));
end
matrizrewsrm{1,15}='valores REWS';
matrizrewstm{1,15}='valores REWS';
matrizrewsrm{2,15}=somarm;
matrizrewstm{2,15}=somatm;
% preenchimento da coluna 16 com as datas
matrizrewsrm{4,15}='Datas';
matrizrewstm{4,15}='Datas';
matrizrewsrm(5,15)=vtmmatriz1(15,posicaooleiturasinf);
matrizrewstm(5,15)=vtmmatriz1(20,posicaooleiturasinf);
% preenchimento de matriz com dados de datas, direções e REWS TM e RM
a=vtmmatriz1{16,posicaooleiturasrotor}(1,1);
if a==999
    i=21;
else
    i=16;
end
rews(:,1)=matrizrewsrm{5,15}; % datas
rews(:,2)=round(vtmmatriz1{i,posicaooleiturasrotor}); % direções
rews(:,3)=cell2mat(matrizrewsrm{2,15}); % REWS RM
rews(:,4)=cell2mat(matrizrewstm{2,15}); % REWS TM
% relação entre velocidades medidas à altura do rotor e REWS calculado
rel_velHH_REWS_rm=matrizrewsrm{posicaooleiturasrotor,3}; % velocidades RM HH
rel_velHH_REWS_rm(:,2)=cell2mat(matrizrewsrm{2,15}); % velocidades RM REWS
rel_velHH_REWS_rm(:,3)=rel_velHH_REWS_rm(:,2)./rel_velHH_REWS_rm(:,1); %
relação REWS / vel HH
rel_velHH_REWS_tm=matrizrewstm{posicaooleiturasrotor,3}; % velocidades TM HH
rel_velHH_REWS_tm(:,2)=cell2mat(matrizrewstm{2,15}); % velocidades TM REWS
rel_velHH_REWS_tm(:,3)=rel_velHH_REWS_tm(:,2)./rel_velHH_REWS_tm(:,1); %
relação REWS / vel HH

```

## 7.5 Avaliação do shear e gráficos

```

% Norma C.5.1.1
clc
diretorioatual=pwd;
load (filename,'velrm_pos3','veltm_pos3', 'rews');
[linhas, colunas]=size(velrm_pos3);
posalturarotor=53;%linhas/2+1; % posição na matriz da altura do rotor

%relvelrotor=veltm_pos3(posalturarotor,2:end)./velrm_pos3(posalturarotor,2:end);
);
relvelrotor=(rews(:,4)./rews(:,3))';
disp(' ');
disp('Relação de velocidades de vento à altura do rotor, calculadas. ');
expcorterm.dados=cell(linhas,colunas);
expcortetm.dados=cell(linhas,colunas);

```

```

for i=2:linhas
    a=log10(velrm_pos3(i,2:end)./velrm_pos3(posalturarotor,2:end));
    b=log10(velrm_pos3(i,1)/velrm_pos3(posalturarotor,1));
    c=a./b;
    expcorterm.dados(i,2:end)=num2cell(c(1,:));
end
for i=2:linhas
    a=log10(veltm_pos3(i,2:end)./veltm_pos3(posalturarotor,2:end));
    b=log10(veltm_pos3(i,1)/veltm_pos3(posalturarotor,1));
    c=a./b;
    expcortetm.dados(i,2:end)=num2cell(c(1,:));
end
expcorterm.dados(:,1)=num2cell(velrm_pos3(:,1));
expcorterm.dados(1,:)=num2cell(velrm_pos3(1,:));
expcortetm.dados(:,1)=num2cell(veltm_pos3(:,1));
expcortetm.dados(1,:)=num2cell(veltm_pos3(1,:));
% verificação da importancia do expoente de corte
dadosexpcortetm=numel(expcortetm.dados(2:end,2:end));
dadosexpcorterm=numel(expcorterm.dados(2:end,2:end));
x=cell2mat(expcortetm.dados(2:end,2:end));
tm=sum(x(:) > 0.25);
x=cell2mat(expcorterm.dados(2:end,2:end));
rm=sum(x(:) > 0.25);
percent_tm=(tm/dadosexpcortetm)*100;
percent_rm=(rm/dadosexpcorterm)*100;
disp(' ');
fprintf('Percentagem de valores de expoente de corte superior a 0.25, no
mastro temporário, é de %2.2f%% \n',percent_tm);
if percent_tm<=25
    texto='Expoente de corte sem importância! \r\n';
    fprintf('Expoente de corte sem importância! \n')
else
    texto='Expoente de corte com importância! \r\n';
    fprintf('Expoente de corte COM importância! \n')
end
disp(' ');
fprintf('Percentagem de valores de expoente de corte superior a 0.25, no
mastro de referência, é de %2.2f%% \n',percent_rm);
if percent_rm<=25
    texto1='Expoente de corte sem importância! \r\n';
    fprintf('Expoente de corte sem importância! \n')
else
    texto1='Expoente de corte com importância! \r\n';
    fprintf('Expoente de corte COM importância! \n')
end
% directoria de gravação dos gráficos
% grava txt com importância do corte
% (f1) histograma relação de velocidades de vento(vel altura rotor TM / vel
altura rotor RM)
% diagramas de dispersao
% (f2 e f3) diagrama de dispersao do expoente de corte em relação à hora do
dia
% (f4 e f5) diagrama de concentração do expoente de corte em relação ao
quadrante da direção do vento
% (f6 e f7) diagrama de dispersão do expoente de corte em relação à direção do
vento
% (f8 e f9) diagrama de dispersão do expoente de corte em relação à velocidade
do vento
% (f10 e f11) diagrama de dispersão da velocidade do vento REWS em relação à
hora do dia
% (f12) construção da rosa de ventos
% (f13 e f14) Rosa de Ventos para REWS TM e RM
cd(diretorioatual);
disp(' ');
disp('Execução terminada.')

```

## 7.6 Fatores de correção pelo método da matriz

```

% ponto C.5.2 (racios) e ponto C.7 (graficos)
clc
diretorioatual=pwd;
cd (diretorio);
load (filename);
%% ----- RM -----
% preenchimento da matriz de trabalho
matriz=zeros(colunas-1,6);
matriz(:,1)=expcoorterm(1,2:end);% datas
matriz(:,2)=expcoorterm(2,2:end);% direções
I=matriz(:,2)==0;% procura indice de 0°
matriz(I,2)=360;% passa 0° para 360°
for i=2:colunas
    media=mean(expcoorterm(3:end,i));
    matriz(i-1,3)=media;% expoentes de corte TM
end
matriz(:,4)=rews(:,4);% velocidades REWS TM
for i=2:colunas
    media=mean(expcoorterm(3:end,i));
    matriz(i-1,5)=media;% expoentes de corte RM
end
matriz(:,6)=rews(:,3);% velocidades REWS RM
%% grupagem por direções com intervalos de 10°
matrizorddir=sortrows(matriz,2);
for i=1:10:360
    b=round(i/10)+1;
    tabela_racios_TM_RM(b,1)=i;
    tabela_racios_TM_RM(b,2)=i+9;
    tabela_racios_TM_RM(b,3)=fix((i+i+9)/2);
    % número total de velocidades na tranche
    a=find(matrizorddir(:,2)>=i & matrizorddir(:,2)<=i+9);
    num_vel=numel(a);
    tabela_racios_TM_RM(b,4)=num_vel;
    num_vel1=sum(matrizorddir(a,6)>=4 & matrizorddir(a,6)<=8);
    num_vel2=sum(matrizorddir(a,6)>8 & matrizorddir(a,6)<=16);
    tabela_racios_TM_RM(b,5)=num_vel1;
    tabela_racios_TM_RM(b,6)=num_vel2;
    med_vel1=mean(matrizorddir(a,4));
    med_vel2=mean(matrizorddir(a,6));
    if isnan(med_vel1)
        med_vel1=0;
    end
    if isnan(med_vel2)
        med_vel2=0;
    end
    tabela_racios_TM_RM(b,7)=med_vel1;
    tabela_racios_TM_RM(b,8)=med_vel2;
    med_racio=mean(matrizorddir(a,7));
    if isnan(med_racio)
        med_racio=0;
    end
    tabela_racios_TM_RM(b,9)=med_racio;
    if tabela_racios_TM_RM(b,4)<144
        tabela_racios_TM_RM(b,10)=0;
    elseif tabela_racios_TM_RM(b,5)<36 || tabela_racios_TM_RM(b,6)<36
        tabela_racios_TM_RM(b,10)=2;
    else
        tabela_racios_TM_RM(b,10)=1;
    end
end
end
% valores minimo e máximo do expoente
expminimorm=round(min(matrizordexp(:,5))*100)/100;
expmaximorm=round(max(matrizordexp(:,5))*100)/100;
% preenchimento das duas matrizes direções vs expoente

```

```

% (racios e quantidades)
a=fix(expminimorm/0.05);
b=a*0.05-(0.05 * (expminimorm/0.05 ~= fix(expminimorm/0.05)));
a1=fix(expmaximorm/.05);
c=a1*0.05+(0.05 * (expmaximorm/0.05 ~= fix(expmaximorm/0.05)));
Nexp=(b:0.05:c)';
mrm_racios=zeros(1+numel(Nexp),37);
mrm_racios(2:(1+numel(Nexp)),1)=Nexp(:);
mrm_racios(2,1)=expminimorm;
mrm_racios(end,1)=expmaximorm;
mrm_racios(1,2:end)=10:10:360;
mrm_quantidades=mrm_racios;
a=(round(expminimorm/0.05)*0.05+0.05)/0.05;
for i=1:colunas-1
    y=1+fix((matrizordexp(i,5)+0.05)/0.05-a)+1;
    x=1+(ceil(matrizordexp(i,2)/10)*10)/10;
    mrm_quantidades(y,x)=mrm_quantidades(y,x)+1;
    mrm_racios(y,x)=mrm_racios(y,x)+(matrizordexp(i,4)/matrizordexp(i,6));
end
a=mrm_racios(2:end,2:end)./mrm_quantidades(2:end,2:end);
a(isnan(a))=0;
mrm_racios(2:end,2:end)=a;
% se no bin expoente/direção o número de dados for menor que 3 (6 horas)
% o bin é excluído.
c=numel(Nexp)+1;
for i=2:37
    for ii=2:c
        bin=mrm_quantidades(ii,i);
        if bin<3
            mrm_racios(ii,i)=0;
        end
    end
end
c=numel(Nexp)+1;
for i=2:37
    b=sum(mrm_quantidades(2:c,i));
    mrm_quantidades(c+1,i)=b;
end
for i=2:37
    if mrm_quantidades(c+1,i)<=144
        mrm_racios(2:end,i)=0;
    end
end
I=tabela_racios_TM_RM(:,10)==2;
dir=tabela_racios_TM_RM(I,2);
n=numel(dir);
for i=1:n
    I=1+find(mrm_quantidades(1,2:end)==dir(i));
    for ii=2:c-1
        if mrm_quantidades(ii,I)<36
            mrm_quantidades(ii,I)=0;
            mrm_racios(ii,I)=0;
        end
    end
end
end
%% grafico C.5 - Correlação de expoentes de corte na calibração do local
% grafico histograma com o número de elementos por velocidades em RM
% grafico histograma com o número de elementos por velocidades em TM
% grafico C.6 = C12

```

## 7.7 Coeficientes de correção pelo método da regressão

```

% Regressão linear
% ponto C.5.3 normativa
clc
diretorioatual=pwd;
cd (diretorio);
load (filename);
rmmatriz=zeros(colunas-1,4);
rmmatriz(:,1)=expcofterm(1,2:end);% datas
rmmatriz(:,2)=rews(:,2);% direções
    I=rmmatriz(:,2)==0;% procura indice de 0°
    rmmatriz(I,2)=360;% passa 0° para 360°
rmmatriz(:,4)=rews(:,3);% velocidades REWS RM sem correção
indices_dirrm=cell(36,3);
a=0;
b=0;
c=0;
for i=1:10:360
a=find(rmmatriz(:,2)>=i & rmmatriz(:,2)<=i+9);
b=round(i/10)+1;
c=max(numel(a),c);
indices_dirrm{b,1}=a;
indices_dirrm{b,2}=i;
indices_dirrm{b,3}=i+9;
end
rmmatriz_vel_dir=cell(c,36);
Vturb_predicted=zeros(c,36);
datas_regressao=cell(c,36);
for i=1:36 % 36 tranches de 10°
    a=rmmatriz(indices_dirrm{i,1},4);
    b=rmmatriz(indices_dirrm{i,1},1);
    for ii=1:numel(indices_dirrm{i,1})
        rmmatriz_vel_dir{ii,i}=a(ii);
        datas_regressao{ii,i}=b(ii);
    end
end
for i=1:36
emptyIndex = cellfun(@isempty,rmmatriz_vel_dir(1:end,i));
    for ii=1:c
        if emptyIndex(ii)==1
            rmmatriz_vel_dir{ii,i} = {0};
            datas_regressao{ii,i} = {0};
        end
    end
end
rmmatriz_vel_dir=cell2mat(rmmatriz_vel_dir);
datas_regressao=cell2mat(datas_regressao);
ii=0;
clear a
for i=1:36
    b=numel(indices_dirtm{i,1});
    if b==0 || b==1;
        ii=ii+1;
        %a(ii)=i;
    end
end
regressao=zeros(10,36);
fig=zeros(36-ii,2);
val_xmin=100;
val_ymin=100;
val_xmax=-100;
val_ymax=-100;
conta_fig=0;
for i=1:36
    b=numel(indices_dirtm{i,1});

```

```

if b~=0 && b~=1;
    conta_fig=conta_fig+1;
    a=numel(indices_dirrm{i,1});
    xIn=rmmatriz_vel_dir(1:a,i);
    yIn=tmmatriz_vel_dir(1:a,i);
    xmin=min(xIn);
    xmax=max(xIn);
    ymin=min(yIn);
    ymax=max(yIn);
    if xmin<val_xmin
        val_xmin=xmin;
    end
    if xmax>val_xmax
        val_xmax=xmax;
    end
    if ymin<val_ymin
        val_ymin=ymin;
    end
    if ymax>val_ymax
        val_ymax=ymax;
    end
    fig(conta_fig,1)=figure;
    [f,f1]=fit(xIn,yIn,'poly1');
    m=f.p1;
    b=f.p2;
    r=f1.rsquare;
    rmse=f1.rmse;
    m1=num2str(round(cell2mat({f.p1})*10000)/10000);
    b1=round(cell2mat({f.p2})*10000)/10000;
    c1=num2str(indices_dirtm{i,2});
    c2=num2str(indices_dirtm{i,2}+9);
    r1=num2str(round(cell2mat({f1.rsquare})*10000)/10000);
    if abs(b1)==b1
        sinal='+ ';
    else
        sinal='- ';
    end
    axlbl=@(h)[xlabel(h,'Velocidades do vento no mastro RM (m/s)');
ylabel(h,'Velocidades do vento no mastro TM (m/s)')];
    linha1=horzcat('Função f(x)= ',m1,' * x ',sinal,num2str(abs(b1)));
    linha2=horzcat('Tranche de ',c1,'° a ', c2,'° com R^2=',r1);
    plot(f,xIn,yIn);
    title({linha1;linha2});
    axlbl(gca);
    grid on
    legend off
    hold on
    % linha de regressão a passar na origem
    b2=xIn\yIn;
    plot (xIn,xIn*b2,'--','Color','g');
    fig(conta_fig,2)=str2double(c1);
    Vturb_predicted(1:a,i)=rmmatriz_vel_dir(1:a,i).*m+b;
    tmmatriz_vel_dir_cor(1:a,i)=tmmatriz_vel_dir(1:a,i).*m+b;
    v1=sum(Vturb_predicted(1:a,i)<=8);
    v2=sum(Vturb_predicted(1:a,i)>8);
    vmin=min(Vturb_predicted(1:a,i));
    vmax=max(Vturb_predicted(1:a,i));
    col=indices_dirtm{i,3}/10;
    regressao(1,col)=indices_dirtm{i,2};
    regressao(2,col)=m;
    regressao(3,col)=b1;
    regressao(4,col)=r;
    regressao(5,col)=a;
    regressao(6,col)=v1;
    regressao(7,col)=v2;
    regressao(8,col)=rmse;
    regressao(9,col)=vmax;

```

```

    regressao(10,col)=(regressao(5,col)>=144 & ...
        regressao(6,col)>=36 & regressao(7,col)>=36);
end
end
% igualar a escala dos eixos em todos os gráficos
for i=1:(36-ii)
    figure(fig(i,1));
    axis([val_xmin-1 val_xmax+1 val_ymin-1 val_ymax+1]);
end

```

## 7.8 Incertezas pelo método da matriz

```

% Método das fatias
% ponto C.6 - Incerteza da calibração do local
clc
diretorioatual=pwd;
disp('Em execução... Aguarde!')
cd (diretorio);
load (filename(1),'c');
load (filename(2)), 'tabela_racios';
% ----- construção das k=10 tranches -----
% ----- C.6.1 Incerteza de calibração do local -----
I=rews(:,2)==0;% procura indice de 0°
rews(I,2)=360;% passa 0° para 360°
rews(:,5)=ceil(rews(:,2)/10)*10;
n_dados=size(rews(:,1),1);
for i=1:n_dados
    rews(i,6)=i-1;
end
rews(:,7)=fix(rews(:,6)./n_dados*10+1);% k-tranches
for i=1:n_dados
    a=rews(i,5);
    indice=(tabela_racios(:,3)==a);
    rews(i,8)=tabela_racios(indice,10);
    rews(i,9)=rews(i,3)*rews(i,8);
    rews(i,10)=rews(i,9)-rews(i,4);
    rews(i,11)=rews(i,9)/rews(i,4);
end
% tabelar as k-tranches
m_tranches_dir=zeros(36,10);
m_quant=zeros(36,10);
m_rm=cell(36,10);
m_tm=cell(36,10);
m_maior8=zeros(36,10);
m_menor8=zeros(36,10);
m_velmax=zeros(36,10);
m_tranches_validas=cell(36,10);
for i=1:10
    clear t
    [linha,~]=find(rews(:,7)==i);
    n=numel(linha);
    t=zeros(n,3);
    t(:,1)=rews(linha,5);
    t(:,2)=rews(linha,3);
    t(:,3)=rews(linha,4);
    t=sortrows(t,1);
    indice=1;
    ii=1;
    while ii<=n
        a=t(ii,1);
        m_tranches_dir(indice,i)=a;
        soma=1;
        while ii+soma<=n

```

```

        if t(ii+soma,1)==a
            soma=soma+1;
        else
            break;
        end
    end
    end
    m_quant(indice,i)=soma;
    m_rm{indice,i}=t(ii:ii+soma-1,2);
    m_tm{indice,i}=t(ii:ii+soma-1,3);
    m_maior8(indice,i)=sum(t(ii:ii+soma-1,2)>8);
    m_menor8(indice,i)=sum(t(ii:ii+soma-1,2)<=8);
    m_velmax(indice,i)=max(t(ii:ii+soma-1,2));
    indice=indice+1;
    ii=ii+soma;
end
end
for ii=1:10
    soma=sum(m_quant(ii,:));
    for i=1:36
        if soma >=144 && ((m_menor8(i,ii)>=36 && m_maior8(i,ii)>=36) ||
m_quant(i,ii)>=36)
            m_tranches_validas{i,ii}=m_tranches_dir(i,ii);
        else
            m_tranches_validas{i,ii}='excl';
        end
    end
end
for i=1:10
    emptyIndex = cellfun(@isempty,m_tranches_validas(1:end,i));
    for ii=1:36
        if emptyIndex(ii)==1
            m_tranches_validas(ii,i) = {'vazio'};
        end
    end
end
% Incerteza da calibração do local de categoria A
% item C.6.1
catA_ktranche=zeros(36,51);
I=tabela_racios(:,11)==1;
catA_ktranche(:,1)=I.*tabela_racios(:,1).*10;
j=catA_ktranche;
I=find(j~=0);
catA_ktranche=j(I,:);
n_dir=numel(I);
for i=1:n_dir
    for ii=1:10
        I=find(rews(:,7)~=ii);
        I1=find(rews(I,5)==catA_ktranche(i,1));
        I2=find(m_tranches_dir(:,ii)==catA_ktranche(i,1));
        vel_sup=m_maior8(I2,ii);
        vel_inf=m_menor8(I2,ii);
        vel_max=m_velmax(I2,ii);
        if isempty(vel_sup)
            vel_sup=0;
        end
        if isempty(vel_inf)
            vel_inf=0;
        end
        if isempty(vel_max)
            vel_max=0;
        end
        coluna=[2 7 12 17 22 27 32 37 42 47];
        catA_ktranche(i,coluna(ii))=numel(I1);
        coluna=[3 8 13 18 23 28 33 38 43 48];
        catA_ktranche(i,coluna(ii))=mean(rews(I1,8));
        coluna=[4 9 14 19 24 29 34 39 44 49];
        catA_ktranche(i,coluna(ii))=vel_inf;
    end
end

```

```

        coluna=[5 10 15 20 25 30 35 40 45 50];
        catA_ktranche(i,coluna(ii))=vel_sup;
        coluna=[6 11 16 21 26 31 36 41 46 51];
        catA_ktranche(i,coluna(ii))=vel_max;
    end
end
% incerteza de categorias A
for i=1:n_dados
    ktranche=rews(i,7);
    dir_ktranche=rews(i,5);
    I=find(catA_ktranche(:,1)==dir_ktranche);
    if isempty(I) || I+1>n_dir
        rews(i,12)=NaN;
        rews(i,13)=NaN;
        rews(i,14)=NaN;
        rews(i,15)=NaN;
        rews(i,16)=NaN;
        rews(i,17)=NaN;
        rews(i,18)=NaN;
        rews(i,19)=NaN;
        rews(i,20)=NaN;
        rews(i,21)=NaN;
        rews(i,22)=NaN;
    else
        % racios médios k-tranche por direção
        coluna=[3 8 13 18 23 28 33 38 43 48];
        rews(i,12)=catA_ktranche(I,coluna(ktranche));
        % velocidade RM corrigida por k-tranche (Vturb_predicted)
        rews(i,13)=rews(i,12)*rews(i,3);
        % residual por k-tranche
        rews(i,14)=rews(i,13)-rews(i,4);
        % racio medio setor seguinte
        coluna=[3 8 13 18 23 28 33 38 43 48];
        rews(i,15)=catA_ktranche(I+1,coluna(ktranche));
        % velocidade RM corrigida setor seguinte
        rews(i,16)=rews(i,15)*rews(i,3);
        % self_consistency_parameter setor seguinte
        rews(i,17)=rews(i,16)/rews(i,4);
        % residual setor seguinte
        rews(i,18)=rews(i,16)-rews(i,4);
        if I-1==0
            rews(i,19)=NaN;
            rews(i,20)=NaN;
            rews(i,21)=NaN;
            rews(i,22)=NaN;
        else
            % racio medio setor anterior
            coluna=[3 8 13 18 23 28 33 38 43 48];
            rews(i,19)=catA_ktranche(I-1,coluna(ktranche));
            % velocidade RM corrigida setor anterior
            rews(i,20)=rews(i,19)*rews(i,3);
            % self_consistency_parameter setor anterior
            rews(i,21)=rews(i,20)/rews(i,4);
            % residual setor anterior
            rews(i,22)=rews(i,20)-rews(i,4);
        end
    end
end
end
% cálculo das incertezas C.6.1.1 e C.6.1.2 - categoria A
incerteza=zeros(4,10);
for i=1:10
    I=find(rews(:,7)==i);
    % número de dados na k-tranche
    incerteza(1,i)=sum(m_quant(:,i));
    % desvio padrao residual (m/s)
    incerteza(2,i)=nanstd(rews(I,14));
    % incerteza estatistica categoria A (método das tranches)

```

```

    % graus de liberdade
    % f=total de elementos de cada k-tranche - 1 * número de direções
    f=incerteza(1,i)-n_dir;
    incerteza(3,i)=incerteza(2,i)*sqrt(incerteza(1,i)-
1)/sqrt(f*incerteza(1,i));
    % valor absoluto da média dos resíduos, ignorando os NaN
    incerteza(4,i)=abs(nanmean(rews(I,14)));
end
    % incerteza total de categoria A (m/s)
    incerteza_total=sqrt(sum(incerteza(3,:).^2)/10);
    disp(' ');
    fprintf('Incerteza total de categoria A = %2.4f m/s
\n',incerteza_total);
    % tabela C.4 - incerteza suplementar devido às variações das tranches
    var_cor=zeros(n_dir,3);
    var_cor(:,1)=catA_ktranche(:,1)-5;% centro da tranche
    for i=1:n_dir
        I1=find(rews(:,5)==catA_ktranche(i,1));
        % média self consistency parameter setor anterior com direção de
        catA_ktranche
        var_cor(i,2)=mean(rews(I1,21));
        % média self consistency parameter setor seguinte com direção de
        catA_ktranche
        var_cor(i,3)=mean(rews(I1,17));
    end
end

```

## 7.9 Incertezas pelo método da regressão

```

% Método da regressão
% ponto C.6 - Incerteza da calibração do local
clc
diretorioatual=pwd;
cd (diretorio);
load (filename{1});
load (filename{2});
% ----- construção das k=10 tranches -----
% ----- C.6.1 Incerteza de calibração do local -----
I=rews(:,2)==0;
rews(I,2)=360;
%rews(:,5)=fix(rews(:,2)/10+.5)*10;
rews(:,5)=ceil(rews(:,2)/10)*10;
n_dados=size(rews(:,1),1);
for i=1:n_dados
    rews(i,6)=i-1;
end
rews(:,7)=fix(rews(:,6)./n_dados*10+1);
for i=1:n_dados
    a=rews(i,5);
    indice=a/10;
    rews(i,8)=regressao(2,indice);
    rews(i,9)=regressao(3,indice);
    rews(i,10)=rews(i,3)*rews(i,8)+rews(i,9);
    rews(i,11)=rews(i,10)-rews(i,4);
    rews(i,12)=rews(i,10)/rews(i,4);
end
% tabelar as k-tranches
m_tranches_dir=zeros(36,10);
m_quant=zeros(36,10);
m_rm=cell(36,10);
m_tm=cell(36,10);
m_declive=zeros(36,10);
m_coef=zeros(36,10);
m_r2=zeros(36,10); % R^2

```

```

m_maior8=zeros(36,10);
m_menor8=zeros(36,10);
m_velmax=zeros(36,10);
m_tranches_validas=cell(36,10);
for i=1:10
    clear t
    [linha,~]=find(rews(:,7)==i);
    n=numel(linha);
    t=zeros(n,3);
    t(:,1)=rews(linha,5);
    t(:,2)=rews(linha,3);
    t(:,3)=rews(linha,4);
    t=sortrows(t,1);
    indice=1;
    ii=1;
    while ii<=n
        a=t(ii,1);
        m_tranches_dir(indice,i)=a;
        soma=1;
        n1=n;
        while ii+soma<=n1
            if t(ii+soma,1)==a
                soma=soma+1;
            else
                break;
            end
        end
        m_quant(indice,i)=soma;
        m_rm{indice,i}=t(ii:ii+soma-1,2);
        m_tm{indice,i}=t(ii:ii+soma-1,3);
        m_maior8(indice,i)=sum(t(ii:ii+soma-1,2)>8);
        m_menor8(indice,i)=sum(t(ii:ii+soma-1,2)<=8);
        m_velmax(indice,i)=max(t(ii:ii+soma-1,2));
        if soma>=144 && m_menor8(indice,i)>=36 && m_maior8(indice,i)>=36;
            xIn=t(ii:ii+soma-1,2);
            yIn=t(ii:ii+soma-1,3);
            [f,f1]=fit(xIn,yIn,'poly1');
            m_declive(indice,i)=f.p1;
            m_coef(indice,i)=f.p2;
            m_r2(indice,i)=f1.rsquare;
            m_tranches_validas{indice,i}=m_tranches_dir(indice,i);
        else
            m_declive(indice,i)=-100;
            m_coef(indice,i)=-100;
            m_r2(indice,i)=-100;
            m_tranches_validas{indice,i}='excl';
        end
        indice=indice+1;
        ii=ii+soma;
    end
end
for i=1:10
    emptyIndex = cellfun(@isempty,m_tranches_validas(1:end,i));
    for ii=1:36
        if emptyIndex(ii)==1
            m_tranches_validas(ii,i) = {'vazio'}; % substituição de []
        end
    end
end
end
% Incerteza da calibragem do local de categoria A
% item C.6.1
cata_ktranche=zeros(36,41);
j=regressao(10,')==1;
cata_ktranche=(regressao(1,j)+9)';
n_dir=numel(cata_ktranche);
for i=1:n_dir

```

```

for ii=1:10
    I= rews(:,7)~=ii;
    I1=find(rews(I,5)==catA_ktranche(i,1));
    coluna=[2 6 10 14 18 22 26 30 34 38];
    catA_ktranche(i,coluna(ii))=numel(I1);
    xIn=rews(I1,3);
    yIn=rews(I1,4);
    [f,f1]=fit(xIn,yIn,'poly1');
    coluna=[3 7 11 15 19 23 27 31 35 39];
    catA_ktranche(i,coluna(ii))=f.p1;
    coluna=[4 8 12 16 20 24 28 32 36 40];
    catA_ktranche(i,coluna(ii))=f.p2;
    coluna=[5 9 13 17 21 25 29 33 37 41];
    catA_ktranche(i,coluna(ii))=f1.rsquare;
end
end
for i=1:n_dados
    ktranche=rews(i,7);
    dir_ktranche=rews(i,5);
    I=find(catA_ktranche(:,1)==dir_ktranche);
    if isempty(I)% || I+1>n_dir
        rews(i,13)=NaN;
        rews(i,14)=NaN;
        rews(i,15)=NaN;
        rews(i,16)=NaN;
        rews(i,17)=NaN;
        rews(i,18)=NaN;
        rews(i,19)=NaN;
        rews(i,20)=NaN;
        rews(i,21)=NaN;
        rews(i,22)=NaN;
        rews(i,23)=NaN;
        rews(i,24)=NaN;
        rews(i,25)=NaN;
        rews(i,26)=NaN;
    else
        % declives k-tranche por direção
        coluna=[3 7 11 15 19 23 27 31 35 39];
        rews(i,13)=catA_ktranche(I,coluna(ktranche));
        % coeficientes k-tranche por direção
        coluna=[4 8 12 16 20 24 28 32 36 40];
        rews(i,14)=catA_ktranche(I,coluna(ktranche));
        % velocidade RM corrigida por k-tranche (Vturb_predicted)
        rews(i,15)=rews(i,13)*rews(i,3)+rews(i,14);
        % residual por k-tranche
        rews(i,16)=rews(i,15)-rews(i,4);
        % SETOR SEGUINTE
        if I+1<=n_dir
            % declive setor seguinte
            coluna=[3 7 11 15 19 23 27 31 35 39];
            rews(i,17)=catA_ktranche(I+1,coluna(ktranche));
            % coeficiente setor seguinte
            coluna=[4 8 12 16 20 24 28 32 36 40];
            rews(i,18)=catA_ktranche(I+1,coluna(ktranche));
            % velocidade RM corrigida setor seguinte
            rews(i,19)=rews(i,17)*rews(i,3)+rews(i,18);
            % self_consistency_parameter setor seguinte
            rews(i,20)=rews(i,19)/rews(i,4);
            % residual setor seguinte
            rews(i,21)=rews(i,19)-rews(i,4);
        else
            rews(i,17)=NaN;
            rews(i,18)=NaN;
            rews(i,19)=NaN;
            rews(i,20)=NaN;
            rews(i,21)=NaN;
        end
    end
end

```

```

% SETOR ANTERIOR
    if I-1==0
        rews(i,22)=NaN;
        rews(i,23)=NaN;
        rews(i,24)=NaN;
        rews(i,25)=NaN;
        rews(i,26)=NaN;
    else
% declive setor anterior
        coluna=[3 7 11 15 19 23 27 31 35 39];
        rews(i,22)=catA_ktranche(I-1,coluna(ktranche));
% coeficiente setor anterior
        coluna=[4 8 12 16 20 24 28 32 36 40];
        rews(i,23)=catA_ktranche(I-1,coluna(ktranche));
% velocidade RM corrigida setor anterior
        rews(i,24)=rews(i,22)*rews(i,3)+rews(i,23);
% self_consistency_parameter setor anterior
        rews(i,25)=rews(i,24)/rews(i,4);
% residual setor anterior
        rews(i,26)=rews(i,24)-rews(i,4);
    end
end
end
% cálculo das incertezas C.6.1.1 e C.6.1.2 - categoria A
incerteza=zeros(4,10);% matriz para valores das incertezas
for i=1:10
    %I=find(rews(:,7)~=i);
    I=find(rews(:,7)==i);
    % número de dados na k-tranche
        incerteza(1,i)=sum(m_quant(:,i));
    % desvio padrao residual (m/s)
        incerteza(2,i)=nanstd(rews(I,16));
    % incerteza estatistica categoria A (método da regressão)
        % graus de liberdade
        f=total de elementos de cada k-tranche - 2 * número de direções
        f=incerteza(1,i)-2*n_dir;
        incerteza(3,i)=incerteza(2,i)*sqrt(incerteza(1,i)-
1)/sqrt(f*incerteza(1,i));
        incerteza(4,i)=abs(nanmean(rews(I,16)));
    end
    % incerteza total de categoria A (m/s)
        incerteza_total=sqrt(sum(incerteza(3,:).^2)/10);
        fprintf('Incerteza total de categoria A = %2.4f m/s
\n',incerteza_total);
    regressao_catB=regressao;
    for i=1:n_dir
        I=find(regressao(1,:)==catA_ktranche(i,1)-9);
        I1=find(rews(:,5)==catA_ktranche(i,1));
        media=mean(rews(I1,25));
        regressao_catB(11,I)=media;
        media=mean(rews(I1,20));
        regressao_catB(12,I)=media;
        media=mean(rews(I1,3));
        regressao_catB(13,I)=media;
        media=mean(rews(I1,4));
        regressao_catB(14,I)=media;
        regressao_catB(15,I)=regressao_catB(13,I)/regressao_catB(14,I);
    end
end
% linha de controlo de direção preenchida por catA_ktranche
    I=regressao_catB(15,:)~=0;
    regressao_catB(16,I)=1;
% tabela C.4 - incerteza suplementar devido às variações das tranches
tabela_C4=zeros(n,3);

```

## 7.10 Controlo de convergência pelo método da matriz

```

%Norma C.7.1
% Verificação da convergência em cada tranche
    clc
    directorioatual=pwd;
    cd (directorio);
    load (filename);
    [lin, col]=size(mRM_tranches);
    mRM_cal_suplem_SELF=mRM_tranches;
    for y=2:lin
        for x=2:col
            nd=cell2mat(mRM_tranches(1,x));
            rd=cell2mat(mRM_tranches(y,1));
            if ~strcmp(mRM_tranches(y,x),'excl') & ...
                ~strcmp(mRM_tranches(y,x),'vazio') & ...
                ~strcmp(mRM_tranches(y,x),'<3')
                %Cálculo adicional
                dados_c=cell2mat(mRM_tranches{y,x});
                dados_l=cell2mat(mRMm_tranches{y,x});
                n=numel(mRM_tranches{y,x});
                % self consistency parameter
                self=dados_c(:)./dados_l(:); % fórmula (C.3) - pág 342
                mRM_cal_suplem_SELF{y,x}=num2cell(self);
            end
        end
    end
% construção gráfico de Controlo de Convergência por tranches
    nmaxele=max(mRM_quantidades(end,2:end));
    self=zeros(nmaxele,col-1);
    datas=zeros(nmaxele,col-1);
    elementos_datas=zeros(1,col-1);
    for x=2:col
        for y=2:lin
            if ~strcmp(mRM_tranches(y,x),'excl') && ...
                ~strcmp(mRM_tranches(y,x),'vazio') && ...
                ~strcmp(mRM_tranches(y,x),'<3')
                elementos=numel(mRM_cal_suplem_SELF{y,x});
                inicio=elementos_datas(1,x-1)+1;
                fim=elementos_datas(1,x-1)+elementos;
                self(inicio:fim,x-1)=cell2mat(mRM_cal_suplem_SELF{y,x});
                datas(inicio:fim,x-1)=cell2mat(mRM_datas{y,x});
                elementos_datas(1,x-1)=fim;
            end
        end
    end
    nmaxele=max(elementos_datas(1,:));
    self(nmaxele+1,:)=[];
    datas(nmaxele+1,:)=[];
for i=1:col-1
    n=elementos_datas(1,i);
    if n ~= 0
        tabela=zeros(n,2);
        tabela(:,1)=datas(1:n,i);
        tabela(:,2)=self(1:n,i);
        tabela_ord=sortrows(tabela);
        tabela_ord(:,3)=round(tabela(:,2).*1e4)/1e4;
        tabela_ord(:,4)=fix(tabela_ord(:,1)./1e8);
        m=tabela_ord(:,1)-tabela_ord(:,4)*1e8;
        tabela_ord(:,5)=fix(m./1e6);
        m=m-tabela_ord(:,5)*10e5;
        tabela_ord(:,6)=fix(m./1e4);
        m=m-tabela_ord(:,6)*1e4;
        tabela_ord(:,7)=fix(m./1e2);
        m=m-tabela_ord(:,7)*1e2;
        tabela_ord(:,8)=fix(m);
    end
end

```

```

for ii=1:n
    tabela_ord(ii,9)=round(10/60*ii*100)/100;
end
%média acumulada do parâmetro de consistência interna
tabela_ord(1,10)=tabela_ord(1,3);
for ii=2:n
    tabela_ord(ii,10)=(tabela_ord(ii-1,3)+tabela_ord(ii,3))/2;
end
mes_menor=min(tabela_ord(:,5));
mes_maior=max(tabela_ord(:,5));
media=round(mean(tabela_ord(1:n,3))*100)/100;
minimo=media-media*.25;
maximo=media+media*.25;
% verificação da convergência
limite_sup=media+media*.005;% intervalo de -0.5%
limite_inf=media-media*.005;% intervalo de +0.5%
conta_self=sum(tabela_ord(:,10)>=limite_inf &
tabela_ord(:,10)<=limite_sup);
percent=conta_self/n*100;
figure;

```

## 7.11 Controle da convergência pelo método da regressão

```

% Cálculos suplementares - convergência
% norma C.7.2
% REGRESSÃO LINEAR
    clc
    diretorioatual=pwd;
    cd (diretorio);
    load (filename);
maximo=max(regressao(5,:));
matriz_self=zeros(maximo,36);
matriz_residual=zeros(maximo,36);
for i=1:36
    if regressao(5,i)>=144 && regressao(6,i)>=36 && regressao(7,i)>=36
        n=regressao(5,i);
        dados_c=Vturb_predicted(1:n,i);
        dados_l=tmmatriz_vel_dir(1:n,i);
        % self consistency parameter
        self=dados_c(:)./dados_l(:); % fórmula (C.3) - pág 342
        matriz_self(1:n,i)=self;
        % residual
        residual=dados_c(:)-dados_l(:);
        matriz_residual(1:n,i)=residual;
    end
end
nome_dir=horzcat('fase3_modulo7_graf_regres_converg_',filename(11:end-4));
[status, msg, msgID] = mkdir (nome_dir);
cd (nome_dir);
for i=1:36
    if regressao(5,i)>=144 && regressao(6,i)>=36 && regressao(7,i)>=36
        n=regressao(5,i);
        tabela=zeros(n,3);
        tabela(:,1)=datas_regressao(1:n,i);
        tabela(:,2)=matriz_self(1:n,i);
        ano=fix(tabela(:,1)./1e8);
        m=tabela(:,1)-ano*1e8;
        mes=fix(m./1e6);
        tabela(:,3)=mes;
        %tabela_ord=sortrows(tabela,3);% ordena por mês
        tabela_ord=sortrows(tabela,1);% ordena por data
        tabela_ord(:,3)=round(tabela_ord(:,2).*1e4)/1e4;
        tabela_ord(:,4)=fix(tabela_ord(:,1)./1e8);
    end
end

```

```

m=tabela_ord(:,1)-tabela_ord(:,4)*1e8;
tabela_ord(:,5)=fix(m./1e6);
m=m-tabela_ord(:,5)*10e5;
tabela_ord(:,6)=fix(m./1e4);
m=m-tabela_ord(:,6)*1e4;
tabela_ord(:,7)=fix(m./1e2);
m=m-tabela_ord(:,7)*1e2;
tabela_ord(:,8)=fix(m);
for ii=1:n
    tabela_ord(ii,9)=round(10/60*ii*100)/100;
end
%média acumulada do parâmetro de consistência interna
for ii=1:n
    tabela_ord(ii,10)=sum(tabela_ord(1:ii,3))/ii;
end
mes_menor=min(tabela_ord(:,5));
mes_maior=max(tabela_ord(:,5));
c=linspace(mes_menor,mes_maior,n);
media=round(mean(tabela_ord(:,10))*100)/100;
minimo=media-media*0.25;
maximo=media+media*0.25;
% verificação da convergência
limite_sup=media+media*.005;
limite_inf=media-media*.005;
conta_self=sum(tabela_ord(:,10)>=limite_inf &
tabela_ord(:,10)<=limite_sup);
percent=conta_self/n*100;
fprintf('Convergência em %3.2f%% de pontos \n',percent);
figure;

```

## 7.12 Norma IEC 2005

```

% Site Calibration normativa de 2005
% e
% Curva de potência medida (V7)
clc
clear
% NOTA: na normativa de 2005 só se considera o anemometro ao nível do rotor
% Criar matriz de bins de direção
dir_rm_hub=matriz{8,1};
I=dir_rm_hub==0;
dir_rm_hub(I,1)=360;
dir_tm_hub=matriz{3,1};
I=dir_tm_hub==0;
dir_tm_hub(I,1)=360;
rmmatriz=zeros(ndados,7);
rmmatriz(:,1)=matriz{2,1};
rmmatriz(:,2)=dir_rm_hub;
rmmatriz(:,3)=ceil(rmmatriz(:,2)./10).*10;
rmmatriz(:,4)=matriz{9,1};
rmmatriz(:,5)=dir_tm_hub;
rmmatriz(:,6)=ceil(rmmatriz(:,5)./10).*10;
rmmatriz(:,7)=matriz{4,1};
ndados=length(rmmatriz);
% ordenação da matriz por fatia de direção de 10°
a=sortrows(rmmatriz,6);
rmmatriz=a;
% contagem de dados nas fatias de direção e seleção das direções válidas
bin=zeros();
for i=10:10:360 % de 10° a 360° m/s de 10° em 10°
    I=rmmatriz(:,6)==i;
    n=i/10;
    bin(n,1)=i;

```

```

        bin(n,2)=sum(I);
        bin(n,3)=sum(rmmatriz(I,4)<=8);
        bin(n,4)=sum(rmmatriz(I,4)>8);
    end
    bin1=bin; % para impressão contendo todos os dados
    I=bin(:,2)<144 | bin(:,3)<36 | bin(:,4)<36;
    bin(I,:)=NaN;
    % criar matriz com os setores de direções válidos
    rm(:,1)=rmmatriz(:,6);
    rm(:,2)=rmmatriz(:,4);
    rm(:,3)=rmmatriz(:,7);
    for i=1:36
        if ~isnan(bin(i,1))
            I=rm(:,1)==i*10;
            rm(I,4)=1;
        end
    end
    dir_nao=rm(:,4)==0;
    dir_sim=rm(:,4)==1;
    rm(dir_sim,5)=rm(dir_sim,3)./rm(dir_sim,2);
    rm(dir_nao,5)=NaN;
    rm(:,6)=ceil(rm(:,3)./0.5).*0.5;
    I=~isnan(rm(:,5));
    rm_limpa=rm(I,:);
    ndados=length(rm_limpa);
    % tabela bins direções vs bins velocidades
    direc=unique(rm_limpa(:,1));
    n_dir=length(direc);
    v=0:0.5:26;
    n_vel=length(v);
    racios_dir_vel=zeros(n_dir+1,n_vel);
    % construção da tabela
    racios_dir_vel(2:n_dir+1,1)=direc;
    racios_dir_vel(1,1:n_vel)=v;
    racios_dir_vel(1,1)=NaN;
    v=zeros();
    v(1:ndados,1)=rm_limpa(:,1);
    v(1:ndados,2)=rm_limpa(:,end);
    v(1:ndados,3)=rm_limpa(:,5);
    for i=1:n_dir
        [linhas,~]=find(v(:,1)==direc(i));
        for ii=1: numel(linhas)
            coluna=(v(linhas(ii),2)+0.5)*2;
            if racios_dir_vel(i+1,coluna)~=0
                a=(racios_dir_vel(i+1,coluna)+v(linhas(ii),3))/2;
                racios_dir_vel(i+1,coluna)=a;
            else
                racios_dir_vel(i+1,coluna)=v(linhas(ii),3);
            end
        end
    end
    end
    racios_dir_vel(racios_dir_vel==0)=NaN;
    % construção da tabela da variação de rácios entre setores vizinhos
    % por direção
    % exclusão do elemento se diferença maior a 0.02
    [linha,coluna]=size(racios_dir_vel);
    var_racios=zeros(linha,coluna);
    for i=2:linha
        for ii=2:coluna-1
            c=abs(racios_dir_vel(i,ii)-racios_dir_vel(i,ii+1));
            c=fix(c*100)/100;
            var_racios(i,ii)=c;
        end
    end
    end
    var_racios(var_racios>0.02)=NaN;
    var_racios(:,1)=racios_dir_vel(1:end,1);
    var_racios(1,:)=racios_dir_vel(1,:);

```

```

racios_sem_filtro=racios_dir_vel;
I=isnan(var_racios);
racios_dir_vel(I)=NaN;
% potencia medida (usando a tabela_racios)
% normativa de 2005
    delimiter=';';
    headerlines=4;
    dados = importdata('dados_potencia_medida_turbina.txt', delimiter,
headerlines);
    matriz=dados.data;
% importar dados da produção dada pelo fabricante
    delimiter=';';
    headerlines=1;
    fab = importdata('turbina.dat', delimiter, headerlines);
% importar dados das velocidades medidas durante o funcionamento da turbina
% no mastro RM
    delimiter=', ';
    headerlines=4;
    dadosRMrotor = importdata('R_85E335.dat',delimiter, headerlines);
    mRMrotor=dadosRMrotor.data;
    Nmatriz=numel(matriz(:,1));
    for i=1:Nmatriz
        if matriz(i,6)==999
            matriz(i,:)=NaN;
        end
        if matriz(i,2)==-999.99
            matriz(i,:)=NaN;
        end
    end
    I=isnan(matriz(:,1));
    matriz(I,:)=[];
    Nmatriz=numel(matriz(:,1));
% fatiar as direções de 10° em 10°
    matriz(:,8)=ceil(matriz(:,6)./10).*10;
    I=matriz(:,8)==0;
    matriz(I,8)=360;
    I=mRMrotor(:,2)==999;
    mRMrotor(I,:)=[];
    I=mRMrotor(:,3)==99.99;
    mRMrotor(I,:)=[];
    NRMrotor=numel(mRMrotor(:,1));
    Vprev=zeros(NRMrotor,8);
    Vprev(:,1)=mRMrotor(:,7);
    Vprev(:,2)=mRMrotor(:,2);
    Vprev(:,3)=mRMrotor(:,3);
    Vprev(:,4)=ceil(Vprev(:,3)./0.5).*0.5;
    Vprev(:,5)=round(Vprev(:,2)./10).*10;
% procura racio na tabela de racios
for i=1:NRMrotor
    a=racios_dir_vel(1,2:end);
    b=Vprev(i,4);
    [~,coluna]=find(a==b);
    coluna=coluna+1;
    c=racios_dir_vel(2:end,1);
    d=Vprev(i,5);
    [linha,~]=find(c==d);
    linha=linha+1;
    if isempty(coluna) || isempty(linha)
        Vprev(i,6)=NaN;
    else
        Vprev(i,6)=racios_dir_vel(linha,coluna);
    end
end
Vprev(:,7)=Vprev(:,6).*Vprev(:,3);
% exclui tranches de velocidade/direção que estão excluídas da tabela
% de racios
I=Vprev(:,7)==0;

```

```

Vprev(I,7)=NaN;
% ordenar por direção
b=sortrows(Vprev,5);
Vprev=b;
% velocidades normalizadas com a altitude
altitude=1500;
temperatura=15.5;
rotor=103;
texto={'Altitude do local (m)', 'Temperatura média (°C)', 'Diâmetro do
rotor'};
titulo='Dados de: ';
pordefeito={num2str(altitude), num2str(temperatura), num2str(rotor)};
resposta=inputdlg(texto, titulo, 1, pordefeito);
if isequal(resposta, {})
    disp('Cancelado pelo utilizador')
    cd(diretorioatual);
    return
else
    altitude=str2double(resposta{1}); % Altitude do local
    temperatura=str2double(resposta{2}); % Temperatura média do local
    rotor=str2double(resposta{3}); % Diâmetro do rotor
end
ro=1.225;
% densidade do ar corrigida
KPa=101.325*(1-2.25577*10^(-5)*altitude)^5.2559;
mbar=KPa*10;
% Wind Energy Handbook - pag 195 (densidade corrigida kg/m3)
ro_cor=1.225*(288.15/(273.15+temperatura))*(mbar/1013.3);
% velocidade normalizada pela densidade corrigida
Vprev(:,8)=Vprev(:,7).*(ro_cor/ro)^(1/3);
H1=matriz(:,1);
H2=Vprev(:,1);
% momentos iguais
[~, index1, index2]=intersect(H1, H2, 'stable');
mgraf(:,1)=Vprev(index2,8);
mgraf(:,2)=Vprev(index2,7);
mgraf(:,3)=matriz(index1,2);
mgraf(:,4)=matriz(index1,3);
mgraf(:,5)=matriz(index1,4);
mgraf(:,6)=matriz(index1,5);
mgraf(:,7)=matriz(index1,6);
I=isnan(mgraf(:,1));
mgraf(I,:)=[];
mgraf(:,8)=ceil(mgraf(:,1)./0.5).*0.5;
% extrapolar a potência do fabricante para a densidade pretendida
% potência à densidade extrapolada para o local kg/m3
fabrica(:,2)=fab.data(:,i1)-(d1-d2).*(fab.data(:,i1)-
fab.data(:,i2))./(d1-d3);
% filtra por potências mínima e máxima (da tabela de fabricante)
valminpot=min(fabrica(:,2));
valmaxpot=max(fabrica(:,2));
I=mgraf(:,3)<valminpot;
mgraf(I,:)=[];
I=mgraf(:,3)>valmaxpot;
mgraf(I,:)=[];
% filtra por velocidades mínimas e máximas do fabricante
valminvel=min(fabrica(:,1));
valmaxvel=max(fabrica(:,1));
I=mgraf(:,8)<valminvel;
mgraf(I,:)=[];
I=mgraf(:,8)>valmaxvel;
mgraf(I,:)=[];
% matriz vel_fatias para execução dos gráficos
vel_fatias=zeros(70,6);
c=-0.5;
for i=1:length(vel_fatias)
    c=c+.5;

```

```

    vel_fatias(i,1)=c;
end
for i=1:length(vel_fatias)
    soma=sum(mgraf(:,8)==vel_fatias(i,1));
    vel_fatias(i,2)=soma;
end
for i=1:length(vel_fatias)
    I=mgraf(:,8)==vel_fatias(i,1);
    vel_fatias(i,3)=mean(mgraf(I,2));
    vel_fatias(i,4)=mean(mgraf(I,1));
    vel_fatias(i,5)=mean(mgraf(I,3));
end
% FILTRAGEM DOS DADOS NA MATRIZ DE EXECUÇÃO DE GRÁFICOS
% Filtra por número de dados na fatia
    I=vel_fatias(:,2)<=2;
    vel_fatias(I,3:end)=NaN;
    I=~isnan(vel_fatias(:,3));
    vel_fatias_menos=vel_fatias(I,:);
    cd (nome_dir);
% grafico potência máxima, média, mínima e desvio padrao
    figure % fig 1
% grafico curva medida e potências médias
% grafico curva potencia medida com gráfico da curva do fabricante
% graficos de Densidade de potência do vento e de Coeficiente de potência
medida.
% gráfico de Weibull

```

### 7.13 Potência medida pelo método da matriz

```

% potencia medida (usando a tabela_racios)
    clc
    diretorioatual=pwd;
    cd (diretorio);
    load (filename,'mrm_racios');
% importar dados das medições na turbina
    delimiter=';';
    headerlines=4;
    dados = importdata('dados_potencia_medida_turbina.txt', delimiter,
headerlines);
    matriz=dados.data;
% importar dados da produção dada pelo fabricante
    delimiter=';';
    headerlines=1;
    fab = importdata('turbina.dat', delimiter, headerlines);
% importar dados das velocidades medidas durante o funcionamento da turbina no
mastro RM
    delimiter=',';
    headerlines=4;
    dadosRMrotor = importdata('R_85E335.dat',delimiter, headerlines);
    Nmatriz=numel(matriz(:,1));
    for i=1:Nmatriz
        if matriz(i,6)==999
            matriz(i,:)=NaN;
        end
        if matriz(i,2)==-999.99
            matriz(i,:)=NaN;
        end
    end
    I=isnan(matriz(:,1));
    matriz(I,:)=[];
    Nmatriz=numel(matriz(:,1));
% fatiar as direções de 10° em 10°
    matriz(:,8)=ceil(matriz(:,6)./10).*10;

```

```

I=matriz(:,8)==0;
matriz(I,8)=360;
% Verificar erros nos dados de direção e velocidade do mastro RM
I=mRMrotor(:,2)==999;
mRMrotor(I,:)=[];
mRMinf(I,:)=[];
I=mRMrotor(:,3)==99.99;
mRMrotor(I,:)=[];
mRMinf(I,:)=[];
%I=mRMinf(:,2)==999;
%mRMinf(I,:)=[];
%mRMrotor(I,:)=[];
I=mRMinf(:,3)==99.99;
mRMinf(I,:)=[];
mRMrotor(I,:)=[];
NRMrotor=numel(mRMrotor(:,1));
NRMMinf=numel(mRMinf(:,1));
% verifica se datas estão coincidentes nas matrizes de dados
if NRMrotor ~= NRMMinf
    clc;
    disp('Necessário garantir que os ficheiros *.dat');
    disp('tenham o mesmo número de dados válidos e com datas iguais!');
    cd(diretorioatual)
    return
end
% verificar se datas são coincidentes nos dois ficheiros RM
I=mRMrotor(:,7)==mRMinf(:,7);
a=sum(I);
if a~=NRMrotor
    clc;
    disp('Necessário garantir que os ficheiros *.dat');
    disp('tenham o mesmo número de dados válidos e com datas iguais!');
    cd(diretorioatual)
    return
end
Vprev=zeros(NRMrotor,9);
Vprev(:,1)=mRMrotor(:,7);
Vprev(:,2)=mRMrotor(:,2);
Vprev(:,3)=mRMrotor(:,3);
Vprev(:,4)=mRMinf(:,3);
Vprev(:,5)=log(Vprev(:,4)./Vprev(:,3))./log(alturainf/alturarotor);
Vprev(:,6)=ceil(Vprev(:,2)./10).*10;
Vprev(:,7)=5*ceil((Vprev(:,5)/5*100))/100;
for i=1:NRMrotor
    a=mrm_racios(1,2:end);
    b=Vprev(i,6);
    [~,coluna]=find(a==b);
    coluna=coluna+1;
    c=round(mrm_racios(2:end,1)*1000)/1000;
    d=Vprev(i,7);
    [linha,~]=find(c==d);
    linha=linha+1;
    if isempty(coluna) || isempty(linha)
        Vprev(i,8)=NaN;
    else
        Vprev(i,8)=mrm_racios(linha,coluna);
    end
end
Vprev(:,9)=Vprev(:,8).*Vprev(:,3);
I=Vprev(:,9)==0;
Vprev(I,9)=NaN;
% velocidades normalizadas com a altitude
altitude=1500;
temperatura=15.5;
rotor=103;
texto={'Altitude do local (m)', 'Temperatura média (°C)', 'Diâmetro do
rotor'};

```

```

titulo='Dados de: ';
pordefeito={num2str(altitude), num2str(temperatura), num2str(rotor)};
resposta=inputdlg(texto, titulo, 1, pordefeito);
if isequal(resposta, {})
    disp('Cancelado pelo utilizador')
    cd(diretorioatual);
    return
else
    altitude=str2double(resposta{1});
    temperatura=str2double(resposta{2});
    rotor=str2double(resposta{3});
end
ro=1.225;
% densidade do ar corrigida
KPa=101.325*(1-2.25577*10^(-5)*altitude)^5.2559;
mbar=KPa*10;
ro_cor=1.225*(288.15/(273.15+temperatura))*(mbar/1013.3);
% velocidade normalizada pela densidade corrigida
Vprev(:,10)=Vprev(:,9).*(ro_cor/ro)^(1/3);
H1=matriz(:,1);
H2=Vprev(:,1);
[~, index1, index2]=intersect(H1, H2, 'stable');
mgraf(:,1)=Vprev(index2,10);
mgraf(:,2)=Vprev(index2,9);
mgraf(:,3)=matriz(index1,2);
mgraf(:,4)=matriz(index1,3);
mgraf(:,5)=matriz(index1,4);
mgraf(:,6)=matriz(index1,5);
mgraf(:,7)=matriz(index1,6);
% retirar velocidades NaN
I=isnan(mgraf(:,1));
mgraf(I,:)=[];
% fatia as velocidades normalizadas em 0.5 m/s
mgraf(:,8)=round(mgraf(:,1)./0.5).*0.5;
% extrapolar a potência do fabricante para a densidade pretendida
% potência à densidade extrapolada kg/m3
fabrica(:,2)=fab.data(:,i1)-(d1-d2).*(fab.data(:,i1)-
fab.data(:,i2))./(d1-d3);
% filtra por potências mínima e máxima (da tabela de fabricante)
valminpot=min(fabrica(:,2));
valmaxpot=max(fabrica(:,2));
I=mgraf(:,3)<valminpot;
mgraf(I,:)=[];
I=mgraf(:,3)>valmaxpot;
mgraf(I,:)=[];
% filtra por velocidades mínimas e máximas do fabricante
valminvel=min(fabrica(:,1));
valmaxvel=max(fabrica(:,1));
I=mgraf(:,8)<valminvel;
mgraf(I,:)=[];
I=mgraf(:,8)>valmaxvel;
mgraf(I,:)=[];
% matriz vel_fatias para execução dos gráficos
vel_fatias=zeros(70,6);% até velocidades de 35 m/s
c=-0.5;
for i=1:length(vel_fatias)
    c=c+.5;
    vel_fatias(i,1)=c; % fatias de 0.5
end
for i=1:length(vel_fatias)
    soma=sum(mgraf(:,8)==vel_fatias(i,1));
    vel_fatias(i,2)=soma; % quantidades de cada fatia de velocidade
end
for i=1:length(vel_fatias)
    I=mgraf(:,8)==vel_fatias(i,1);
    vel_fatias(i,3)=mean(mgraf(I,2));
    vel_fatias(i,4)=mean(mgraf(I,1));

```

```

        vel_fatias(i,5)=mean(mgraf(I,3));
    end
% FILTRAGEM DOS DADOS NA MATRIZ DE EXECUÇÃO DE GRÁFICOS
    % Filtra por número de dados na fatia
        I=vel_fatias(:,2)<=2;
        vel_fatias(I,3:end)=NaN;
I=~isnan(vel_fatias(:,3));
vel_fatias_menos=vel_fatias(I,:);
% Coeficiente de potência medida
area_varrimento=pi*rotor^2/4;
pot_medida=vel_fatias(I,5);% em kW
Cp=(pot_medida*1000)./(0.5*ro_cor*area_varrimento*vel_fatias(I,4).^3);
vel_fatias(I,6)=Cp;
% gráfico de Weibull
    dados=zeros(length(matriz),3);
    U=matriz(:,7);
    U=sort(U);
    dados(:,1)=U;
    % calculo do fator de forma
    desv=std(U);
    vmedia=mean(U);
    k=(desv/vmedia)^(-1.089);
    % cálculo do fator de escala (m/s)
    x1=1+1/k;
    %função gamma para x1
    fg=gamma(x1);
    A=round(vmedia/fg*10)/10; % fator de escala (m/s)
    % distribuição de Weibull(%)
    % probabilidade de ocorrência de ventos com U m/s
    P=(k/A).*(U./A).^(k-1).*exp(-(U./A).^k);
    dados(:,2)=P;
    % função cumulativa
    % probabilidade de ocorrerem ventos iguais ou inferiores a U m/s
    F=1-exp(-(U./A).^k);
    dados(:,3)=F;
    figure
% grafico potência máxima, média, mínima e desvio padrao
% grafico curva medida e potências médias
% grafico curva potencia medida com gráfico da curva do fabricante
% Graficos de Densidade de potência do vento e de Coeficiente de potência
medida.

```

## 7.14 Potência medida pelo método da regressão

```

% potencia medida (usando a regressao)
    clc
    directorioatual=pwd;
    load (filename,'regressao');
% importar dados das medições na turbina
    delimiter=';';
    headerlines=4;
dados = importdata('dados_potencia_medida_turbina.txt', delimiter,
headerlines);
matriz=dados.data;
% importar dados da produção dada pelo fabricante
    delimiter=';';
    headerlines=1;
fab = importdata('turbina.dat', delimiter, headerlines);
N=numel(matriz(:,1));
for i=1:N
    if matriz(i,6)==999
        matriz(i,:)=NaN;
    end

```

```

        if matriz(i,2)==-999.99
            matriz(i,:)=NaN;
        end
    end
    I=isnan(matriz(:,1));
    matriz(I,:)=[];
    N=numel(matriz(:,1));
% fatiar as direções de 10° em 10°
    matriz(:,8)=ceil(matriz(:,6)./10).*10;
    I=matriz(:,8)==0;
    matriz(I,8)=360;
% contar número de direções em cada fatia de direção
    for i=1:N
        I=matriz(:,8)==matriz(i,8);
        matriz(i,9)=sum(I);
    end
% filtra por número de dados na tranche (normativa)
    I=matriz(:,9)<3;
    matriz(I,:)=[];
    N=numel(matriz(:,1));
% corrigir as velocidades Hub RM
    for i=1:N
        a=matriz(i,8)-9;
        I=regressao_catB(1,')==a;
        if regressao_catB(16,I)==1
            m=regressao_catB(2,I);
            b=regressao_catB(3,I);
            matriz(i,10)=m*matriz(i,7)+b;
        else
            matriz(i,10)=NaN;
        end
    end
    I=isnan(matriz(:,10));
    matriz(I,:)=[];
    % velocidades normalizadas com a altitude
    texto={'Altitude do local (m)', 'Temperatura média (°C)', 'Diâmetro do
rotor'};
    titulo='Dados de: ';
    resposta=inputdlg(texto,titulo,1,pordefeito);
    if isequal(resposta, {})
        disp('Cancelado pelo utilizador')
        cd(diretorioatual);
        return
    else
        altitude=str2double(resposta{1});
        temperatura=str2double(resposta{2});
        rotor=str2double(resposta{3});
    end
    area_varrimento=pi*rotor^2/4;
% densidade do ar corrigida
    ro_cor=1.225*(288.15/(273.15+temperatura))*(mbar/1013.3);
% velocidade normalizada pela densidade corrigida
    matriz(:,11)=matriz(:,10).*(ro_cor/ro)^(1/3);
    I=matriz(:,11)==0;
    matriz(I,11)=NaN;
    % ordenação por velocidades corrigidas e validadas
    a=sortrows(matriz,11);
    matriz=a;
    % eliminar linhas de velocidades não validadas
    I=isnan(matriz(:,11));
    matriz(I,:)=[];
    N=numel(matriz(:,1));
% fatia as velocidades em 0.5 m/s se a direção for válida
    matriz(:,12)=ceil(matriz(:,11)./0.5).*0.5;
    % extrapolar a potência do fabricante para a densidade pretendida
% filtra por potências mínima e máxima (da tabela de fabricante)
% filtra por velocidades mínimas e máximas do fabricante

```

```
% matriz com as fatias de velocidades de 0.5 em 0.5
vel_fatias=zeros(70,6);
c=-0.5;
for i=1:length(vel_fatias)
    c=c+.5;
    vel_fatias(i,1)=c;
end
for i=1:length(vel_fatias)
    soma=sum(matriz(:,12)==vel_fatias(i,1));
    vel_fatias(i,2)=soma;
end
for i=1:length(vel_fatias)
    I=matriz(:,12)==vel_fatias(i,1);
    vel_fatias(i,3)=mean(matriz(I,10));
    vel_fatias(i,4)=mean(matriz(I,11));
    vel_fatias(i,5)=mean(matriz(I,2));
    % Coeficiente de potência medida
    Cp=(vel_fatias(i,5)*1000)./(0.5*ro_cor*area_varrimento*vel_fatias(i,4).^3);
    vel_fatias(i,6)=Cp;
end
% FILTRAGEM DOS DADOS NA MATRIZ DE EXECUÇÃO DE GRÁFICOS
% Filtra por número de dados na fatia
I=vel_fatias(:,2)<=3;
vel_fatias(I,2:end)=NaN;
I=~isnan(vel_fatias(:,2));
vel_fatias_menos=vel_fatias(I,:);
% grafico potência máxima, média, mínima e desvio padrao
% grafico curva medida e potências médias
% grafico curva potencia medida e curva de potência do fabricante
% Graficos de Densidade de potência do vento e de Coeficiente de potência
medida.
% gráfico de Weibull
```

---