

# Regione Puglia

COMUNE DI SALICE SALENTINO - COMUNE DI VEGLIE

PROVINCIA DI LECCE

**PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI IMPIANTO PER LA  
PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA FONTI RINNOVABILI,  
NONCHE' OPERE CONNESSE ED INFRASTRUTTURE, DI POTENZA  
PREVISTA IMMESSA IN RETE PARI A 60 MW  
ALIMENTATO DA FONTE EOLICA DENOMINATO "SAVE ENERGY"**

OPERE DI CONNESSIONE E INFRASTRUTTURE PER IL COLLEGAMENTO ALLA RTN:  
Comuni di Erchie (Br)-San Pancrazio Salentino (Br) - Avetrana (Ta)

## PROGETTO DEFINITIVO

Codice Impianto: 6QTZQR9

Tavola :

Titolo :

RELAZIONE  
CALCOLO GITTATA IN CASO DI ROTTURA PALA  
AEROGENERATORE

**R32**

Cod. Identificativo elaborato :

**6QTZQR9\_DocumentazioneSpecialistica\_R32**

Progetto:

**ENERWIND s.r.l.**

Via San Lorenzo 155 - cap 72023 MESAGNE (BR)  
P.IVA 02549880744 - REA BR-154453 - enerwind@pec.it

MSC Innovative Solutions s.r.l.s.

Via Milizia n.55 - 73100 Lecce  
Tel. +39 3383137911  
Email: msc.innovativesolutions@gmail.com - P. IVA 05030190754  
Responsabile progettazione: Dott. Ing. Santo Masilla

Committente:

**AVETRANA ENERGIA s.r.l.**

Piazza del Grano n.3 - cap 39100 BOLZANO (BZ)  
P.IVA 03050420219 - REA BZ 227626 - avetrana.energia@legalmail.it

SOCIETA' DEL GRUPPO

FRI-EL GREEN POWER S.p.A.  
Piazza della Rotonda, 2 - 00186 Roma (RM) - Italia  
Tel. +39 06 6880 4163 - Fax. +39 06 6821 2764  
Email: info@fri-el.it - P. IVA 01533770218

Indagine Specialistiche :

Data

Revisione

Redatto

Approvato

20.06.2021

Prima Emissione

SM

MT

Data: Giugno 2021

Scala :

File: 6QTZQR9\_DocumentazioneSpecialistica\_R32

Controllato:

Formato:

**A4**

## **1. PREMESSA**

La presente relazione si riferisce al calcolo della gittata massima in caso di rottura di una pala dell'aerogeneratore e/o frammento di esso, relativo alla proposta progettuale per la realizzazione di un parco eolico proposto dalla società **AVETRANA ENERGIA srl in Salice Salentino (LE) e Veglie (LE) della Potenza di 60MW.**

La proposta progettuale è finalizzata alla realizzazione di un impianto eolico per la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile eolica, costituito da n. 10 aerogeneratori, ciascuno di potenza nominale pari a 6,0 MW per una potenza complessiva di 60 MW, da realizzarsi nella Provincia di Lecce, nei territori comunali di Salice Salentino e Veglie, in cui insistono gli aerogeneratori con annesse piazzole e relativi cavidotti di interconnessione interna, mentre i territori comunali di Avetrana (TA) e San Pancrazio Salentino (BR) vengono attraversati dall'elettrodotto esterno fino al comune di Erchie (BR) dove sono situate le opere di connessione alla RTN.

La relazione ha lo scopo di verificare e calcolare la gittata massima in caso di rottura della pala e/o di un frammento di pala di un aerogeneratore.

## **2. PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO AEROGENERATORE**

Nel dettaglio, le pale sono fissate su un mozzo, e nell'insieme costituiscono il rotore; il mozzo, a sua volta, è collegato ad un primo albero di trasmissione, detto albero lento, che ruota alla stessa velocità angolare del rotore.

L'albero lento è, nella maggior parte dei casi, collegato ad un moltiplicatore di giri, da cui si diparte un albero veloce, che ruota con velocità angolare data da quella dell'albero lento per il rapporto di trasmissione del rotismo installato. Tutti i componenti sopra menzionati, ad eccezione, del rotore e del mozzo, sono ubicati entro una cabina, detta navicella la quale, a sua volta, è sistemata su un supporto-cuscinetto, in maniera da essere facilmente orientata secondo la direzione del vento.

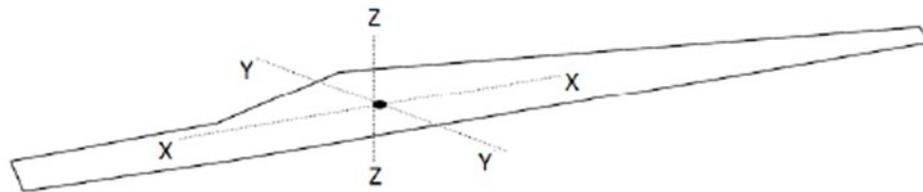
Oltre ai componenti su elencati, vi è un sistema di controllo che esegue, il controllo della potenza ruotando le pale intorno al loro asse principale, il controllo dell'orientamento della navicella, detto controllo dell'imbardata, che serve ad allineare la macchina rispetto alla direzione del vento. Si riporta di seguito una figura che evidenzia il verso di rotazione dell'aerogeneratore, in relazione alla direzione del vento che causa tale moto. La conformazione del profilo alare dell'aerogeneratore è fissa, mentre è mobile il rotore sul quale sono ancorate le pale. Questo garantisce il fatto che il rotore possa orientarsi rispetto al vento in modo tale da offrire allo stesso sempre il medesimo profilo alare garantendo indipendentemente dalla direzione del vento un verso orario di rotazione. Questa considerazione ci serve per fissare in ogni momento il verso della velocità tangenziale, responsabile della gittata nel piano, rispetto a quello della velocità del vento, ortogonale alla velocità tangenziale ed a sua volta responsabile della gittata fuori dal piano. Dalla composizione delle due traiettorie si ottiene la traiettoria complessiva e quindi si capisce la direzione lungo la quale l'eventuale pala o parte di essa che si distacca percorre il suo moto.

Mettendo in relazione la traiettoria del corpo che si distacca con la corografia del luogo si capisce se la pala nella percorrenza della sua traiettoria può essere o meno un elemento di pericolo per la strada e/o altro edificio interessato.

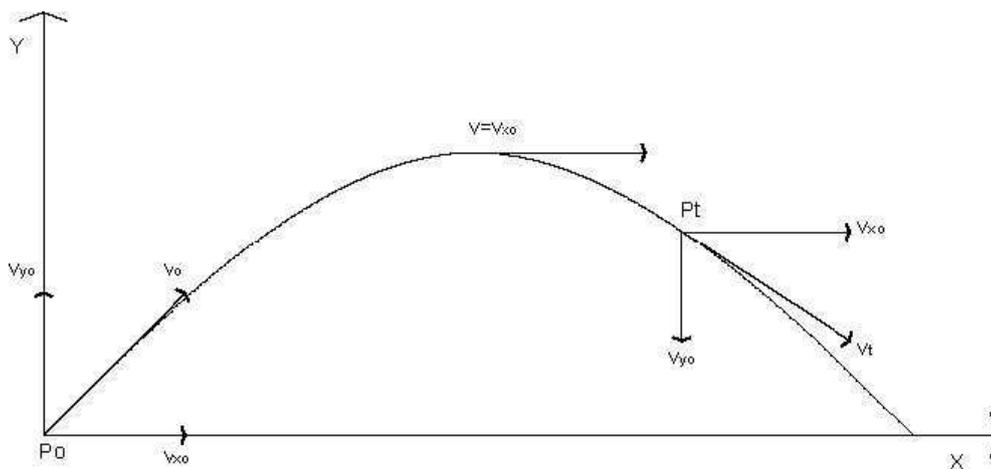
### 3. ROTTURA DELLA PALA

#### 3.1. AEROGENERATORE MODELLO SIEMENS GAMESA SG170

Il calcolo della gittata massima in caso di rottura di una pala dell'Aerogeneratore segue il principio della balistica applicata ai moto dei proiettili. Si evidenzia che i calcoli sono fatti considerando nullo l'attrito con l'aria.



Baricentro pala



Traiettoria di un grave in caduta libera

Nel caso in esame (tipologia SIEMENS GAMESA SG170) si suppone che l'eventuale rottura della pala avvenga alle peggiori condizioni possibili ovvero:

- 1) alla velocità massima del rotore, pari a circa 8,5 giri/minuto
- 2) nel punto di ascissa e ordinata in cui la gittata è massima, con angolo =  $-\pi/4$
- 3) con il centro di massa posizionato ad  $1/3$  della lunghezza della pala, in prossimità del mozzo. L'aerogeneratore di tipo SIEMENS GAMESA SG170 previsto ha altezza al mozzo uguale a 135mt, le pale costituenti il rotore sono lunghe 85 mt

#### 3.1 FORMULE E CALCOLI RISULTANTI

L'Ordinata di Massima Velocità  $O_{mv}$  al momento di rottura è data dalla somma dell'altezza del mozzo più la componente verticale del Centro di Massa:

➤  $O_{mv} = \text{Ordinata di Massima Velocità} = H_m + D_{cm} * \text{Radice}(2)/2 =$

**155,03 m** Analogamente l'ascissa di Massima Velocità  $A_{mv}$  al momento di rottura:

- **$A_{mv}$  = Ascissa di Massima Velocità =  $-D_{cm} * \text{Radice}(2)/2 = -20,03 \text{ m}$**   
La Velocità Lineare al Centro di Massa  $V_{max}$  è desunta dalla Velocità Angolare  $V_{ang}$
- **$V_{max}$  = Velocità Lineare al Centro di Massa =  $V_{ang} * D_{cm} = 25.22 \text{ m/sec}$**   
Le componenti Verticale  $V_y$  ed Orizzontale  $V_x$  di tale velocità Lineare al Centro di Massa si ottengono moltiplicando per il Seno ed il Coseno dell'angolo:
- **$V_y$  = Componente Verticale Velocità =  $V_{max} * \text{Radice}(2)/2 = 17.83 \text{ m/sec}$**
- **$V_x$  = Componente Orizzontale Velocità =  $V_{max} * \text{Radice}(2)/2 = 17.83 \text{ m/sec}$**

Il tempo necessario  $T_y$  perché la componente verticale della velocità sia nullo è dato dalla formula:

- **$T_y$  = Tempo di decelerazione Verticale =  $V_y / 9.8 \text{ m/sec}^2 = 1,82 \text{ sec}$**   
L'altezza Massima  $H_{max}$  si ottiene dalla formula:

- **$H_{max} = O_{mv} + V_y * T_y - 1/2 * g * T_y^2 = 171.24 \text{ m}$**

Il tempo necessario  $T_{max}$  affinché l'elemento rotante precipiti a terra dalla sommità si ottiene dalla relazione:

- **$T_{max} = \text{tempo di caduta} = \text{Radice}(171,24/9.8 \text{ m/sec}^2) = 4.18 \text{ sec}$**

La distanza massima  $DL_{max}$  dalla base della torre percorsa dall'elemento rotante distaccatosi è quindi fornito dalla formula:

**$DL_{max} = V_x * (T_{max} + T_y) + A_{mv} + (L_p - D_{cm}) = 143.55 \text{ m}$**

#### 4. CALCOLO DELLA TRAIETTORIA REALE DI UN FRAMMENTO DELLA PALA

##### 4.1. FONDAMENTI DI CALCOLO DELLA TRAIETTORIA REALE

La determinazione di una traiettoria reale che tenga conto della resistenza dell'aria, è fattibile con un calcolo iterativo che consideri la traiettoria come una successione di elementi minimi, per ciascuno dei quali sia possibile ricalcolare la distanza, l'altezza, l'inclinazione e la velocità finali. Il calcolo risulta facilitato se la sequenza dei punti è determinata da incrementi di tempo costanti  $t_e$ . Passando dal punto **P** a quello successivo gli elementi della traiettoria possono allora essere così ricalcolati:

##### Tempo totale

$$t_{p+1} = t_p + t_e$$

##### Ascissa o distanza in piano

$$X_{p+1} = X_p + \cos \omega_p \times V_p \times t_e$$

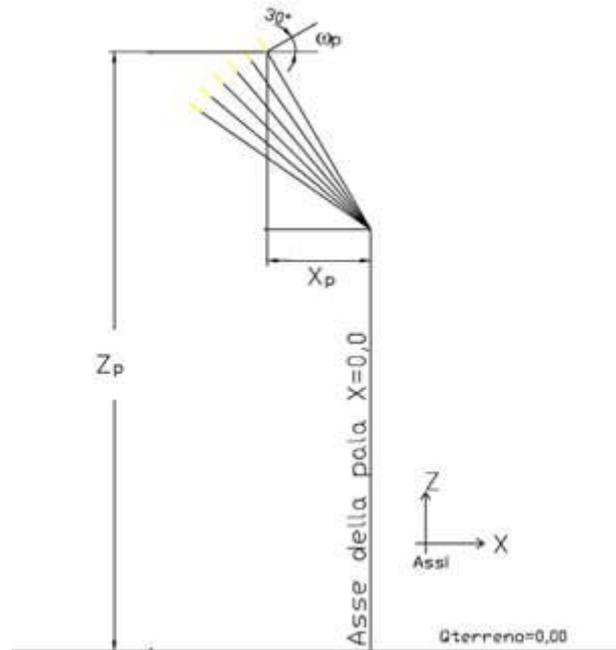
##### Altezza o quota

$$Z_{p+1} = Z_p + \sin \omega_p \times V_p \times t_e - g \times t_e^2 / 2$$

Si precisa che:

1. si assume come origine degli assi la base della torre della turbina ed un sistema di riferimento come illustrato nella figura seguente;
2.  $X_p$  e  $Z_p$  sono le coordinate di partenza del centro di massa del frammento di pala e variano al variare dell'angolo di partenza;

3.  $X_p$  e  $Z_p$  sono state ricavate graficamente così come indicato nella seguente immagine:



$$\omega_{p+1} = \arctan \left[ \tan \omega_p - g \times (X_{p+1} - X_p) / (\cos^2 \omega_p \times V_p^2) \right]$$

### Velocità

$$V_{p+1} = \left[ (V_p^2 - 2g \times (Z_{p+1} - Z_p)) - \sigma_p \times t_e \right]^{1/2}$$

dove  $\sigma$  la decelerazione (o **ritardazione** come si dice in balistica) causata dalla resistenza dell'aria.

Per valutare la **resistenza R** opposta dall'aria, la formula usata nella meccanica dei fluidi è ingegnere la seguente:

$$R = 1/2 \times C_r \times \rho \times S \times V^2$$

dove:

**R** = resistenza (N)

S = sezione del corpo rispetto al

movimento ( $m^2$ ) V = velocità (m/s)

$C_r$  = coefficiente di forma

(adimensionale)  $\rho$  = densità del fluido

attraversato ( $kg/m^3$ )

E' da notare che il **coefficiente di forma  $C_r$**  varia esso stesso in funzione della velocità, ma può essere considerato costante per variazioni di velocità che non comportano significativi cambiamenti nei regimi di turbolenza del fluido attraversato. Oggi sono disponibili numerosissimi modelli di simulazione che consentono di calcolare con approssimazione il valore di  **$C_r$** .

Essendo **R** e  $\sigma$  ovviamente correlati dalla massa  $m_f$  (kg) del frammento secondo la relazione  $R = m_f \times \sigma$ , per un regime uniforme di velocità, la ritardazione ( $m/s^2$ ) è così esprimibile:

$$\sigma = (1/2 \times C_r \times \rho \times S \times V^2) / m_f$$

ciò significa che a parità di altre condizioni la ritardazione diminuisce con l'aumentare della massa del

frammento e aumenta con l'aumentare della sua sezione.

#### 4.2. APPLICAZIONE DEL CALCOLO DELLA TRAIETTORIA REALE ALLA TURBINA SIEMENS GAMESA SG170

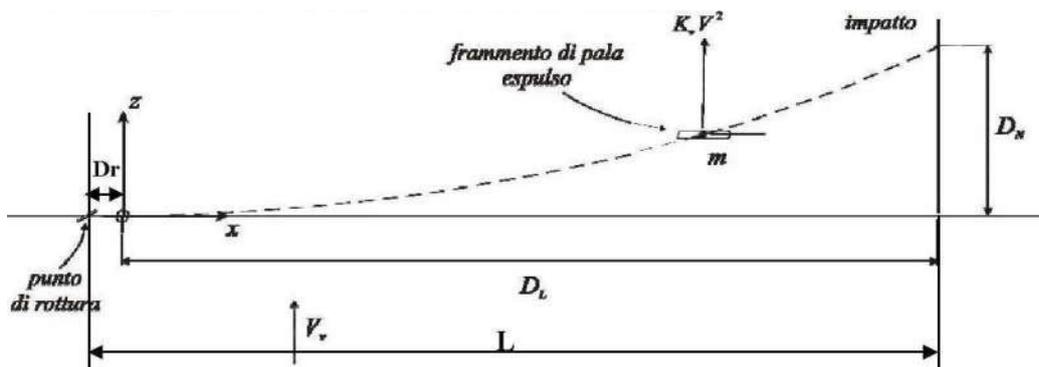
Il calcolo della gittata del frammento di pala è stato condotto considerando i seguenti dati di partenza:

$S = 4,0 \text{ m}^2$  (sezione del corpo rispetto al movimento)

$V_0 = 72,69 \text{ m/s}$

Nel Calcolo si considerano le seguenti condizioni:

1. Dalla campagna anemometrica si evince che le velocità del vento sul sito variano prevalentemente da 0 a 10 m/s, quindi la probabile rottura del frammento avverrà in questo range di velocità;
2. Inoltre l'azione dinamica del vento, ortogonale al piano che contiene la parabola, riduce ulteriormente lo sviluppo della traiettoria reale rispetto a quella teorica quindi tanto maggiore è la velocità del vento tanto maggiore è la curvatura fuori dal piano;



$V_0$  viene ricavato dalla seguente formula:

$$V_0 = V_r \times 2\pi / 60 \times R_f$$

Dove

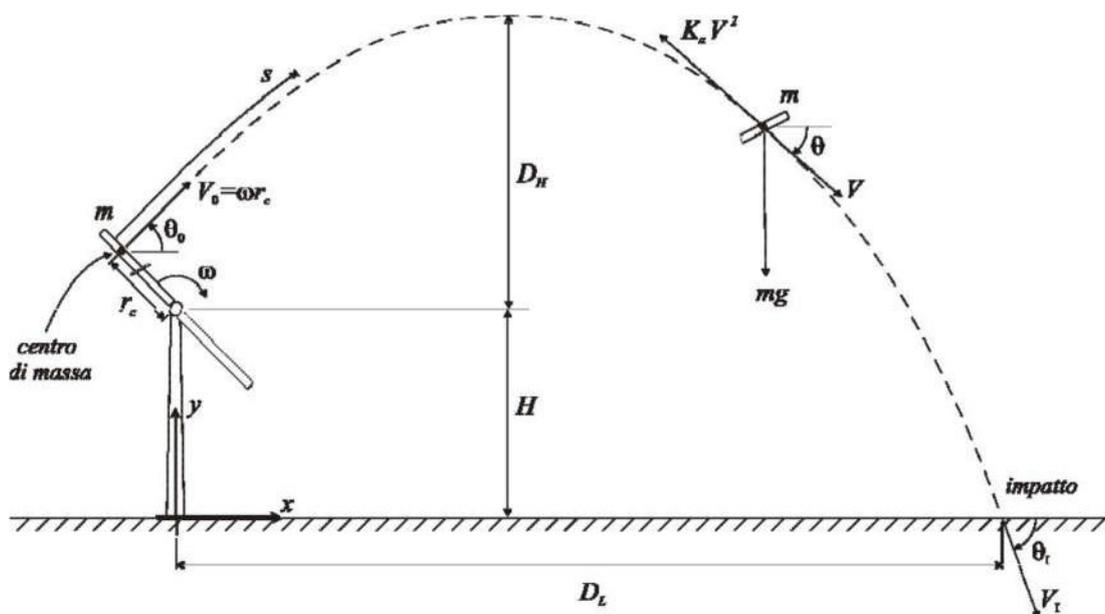
$V_r$  è la velocità di rotazione

$R_f$  è il raggio del frammento di pala (dall'asse navicella al centro di massa del frammento)  $V_0 = 98.41 \text{ m/s}$

$C_r = 1,5$  (coefficiente di forma (adimensionale))

$\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$  (densità del fluido attraversato)

$m_f = 150 \text{ kg}$  (massa del frammento)



Vista frontale dell'aerogeneratore e della traiettoria di un frammento di pala espulso

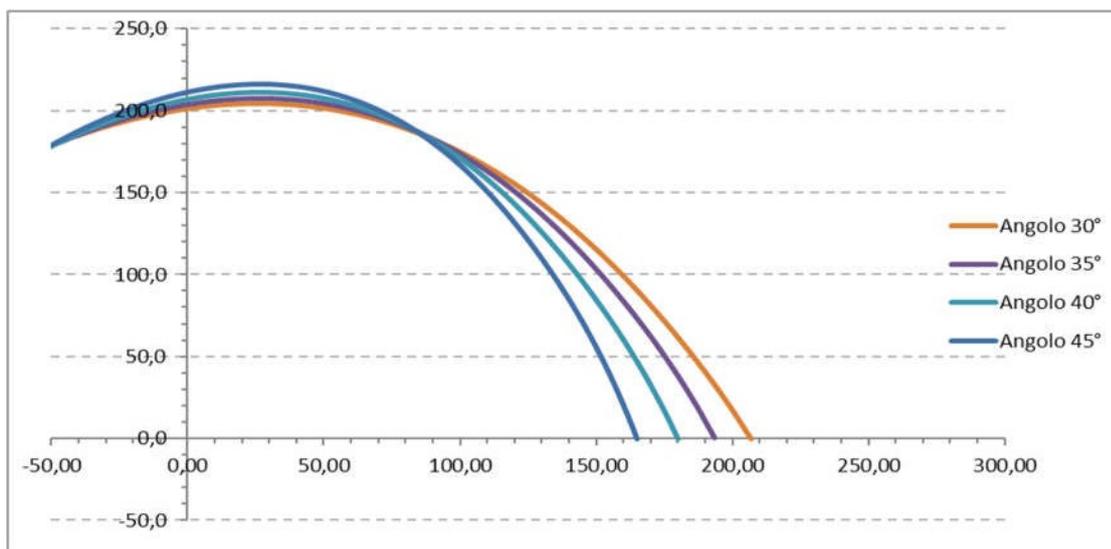


Grafico della traiettoria di un frammento di pala

## 5. CONSIDERAZIONI FINALI

Ponendoci nella condizione peggiore che un frammento o l'intera pala si staccasse dal mozzo, si è dimostrato che l'impatto della stessa avviene a distanze molto contenute.

Infatti nel caso si staccasse l'intera pala il suo valore massimo di gittata è di **145** mt alla velocità massima di rotazione, nella direzione prevalente di vento e trascurando l'attrito dell'aria.

Nel caso di rottura di un frammento di pala, per il quale vigono solo calcoli di tipo probabilistico, come si evince dai calcoli, si ha un valore di gittata pari a circa **210 mt** per un frammento pari a 5m della pala.

L'accadimento di tali fenomeni ha un valore di rischio molto basso, resi ancora più bassi dal fattore di contemporaneità. Si tenga conto che tutte le turbine eoliche sono dotate di un complesso sistema parafulmine, e per quanto riguarda l'urto non è pensabile potersi tutelare da un incidente, quale un velivolo o altro, che impatta sul rotore di una turbina o alla base della torre.

Riportando quanto scritto dalla BP POWER nel "Blade throw calculation under normal operating" "esperienze basate su dati reali (su una casistica di 1578 casi) fino all'agosto del 2006 hanno dimostrato che nel caso di distacco della pala o parti di essa l'unico moto che si è registrato è stato un moto di completa rotazione e che le distanze percorse lungo il moto sono risultate sempre inferiori alle lunghezze riportate nella relazione. Il distacco delle parti, in genere piccole, dovuto a guasti causati da eventi eccezionali (quali la straordinaria energia prodotta da un fulmine) ha portato nel peggiore dei casi, a ritrovare le parti stesse a distanze non superiori ai 40-50 metri dalla base della torre."

Si riportano i Tabulati di calcolo per angolo di partenza con percorrenza massima del frammento:

Angolo di Lancio 30

tp s	Xp m	wp o	Zp m
0,00	-40,83	30,00	184,7
0,10	-37,31	28,79	186,7
0,20	-33,79	27,55	188,6
0,30	-30,29	26,27	190,4
0,40	-26,81	24,96	192,0
0,50	-23,34	23,61	193,6
0,60	-19,89	22,23	195,1
0,70	-16,45	20,82	196,4
0,80	-13,03	19,37	197,7
0,90	-9,62	17,89	198,8
1,00	-6,24	16,37	199,9
1,10	-2,87	14,82	200,8
1,20	0,48	13,24	201,6
1,30	3,81	11,63	202,4
1,40	7,13	10,00	203,0
1,50	10,42	8,34	203,5
1,60	13,70	6,65	204,0

1,70	16,95	4,94	204,3
1,80	20,19	3,21	204,5
<b>1,90</b>	<b>23,41</b>	<b>1,47</b>	<b>204,7</b>
2,00	26,60	-0,29	204,7
2,10	29,78	-2,06	204,6
2,20	32,93	-3,84	204,5
2,30	36,07	-5,62	204,2
2,40	39,18	-7,40	203,9
2,50	42,28	-9,18	203,4
2,60	45,35	-10,95	202,9
2,70	48,40	-12,71	202,2
2,80	51,43	-14,46	201,5
2,90	54,45	-16,20	200,7
3,00	57,44	-17,92	199,7
3,10	60,41	-19,61	198,7
3,20	63,37	-21,28	197,6
3,30	66,30	-22,92	196,4
3,40	69,22	-24,54	195,2
3,50	72,12	-26,12	193,8
3,60	74,99	-27,68	192,3
3,70	77,86	-29,20	190,8
3,80	80,70	-30,68	189,1
3,90	83,53	-32,13	187,4
4,00	86,34	-33,54	185,6
4,10	89,13	-34,91	183,7
4,20	91,91	-36,25	181,7
4,30	94,68	-37,55	179,6
4,40	97,43	-38,81	177,5
4,50	100,16	-40,04	175,2
4,60	102,88	-41,23	172,9
4,70	105,59	-42,38	170,5
4,80	108,29	-43,50	168,0
4,90	110,97	-44,58	165,4
5,00	113,64	-45,63	162,7
5,10	116,30	-46,65	159,9

5,20	118,94	-47,63	157,1
5,30	121,58	-48,58	154,1
5,40	124,20	-49,50	151,1
5,50	126,82	-50,39	148,0
5,60	129,42	-51,25	144,8
5,70	132,01	-52,09	141,5
5,80	134,60	-52,89	138,1
5,90	137,17	-53,67	134,7
6,00	139,74	-54,43	131,2
6,10	142,30	-55,16	127,5
6,20	144,85	-55,86	123,8
6,30	147,39	-56,55	120,0
6,40	149,92	-57,21	116,1
6,50	152,45	-57,85	112,2
6,60	154,97	-58,47	108,1
6,70	157,48	-59,07	104,0
6,80	159,99	-59,66	99,7
6,90	162,49	-60,22	95,4
7,00	164,98	-60,77	91,0
7,10	167,47	-61,30	86,5
7,20	169,95	-61,81	81,9
7,30	172,42	-62,31	77,3
7,40	174,89	-62,79	72,5
7,50	177,35	-63,26	67,7
7,60	179,81	-63,72	62,7
7,70	182,26	-64,16	57,7
7,80	184,71	-64,59	52,6
7,90	187,16	-65,05	47,4
8,00	189,59	-65,53	42,1
8,10	192,03	-66,04	36,7
8,20	194,46	-66,57	31,2
8,30	196,88	-67,11	25,5
8,40	199,30	-67,66	19,7
8,50	201,72	-68,22	13,7
8,72	207,03	-69,44	0,0

