



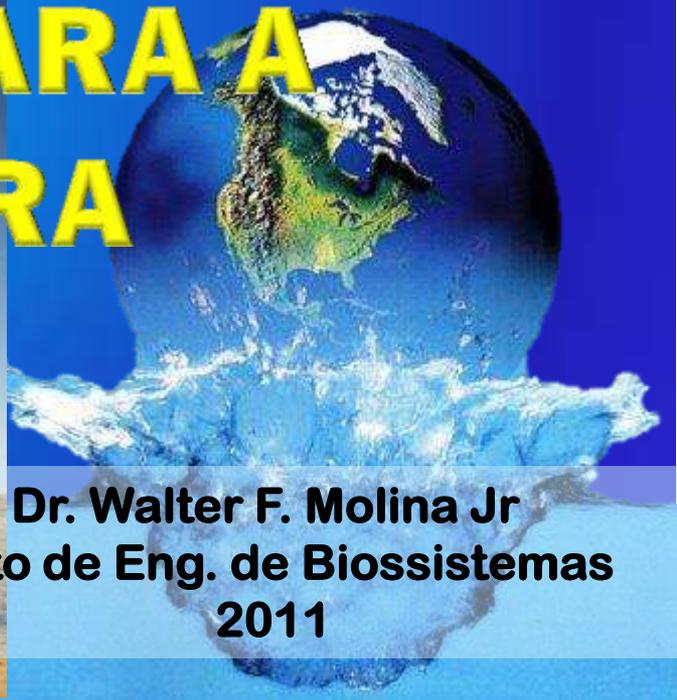
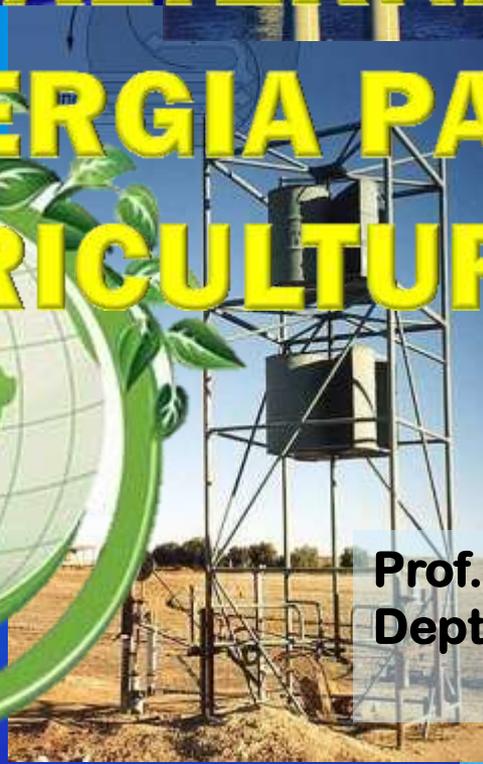
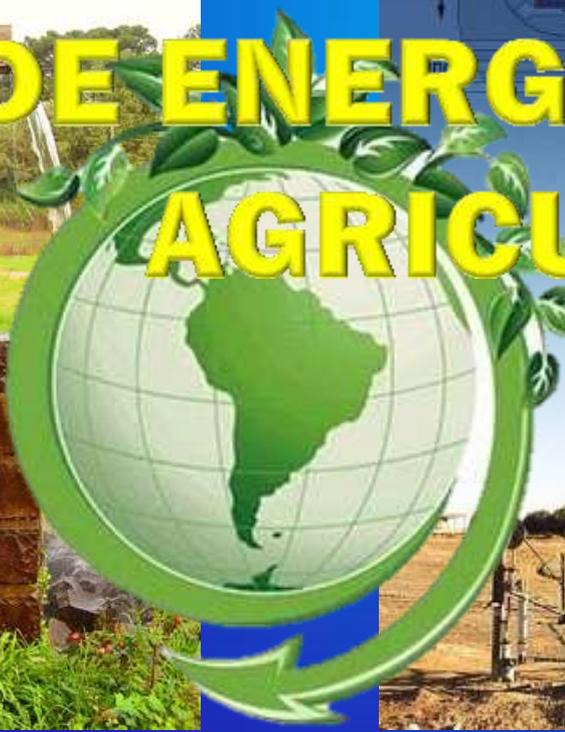
# ESALQ

Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"  
Universidade de São Paulo

## LEB 332

# FONTES ALTERNATIVAS

# DE ENERGIA PARA A AGRICULTURA



Prof. Dr. Walter F. Molina Jr  
Depto de Eng. de Biosistemas  
2011

# MOTORES EÓLICOS

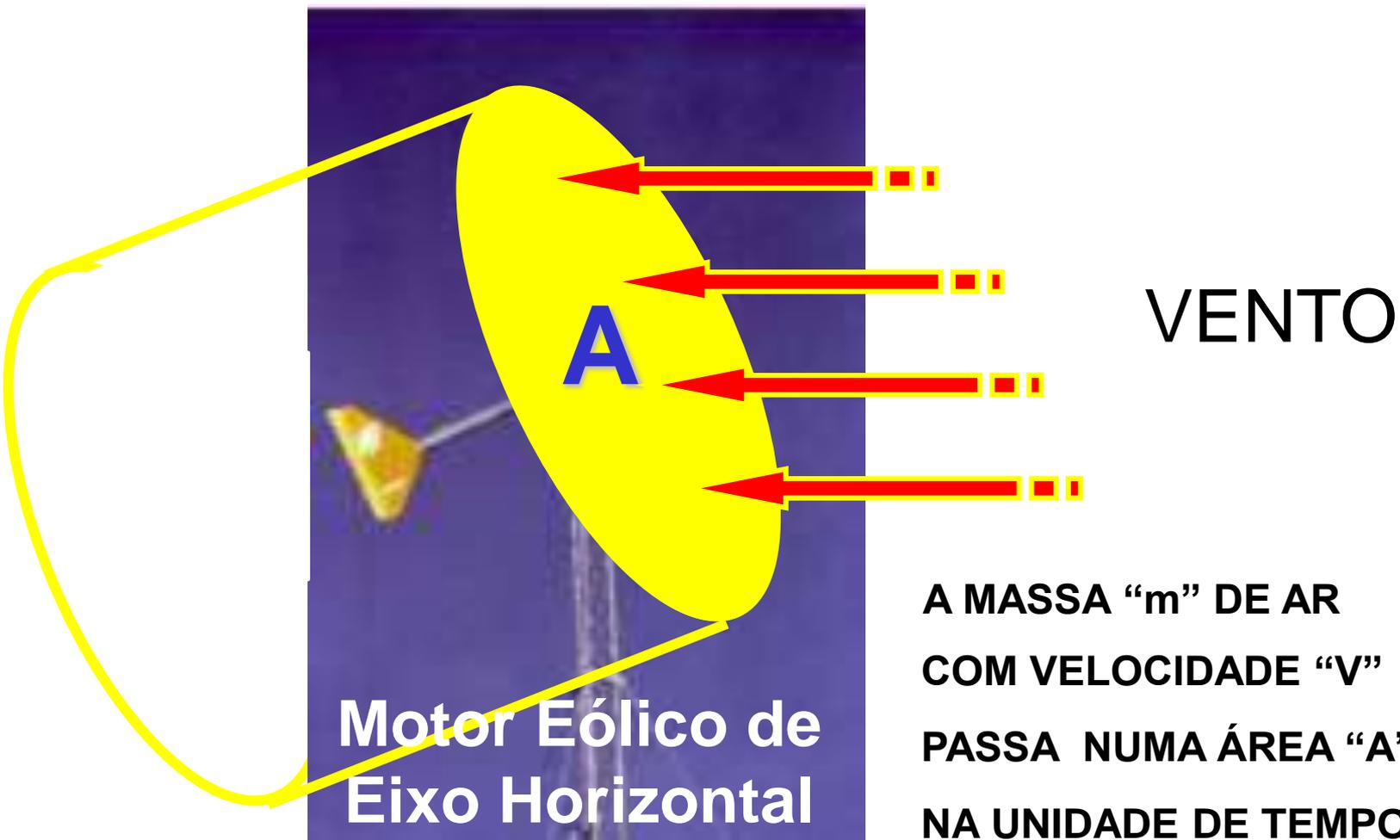
## 1. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.

O QUE É VENTO?

**“MASSA DE AR EM MOVIMENTO”**

E SUA ENERGIA CINÉTICA ( $e_v$ ) É EXPRESSA POR:

$$e_v = m \frac{v^2}{2} \quad (1)$$



A MASSA “m” DE AR  
COM VELOCIDADE “V”  
PASSA NUMA ÁREA “A”  
NA UNIDADE DE TEMPO,  
SERÁ:

$$m = d \cdot A \cdot V \quad (2)$$

ONDE  $d$  = DENSIDADE DO AR (1290 g/m<sup>3</sup>)

A POTÊNCIA EÓLICA ( $P_e$ ) É OBTIDA SUBSTITUINDO-SE (2) EM (1):

$$e_v = 1 \quad P_e = dA \frac{v^3}{2} \quad A \cdot v$$

**EQUAÇÃO GERAL DA POTÊNCIA TOTAL  
DISPONÍVEL PARA DIFERENTES UNIDADES DE  
POTÊNCIA, ÁREA E VELOCIDADE**

$$P_e = k \cdot A \cdot v^3$$

# VALORES DE DA CONSTANTE **k** A SEREM EMPREGADOS NO CÁLCULO DA POTÊNCIA DISPONÍVEL NO VENTO

UNIDADES DE POTÊNCIA	ÁREA	VELOCIDADE	VALOR DE k
CV	m <sup>2</sup>	m/s	0,0008766565
kW	m <sup>2</sup>	m/s	0,00006449924
kW	m <sup>2</sup>	km/h	0,0000138244
hp	pé <sup>2</sup>	mph	0,0000071316
kW	pé <sup>2</sup>	mph	0,0000053215

**SEGUNDO BETZ (1922): APENAS UMA FRAÇÃO DO POTENCIAL DISPONÍVEL NO VENTO SE TRANSFORMA EM TRABALHO ÚTIL. PERDAS OCORREM DEVIDO A : POTÊNCIA DE ATRITO, VARIAÇÃO DA VELOCIDADE, TIPO DE ROTOR E POR QUESTÕES AERODINÂMICAS.**

**Albert Betz (1885-1968):** Físico alemão que desenvolveu estudos teóricos sobre o desempenho de aeromotores. A famosa “Lei de Betz” prega que é possível transformar  $16/27$  (59%) da energia cinética de uma corrente de ar em energia mecânica.



**Estudos mais recentes verificaram que na realidade o valor da energia eólica que pode ser transformado em energia mecânica é menor que os 59%**

**apregoados por Betz.**

**A esta fração deu-se o nome de**

## **COEFICIENTE DE EFICIÊNCIA MÁXIMA - $C_p$**

**$C_p$  VARIA DE**

**0,3 A 0,4**

**dependendo do tipo de aeromotor e de sua tecnologia**

ASSIM, A EQUAÇÃO DE POTÊNCIA  
MECÂNICA ( $P_m$ ) OBTIDA  
É EXPRESSA POR:

$$P_m = C_p \cdot k \cdot A \cdot V^3$$

OUTROS ESTUDOS EM AEROMOTORES DE *ÁRVORES HORIZONTAIS E DE PÁS* DEMONSTRARAM QUE HÁ LIMITES NAS RELAÇÕES ENTRE VELOCIDADE ANGULAR ( $\omega$ ) , RAIOS DO ROTOR ( $R$ ) E VELOCIDADE DO VENTO ( $V$ ) A RELAÇÃO ÓTIMA ENTRE ESSAS VARIÁVEIS:

$$\frac{\omega \cdot R}{V} = 0,9$$

## EXEMPLO APLICATIVO:

AVALIAR O POTENCIAL EÓLICO ( $P_e$ ) EM cv, A POTÊNCIA MECÂNICA OBTIDA ( $P_m$ ), EM cv; A VELOCIDADE DO ROTOR, EM rpm; E O TORQUE (T), EM mkgf DESENVOLVIDOS POR UM AEROMOTOR TIPO BETZ nº 2. DADOS:

$$C_p = 0,35;$$

VELOCIDADE NOMINAL DO VENTO ( $V$ ) = 5,9 m/s

DIÂMETRO DA RODA-DE-PÁS ( $D$ ) = 3,95 m.

Área do Rotor:  $A = \pi \cdot R^2 = 3,14 \cdot (1,95)^2 = 12 \text{ m}^2$

Potência Eólica:

Área –  $\text{m}^2$       Potência – cv      Velocidade – m/s

**VALORES DE DA CONSTANTE **k** A SEREM  
EMPREGADOS NO CÁLCULO DA POTÊNCIA  
DISPONÍVEL NO VENTO**

<b>Unidades de Potência</b>	<b>Área</b>	<b>Velocidade</b>	<b>Valor de k</b>
cv	m <sup>2</sup>	m/s	0,0008766565
kW	m <sup>2</sup>	m/s	0,00006449924
kW	m <sup>2</sup>	km/h	0,0000138244
hp	pé <sup>2</sup>	mph	0,0000071316
kW	pé <sup>2</sup>	mph	0,0000053215

$$\text{Área do Rotor: } A = \pi \cdot R^2 = 3,14 \cdot (1,95)^2 = 12 \text{ m}^2$$

Potência Eólica:

Área – m<sup>2</sup>      Potência – cv      Velocidade – m/s

$$\text{Valor de } k = 0,0008766565$$

$$P_e = 0,0008766565 \cdot 12 \cdot (5,9)^3 = 2,16 \text{ cv}$$

Potência Mecânica – Coeficiente de Eficiência Máxima (Cp)

$$P_m = 0,35 \cdot 2,16 = 0,76 \text{ cv}$$

## Velocidade do Rotor

$$\frac{\omega \cdot R}{V} = 0,9 \quad \Rightarrow \quad \omega = \frac{0,9 \cdot V}{R} = 2,72 \text{ rad/s}$$

$$1 \text{ volta} \longrightarrow 2 \pi \text{ rad}$$

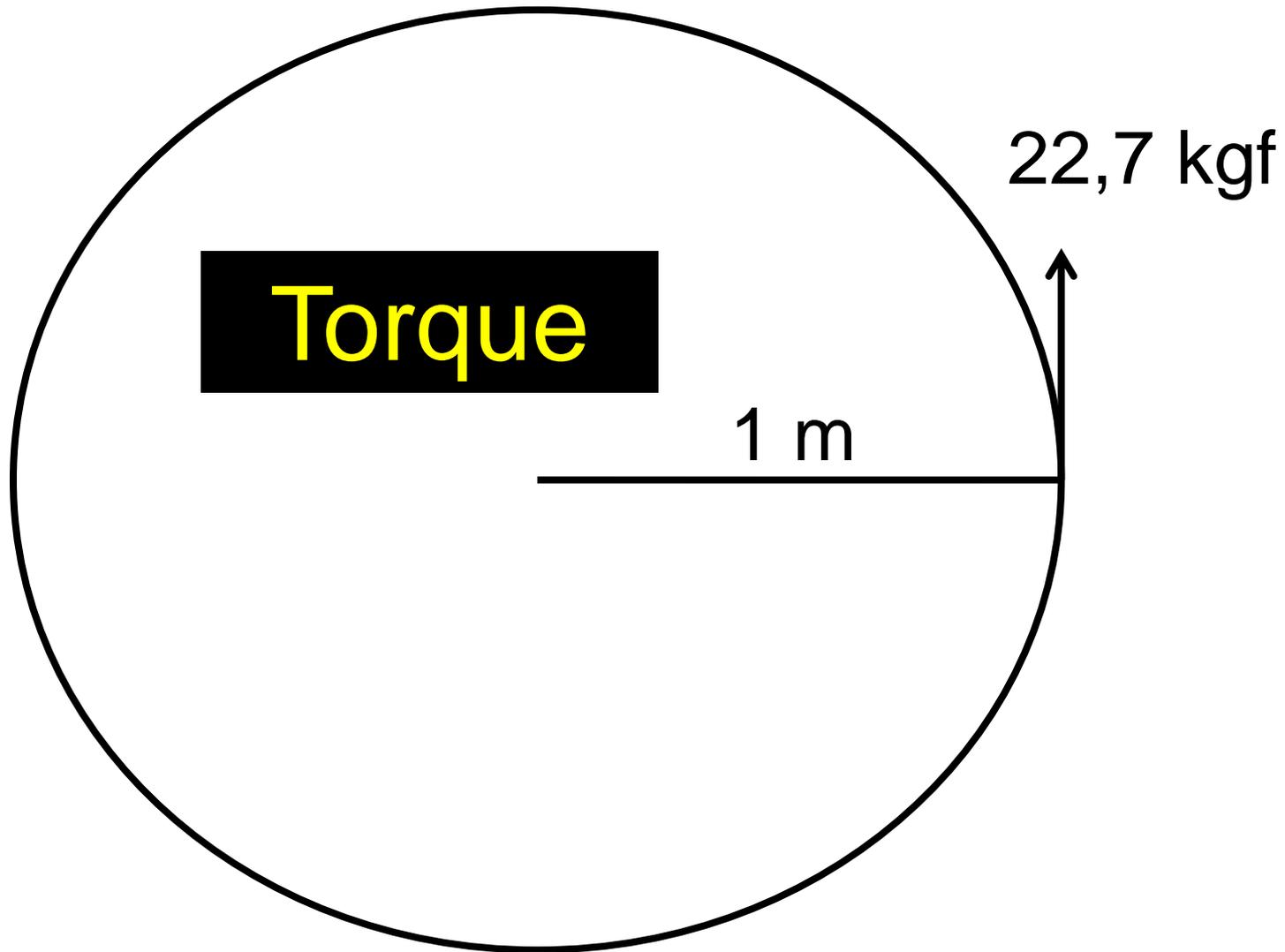
$$X \text{ voltas} \longleftarrow 2,72 \text{ rad}$$

$$X = \frac{2,72}{2 \cdot 3,14} \cdot 60 = 24 \text{ RPM}$$

Torque

$$P = 2\pi NT \longrightarrow T = \frac{P}{2\pi N}$$

$$T = \frac{0,76}{2\pi \cdot 24} \cdot 75 \cdot 60 = 22,7 \text{ mkgf}$$



# PARA UTILIZAÇÃO DE AEROMOTORES DEVE-SE OBSERVAR ALGUMAS CARACTERÍSTICAS DOS VENTOS:

- ALTITUDE ; 30- 60 m

- A VARIAÇÃO DA VELOCIDADE, POR HORA,  
DURANTE O ANO

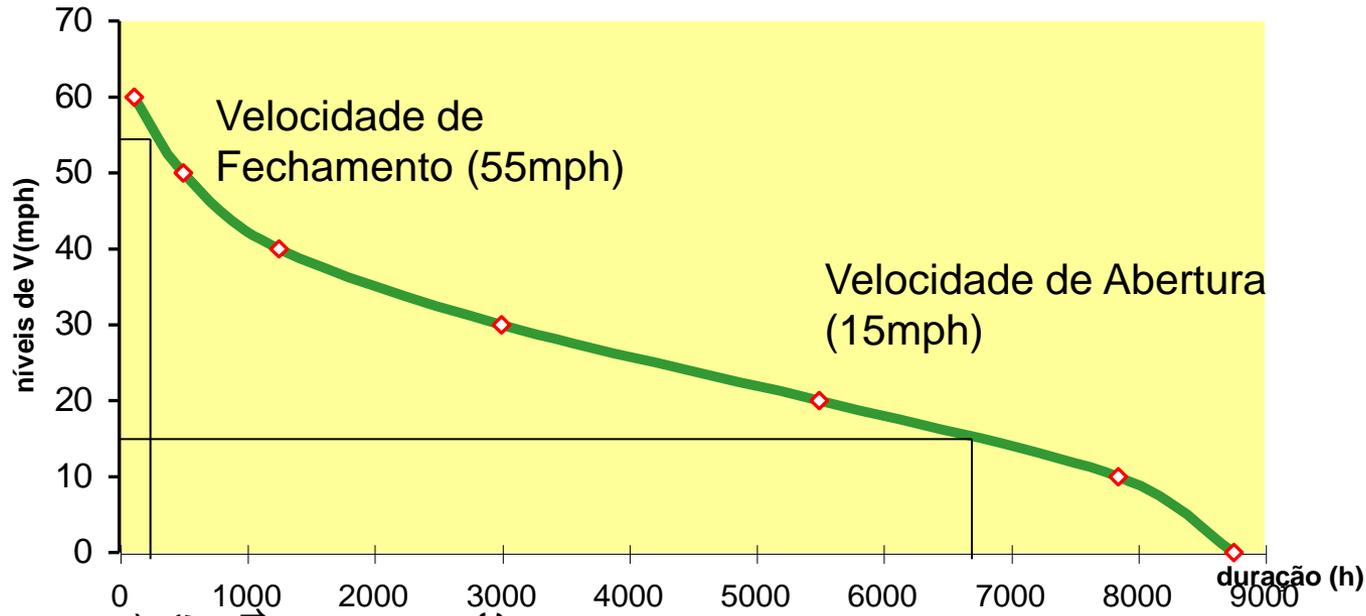
- POTENCIAL MÉDIO ANUAL:

$24 \text{ h/dia} \cdot 365 \text{ dias/ano} = 8760 \text{ h/ano} = \text{VALORES}$

**EXEMPLO: NUM CERTO LOCAL OBTEVE-SE OS SEGUINTE VALORES DE VELOCIDADES MÉDIAS DOS VENTOS:**

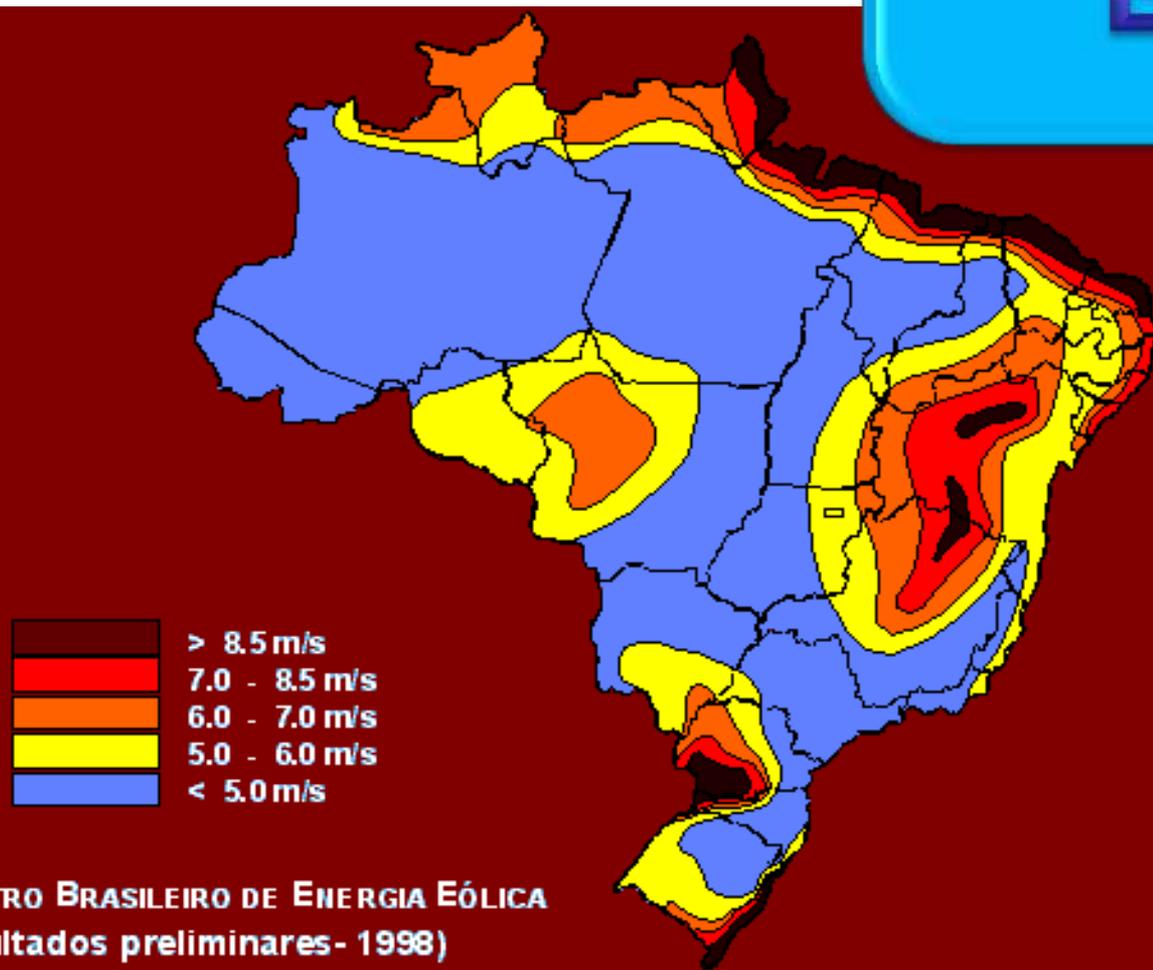
<b>V (km/h)</b>	<b>Tempo (h)</b>	<b>Potencial Eólico Anual (<math>V^3t</math>)</b>
0	8760	0
10	7850	$7,85 \times 10^6$
20	5550	$44,00 \times 10^6$
30	3000	$81,00 \times 10^6$ (máximo)
40	1250	$80,00 \times 10^6$
50	500	$62,50 \times 10^6$
60	120	$25,92 \times 10^6$

Curva de duração da velocidade dos ventos, ao longo do ano.



Todos os aeromotores de árvore horizontal, apresentam, como uma de suas especificações, as velocidades de ABERTURA e de FECHAMENTO.

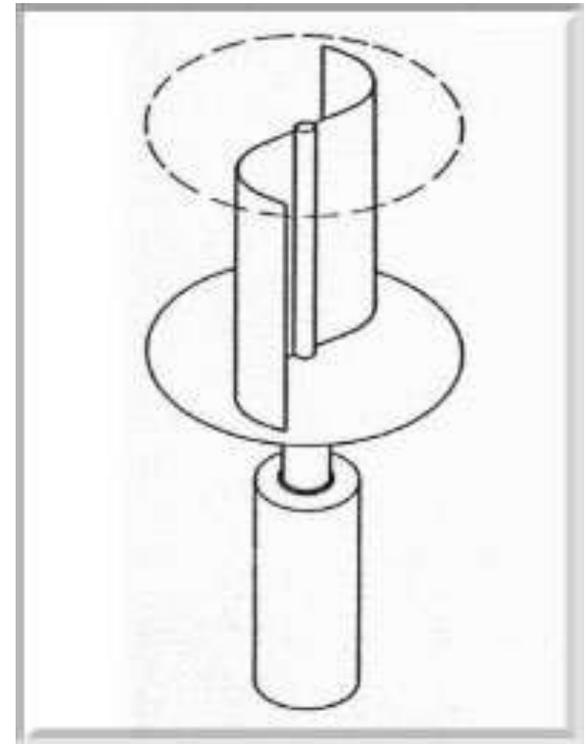
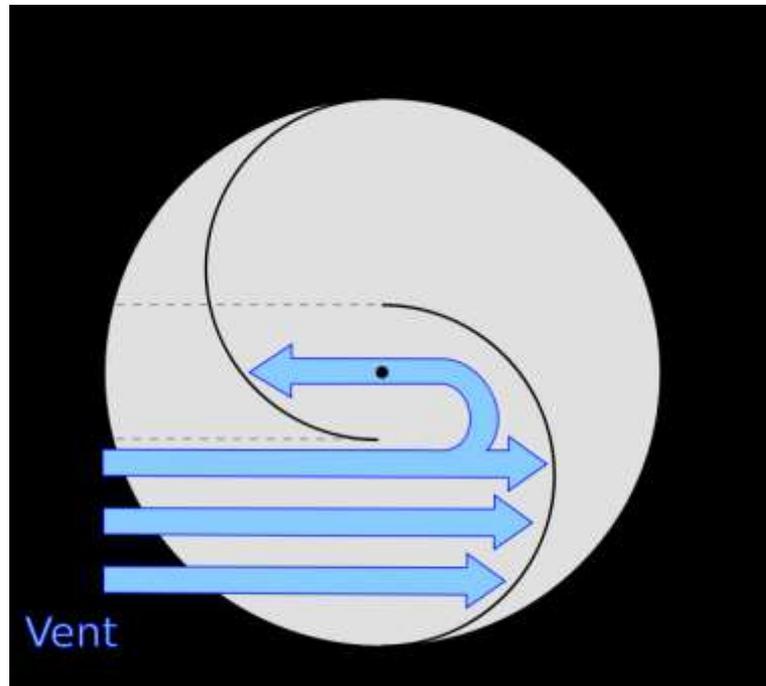
# POTENCIAL EÓLICO DO BRASIL

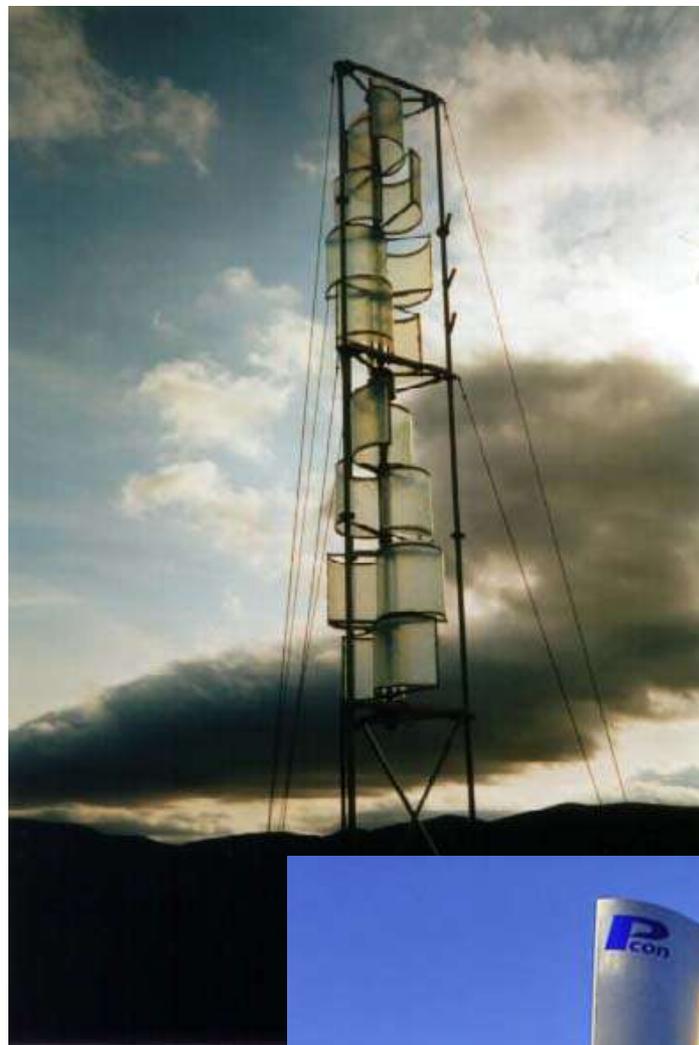
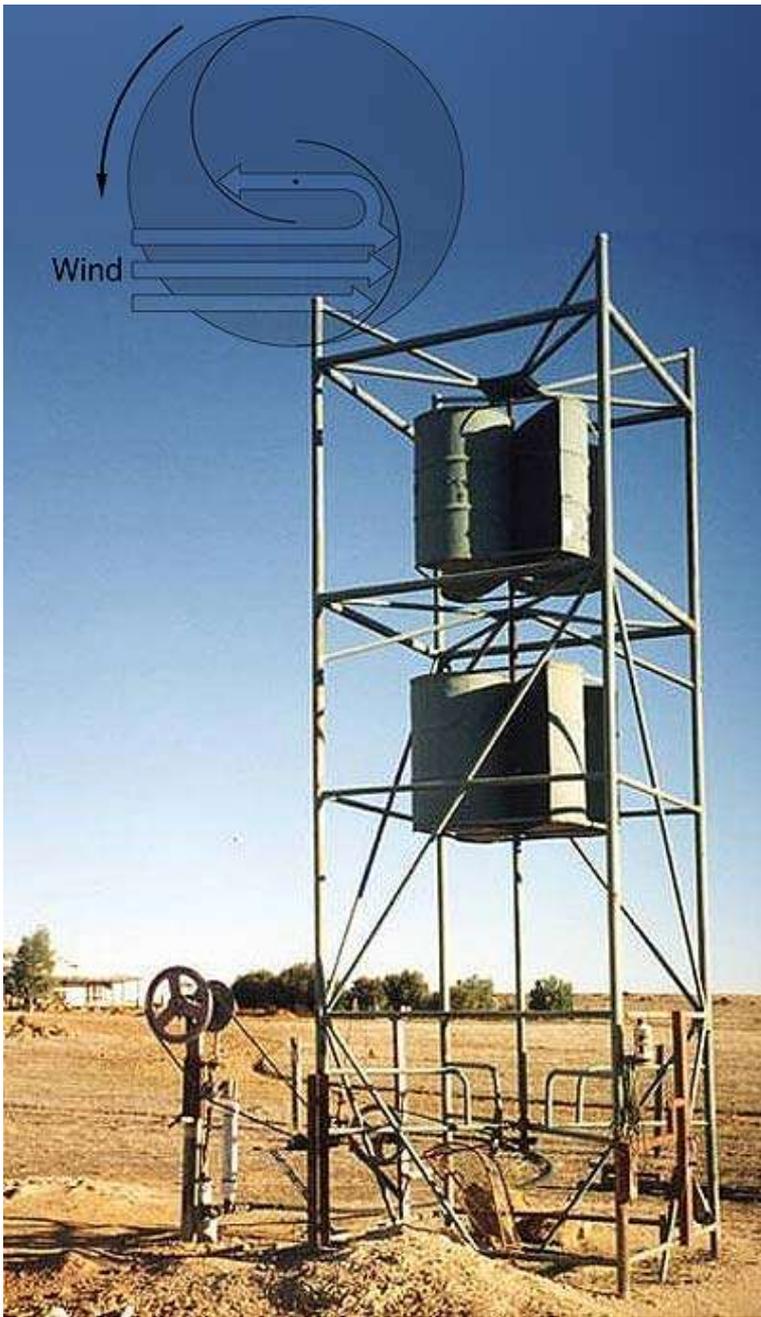


CENTRO BRASILEIRO DE ENERGIA EÓLICA  
(resultados preliminares - 1998)

# MOTORES EÓLICOS DE ÁRVORE VERTICAL

## ROTOR DE SAVONIUS

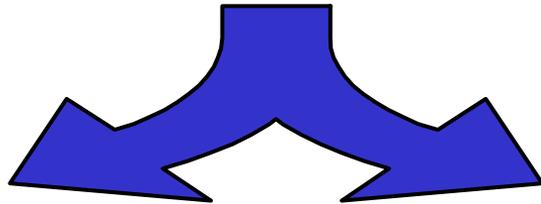




# MOTORES HIDRÁULICOS

## CANAL ABERTO

Utiliza a Energia das Quedas  
D'água



**Turbinas**

(BERNOUILLE E  
TORRICELLI)

- Francis
- Kaplan
- Pelton

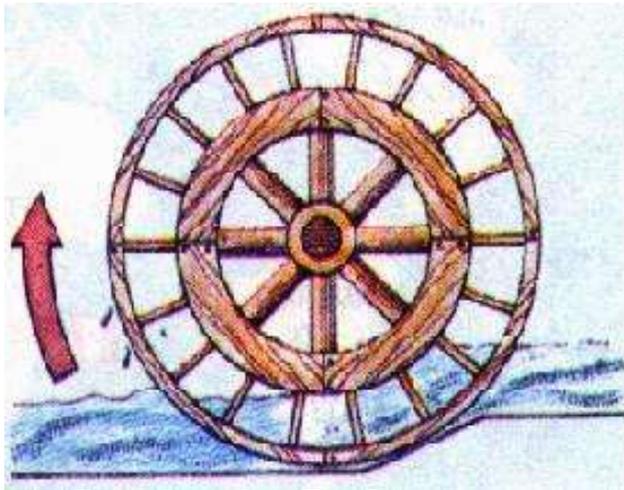
**RODAS D'ÁGUA**

- Alcatruzes
- De Pás
- De Baixo

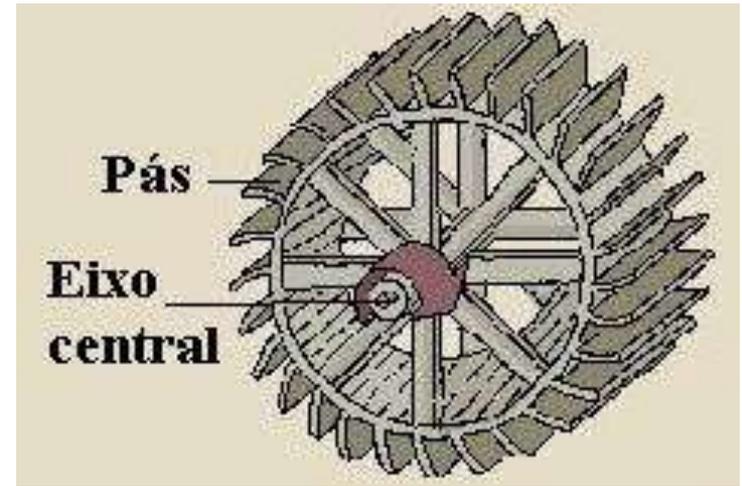
## CIRCUITO FECHADO



Sistemas Óleo-  
Dinâmicos



**Roda de Baixo**

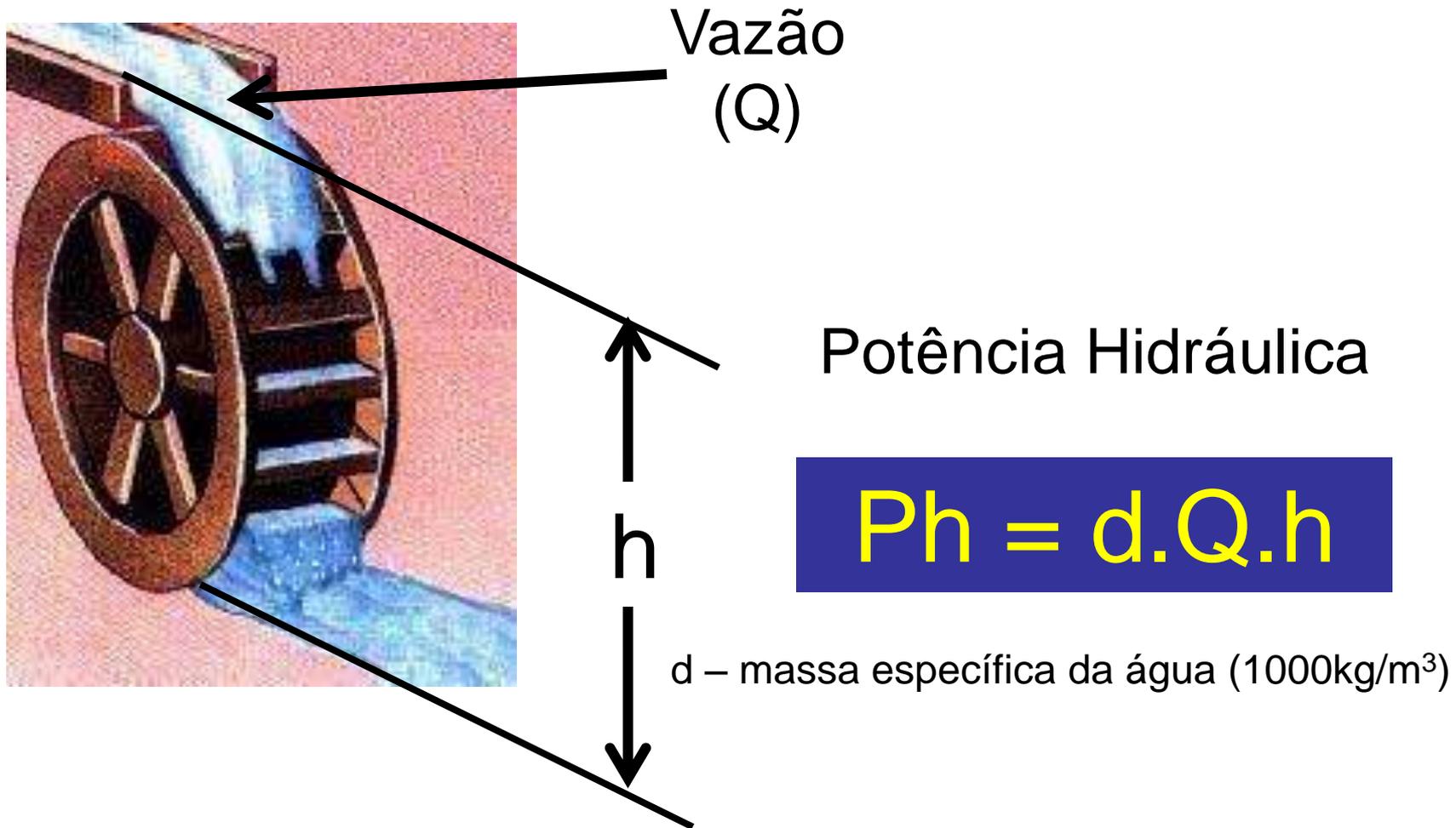


**Roda de Pás**



**Roda de Alcatruzes**

# Energia Disponível num Canal Aberto



**EXEMPLO:  
TESTE DE UMA RODA D'ÁGUA DE ALCATRUZES.  
ESPECIFICAÇÕES:**

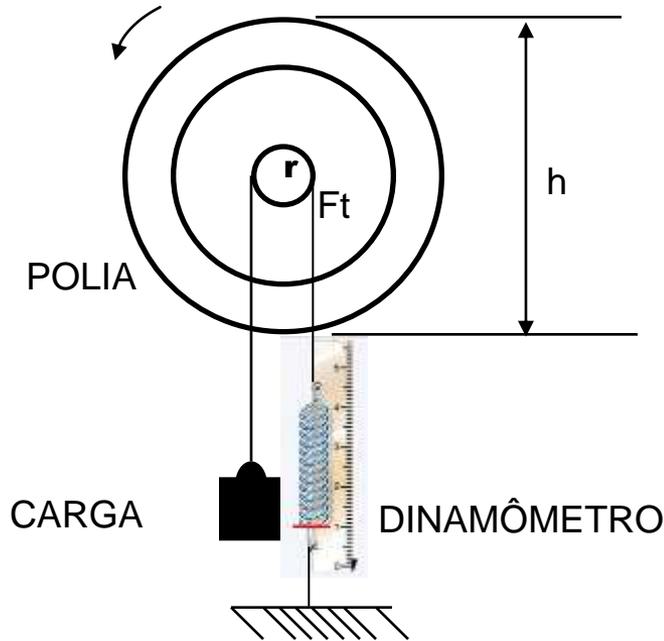
**$H_m = 1,75 \text{ m}$  ;  $\text{RAIO DA POLIA} = 0,2 \text{ m}$  ;  $\text{VAZÃO} = 0,009 \text{ m}^3/\text{s}$**

**1. CÁLCULO DA POTÊNCIA HIDRÁULICA**

$$\text{Ph} = d \cdot \text{Qt} \cdot H_m / 75 = 1000 \cdot 0,009 \cdot 1,75 / 75 = 0,21 \text{ cv}$$

**2. DETERMINAÇÕES NA RODA D'ÁGUA:**

# RODA D'ÁGUA



$r$  = RAIO DA POLIA

$h$  = ALTURA MANOMÉTRICA

$F_t$  = FORÇA DE ATRITO

$$P = 2\pi NT$$

EXEMPLO: TESTE DE UMA RODA D'ÁGUA DE ALCATRUZES.

ESPECIFICAÇÕES:

$h = 1,75 \text{ m}$ ; RAIO DA POLIA =  $0,2 \text{ m}$ ; VAZÃO =  $0,009 \text{ m}^3/\text{s}$

# EXEMPLO PRÁTICO

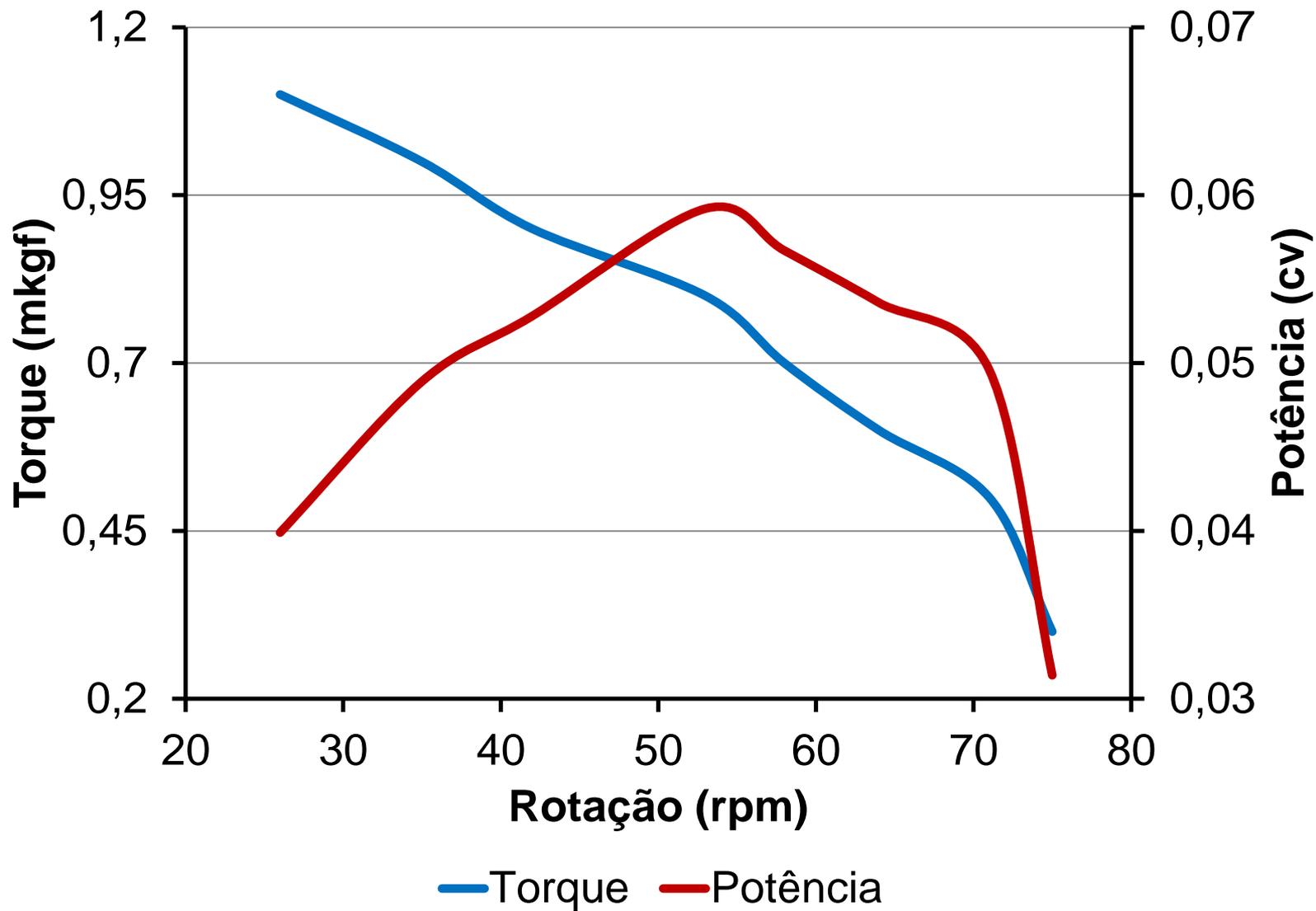
Leitura	Rpm (a)	Carga (kgf) (b)	Dinamometro (kgf) (c)	Atrito (kgf) (c) - (b)=(d)	Torque (mkgf) (d) . r = (e)	Potência Mecânica (cv)
1	75	1,0	2,5	1,5	0,3	0,0314
2	71	2,0	4,5	2,5	0,5	0,0496
3	64	3,0	6,0	3,0	0,6	0,0536
4	58	4,0	7,5	3,5	0,7	0,0567
5	53	5,0	9,0	4,0	0,8	0,0592
6	42	6,0	10,5	4,5	0,9	0,0528
7	35	7,0	12,0	5,0	1,0	0,0489
8	26	8,0	13,5	5,5	1,1	0,0399

$$cv = 75kgf \frac{1m}{s}$$

$$rpm = \frac{Rev}{min}$$



$$P = \frac{2\pi NT}{60 \cdot 75}$$



# Potência Hidráulica Teórica

$$P_h = d \cdot Q \cdot h = 1000 \cdot 0,009 \cdot 1,75 = 0,21$$

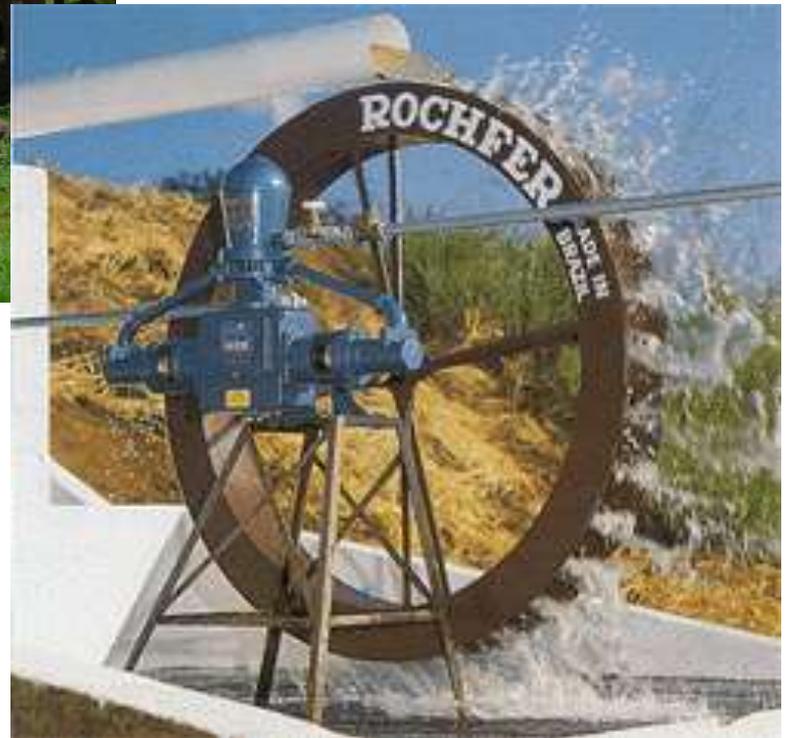
# Rendimento Mecânico ( $\eta$ )

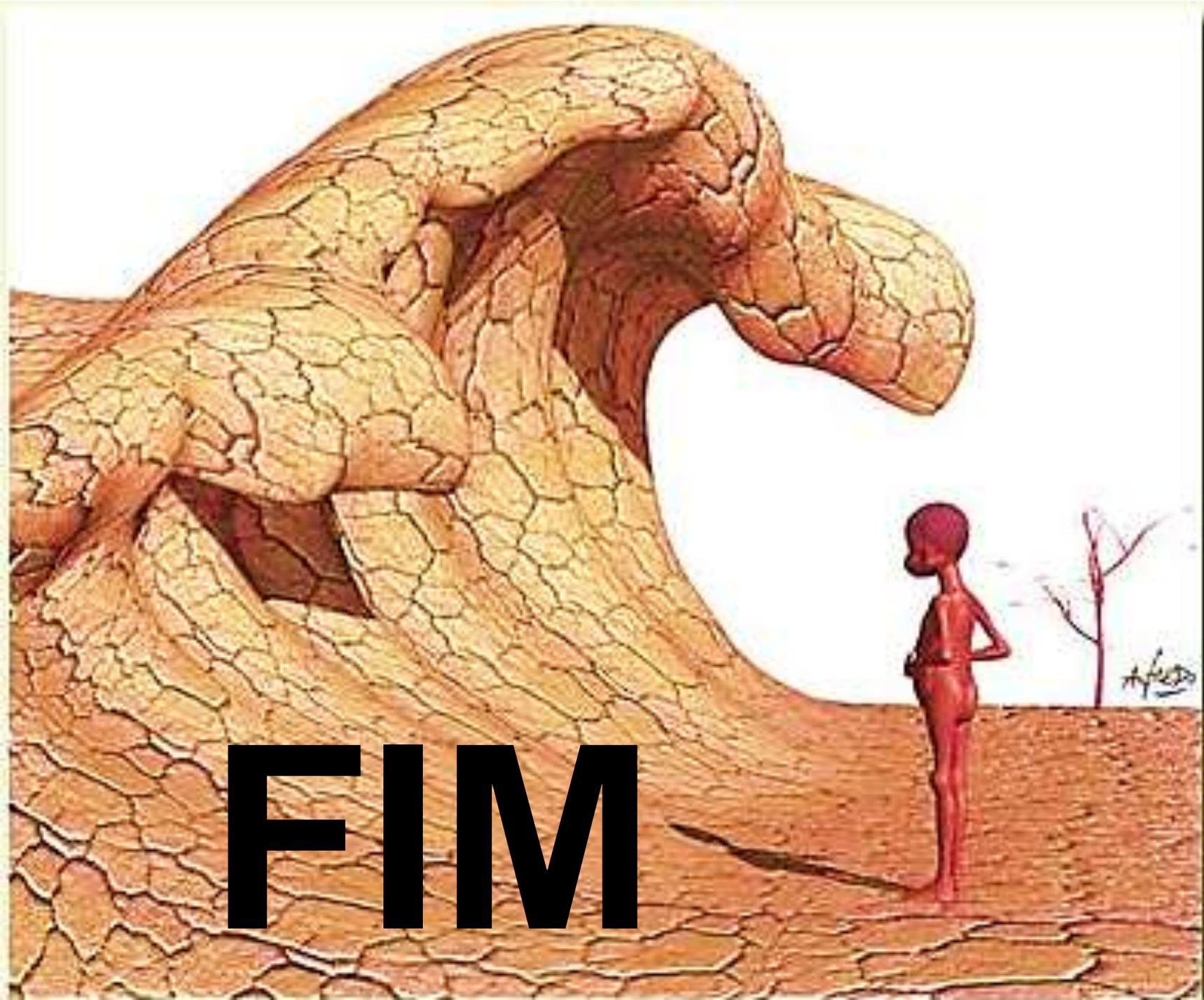
$$P_m = 0,0592$$

$$\eta = \frac{P_m}{P_h} \times 100 \quad \eta = \frac{0,0592}{0,21} \times 100 = 28,2\%$$

# MOTORES HIDRÁULICOS DE CANAL ABERTO: **RODAS D'ÁGUA**







**FIM**