

USO DE INVERORES DE FREQUÊNCIA EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO DO TIPO PIVÔ CENTRAL

VARIABLE FREQUENCY DRIVE USE ON
CENTER PIVOT IRRIGATION SYSTEMS

Alberto Colombo
Universidade Federal de Lavras-
UFLA
Lavras, MG.
acolombo@deg.ufla.br



INOVAGRI
International Meeting

&



IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação





http://www.apescapiumhi.50webs.com/mapa_da_regiao.htm



INOVAGRI
International Meeting

&



IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação





O Lago de Furnas no Estado de **Minas** **Gerais**

O Lago cobre uma superfície de **1440km²**, atingindo **34 municípios** de Minas Gerais .

Ao longo de sua extensão, o lago exibe diversas paisagens com contornos sinuosos, por causa do "**mar de morros**" sobre o qual a represa foi formada.

O nível de armazenamento do lago é de 768 metros acima do nível do mar, com o **nível máximo de 769,3 metros** e o **nível mínimo** de operação de **750 metros**.

http://pt.wikipedia.org/wiki/Usina_Hidrel%C3%A9trica_de_Furnas



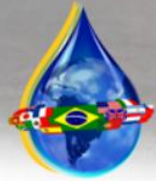
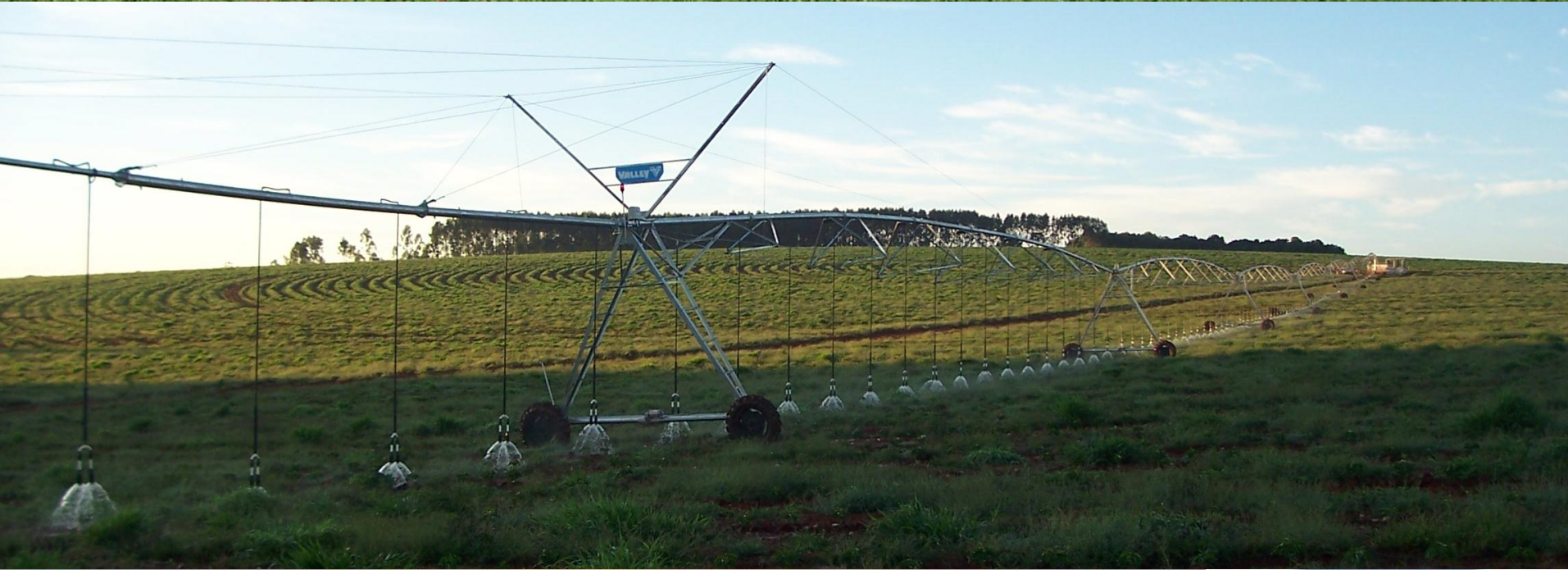
INOVAGRI
International Meeting

&



IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação





INOVAGRI
International Meeting

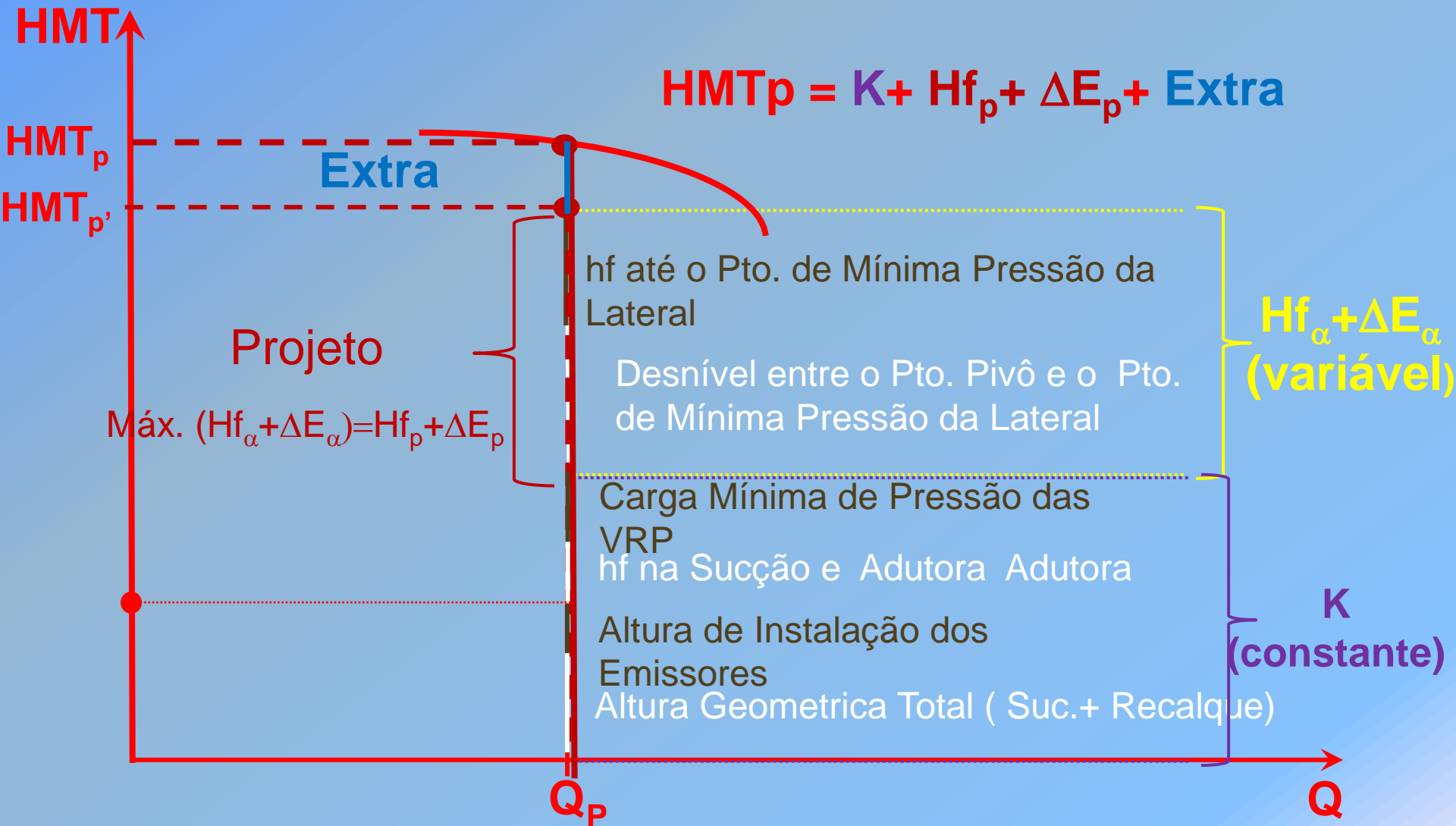
&



IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação



Altura Manométrica Total- Pivô Central



INOVAGRI
International Meeting

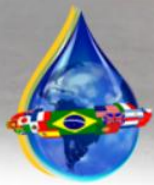
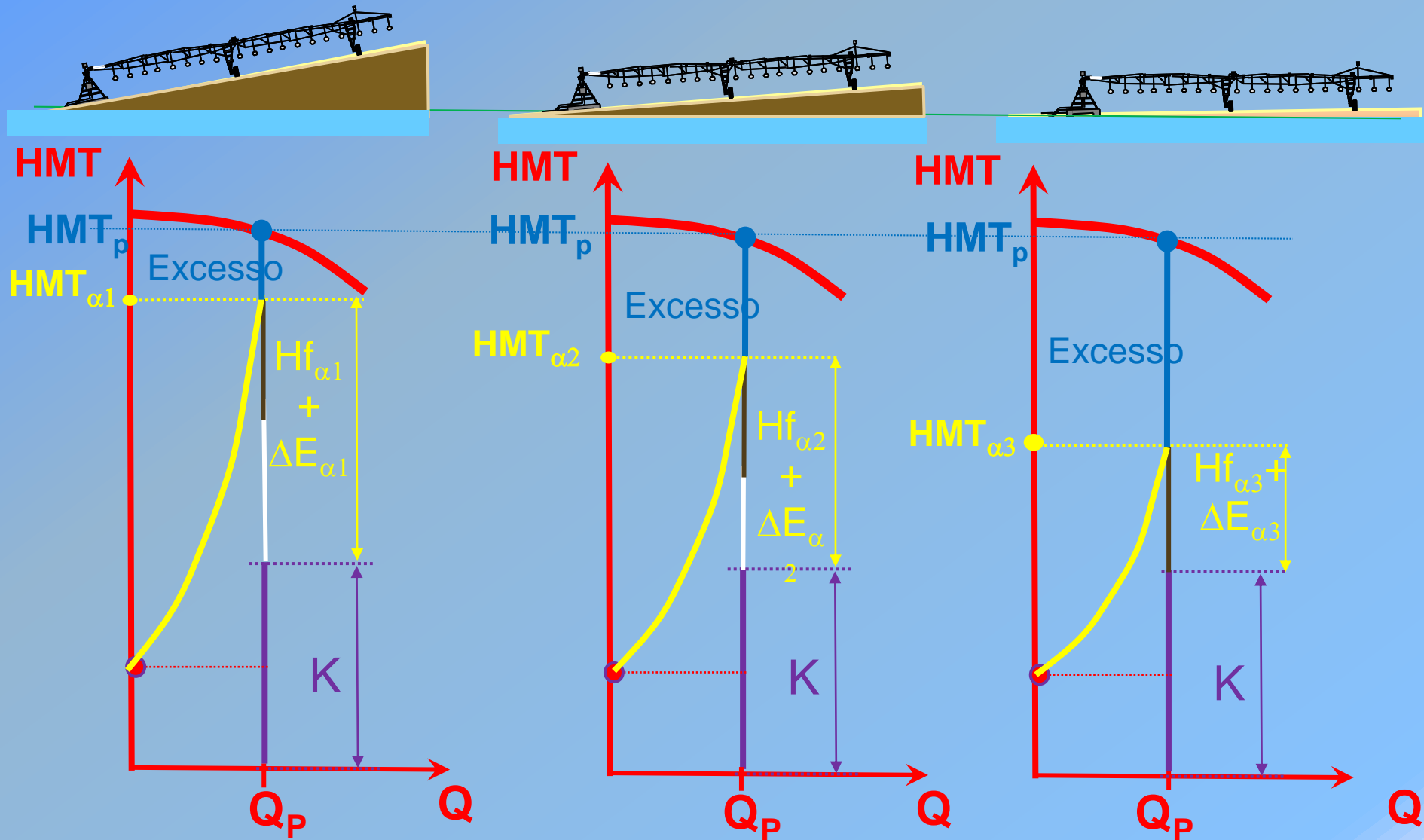
&



IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação



Terreno inclinado e motor elétrico SEM Inversor



INOVAGRI
International Meeting

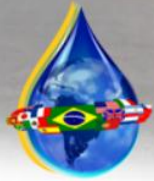
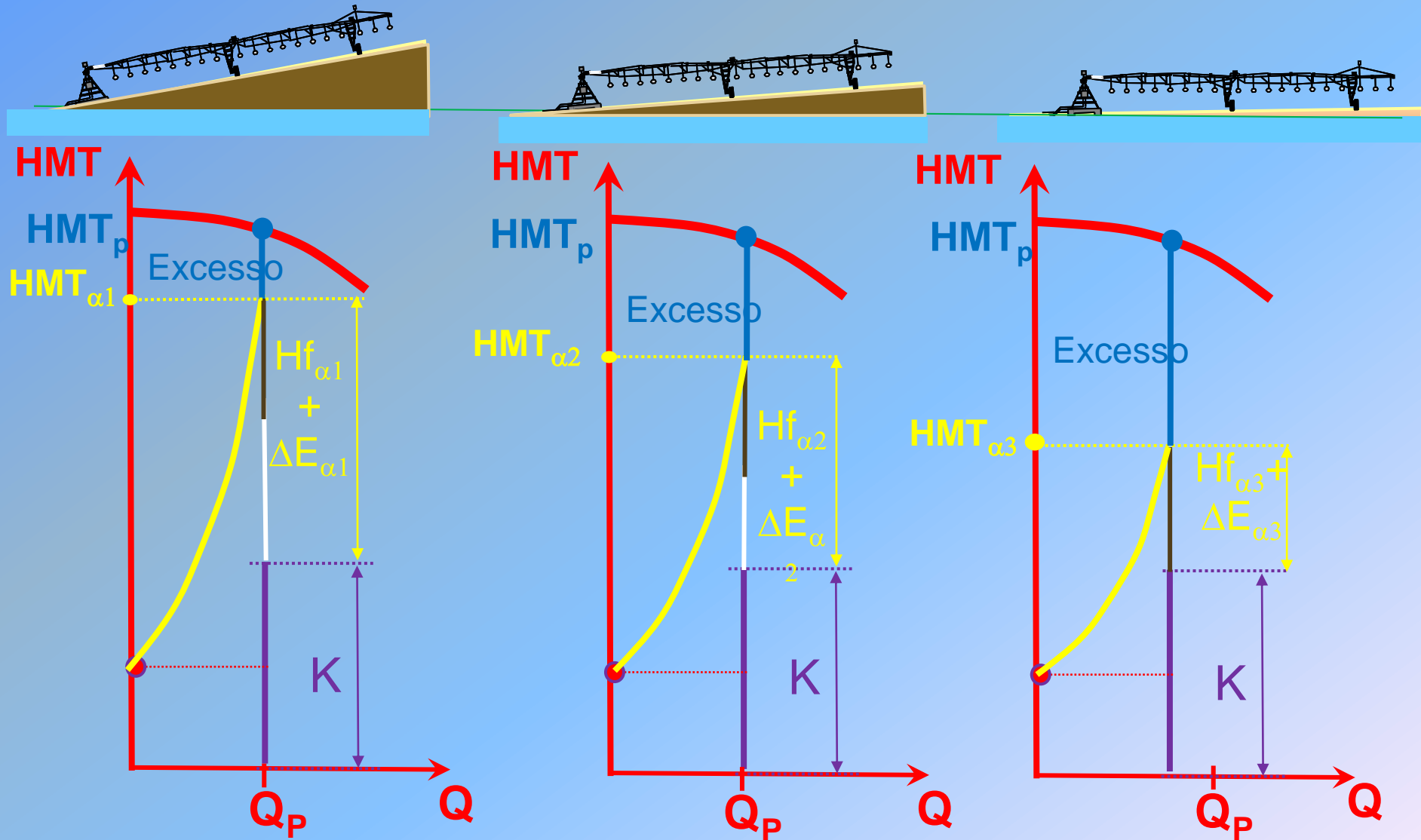
&



IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação



Terreno Inclinado e motor elétrico COM Inversor



INOVAGRI
International Meeting

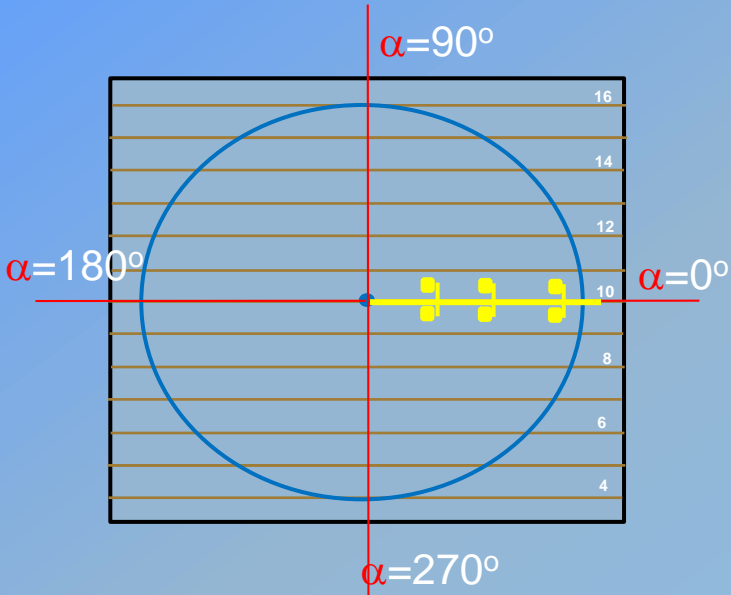
&



IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação



HTMT de Projeto e HTMT requerida no giro



$$HMT_p = K + Hf_p + \Delta E_p$$

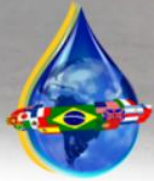
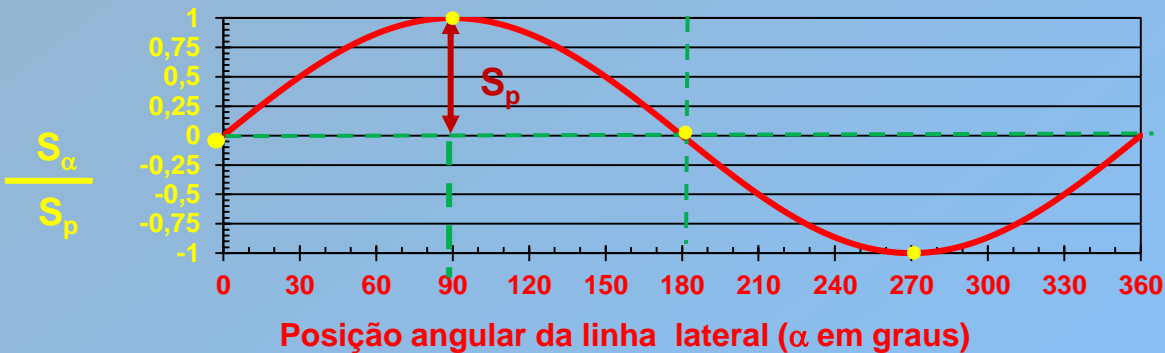
$$HMT_{\alpha} = K + f_{h\alpha} \times Hf_p + f_{e\alpha} \times \Delta E_p$$

$$HMT_{\alpha=0} = K + 1,0 \times Hf_p + 0,0 \times \Delta E_p$$

$$HMT_{\alpha=90} = K + 1,0 \times Hf_p + 1,0 \times \Delta E_p$$

$$HMT_{\alpha=180} = K + 1,0 \times Hf_p + 0,0 \times \Delta E_p$$

$$HMT_{\alpha=270} = K + 0,0 \times Hf_p + 0,0 \times \Delta E_p$$



INOVAGRI
International Meeting

&



IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação



1- Em que Condições a Redução da HMT de Projeto é Significativa ?

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (\mathbf{K} + \mathbf{f} \mathbf{h}_{\alpha} \times \mathbf{H} \mathbf{f}_p + \mathbf{f} \mathbf{e}_{\alpha} \times \Delta \mathbf{E}_p) d\alpha$$

$$\ll \mathbf{K} + \mathbf{H} \mathbf{f}_p + \Delta \mathbf{E}_p =$$

\mathbf{HMT}_p



INOVAGRI
International Meeting

&

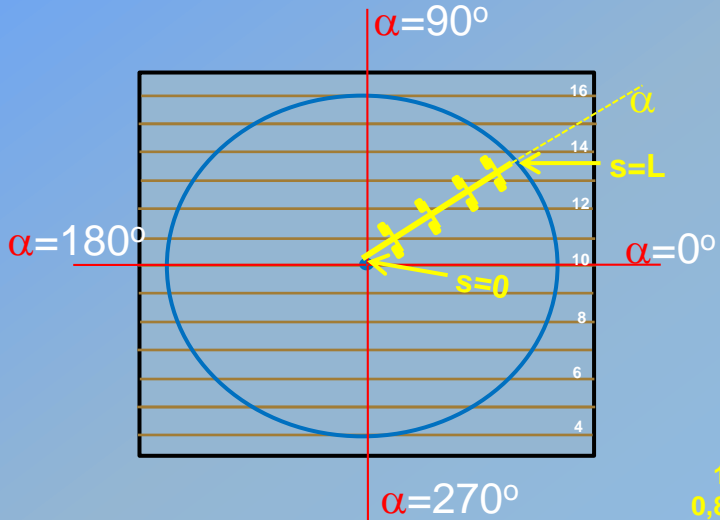


IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação



Análise Teórica em um Plano Inclinado (i)

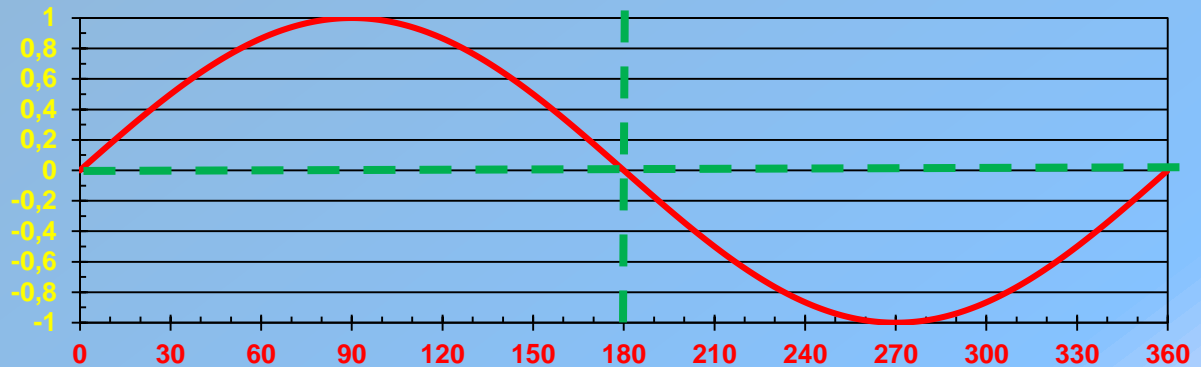
- Declividade (S_α) varia com o posicionamento (α) da lateral ;
- Todos os pontos da lateral ($0 < s < L$) estão sujeitos a mesma S_α



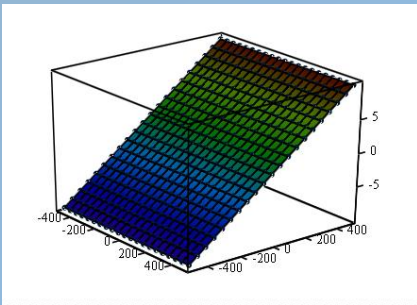
$$\frac{\text{Declividade em } \alpha = S_\alpha}{\text{Declividade máxima} = S_p} = \text{sen}(\alpha)$$

$$S_\alpha = \text{sen}(\alpha) S_p$$

$$\frac{S_\alpha}{S_p}$$



Posição angular da linha lateral (α em graus)



INOVAGRI
International Meeting

&



IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação



Análise Teórica em um Plano Inclinado (ii)

➤ Todos os pontos da lateral ($0 < s < L$) estão sujeitos a mesma $S_\alpha = \text{sen}(\alpha)S_p$

Nas posições ascendentes da lateral ($S_\alpha \geq 0$), o ponto de mínima pressão encontra-se na ponta da lateral: $r_{\min} = L$

Nas posições descendentes, o ponto de mínima pressão é encontrado:

(i) No ponto do pivô, quando $|S_p \text{sen}(\alpha)| \geq J_0$

(ii) No ponto onde a taxa de perda de carga J_s é igual a $|S_p \text{sen}(\alpha)|$

$$J_{r_{\min}} = S_\alpha \quad J_0 \left(1 - \left(\frac{r_{\min_\alpha}}{L} \right)^2 \right)^{1.852} = |S_p \text{sen}(\alpha)|$$

$$r_{\min} = L \sqrt[1.852]{1 - \left(\frac{|S_p \text{sen}(\alpha)|}{J_0} \right)^{\frac{1}{1.852}}}$$

$$r_m(\alpha) := \begin{cases} k \leftarrow \frac{S_p}{J_0} \sin(\alpha) \\ k \leftarrow 0 \text{ if } k > 0 \\ k \leftarrow -1 \text{ if } |k| > 1 \\ a \leftarrow L \sqrt[1.852]{1 - (-k)^{\frac{1}{1.852}}} \end{cases}$$



INOVAGRI
International Meeting

&



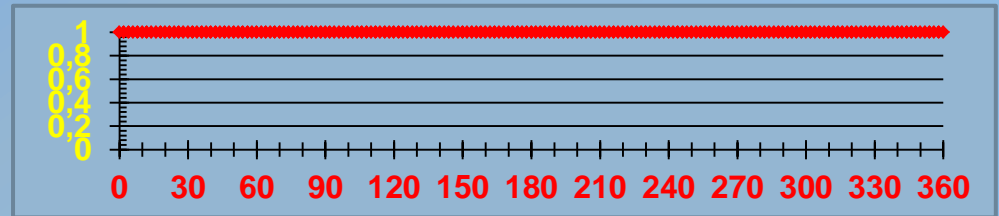
IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação



Análise Teórica em um Plano Inclinado (iii)

Caso 1: $S_p / J_o = 0$

$$\frac{r_{\min}}{L}$$

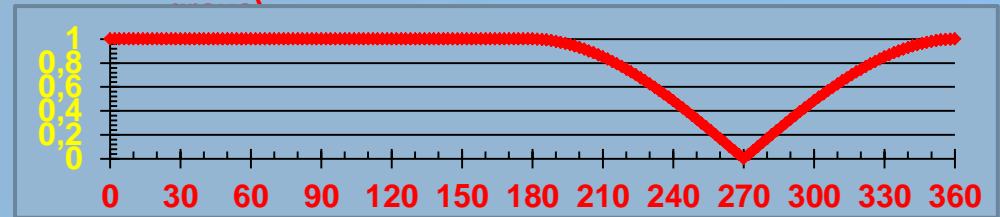


Posição angular da linha lateral (α em

$0 \leq S_p / J_o < 1$

Caso 2: $S_p / J_o = 1$

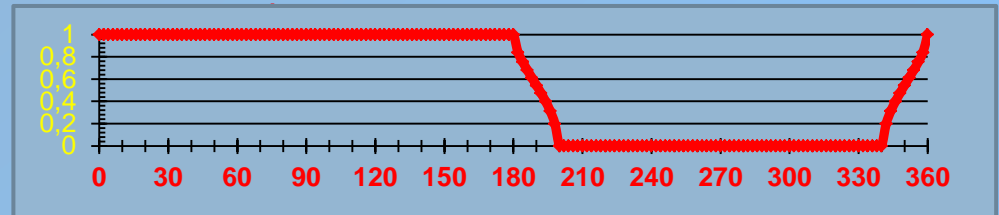
$$\frac{r_{\min}}{L}$$



Posição angular da linha lateral (α em

$1 < S_p / J_o$

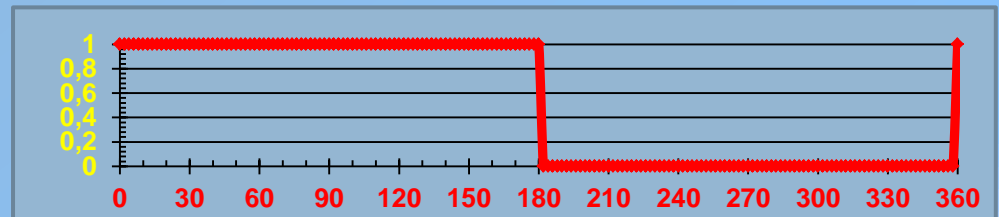
$$\frac{r_{\min}}{L}$$



Posição angular da linha lateral (α em graus)

Caso 3: $S_p \gg \gg J_o$

$$\frac{r_{\min}}{L}$$



Posição angular da linha lateral (α em graus)



INOVAGRI
International Meeting

&



IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação



Análise Teórica em um Plano Inclinado (v)

Ao Longo de um giro completo, valor médio de f_{h_α} será:

$$f_h = \frac{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(J_0 L \left(\frac{rmin_\alpha}{L} - \frac{1,852}{3} \left(\frac{rmin_\alpha}{L} \right)^2 + \frac{0,852}{5,148} \left(\frac{rmin_\alpha}{L} \right)^{5,148} \right) d\alpha}{J_0 L(0,546)}$$

Ao Longo de um giro completo, valor médio de f_{e_α} será:

$$f_e = \frac{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (S_p rmin_\alpha \sin(\alpha)) d\alpha}{S_p L}$$

$$rm(\alpha) := \begin{cases} k \leftarrow \frac{S_p}{J_0} \sin(\alpha) \\ k \leftarrow 0 \text{ if } k > 0 \\ k \leftarrow -1 \text{ if } |k| > 1 \\ a \leftarrow L \sqrt{\frac{1}{1 - (-k)^{1.852}}} \end{cases}$$



INOVAGRI
International Meeting

&



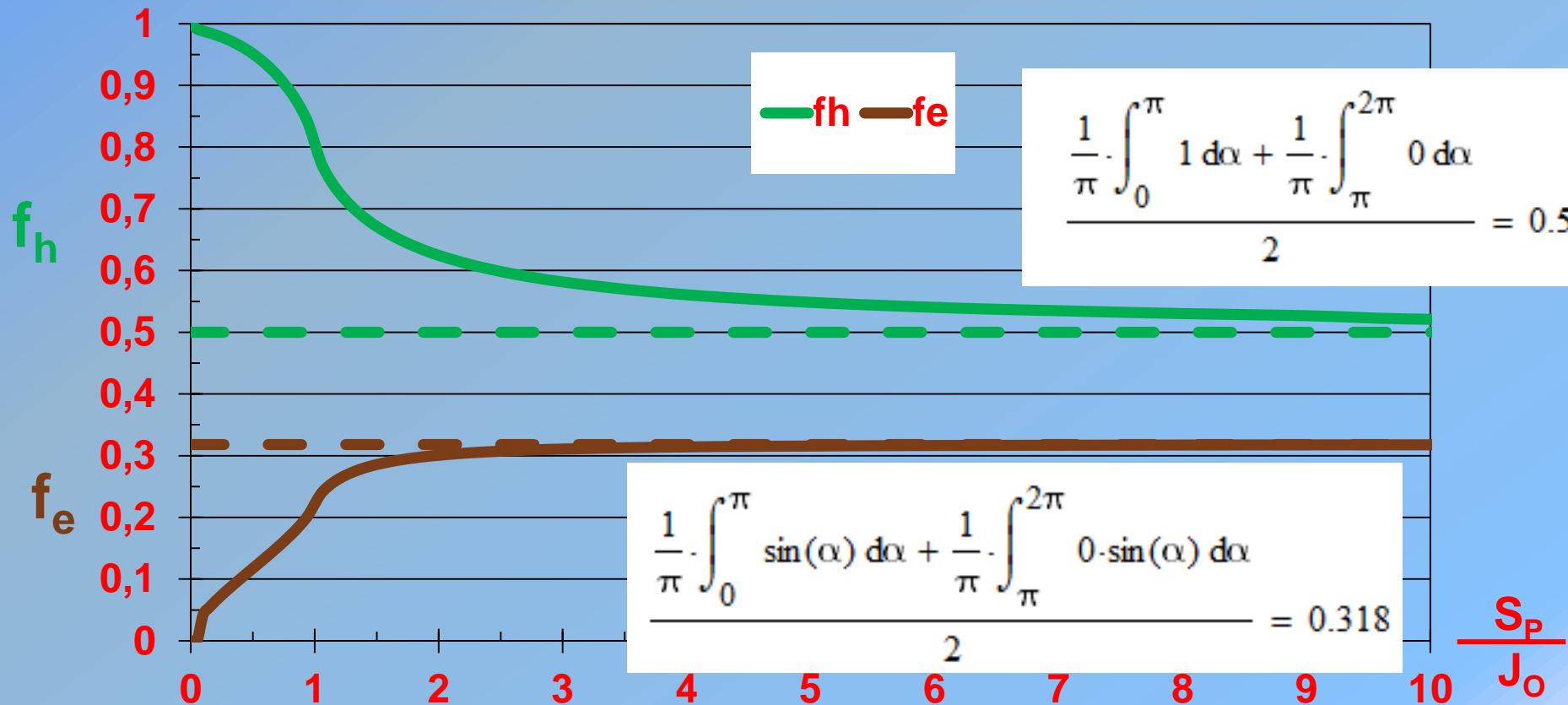
IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação



Análise Teórica em um Plano Inclinado (vi)

Valor médio da HMT por giro completo “com inversor”

$$\text{HMTc} = K + f_h (0,546LJ_o) + f_e (Ls_p)$$



INOVAGRI
International Meeting

&



IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação



Análise Teórica em um Plano Inclinado (viii)

$$HMT_p = K + Hf_p + DE_p$$

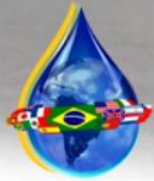
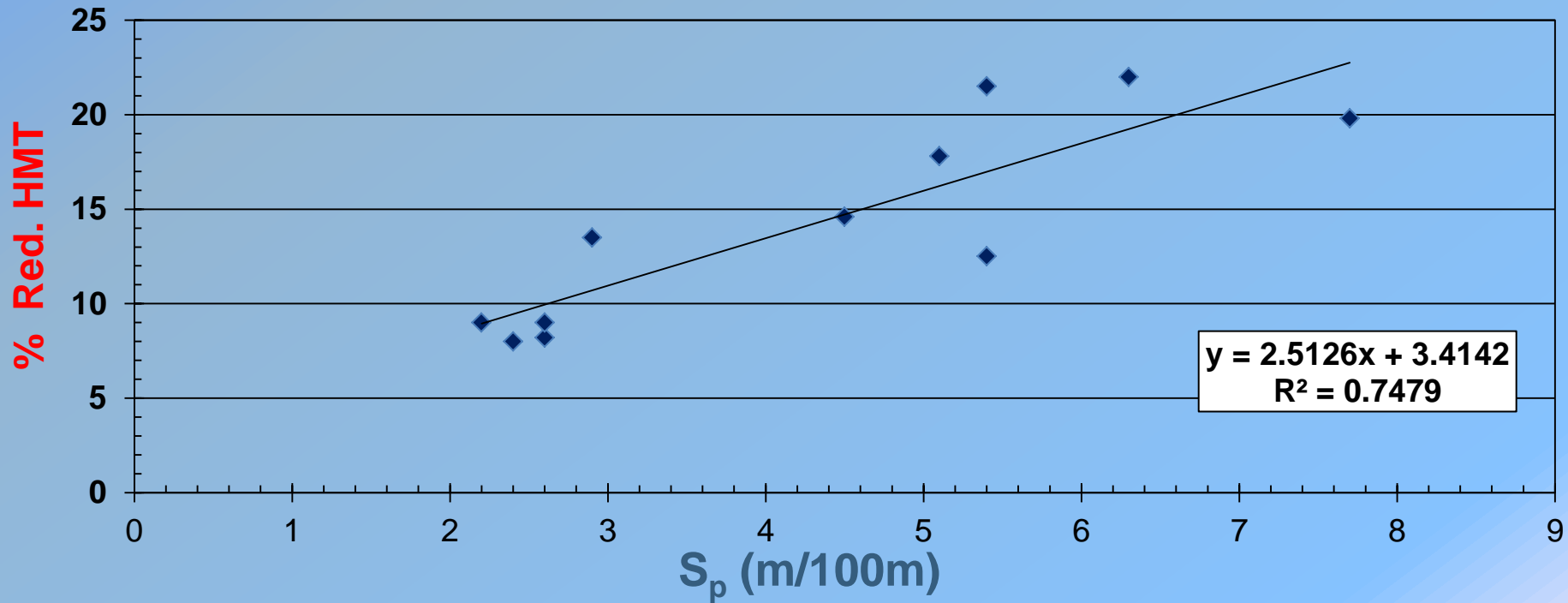
$$HMT_p = K + (0,546LJ_0) + (LS_p)$$

$$HMT_c = K + f_h Hf_p + f_e DE_p$$

$$HMT_c = K + f_h (0,546LJ_0) + f_e (LS_p)$$

DADOS DE 11
PIVÔS DA REGIÃO

$$\% \text{ Redução da HMT} = \frac{HMT_p - HMT_c}{HMT_p}$$



INOVAGRI
International Meeting

&



IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação



2- Em Condições Reais de Campo a Redução da HMTp Também é Significativa ?



INOVAGRI
International Meeting

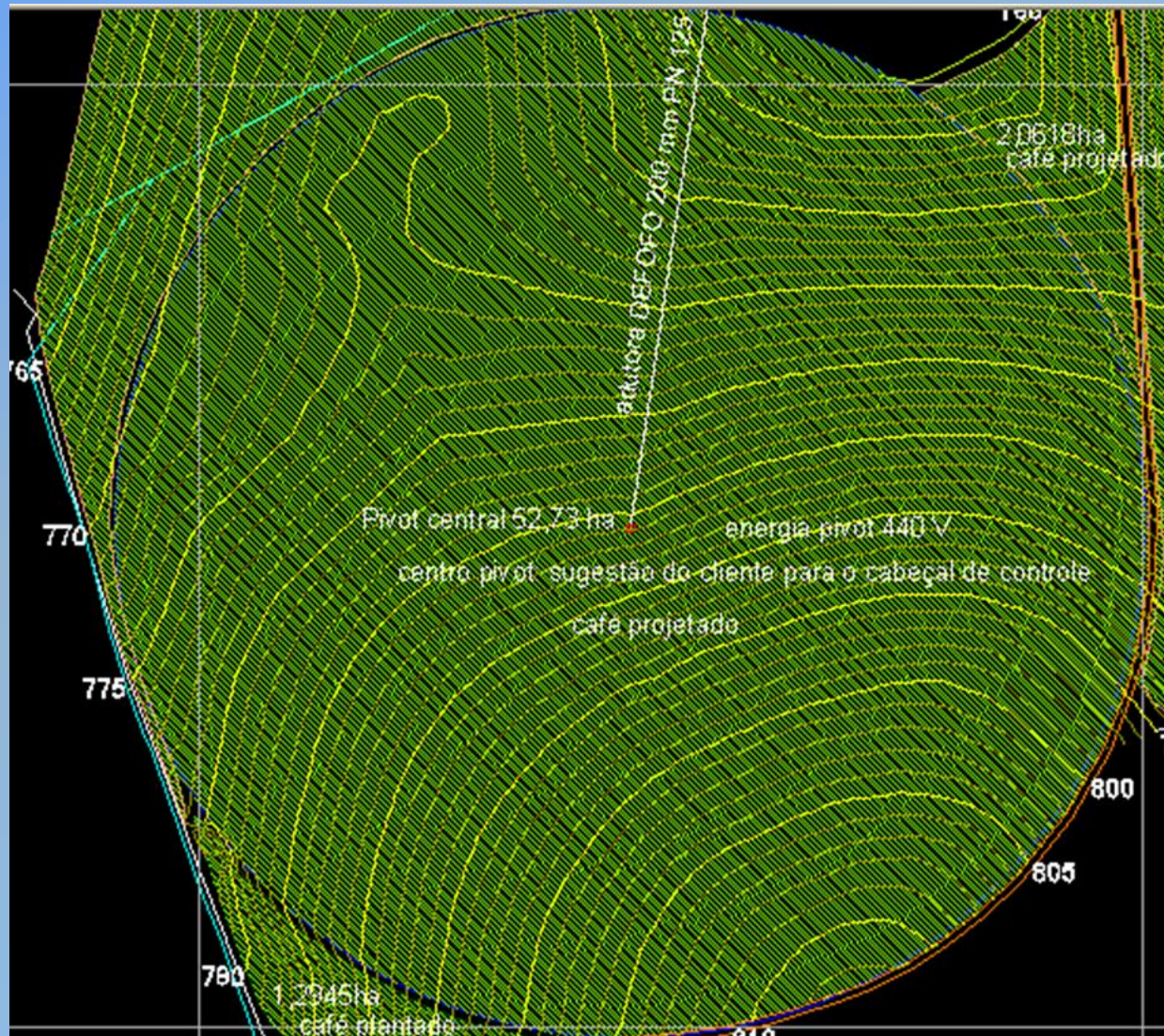
&



IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação



Análise Teórica com Topografia Real (i)



INOVAGRI
International Meeting

&



IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação



Análise Teórica com Topografia Real (ii)

Avaliação Preliminar em 8 Sistemas

Pivô	HMT - m			PA - kW		Redução na PA (%)
	Projeto	Sem IF	Com IF	Sem IF	Com IF	
1	137,8	146,5	119,2	156,3	123,4	21,0
2	60,5	71,2	54,5	39,2	28,8	26,5
3	98,2	105,9	82,0	54,6	28,9	23,5
4	101,2	107,3	88,1	75,6	61,4	18,7
5	88,0	92,1	76	75,2	63,2	15,9
6	68,5	75,1	52,5	47,6	32,3	32,2
7	159,6	192,3	132,84	150,1	108,8	27,7
8	88,3	94,2	80,9	9,6	7,7	19,4

↗ $HMT_p = K + Hf_p + \Delta E_p + \text{Extra}$



INOVAGRI
International Meeting

&



IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação



3- É possível Alcançar a Redução da HMTp desejada?



INOVAGRI
International Meeting

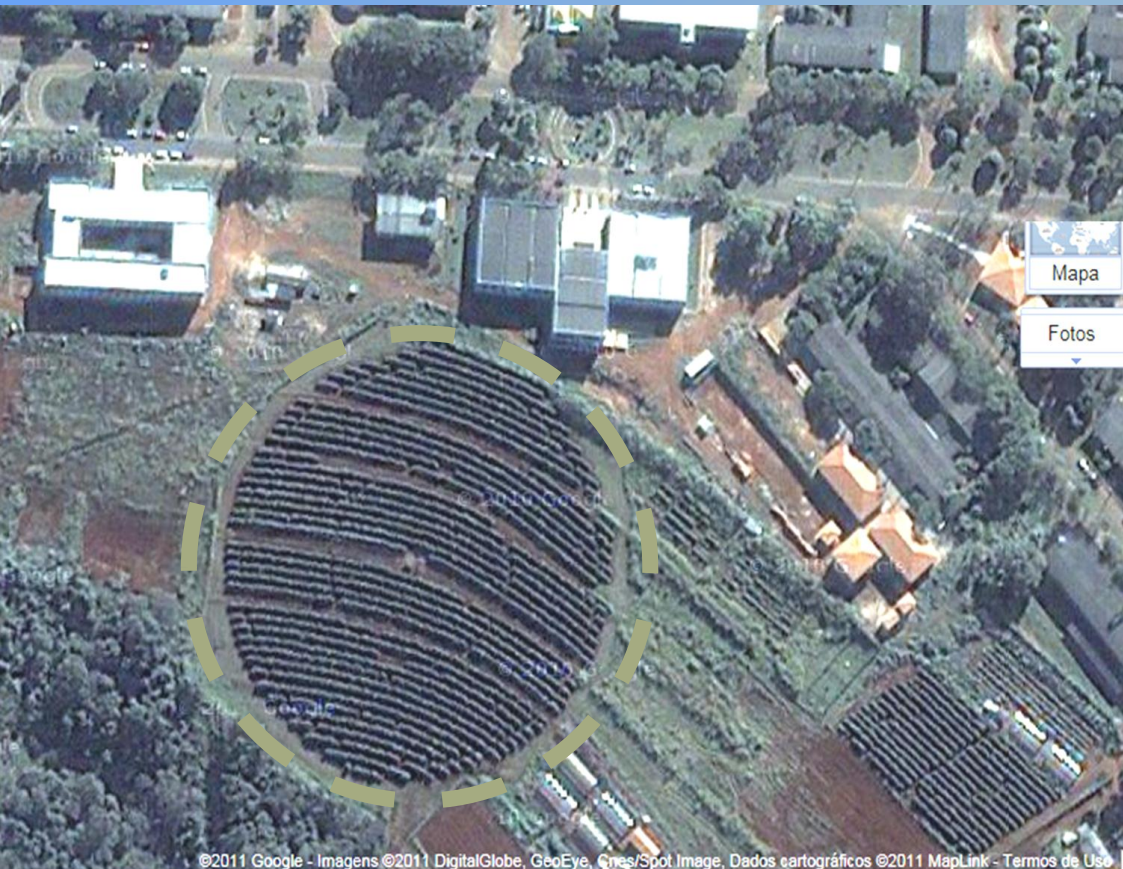
&



IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação



É Possível Alcançar ? (i)



Resultados obtidos na UFLA

$$L = 72\text{m}$$

$$\Delta E_p = 8\text{m}$$

$$S_p = 8/72 \times 100 = 11\%$$

$$Q = 20\text{m}^3/\text{h}$$

$$d = 6 \frac{5}{8}'' = 168\text{mm}$$

$$J_o = 0,04\text{m}/100\text{m}$$

$$HF_p = 0,017\text{m}$$

$$S_p/J_o = 251$$



INOVAGRI
International Meeting

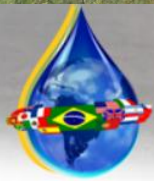
&



IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação



É Possível Alcançar ? (ii)



INOVAGRI
International Meeting

&



IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação



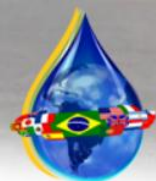
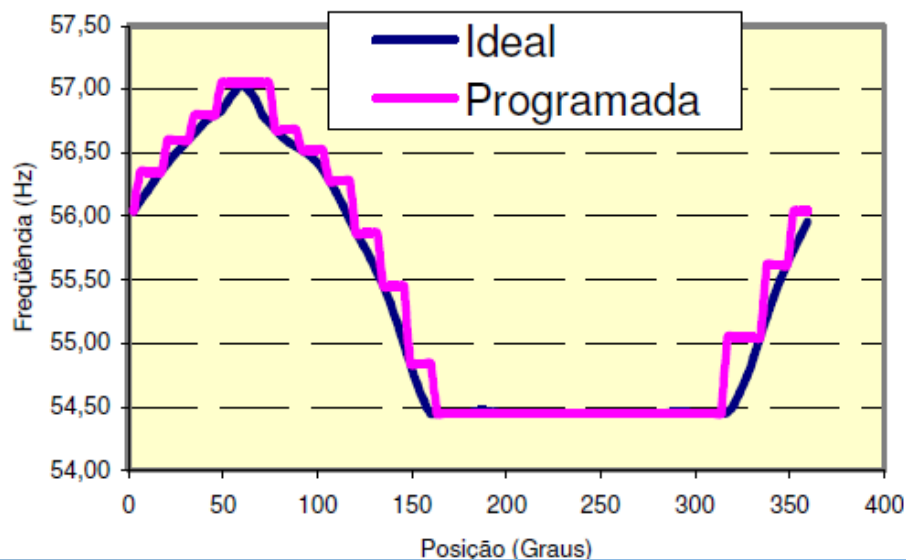
É Possível Alcançar ? (iii)



É Possível Alcançar ? (iv)

FREQUÊNCIAS CALCULADAS EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO DA LINHA LATERAL DO PIVÔ CENTRAL.

α	HMT	n	Rend	Pot _{eixo}	τ	n_s	f_α
graus	m	rpm	%	Watt	N.m	rpm	Hz
0	82,0	3334	61,9	7219	20,6	3365	56,09
20	83,4	3358	61,8	7356	20,9	3389	56,49
40	84,4	3375	61,7	7454	21,0	3406	56,78
60	85,2	3390	61,6	7540	21,2	3421	57,03
80	84,2	3372	61,7	7438	21,0	3403	56,73
100	83,3	3357	61,8	7348	20,9	3388	56,47
120	81,7	3328	62,0	7186	20,6	3359	55,99
140	79,7	3294	62,1	6994	20,2	3324	55,42
160	77,2	3250	62,4	6747	19,8	3279	54,66
180	77,2	3250	62,4	6747	19,8	3279	54,66
200	77,2	3250	62,4	6747	19,8	3279	54,66
220	77,2	3250	62,4	6747	19,8	3279	54,66
240	77,2	3250	62,4	6747	19,8	3279	54,66
260	77,2	3250	62,4	6747	19,8	3279	54,66



INOVAGRI
International Meeting

&



IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação



É Possível Alcançar ? (v)

ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DO INVERSOR

(1) Tempo – Ciclo automático com 6 velocidades (P500, P501...P505) e 6 intervalos (P506, P507....P5111) Limite de 9999 segundos....

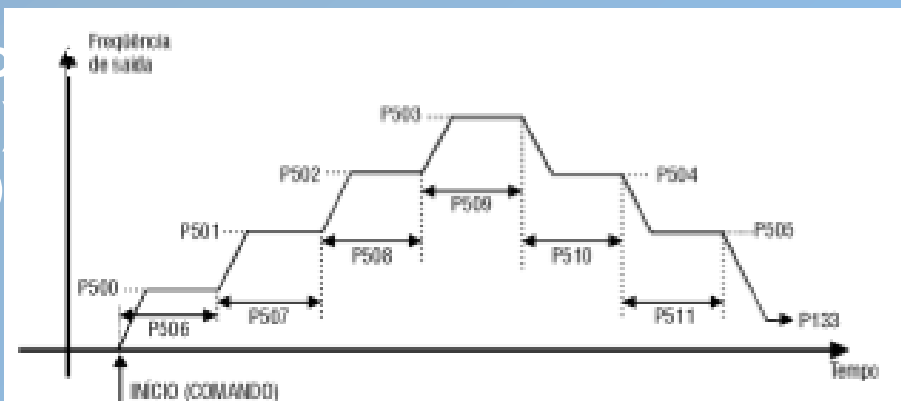


Figura 6.29 - Curva ciclo automático

(2) - Multispped : 8 Velocidade

8 velocidades			
4 velocidades			Ref. de Veloc.
2 velocidades			
DI6	DI5	DI4	Ref. de Veloc.
0 V	0 V	0 V	P124
0 V	0 V	24 V	P125
0 V	24 V	0 V	P126
0 V	24 V	24 V	P127
24 V	0 V	0 V	P128
24 V	0 V	24 V	P129
24 V	24 V	0 V	P130
24 V	24 V	24 V	P131

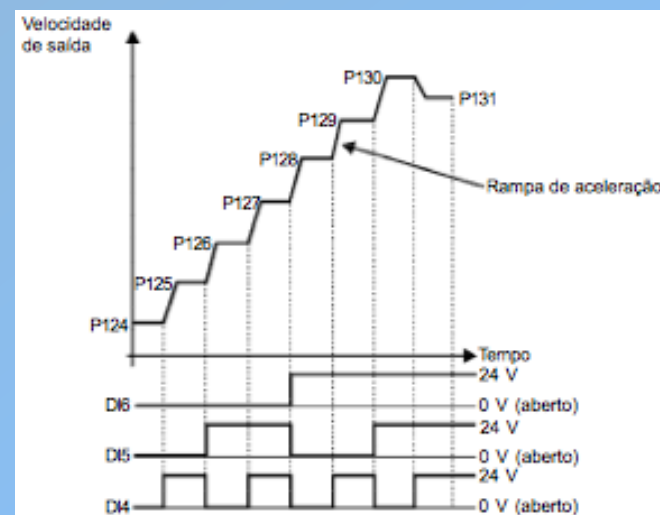


Figura 6.2 - Multispeed



INOVAGRI
International Meeting

&



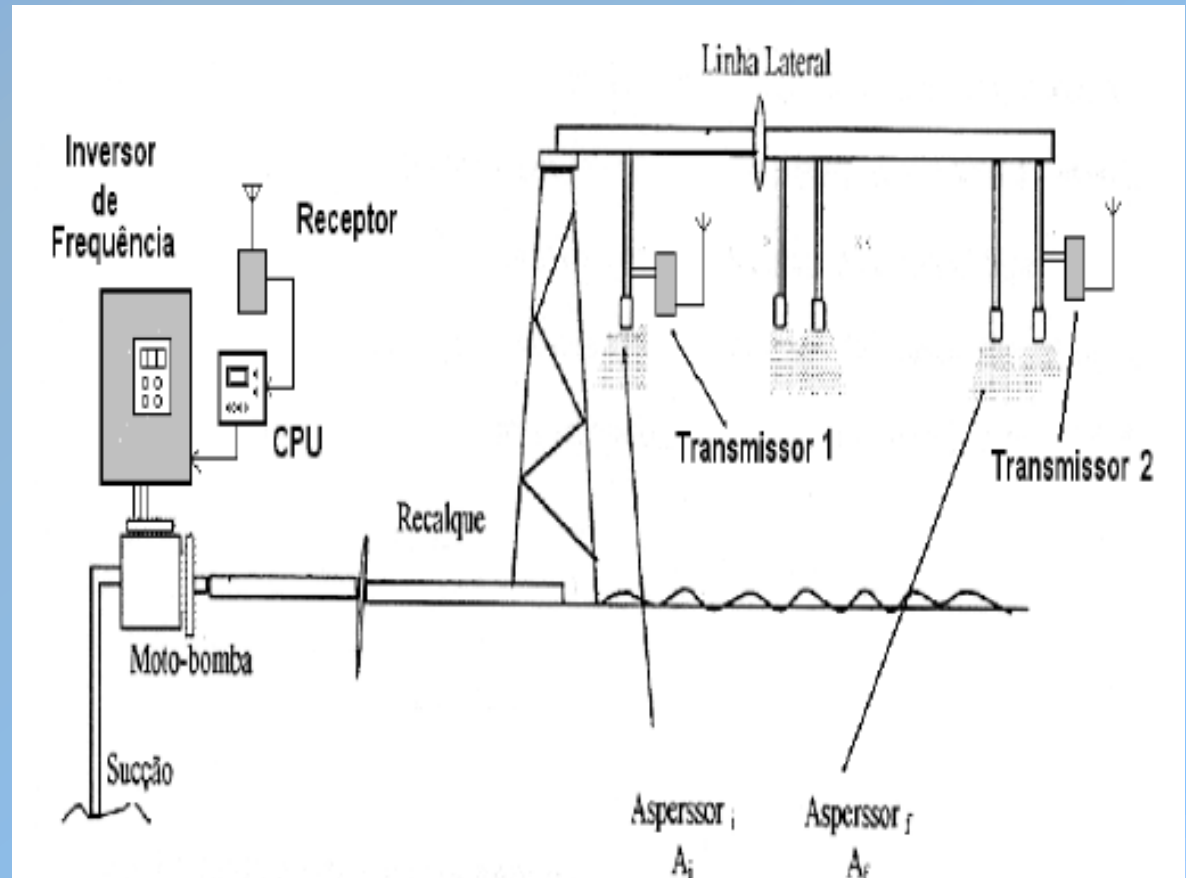
IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação



É Possível Alcançar ? (vi)

ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DO INVERSOR

(3) Transdutores de pressão ao longo da lateral móvel .



ANTÔNIO M. M. MEDEIROS¹, JOSÉ W. L. NERYS¹, ANTONIO M. OLIVEIRA¹, ENES G. MARRA¹, LUIZ F. C. OLIVEIRA²

¹Núcleo de Estudo e Pesquisa em Processamento da Energia e Qualidade, Escola de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal de Goiás.



INOVAGRI
International Meeting

&



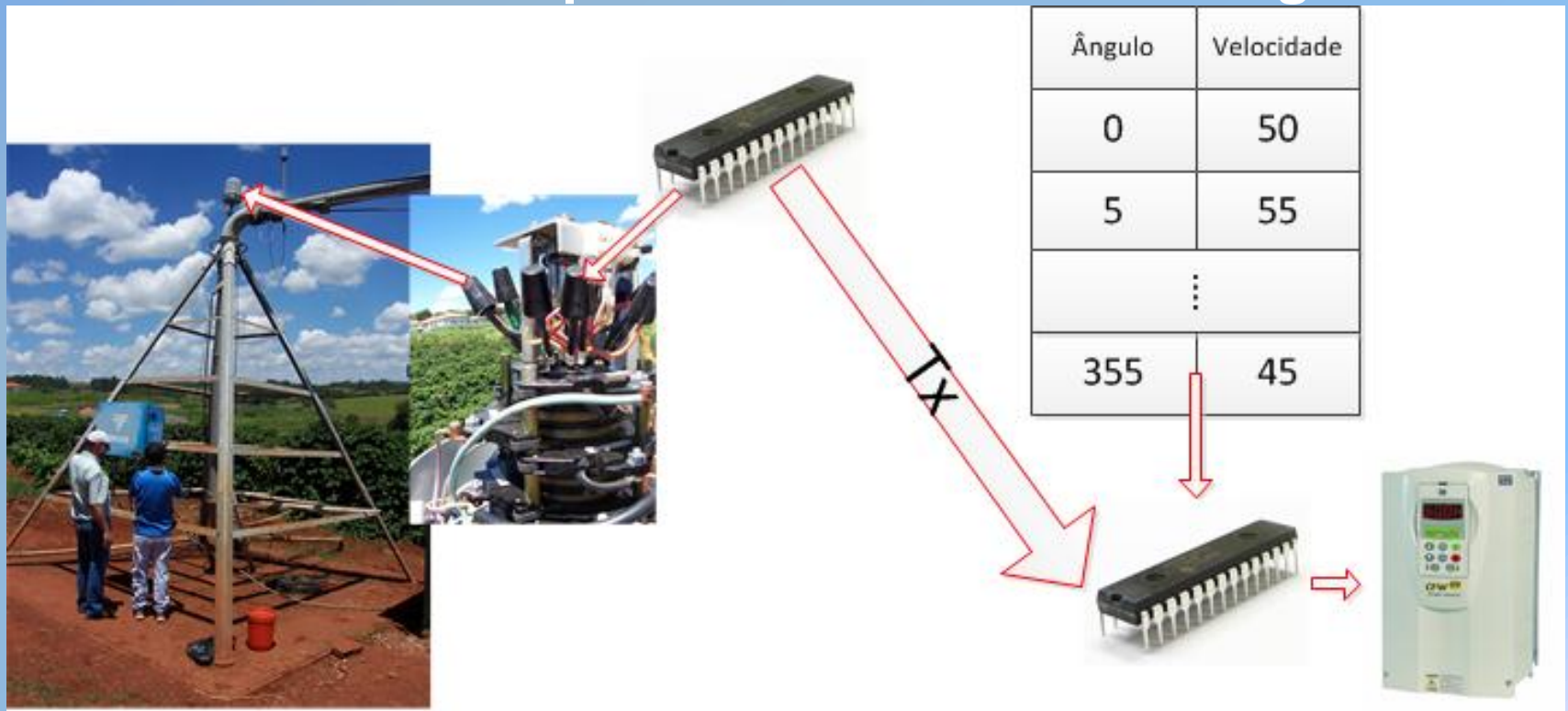
IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação



É Possível Alcançar ? (vii)

ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DO INVERSOR

(4) (i) Microcontrolador medindo e transmitindo a posição angular do resolver para um segundo microcontrolador que controla o inversor segundo



INOVAGRI
International Meeting

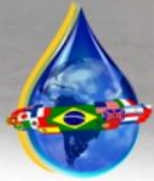
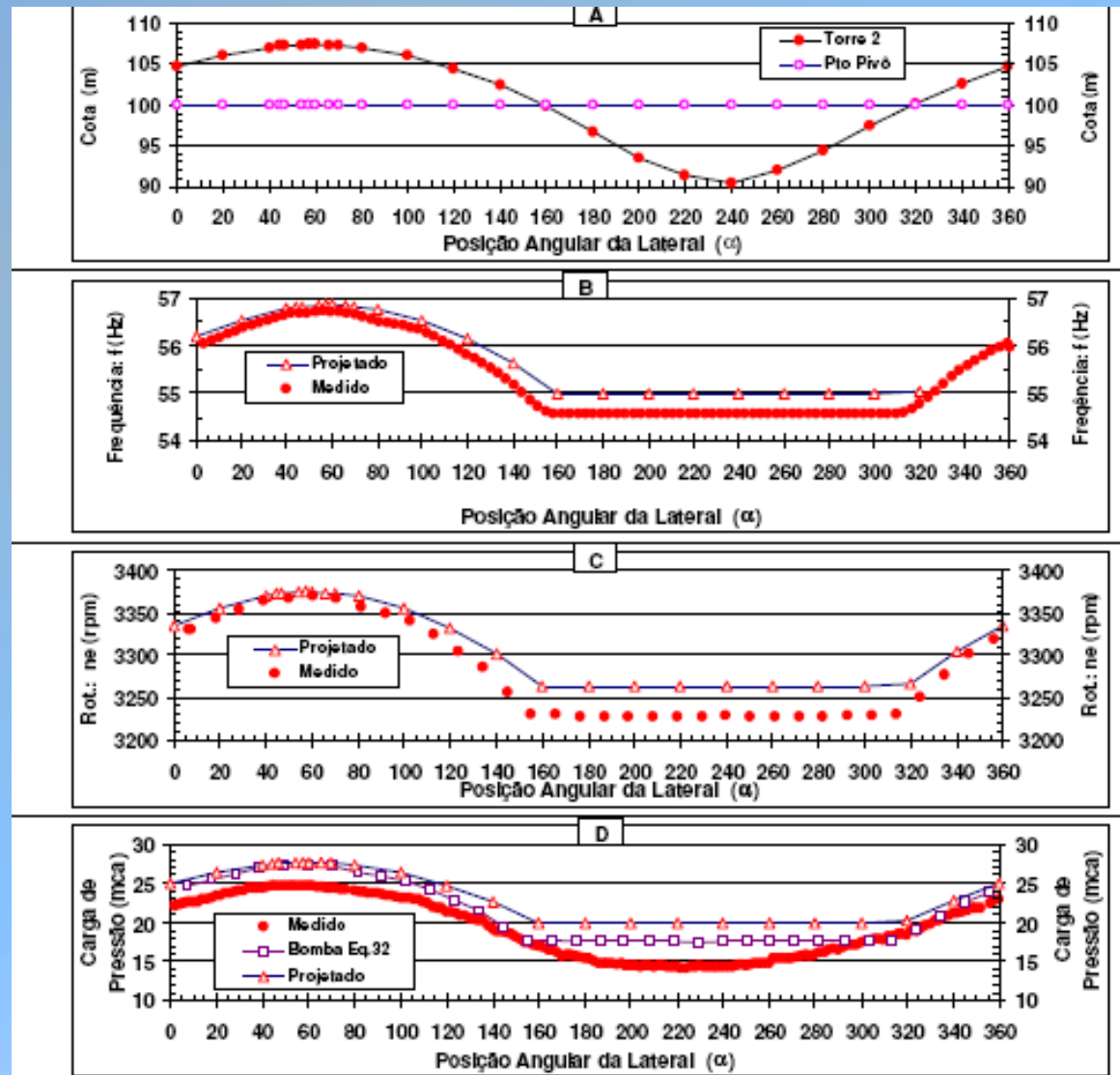
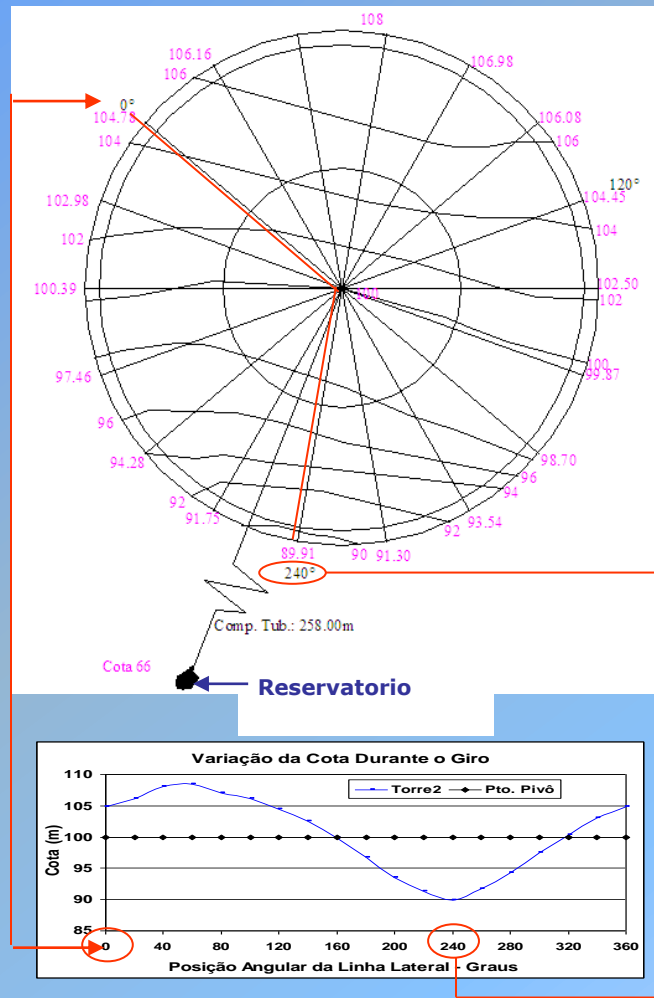
&



IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação



É Possível Alcançar ? (viii)



INOVAGRI
International Meeting

&



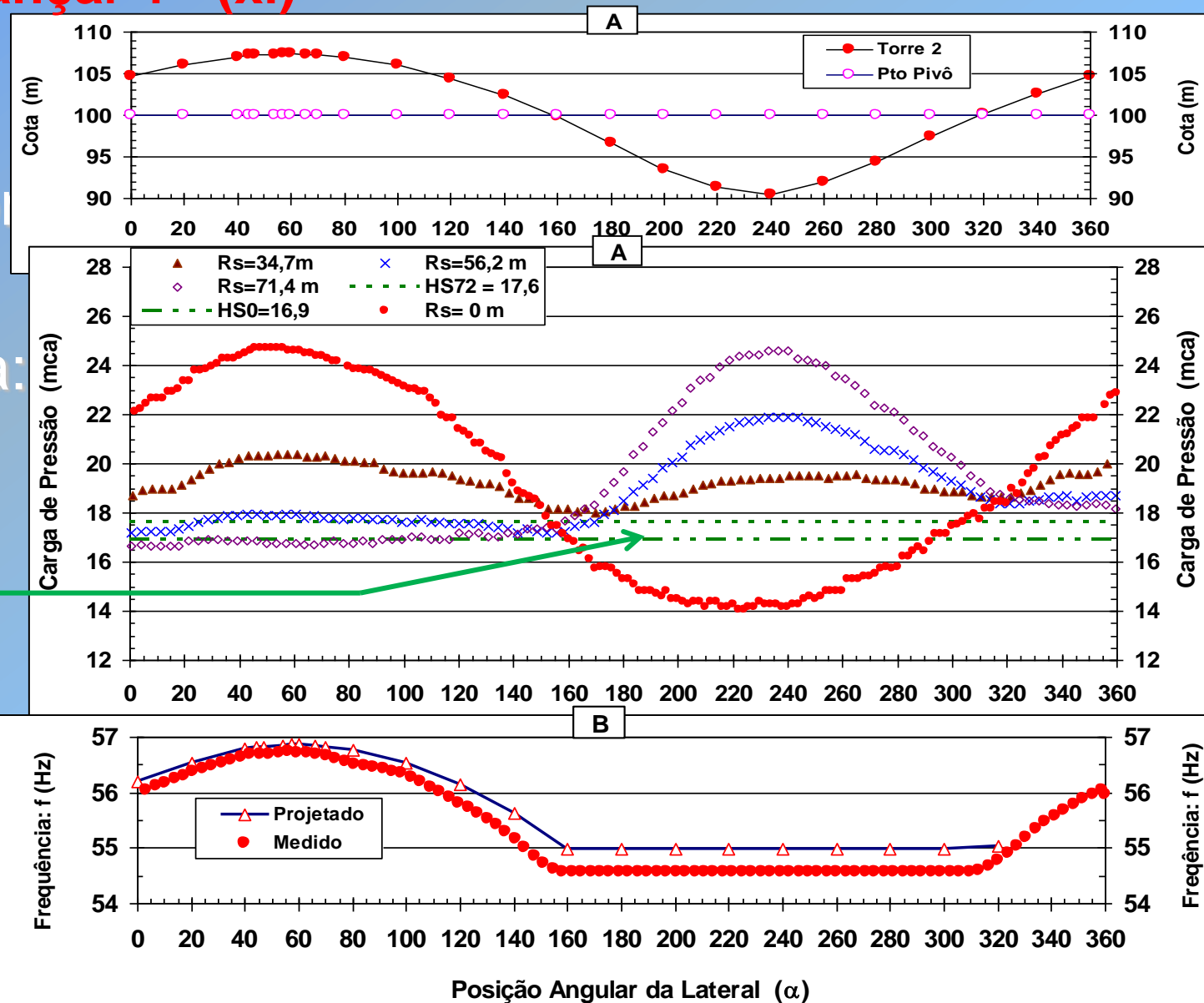
IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação



É Possível Alcançar ? (xi)

Com Inversão
de
Frequência:

Meta: 17mca
(14 +3)mca



INOVAGRI
International Meeting

&



IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação

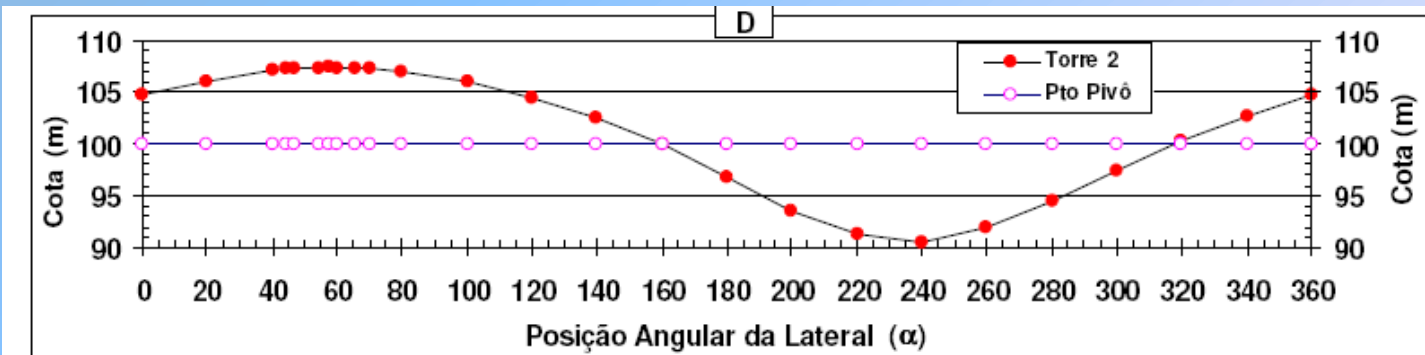
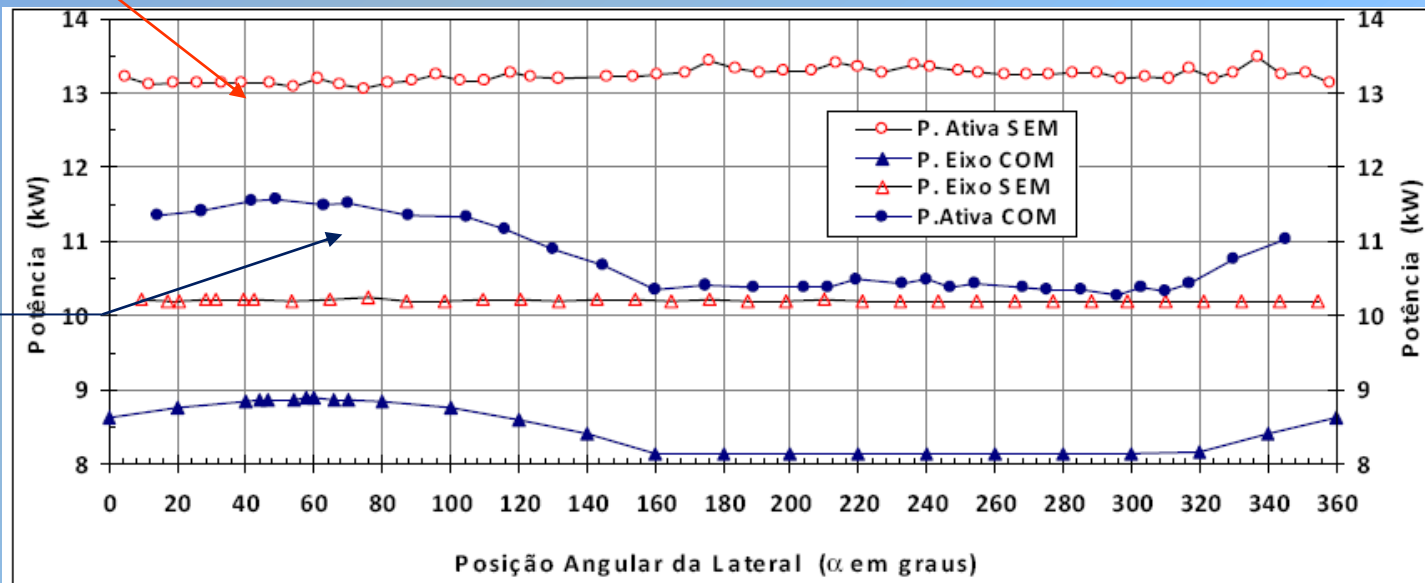


É Possível Alcançar ? (xii)

SEM IF
Potência Ativa
13,2 KW/giro

COM IF
Potência Ativa
10,8 KW/giro

Redução:
19%



INOVAGRI
International Meeting

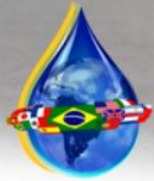
&



IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação



4- É Possível Alcançar a Redução Desejada da HMTp em Condições de Campo?



INOVAGRI
International Meeting

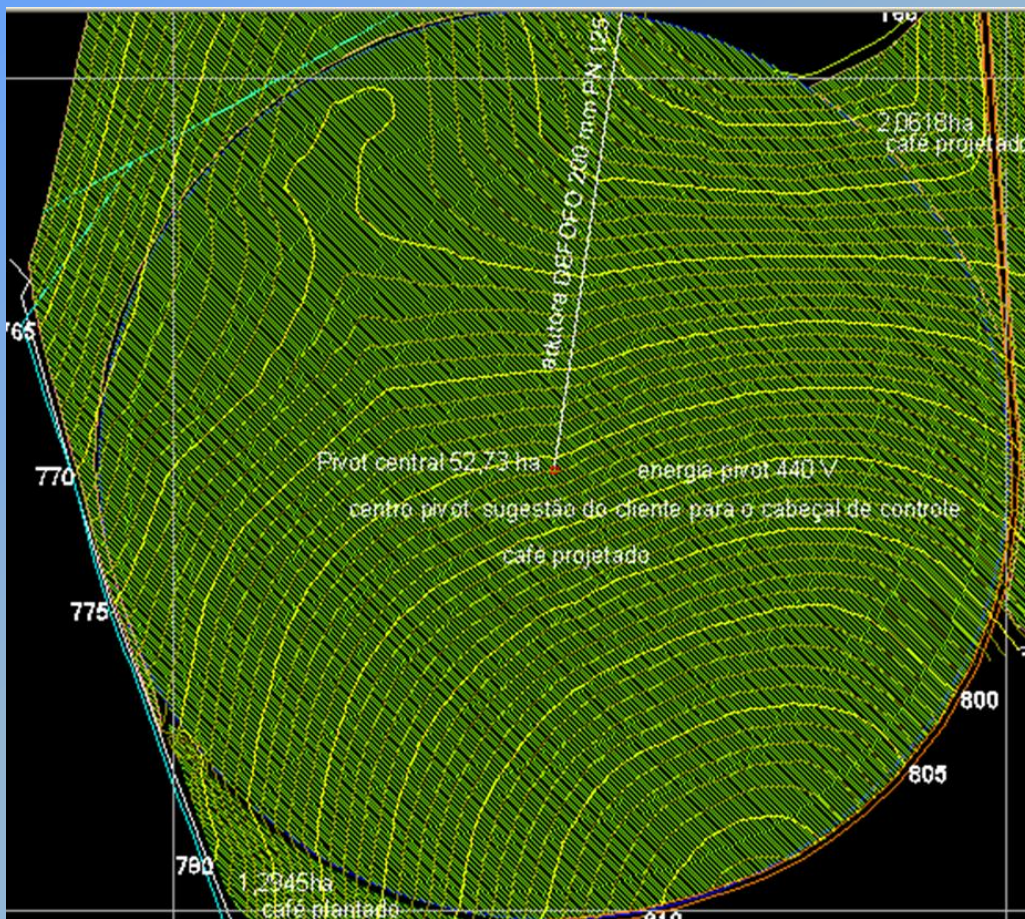
&



IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação



É Possível Alcançar no Campo ? (i)



$L = 409\text{m}$

$\Delta E_p = 25\text{m}$

$S_p = 25/409 \times 100 = 6,12\%$

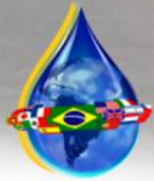
$Q = 200\text{m}^3/\text{h}$

$d = 6 \frac{5}{8}'' = 168\text{mm}$

$J_o = 3,71\text{m}/100\text{m}$

$HF_p = 8,18\text{m}$

$S_p/J_o = 1,65$



INOVAGRI
International Meeting

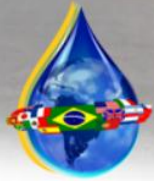
&



IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação



É Possível Alcançar no Campo ? (ii)



INOVAGRI
International Meeting

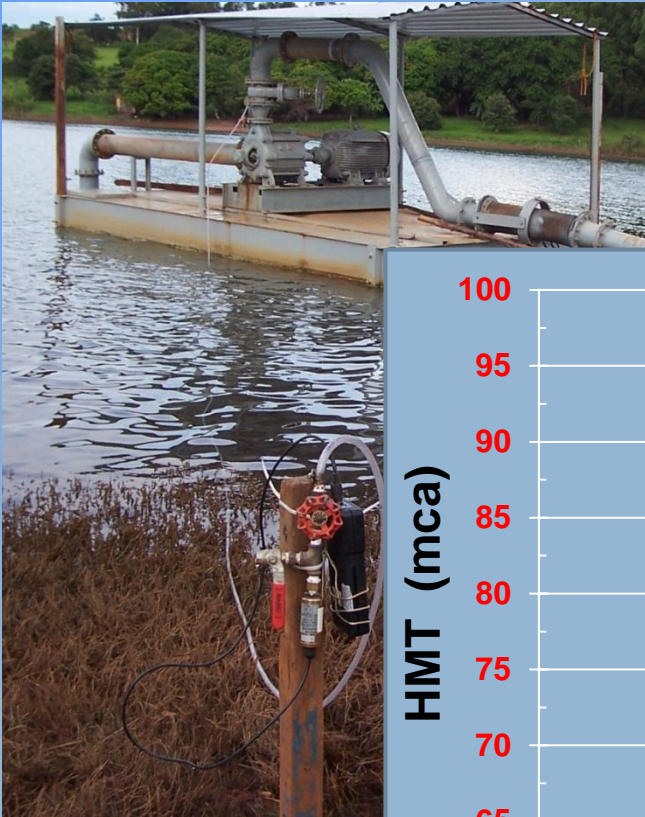
&



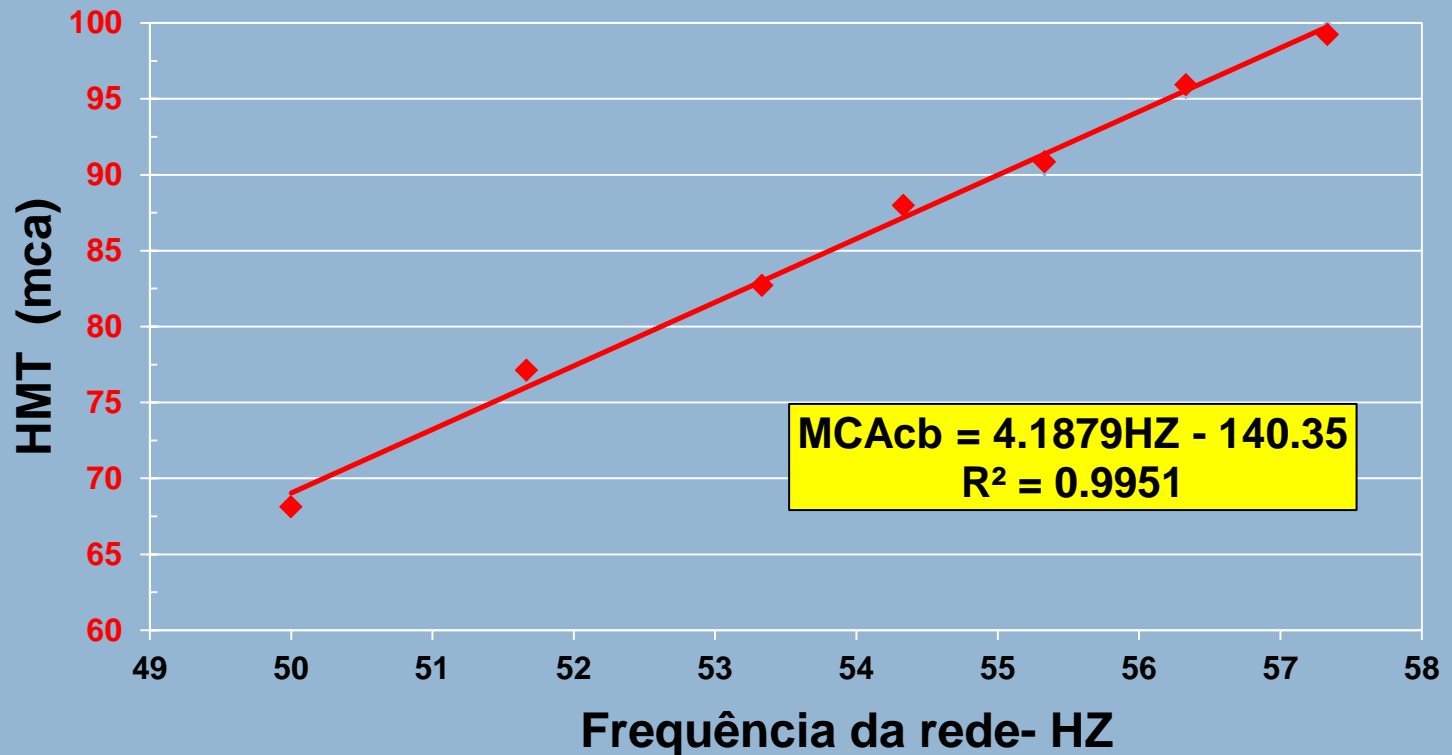
IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação



É Possível Alcançar no Campo ? (iii)



Na primeira fase redução de 20% na HMT de (111 para 85 mca)



INOVAGRI
International Meeting

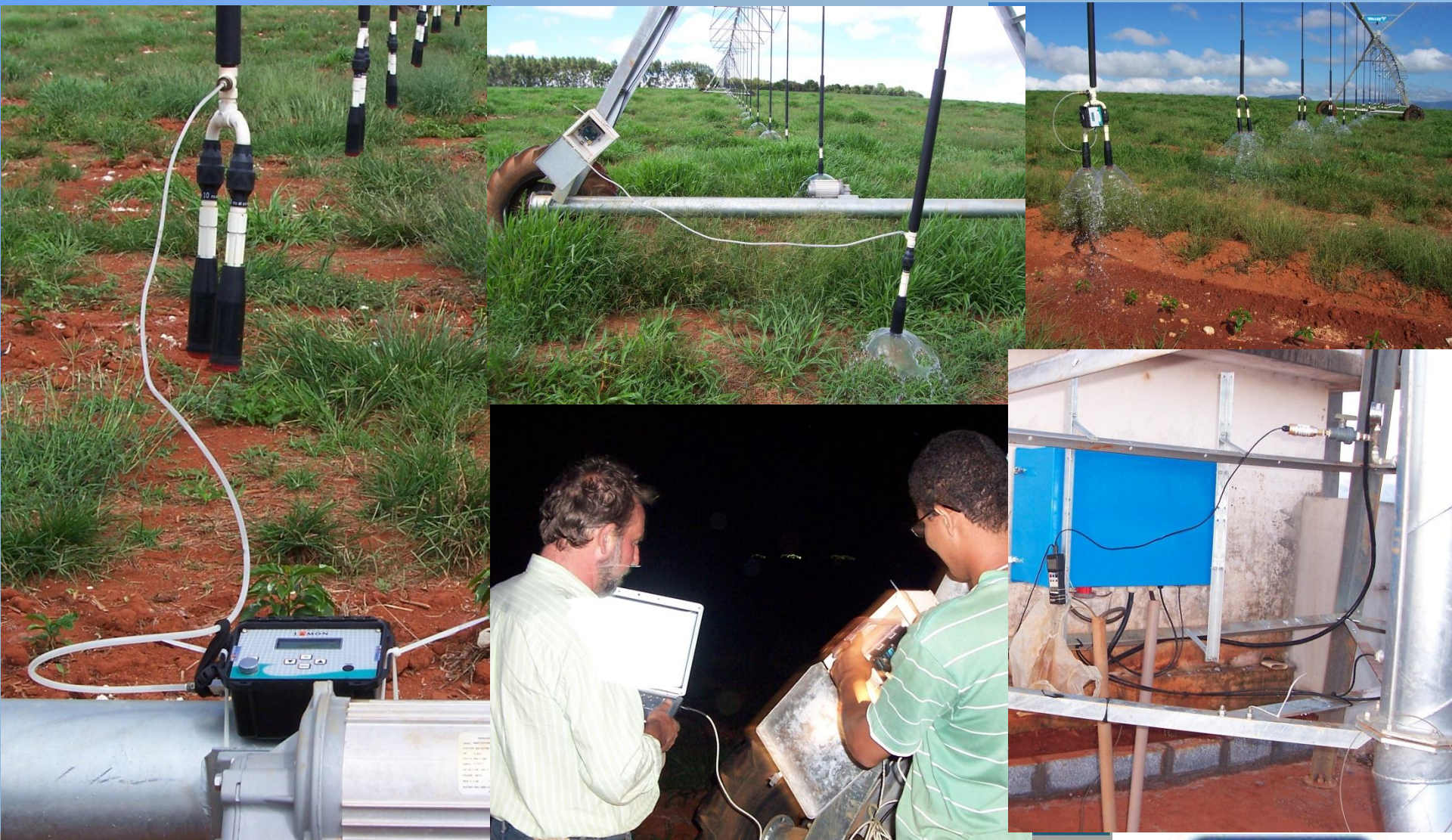
&



IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação



É Possível Alcançar no Campo ? (iv)



INOVAGRI
International Meeting

&

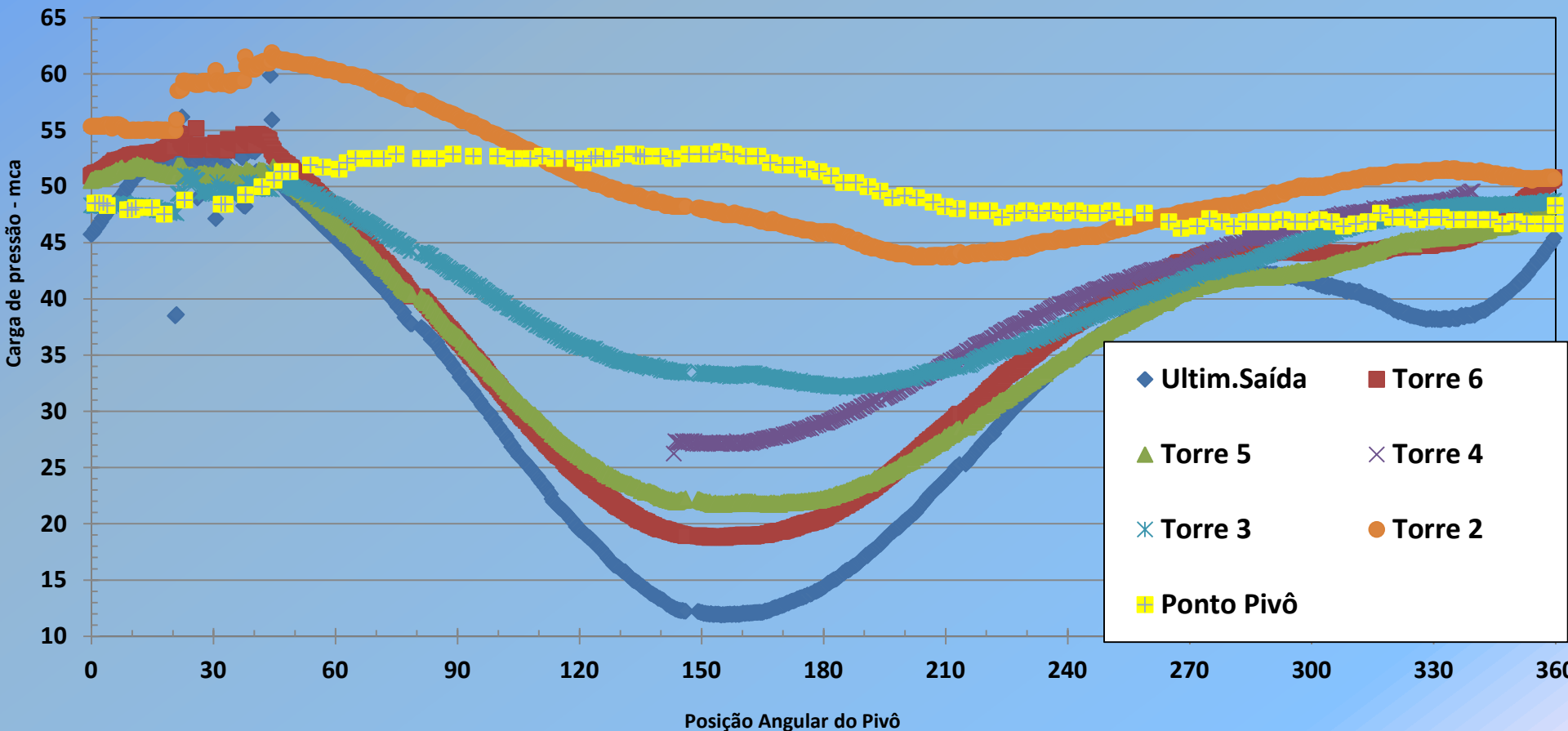


IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação



É Possível Alcançar no Campo ? (v)

Existe possibilidade de uma maior redução com a implantação dos microcontroladores (pto. pivo- pto. baixo= 25m , carga nas VPR =13)



INOVAGRI
International Meeting

&



IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação



RESUMO FINAL

1. Análise teórica resulta em reduções de consumo de 15 a 20% em áreas com declividades entre 4,5 e 8% ;
2. Simulações na região do lago de FURNAS resultam em valores pouco superiores aos da análise teórica;
3. Na UFLA, um estudo experimental resultou em economia de 18% no consumo de energia;
4. Resultados de um estudo em área comercial indicam uma economia de 10% e sinalizam para uma maior redução;



INOVAGRI
International Meeting

&



IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação



Obrigado !

Alberto Colombo
Universidade Federal de Lavras
acolombo@deg.ufla.br

Agradecimentos:

CNPq- Bolsa produtividade e
Projeto- Eficácia do Inversor de
Frequência de um Pivô Central
Sob Diferentes Estratégias de
Controle da Rotação da Bomba

FAPEMIG Projetos CAG-1607/06 e APQ-02656-10.

Organizadores INOVAGRI – IV WINOTEC



INOVAGRI
International Meeting

&



IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação





INOVAGRI
International Meeting

&



IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação



Análise Teórica em um Plano Inclinado (iv)

O valor de HMT para qualquer valor de α é:

$$HMT_{\alpha} = K + J_0 L \left(\frac{rmin_{\alpha}}{L} - \frac{1,852}{3} \left(\frac{rmin_{\alpha}}{L} \right)^2 + \frac{0,852}{5,148} \left(\frac{rmin_{\alpha}}{L} \right)^{5.148} \right) + S_p rmin_{\alpha} \sin(\alpha)$$

O valor de projeto de HMT corresponde a $\alpha = 90^\circ$ e $rmin = L$

$$HMT_p = k + J_0 L \left(\frac{L}{L} - \frac{1,852}{3} \left(\frac{L}{L} \right)^2 + \frac{0,852}{5,148} \left(\frac{L}{L} \right)^{5.148} \right) + S_p L \sin(90^\circ)$$

$$HMT_p = k + J_0 L(0,546) + S_p L$$



INOVAGRI
International Meeting

&



IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação



Análise Teórica em um Plano Inclinado (vii)

$$HMT_p = K + Hf_p + DE_p$$

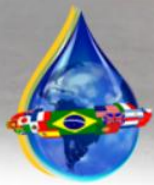
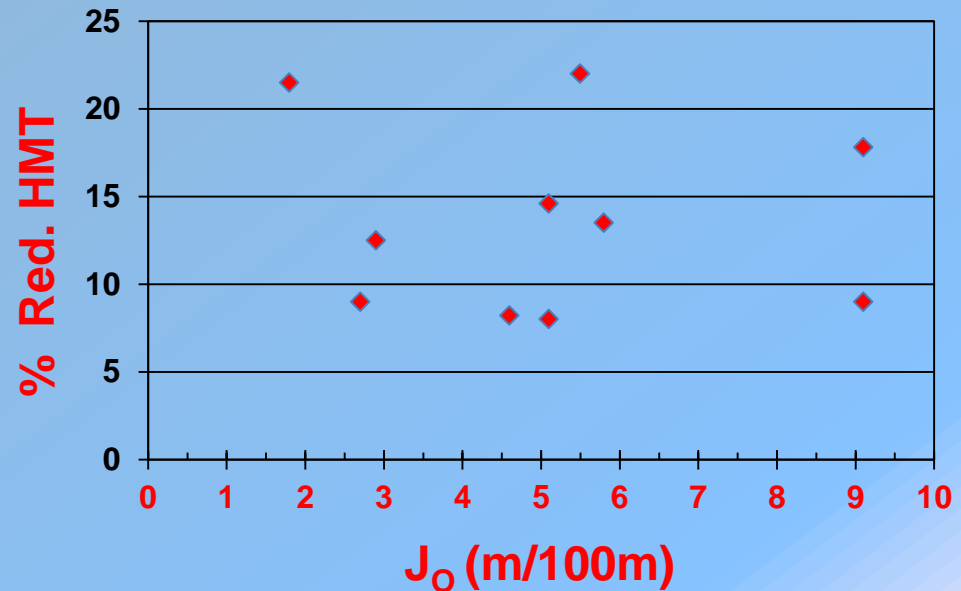
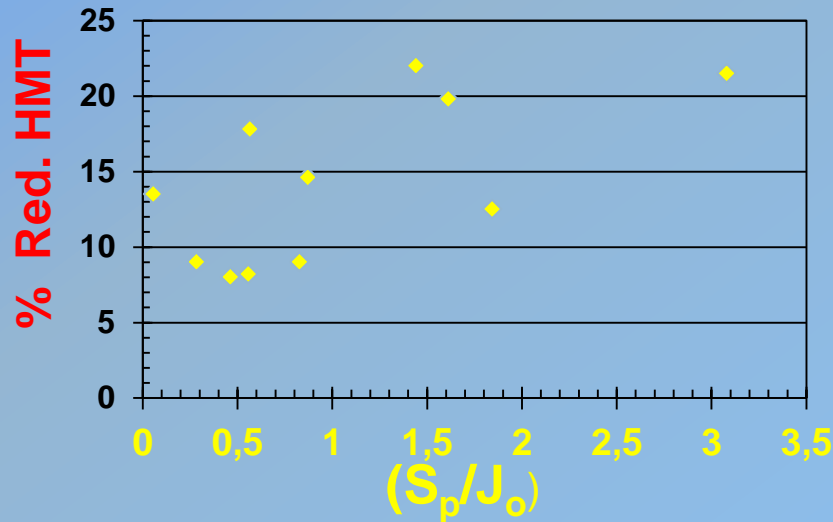
$$HMT_p = K + (0,546LJ_0) + (LS_p)$$

$$HMT_c = K + f_h Hf_p + f_e DE_p$$

$$HMT_c = K + f_h (0,546LJ_0) + f_e (LS_p)$$

DADOS DE 11
PIVÔS DA REGIÃO

$$\% \text{ Redução da HMT} = \frac{HMT_p - HMT_c}{HMT_p}$$



INOVAGRI
International Meeting

&



IV WINOTEC
Workshop Internacional
de Inovações Tecnológicas
na Irrigação

