



LII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA



Fundamentos de projeto de pivô central



UNICAMP

Prof. Dr. Antonio Pires de Camargo
Professor Associado
Laboratório de Hidráulica e Irrigação - LHI



Dr. Bernardo Gomes Norenberg
Engenheiro de Aplicação
Lindsay Brasil





Apresentação

Objetivos: Conhecer e compreender os principais componentes da lateral do pivô central, entendendo funcionalidades, fatores e critérios básicos de seleção e dimensionamento

Conteúdo:

- Visão geral do sistema pivô central
- Principais componentes da lateral do pivô central
- Fatores, critérios de seleção e opções de componentes da lateral
- Capacidade do sistema e dimensionamento da lateral
- Estimativa do risco de escoamento superficial em pivô central
- Exemplo de dimensionamento de um pivô central

Duração: 08:00 – 12:00

- Coffee-break das 10:00 – 10:30



Visão geral do sistema pivô central





O pivô central na agricultura irrigada brasileira

Informações do CONBEA-2023 (Prof. Everardo Mantovani)

- Mais de 30000 pivôs instalados
- Área equipada com pivô central: 1,92 milhões de hectares
 - Aumento de 370 mil hectares em relação a 2019 (+24%)
 - Aumento de 1 milhão de hectares em relação a 2010 (+225%)
- 92,5% dessas áreas estão nos estados de MG, GO, BA, SP, RS e MT



EVOLUÇÃO ÁREA EQUIPADA POR PIVÔS CENTRAIS NO BRASIL(ha)



Agricultura irrigada:
Segurança Alimentar com sustentabilidade hídrica e tecnológica



Everardo Mantovani
Consultor
Professor Titular Sênior UFV



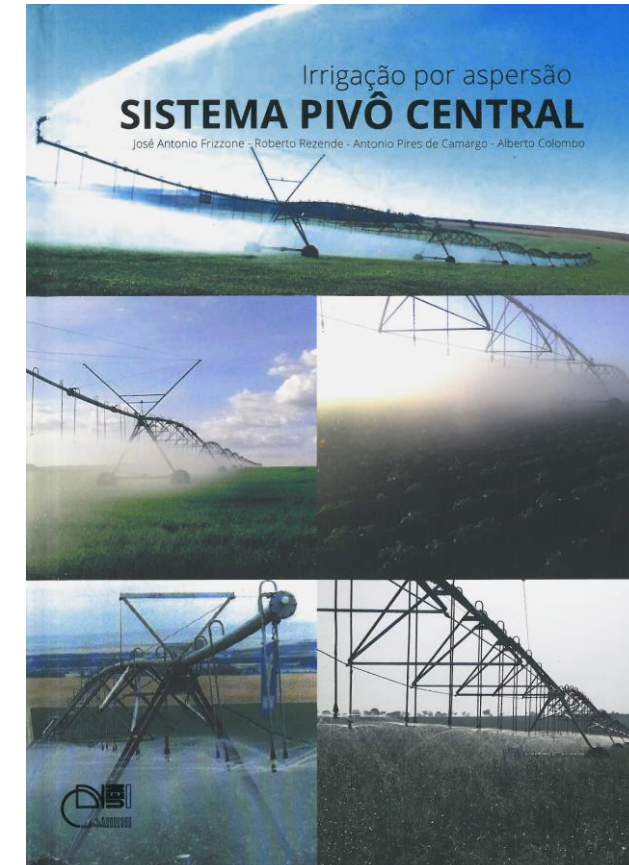
Área total irrigada no Brasil até 2022: 9,2 Mha



Irrigação por aspersão

Classificação dos sistemas de irrigação por aspersão (principais):

- Sistemas convencionais
- Sistemas mecanizados
 - Sistema com deslocamento radial - Pivô central
 - Sistema com deslocamento linear - Sistema linear ou Linear móvel
 - Autopropelido (carretel)





Sistema de irrigação pivô central

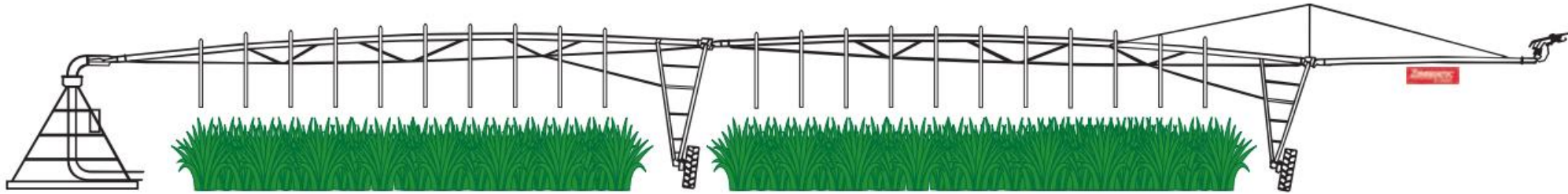
- Máquina de irrigação automatizada
- Linha lateral com deslocamento radial, que gira em torno do ponto central do equipamento (“ponto pivô”)
- Linha lateral suportada por torres autopropelidas
- Velocidade de deslocamento da última torre determina lâmina de irrigação aplicada



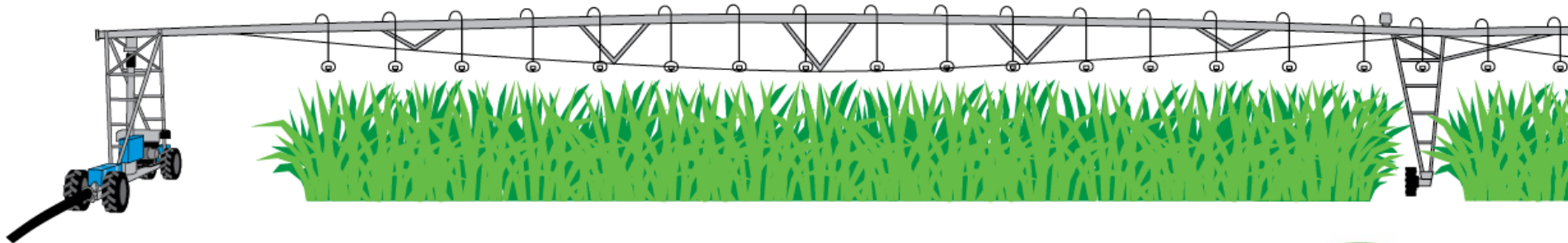


Pivô central e sistema linear

Pivô central



Sistema linear ou sistema lateral ou linear móvel ou...





Destaques do pivô central

- Simplicidade de operação / Operação automatizada: interferência mínima do operador
- Capacidade de aplicar pequenas lâminas de irrigação em alta frequência
- Elevada uniformidade e eficiência de aplicação de água
- Deslocamento circular: Ao final de uma irrigação o equipamento já está na posição para iniciar a próxima rotina
- Em grandes áreas e quando há necessidade de irrigar a área total, espera-se que o custo de investimento por ha do pivô central seja inferior ao sistema fixo por aspersão convencional ou a um sistema de microirrigação
- Possibilidade de uso em fertirrigação
- Possibilidade de revender equipamento usado





Potenciais limitações

- A área de cultivo é parcialmente irrigada (bordaduras)
 - Complicação para irrigação dos cantos
 - Sistema “Corner”
 - Uso de aspersão fixa ou irrigação localizada nas bordaduras
- Exige área livre de obstáculos
- Intensidade de aplicação de água na extremidade final da linha lateral pode ser elevada causando problemas de escoamento superficial
 - Uso de boombacks
- Influência de vento
 - Pendurais mais longos
 - Seleção de emissores que produzem gotas maiores
- Dificuldades de operação em terrenos com declividade superior a 15%





Dimensões típicas do sistema

Tamanho típico

- Nos EUA:
 - 400 m de comprimento -> Área irrigada = 50 ha (círculo inscrito em área quadrada de 64 ha)
- No Brasil:
 - Tamanho muito variável
 - Mini-pivô rebocável -> áreas irrigadas acima de 2 ha
 - Maior pivô central do mundo instalado em Tocantins -> área irrigada de 530 ha -> Linha lateral de 1300 m e 26 torres

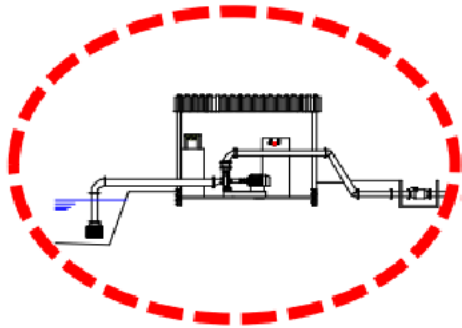


Principais componentes da lateral do pivô central

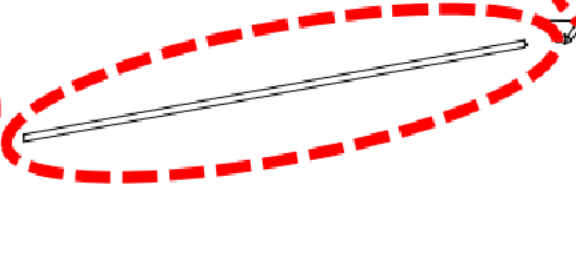


Visão geral do sistema

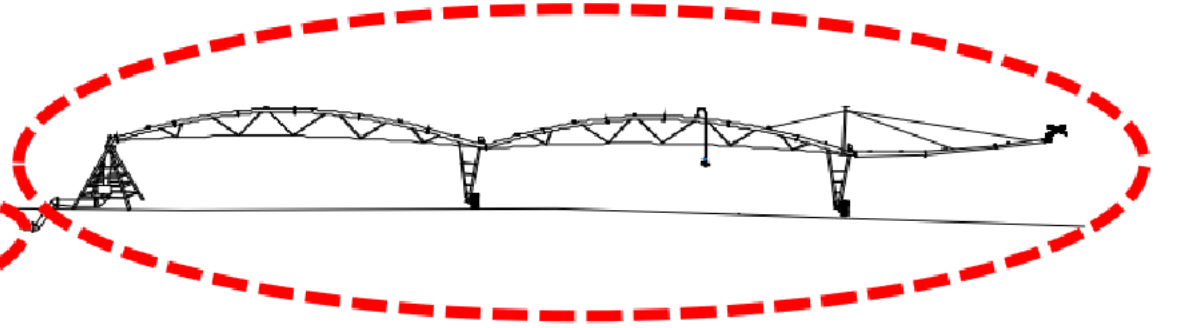
Sistema de bombeamento



Adutora



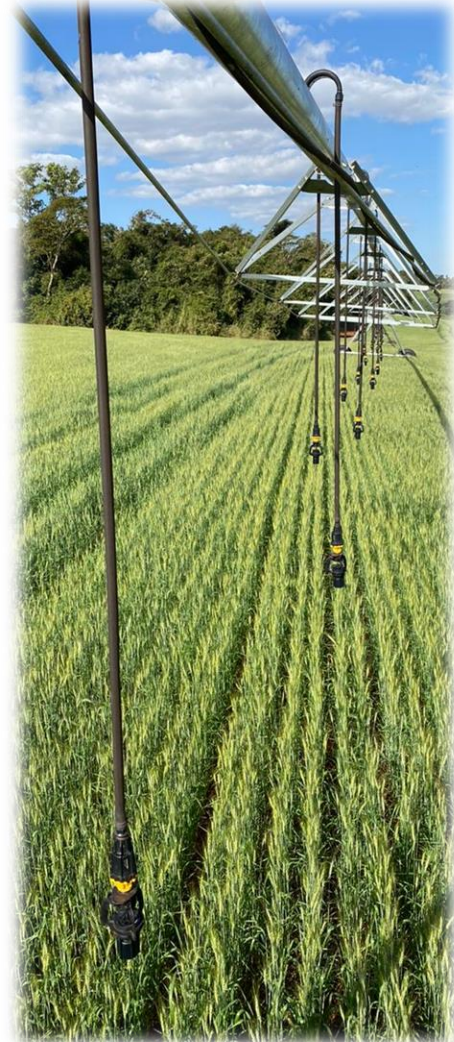
Pivô central





Principais componentes do pivô central

- Ponto pivô
- Torres móveis, motoredutores e pneus
- Lances (vãos) intermediários
- Lance (vão) em balanço
- Pendurais
- Válvulas reguladoras de pressão
- Aspersores
- Bomba booster
- Aspersor final





Torre fixa ou Ponto Pivô





Painel de controle e supervisão remota





Lances (vãos) e torres móveis



- Lances (vãos) intermediários
- Torres móveis, motoredutores e pneus
- Trelças e tirantes



Lance (vão) em balanço e aspersor final



Vão em balanço sem canhão final

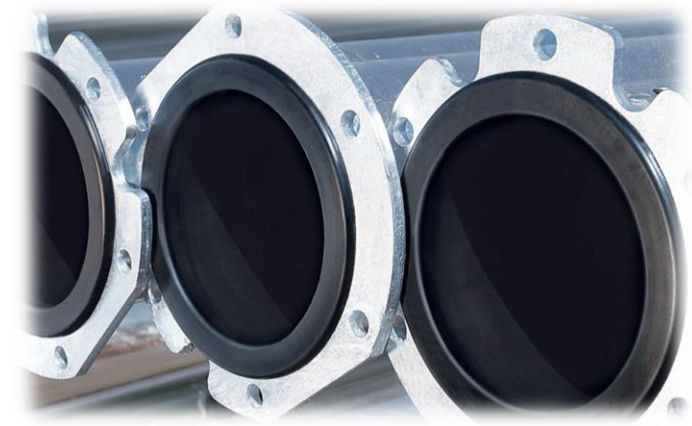


Vão em balanço com canhão final



Tubulação da linha lateral

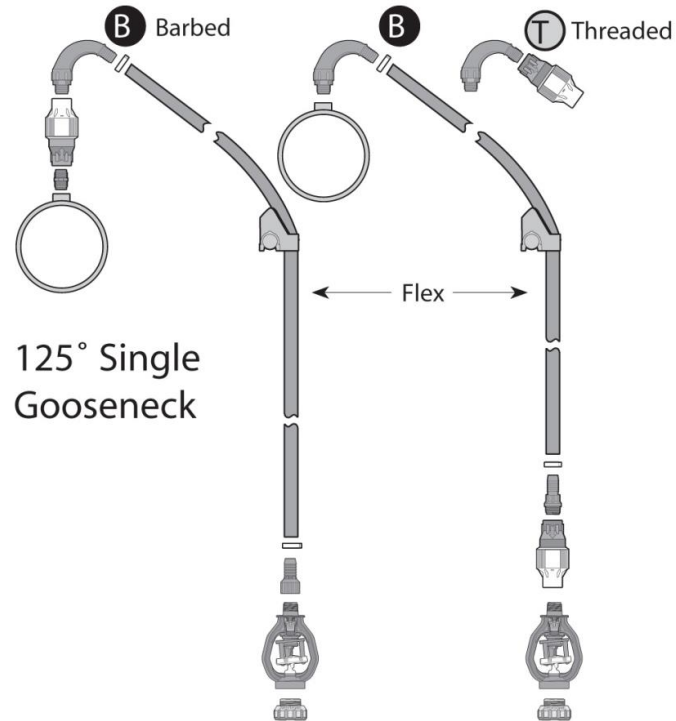
- Aço galvanizado
- Opcional: tubulações com revestimento
 - Fertirrigação
 - Vinhaça
 - Outros efluentes
- Diâmetros típicos: 4 a 10 polegadas (100 a 250 mm)
- Emissores espaçados de 0,7 a 3 m



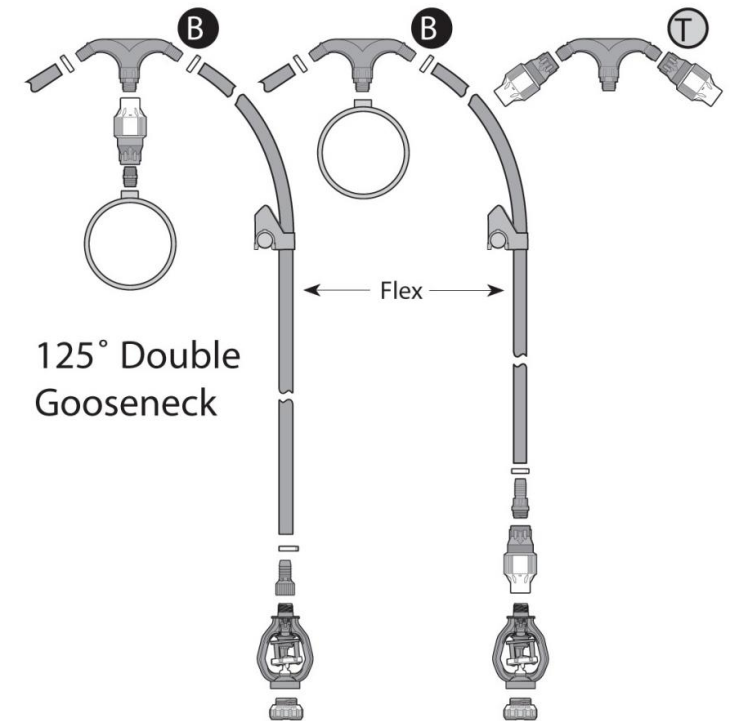
Tubos com revestimento

Curva de saída e pendural

Pendural simples



Pendural duplo





Válvula reguladora de pressão e aspersor





Aspersor final e bomba booster



Sistema de acionamento das torres

Percentímetro: Dispositivo para ajuste da velocidade de deslocamento do pivô central

- Ciclo de trabalho (*duty-cycle*): normalmente 1 minuto
- 100%: Motor da torre final ligado 100% do tempo
- 50%: Motor da torre final ligado 50% do ciclo de trabalho (30 s ligado e 30 s desligado)
- O deslocamento das outras torres é induzido pelo desalinhamento da linha lateral (maioria dos equipamentos)

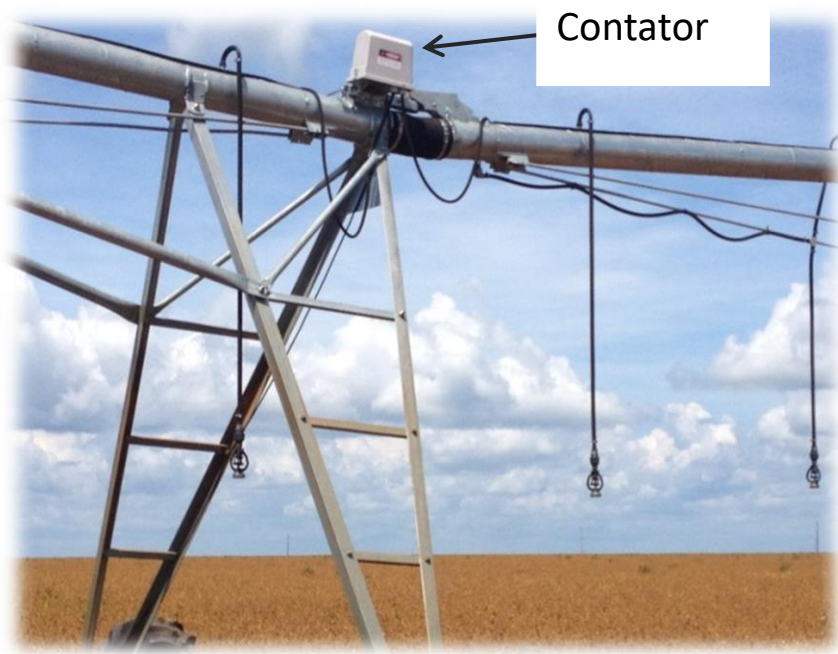




Sistema de acionamento das torres

Cada torre móvel é acionada por motor elétrico de 1/2 CV a 1.1/2 CV

Contator em cada torre

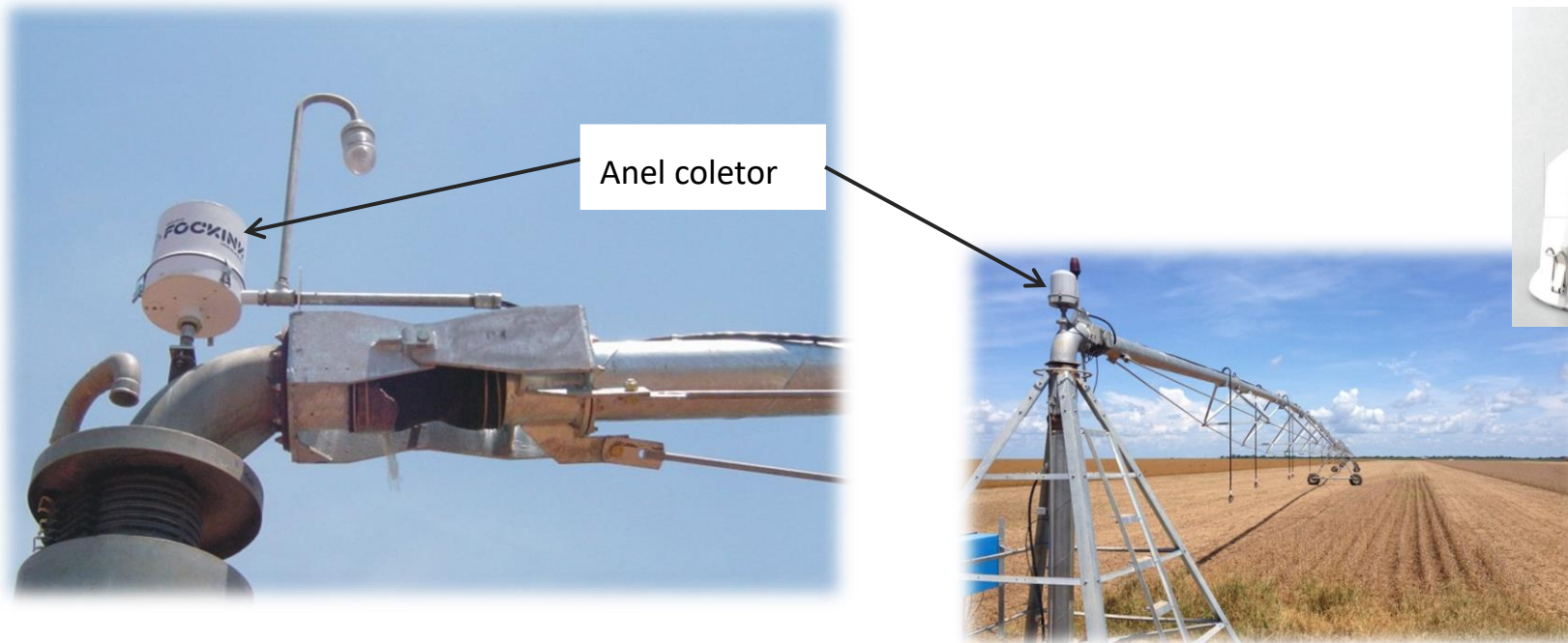


Sistema de acionamento das torres

Anel coletor: Dispositivo localizada no topo da torre fixa, que permite o funcionamento circular do pivô sem que o sistema elétrico seja desligado.

- Contatos elétricos deslizantes sobre um anel circular que recebe o cabeamento do painel de comando

Função: Fornecer energia para as unidades propulsoras do restante do pivô



Pivô Central 9500P

Adequado para áreas irregulares, sistemas mais longos e aplicações que necessitam de uma estrutura mais robusta!



Como é fabricado um pivô central

<https://www.youtube.com/watch?v=ND4ZDNud5i4&t=1s>



Faculdade de Engenharia Agrícola



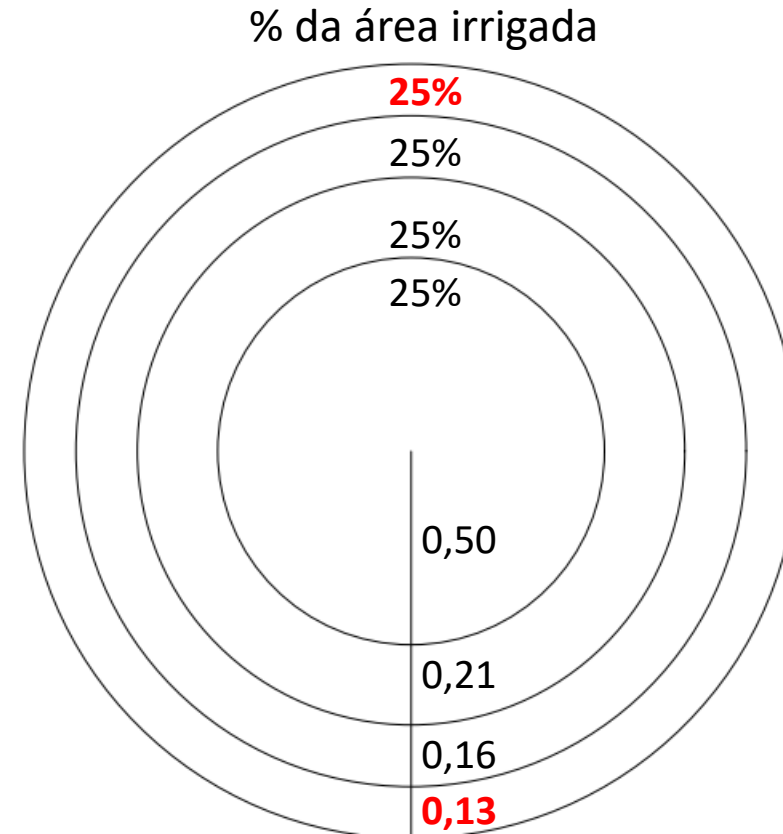
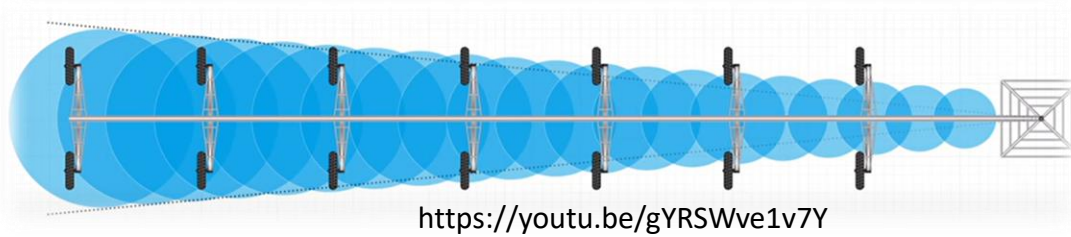
Fatores, critérios de seleção e opções de componentes da lateral do pivô central





Lateral do pivô central

Tubulação com múltiplas saídas equidistantes e com diâmetros associados em série
Vazão dos aspersores é crescente na lateral

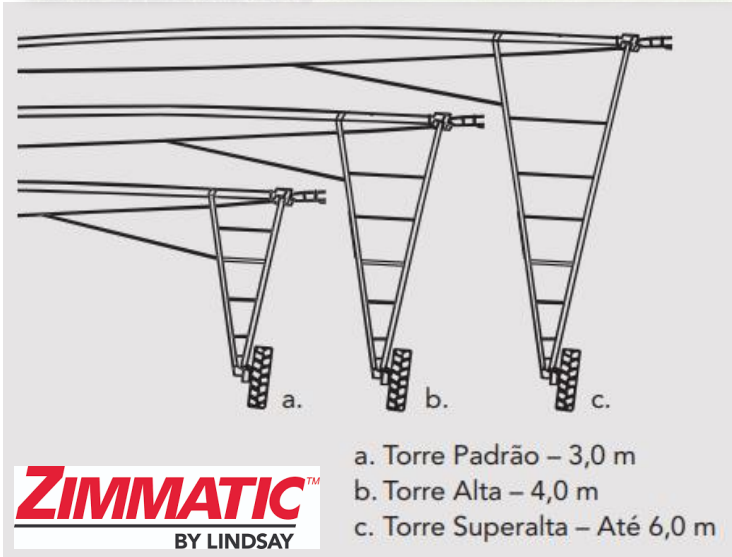
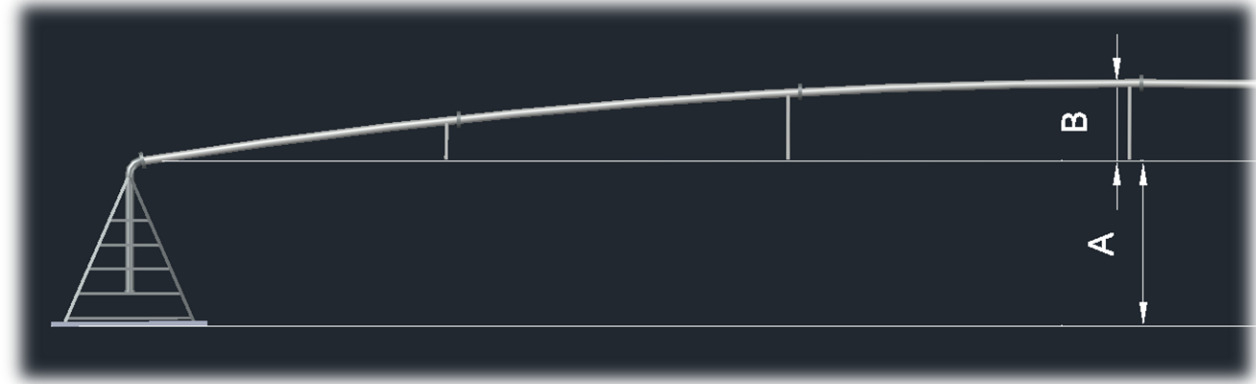


Frações do comprimento da lateral



Altura das torres

Fatores de seleção: Altura da cultura



Tamanho	Altura das torres A (m)	Altura máxima no lance A+B (m)
Padrão	3	4,6
Média	4	5,6
Alta	5	6,6
Super alta	6	7,6

↑ Custo



Configurações de lances intermediários

Fatores de seleção do diâmetro:

- V_{max} de escoamento
- Perda de carga
- Investimento x Energia

Fatores de seleção do tamanho de lance:

- Ocupação da área
- Restrições de topografia
- Custo do lance

Valores aproximados de configurações de lances comerciais

DN	D (mm)	Comprimento (m)	Nº de tubos	Nº de emissores
10"	248	48	7	21
10"	248	41	6	18
8.5/8"	213	55	8	24
8.5/8"	213	48	7	21
8.5/8"	213	41	6	18
8"	198	55	8	24
8"	198	48	7	21
8"	198	41	6	18
6.5/8"	162	62	9	27
6.5/8"	162	55	8	24
6.5/8"	162	48	7	21
6.5/8"	162	41	6	18
5.9/16"	136	55	8	24
5.9/16"	136	48	7	21
5.9/16"	136	41	6	18

Configurações do lance em balanço

Fatores de seleção do tamanho do lance em balanço:

- Ocupação da área
- Custo

As configurações exatas de lances variam conforme o fabricante



DN	D (mm)	Tamanho do vão ou lance	Comprimento (m)	Nº de tubos	Nº de emissores	Observação
5.9/16" e 4"	136 e 96	L4	28	4	12	2 tubos 5.9/16" + 2 tubos 4"
5.9/16" e 4"	136 e 96	L3	21	3	9	2 tubos 5.9/16" + 1 tubo 4"
5.9/16"	136	L2	14	2	6	
5.9/16"	136	L1	7	1	3	

Composição dos lances do pivô central

Exercício: Composição dos lances de um pivô central

- Área: 149,6 ha
- Lâmina: 7 mm/21 h
- Vazão: 498,6 m³/h
- Válvulas de 10 PSI
 - Pressão mínima no final da lateral: 13 m
- Terreno plano



Opção	Composição da lateral do pivô					V _{entrada} (m/s)	hf (m)	H _{pp} (m)	Ph _{pp} (CV)	Aumento na Ph _{pp} (%)
1	1x 10" (6 tubos)	6x 10" (7 tubos)	4x 8.5/8" (8 tubos)	2x 6.5/8" (8 tubos)	1x L4	2,9	14,9	32,5	60,0	---
2	1x 8.5/8" (6 tubos)	6x 8.5/8" (7 tubos)	4x 8.5/8" (8 tubos)	2x 6.5/8" (8 tubos)	1x L4	3,9	24,2	41,8	77,3	28,8
3	1x 8" (6 tubos)	6x 8" (7 tubos)	4x 8" (8 tubos)	2x 6.5/8" (8 tubos)	1x L4	4,5	34,3	51,9	95,9	59,8

Espaçamento entre aspersores

Não é uma opção nos nossos projetos

- Espaçamento equidistante de aspersores na lateral (pivôs brasileiros)
- Facilita a fabricação da linha lateral do pivô
- Vazão de cada emissor aumenta proporcionalmente com a distância a partir do ponto pivô
- Diâmetro de cobertura também apresenta aumento com a distância, mas não é exatamente proporcional (efeitos de pressão, vazão e tipo de placa defletora)
- Vazões elevadas no final do pivô -> Risco de escoamento superficial





Aspersores

Características desejáveis para a maioria das aplicações:

- Baixa pressão de operação
- Tamanho médio de gotas
- Diâmetro molhado o maior possível
- Uniformidade e eficiência de aplicação

Itens a selecionar:

- Fabricante e modelo de aspersor
- Pressão de operação (válvula reguladora de pressão)
- Diâmetro de bocal (depende do fabricante)
 - Interfere na vazão e no alcance do jato
 - Diâmetros de 2 a 10,3 mm
 - Vazões de 100 a 4500 L/h
- Tipo de placa defletora (depende do fabricante)
 - Interfere nas características de distribuição de água
 - Diâmetro molhado de 9 a 18 m
 - Pressão, tamanho do bocal, tipo de placa



Cálculo de vazão: Lei dos orifícios

$$1 \text{ bocal: } q = C_d \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 g h}$$

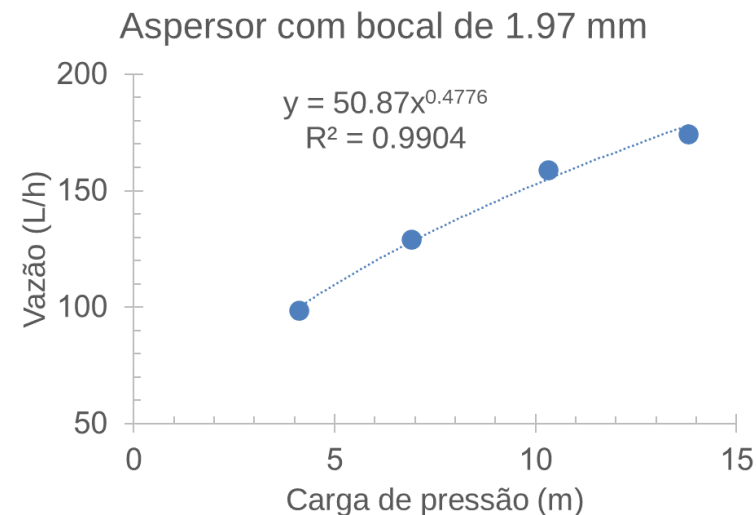
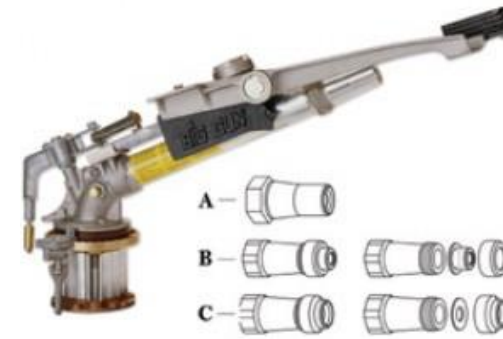
$$2 \text{ ou mais bocais: } q = C_d (A_1 + A_2 + \dots) \sqrt{2 g h}$$

Equação vazão-pressão de aspersores:

$$q = k \sqrt{h}$$

Ou ainda,

$$q = k h^x$$





Aspersores

KOMET PRECISION TWISTER (KPT)

FAIXA DE BOCAIS

43 bocais
 Ø 2.0 - 10.3 mm
 Ø 10 - 52 1/128"

FAIXA DE VAZÃO

100.7 - 4844.4 l/hr
 0.44 - 21.33 gpm

FAIXA DE ALCANCE

Ø 9.0 - 16.8 m
 Ø 30.0 - 55.0 ft
 a 1.8 mt (6 ft)
 altura do solo



Bocal:

- Controla a vazão no aspersor
- Dimensionado com base na vazão do sistema e na posição do aspersor ao longo da lateral



komet	Rapid Fit Nozzle		UNIDADE U.S. (GPM)				UNIDADE MÉTRICAS (L/Hr)			
			DONNÉES TECHNIQUES EN UNITÉS U.S.				DONNÉES TECHNIQUES EN UNITÉS MÉTRIQUES			
			Pressão do bocal / Pression à la buse				Pressão do bocal / Pression à la buse			
Tamanho do bocal em incrementos de 1/28"	COR / COULEUR		6 PSI	10 PSI	15 PSI	20 PSI	0,41 bar	0,69 bar	1,03 bar	1,38 bar
Taille buse en incréments de 1/128"			Vazão / Débit (GPM)				Vazão / Débit (L/Hr)			
8		Azul Claro / Bleu Clair	0.28	0.37	0.45	0.52	63,4	82,9	102,0	111,9
9		Azul Claro / Bleu Clair	0.35	0.46	0.57	0.66	80,1	104,8	128,9	141,4
10		Bege / Beige	0.43	0.57	0.70	0.81	98,7	129,1	158,8	174,2
11		Bege / Beige	0.52	0.69	0.84	0.98	119,2	156,0	191,9	210,5
12		Dourado / Or	0.62	0.82	1.00	1.17	141,7	185,4	228,1	250,1
13		Dourado / Or	0.73	0.96	1.18	1.37	166,0	217,3	267,3	293,2
14		Limão / Vert Lime	0.85	1.11	1.36	1.59	102,2	251,7	200,7	220,6
...										
46		Creme / Crème	8.97	11.74	14.44	16.80	2037,3	2666,4	3280,1	3597,3
47		Creme / Crème	9.36	12.25	15.07	17.53	2126,1	2782,7	3423,0	3754,1
48		Azul escuro / Bleu Foncé	9.76	12.77	15.71	18.28	2216,8	2901,4	3569,0	3914,3
49		Azul escuro / Bleu Foncé	10.17	13.31	16.37	19.04	2309,4	3022,5	3718,1	4077,7
50		Cobre / Cuivre	10.58	13.85	17.04	19.82	2403,8	3146,1	3870,1	4244,5
51		Cobre / Cuivre	11.01	14.41	17.72	20.62	2500,1	3272,2	4025,2	4414,5
52		Dourado / Or	11.44	14.97	18.42	21.43	2598,3	3400,7	4183,3	4587,9





Aspersores

KOMET PRECISION TWISTER (KPT)

FAIXA DE BOCAIS

43 bocais
Ø 2.0 - 10.3 mm
Ø 10 - 52 1/128"

FAIXA DE VAZÃO

100.7 - 4844.4 l/hr
0.44 - 21.33 gpm

FAIXA DE ALCANCE

Ø 9.0 - 16.8 m
Ø 30.0 - 55.0 ft
a 1.8 mt (6 ft)
altura do solo



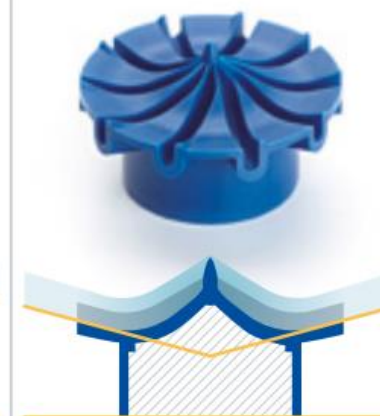
Placa defletora: Interfere nas características de distribuição de água pelo aspersor

Ângulo trajetória padrão
Angle trajectoire standard



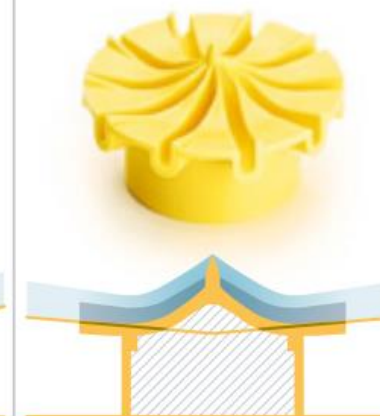
Para uso em tubos de descida

Ângulo trajetória baixo
Angle trajectoire bas



Para uso em tubos de descida

Ângulo trajetória ultra-baixo
Angle trajectoire ultra-bas



Para uso em tubos de descida



Válvulas reguladoras de pressão (VRP)



Opções comerciais:

6 PSI, **10 PSI**, 15 PSI, 20 PSI



Função: Manter pressão fixa na entrada do aspersor

Característica desejada: Pressão fixa na saída da válvula para um intervalo amplo de pressões de entrada e de vazões

Realidade: Pressão na saída da válvula (p_s) é influenciada pela pressão na entrada (p_e) e pela vazão (q)

$$p_s = f(p_e, q)$$

Exemplo de função matemática para cálculo da pressão de saída em VRPs.

$$p_s = a + b q + \frac{c}{1 + e^{\left(\frac{d-p_e}{f}\right)}}$$

a, b, c, d, f são coeficientes que variam conforme o modelo de válvula

Válvulas reguladoras de pressão (VRP)

Curva de regulagem

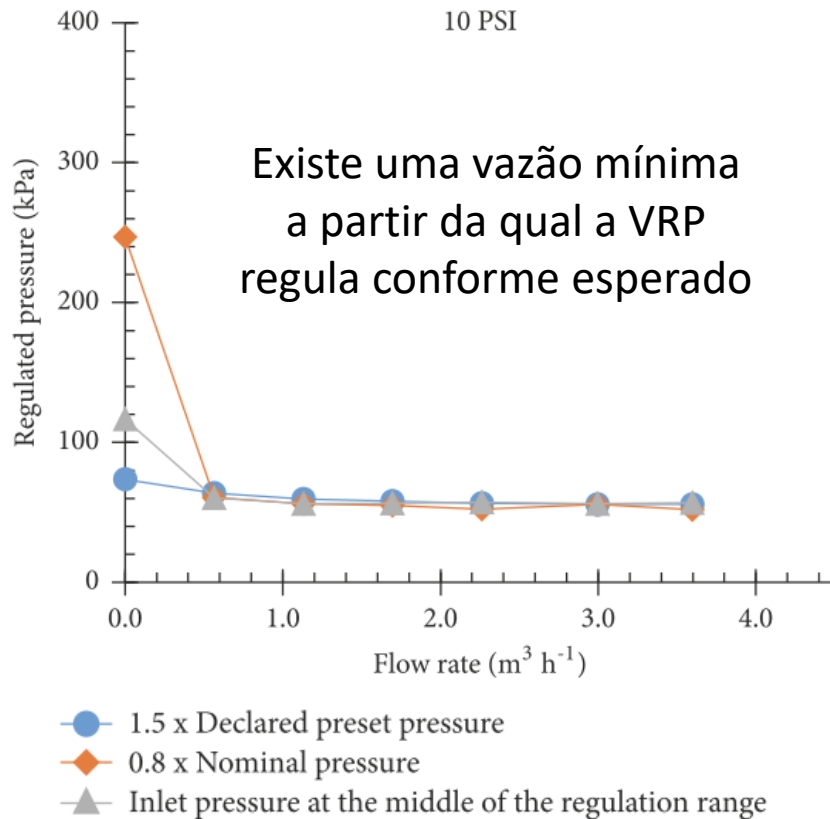


FIGURE 2: Regulation curves.

Histerese

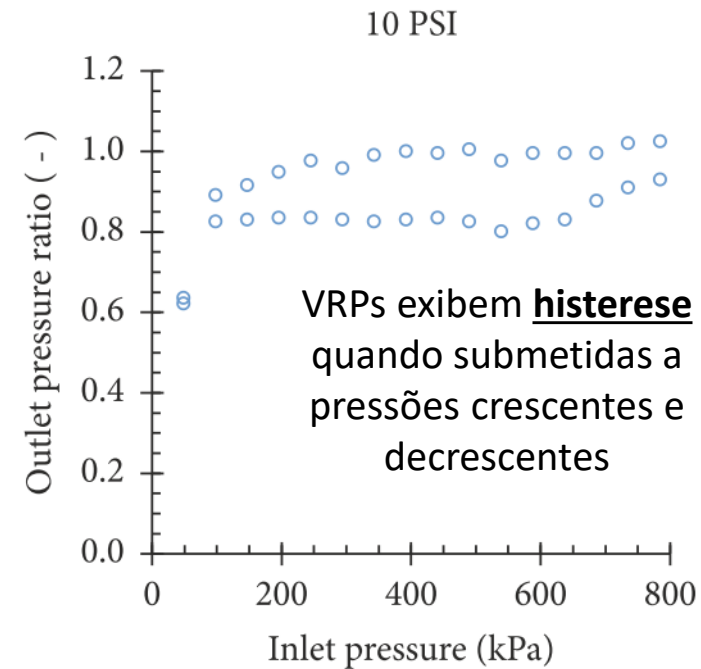
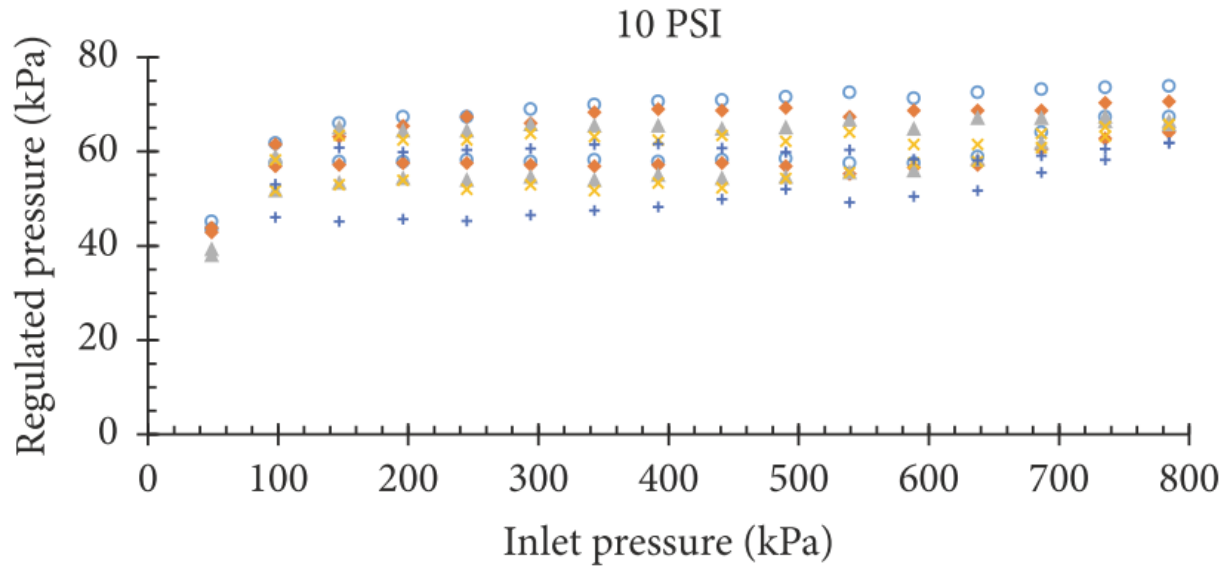


Figure 4: Hysteresis observed when operating the PRVs under $q = 1.13 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$ (flow velocity of 1 m s^{-1})



Válvulas reguladoras de pressão (VRP)



Uso adequado dos produtos
 Atenção com as especificações técnicas, recomendações e limites operacionais informados nos catálogos dos fabricantes

- Pressões mínima e máxima
- Vazões mínima e máxima

Séries do gráfico são as vazões de ensaio em m³/h



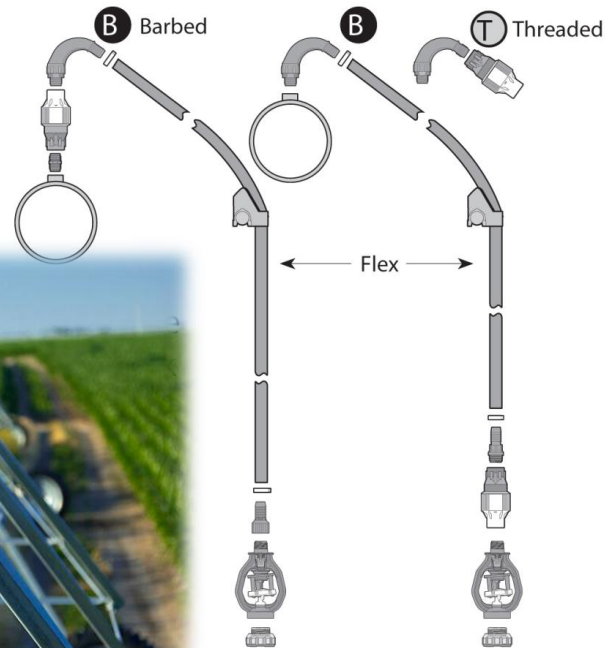
Curva de saída e pendural

Função: Conduzir água da lateral até o aspersor

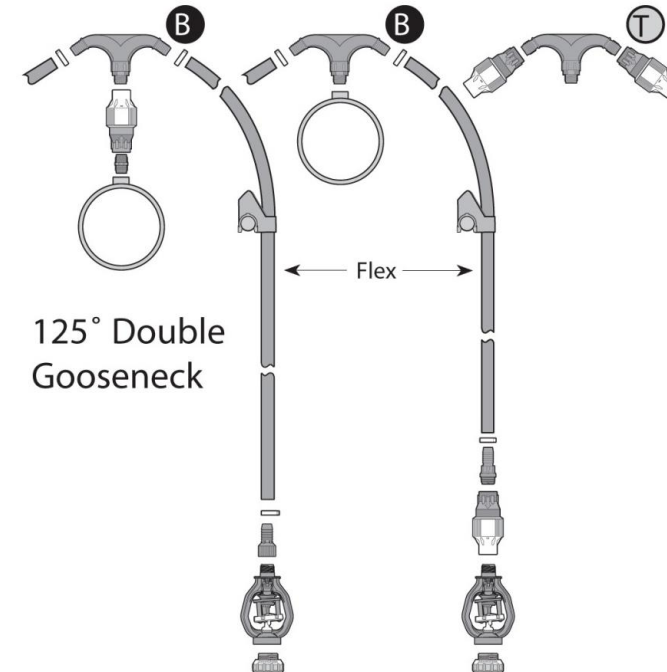
Fatores de seleção:

- Posição de componentes
- Comprimento do pendural
- Simples ou duplo

Pendural simples



Pendural duplo

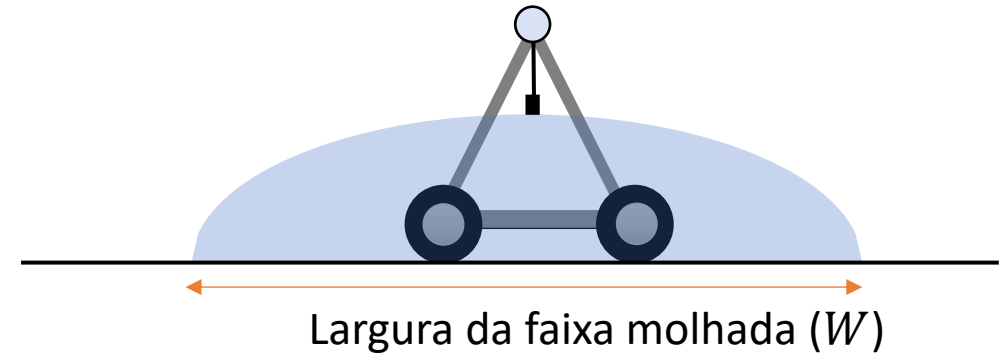




Pendural duplo

Função: Solução para pontos cuja vazão não pode ser obtida com um único bocal

- Também proporciona aumento da largura da faixa molhada, contribuindo para redução da intensidade de aplicação

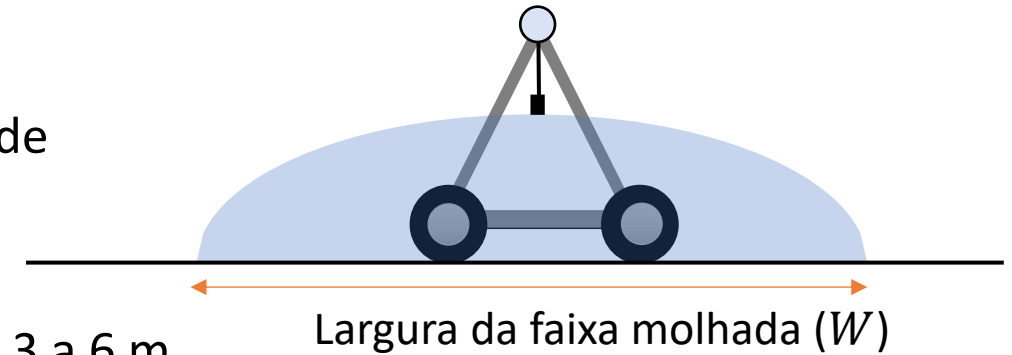


Boombacks (Espaçadores)

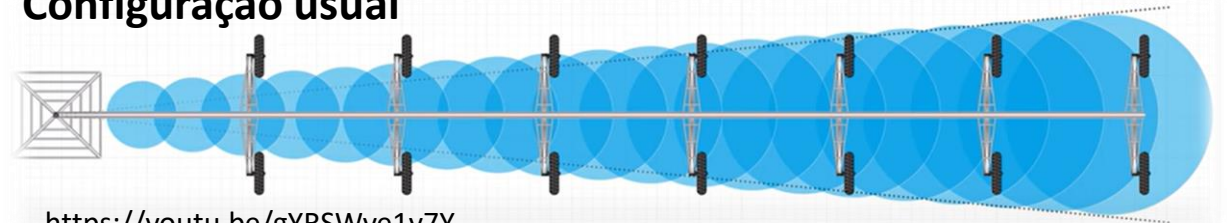
Função:

- Aumentar a largura da faixa molhada, reduzir intensidade de aplicação e risco de escoamento superficial

Distância de instalação em relação a tubulação do pivô: de 3 a 6 m

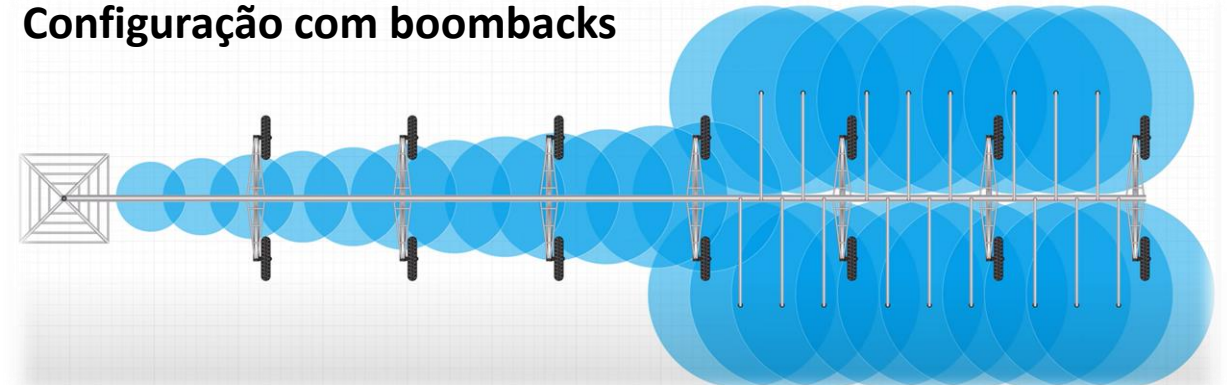


Configuração usual



<https://youtu.be/gYRSWve1v7Y>

Configuração com boombacks





Trilha seca com aspersores setoriais

Função: Aspersores setoriais acoplados em boombacks podem ser instalados próximo das torres móveis para proporcionar trilha seca.

Benefícios: Reduzir patinagem de pneus, evitar a formação de sulcos profundos nas trilhas

Aspersores setoriais

Boombacks para trilha seca





Aspersor no final do lance em balanço

Função:

- Proporcionar área adicional irrigada sem a necessidade de mais uma torre móvel

Fatores de seleção:

- Alcance desejado
- Necessidade de bomba em série (booster)
- Custo

Atenção: A uniformidade e eficiência de aplicação é inferior na área irrigada pelo aspersor final (vento, deriva e evaporação direta)



Aspersor no final do lance em balanço



Nelson R55



- $p_{min} \geq 1 \text{ bar}$
- Raio de alcance: 12 a 13 m
- Não requer booster



Nelson R75



- $p_{min} \geq 1,7 \text{ bar}$
- Raio de alcance: 12 a 21 m
- Eventualmente não requer booster



Nelson SR75 e SR100



- $p_{min} \geq 2 \text{ bar}$
- Raio de alcance: 21 a 37 m
- Requer booster

Soluções combinadas de final de pivô





Bomba booster para o aspersor final

Função:

- Elevar a pressão no final do pivô para operação adequada do aspersor final

Fatores de seleção:

- Vazão do aspersor final
- Pressão requerida para operação do aspersor final
- Pressão disponível no final da lateral do pivô

Usualmente são motobombas com potência nominal entre 3 e 5 CV.

Q = Vazão do aspersor pressurizado pela booster

$$H_{MT_{booster}} = -\frac{p_{final}}{\gamma} + \frac{p_{aspersor}}{\gamma} + h_{aspersor}$$

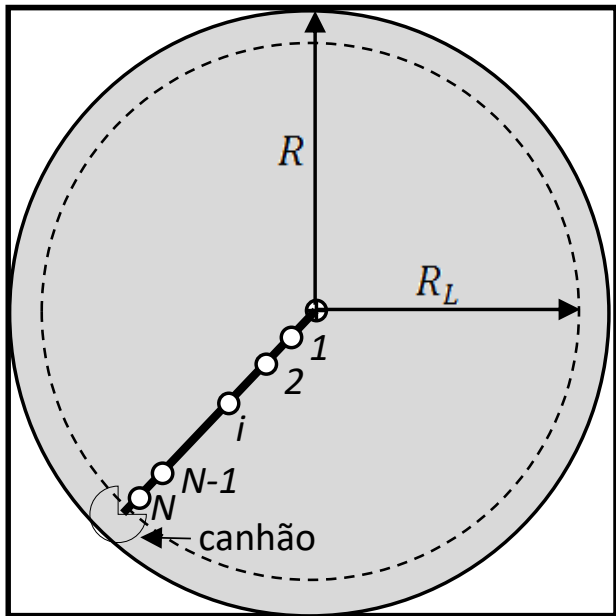
$H_{MT_{booster}}$: Altura manométrica total da bomba booster (m);

p_{final} : Carga de pressão disponível no final da lateral do pivô (m);

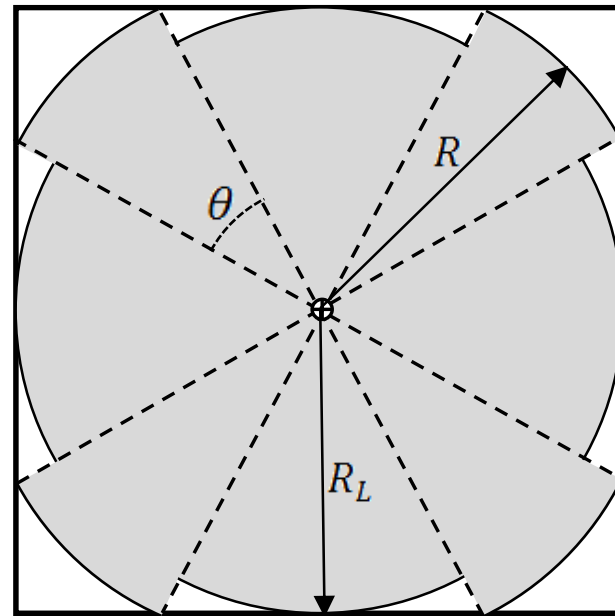
$p_{aspersor}$: Carga de pressão requerida para operação do aspersor (m);

$h_{aspersor}$: Distância vertical entre a bomba e o bocal do aspersor (m)

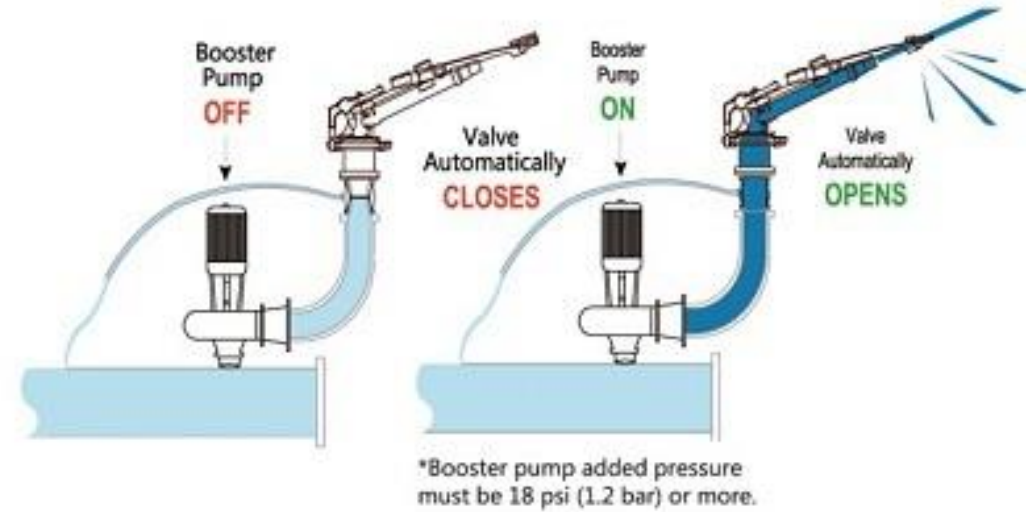




círculo completo com canhão final irrigando círculo total



círculo completo com canhão final para irrigar cantos



Capacidade do sistema e dimensionamento da lateral





Lâmina bruta de projeto

Lâmina bruta de projeto ou Taxa de Reposição Diária (TRD)

- Indica a capacidade máxima do pivô
- Usual: 6 a 12 mm/dia (Lâmina bruta)
- Número máximo de horas que o equipamento opera por dia
 - Usual: 21 h/dia



TRD

Menor custo do equipamento
Maior risco de não atender a demanda da cultura
-> *Regiões mais úmidas ou culturas mais tolerantes ao estresse hídrico*



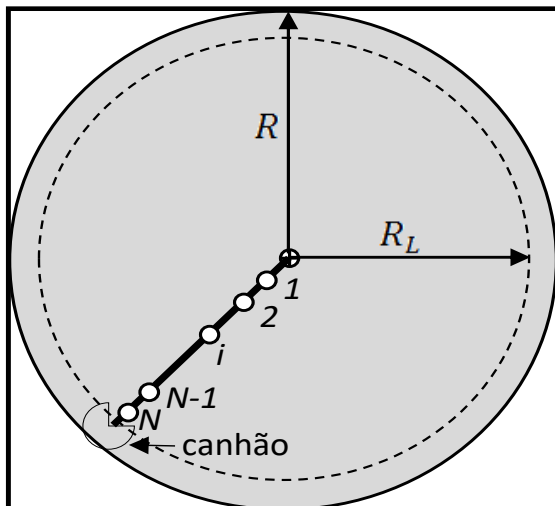
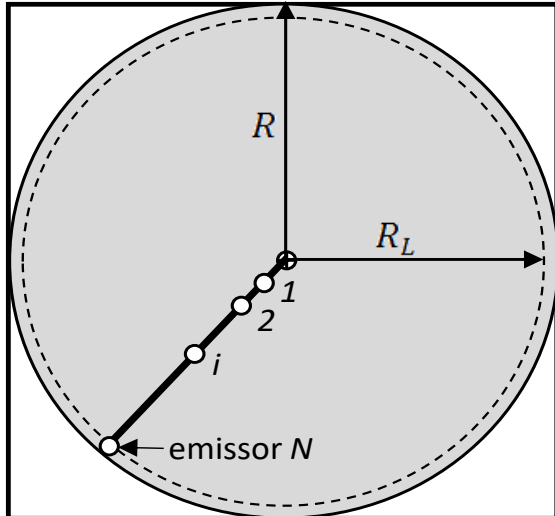
TRD

Maior custo do equipamento
Maior segurança da produção
-> *Regiões mais secas ou culturas mais sensíveis ao estresse hídrico*

Principais fatores a considerar na definição da TRD:

- Demanda hídrica máxima da cultura
- Precipitação efetiva
- Necessidade de lixiviação de sais





$$R = R_L + r_u$$

R : Raio da área irrigada (m)

R_L : Comprimento da linha lateral (m)

r_u : Raio de alcance efetivo do último aspersor (m)

Área total irrigada (A):

$$A = \pi R^2$$

$$A = \pi (R_L + r_u)^2$$

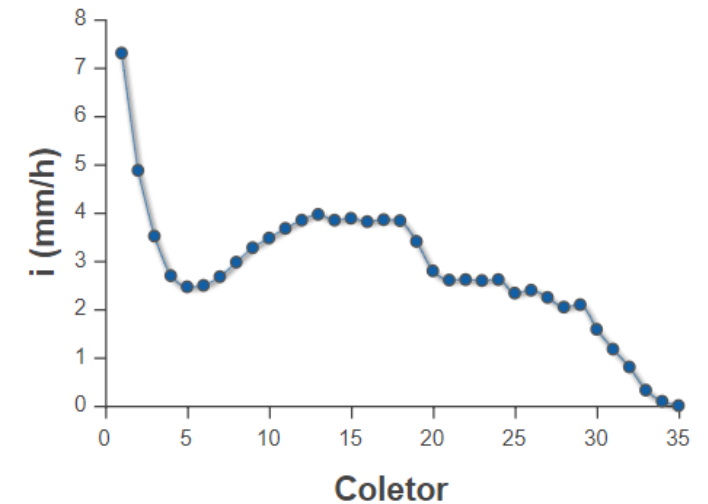
Área básica (A_b):

$$A_b = \pi R_L^2$$

Área irrigada pelo último aspersor (A_u):

$$A_u = A - A_b$$

Perfil de distribuição radial de aspersores



Raio de alcance efetivo de um aspersor

- 1) ISO15886-3: Distância na qual $i = 0,27 \text{ mm/h}$
- 2) Literatura: 75 a 95% do raio de alcance total

Vazão necessária ao sistema

Lâmina bruta de projeto

$$h_b = \frac{ET_{pc}}{E_a}$$

h_b : Lâmina bruta de projeto (mm/dia)

- Usual 6 a 12 mm/dia

ET_{pc} : Evapotranspiração da cultura no período de máxima demanda (mm/dia)

E_a : Eficiência de aplicação (-)

- Esperado: 80 a 90%

Estimativa da vazão na entrada do pivô (Q_0)

$$Q_0 = \frac{A h_b}{t_{rp}} 10$$

Q_0 : Vazão necessária na entrada do pivô (m³/h)

A : Área total irrigada (ha)

h_b : Lâmina bruta de irrigação (mm/dia)

t_{rp} : Tempo de revolução do pivô na condição de projeto (h/dia)

- Valor típico de projeto: 21 h/dia



Vazão necessária ao sistema

Vazão do sistema:

$$Q_0 = Q_b + Q_u$$

Vazão na área básica:

$$Q_b = \frac{A_b h_b}{t_{rp}} 10$$

Vazão no último aspersor:

$$Q_u = \frac{A_u h_b}{t_{rp}} 10$$

Q_0 : Vazão necessária na entrada do pivô (m³/h)

Q_b : Vazão necessária na área básica (m³/h)

Q_u : Vazão necessária na área irrigada pelo último aspersor (m³/h)

A_b : Área básica (ha)

A_u : Área irrigada pelo último aspersor (ha)

t_{rp} : Tempo de revolução do pivô na condição de projeto (h/dia)



Dimensionamento de aspersores para a área básica



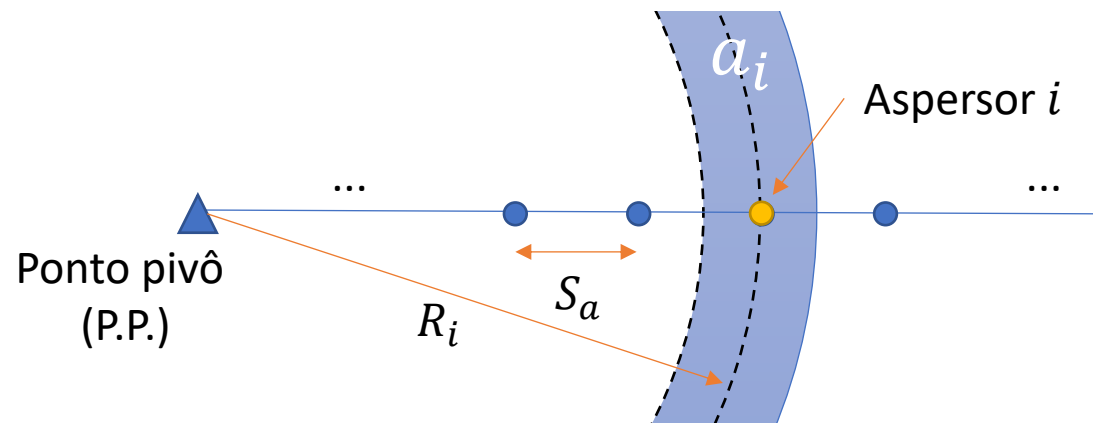
Área irrigada por um aspersor i

$$a_i = \pi \left(R_i + \frac{S_a}{2} \right)^2 - \pi \left(R_i - \frac{S_a}{2} \right)^2$$

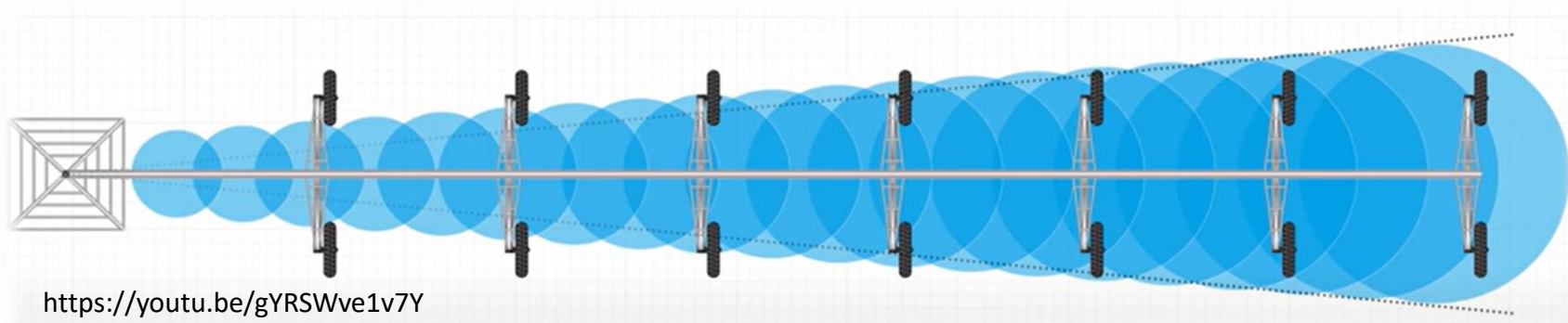
$$\dots$$

$$a_i = 2 \pi R_i S_a$$

a_i : Área irrigada pelo aspersor i (m²)
 R_i : Distância do P.P. até o aspersor i (m)
 S_a : Espaçamento entre aspersores (m)



Dimensionamento de aspersores para a área básica



Vazão no aspersor i irrigando círculo total:

$$q_i = \frac{Q_b}{A_b} a_i$$

...

$$q_i = \frac{2 Q_b R_i S_a}{R_L^2}$$

Diâmetro do bocal do aspersor i :

$$q = C_d \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 g h}$$

...

$$d_i = \sqrt{\frac{4 q_i}{C_d \pi \sqrt{2 g h_i}}}$$



Dimensionamento de aspersores para a área básica

$$q_i = \frac{2 Q_b R_i S_a}{R_L^2}$$

$$d_i = \sqrt{\frac{4 q_i}{C_d \pi \sqrt{2 g h_i}}}$$

Pressão na saída da válvula reguladora de pressão:

Opção 1: Assumir pressão declarada

- 6 PSI = 4,1 m
- 10 PSI = 6,9 m
- 15 PSI = 10,3 m

Não recomendado!

Opção 2: Utilizar a equação da VRP
Limitação: Curvas das VRPs não são disponibilizadas pelos fabricantes

Opção 3: Utilizar o software dos fabricantes de VRPs e aspersores para obtenção do mapa de bocais

Essa é a opção usual





Cálculos hidráulicos da lateral do pivô

Cálculo de vazão na lateral do pivô

Solução 1: Cálculo trecho-a-trecho

Solução 2: Método algébrico

Cálculo trecho-a-trecho

- Essa é a solução empregada nas planilhas e softwares de cálculo
- Parâmetros hidráulicos são calculados para o trecho correspondente a distância de sucessivos aspersores
- Permite espaçamentos irregulares entre saídas
- Permite considerar variações na declividade do terreno
- Permite fechar saídas no início do pivô e duplicar saídas no final do pivô
- Cálculos exatos

1	Trecho	Comprimento do trecho (m)	Declividade do terreno (%)	Δz no trecho (m)	Emissor i	Raio até o emissor i (m)	Área irrigada pelo emissor i (ha)	Vazão
2	canhão	201	2.3	7	0.161 canhão	464.14		2.69
3		201 200	2.3	7	0.161 201	461.84		0.667
4		200 199	2.3	7	0.161 200	459.54		0.664
5		199 198	2.3	7	0.161 199	457.24		0.661
6		198 197	2.3	7	0.161 198	454.94		0.657
7		197 196	2.3	7	0.161 197	452.64		0.654
8		196 195	2.3	7	0.161 196	450.34		0.651
9		195 194	2.3	7	0.161 195	448.04		0.647
10		194 193	2.3	7	0.161 194	445.74		0.644
11		193 192	2.3	7	0.161 193	443.44		0.641
12		192 191	2.3	7	0.161 192	441.14		0.638
13		191 190	2.3	7	0.161 191	438.84		0.634
14		190 189	2.3	7	0.161 190	436.54		0.631
15		189 188	2.3	7	0.161 189	434.24		0.628
16		188 187	2.3	7	0.161 188	431.94		0.624
17		187 186	2.3	7	0.161 187	429.64		0.621
18		186 185	2.3	7	0.161 186	427.34		0.618
19		185 184	2.3	7	0.161 185	425.04		0.614
20		184 183	2.3	7	0.161 184	422.74		0.611
21		183 182	2.3	7	0.161 183	420.44		0.608
22		182 181	2.3	7	0.161 182	418.14		0.604
23		181 180	2.3	7	0.161 181	415.84		0.601
24		180 179	2.3	7	0.161 180	413.54		0.598
25		179 178	2.3	7	0.161 179	411.24		0.594
26		178 177	2.3	7	0.161 178	408.94		0.591



Cálculos de perda de carga

Equação de Hazen-Williams

$$h_f = \frac{10,65 Q^{1,852} L}{C^{1,852} D^{4,871}}$$

h_f : Perda de carga distribuída (m)

Q : Vazão na entrada do trecho (m³/s)

L : Comprimento do trecho (m)

C : Coeficiente de atrito da Eq. de Hazen-Williams (-)

- Valor usual para aço galvanizado: C=135

D : Diâmetro interno do conduto (m)

Equação Universal (ou Equação de Darcy-Weisbach)

$$h_f = f \frac{L v^2}{D 2 g} \quad \text{ou} \quad h_f = 0,08263 f \frac{Q^2}{D^5} L$$

h_f : Perda de carga distribuída (m)

v : Velocidade média de escoamento na entrada do trecho (m/s)

Q : Vazão na entrada do trecho (m³/s)

L : Comprimento do trecho (m)

D : Diâmetro interno do conduto (m)

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$

f : Coeficiente de atrito da Equação Universal (-)

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{R_e} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,7 D} + \frac{5,74}{R_e^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{R_e} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125}$$

Aço galvanizado: $60 \mu\text{m} \leq \varepsilon \leq 200 \mu\text{m}$

Cálculos hidráulicos da lateral do pivô

Definição da pressão requerida no final do pivô central

Regra prática: A pressão mínima do final da lateral deve ser a pressão nominal da válvula reguladora de pressão mais uma folga de 6 m.

VRP	Pressão declarada (m)	Pressão mínima no final da lateral (m)
6 PSI	4,2	10,2
10 PSI	7,0	13,0
15 PSI	10,5	16,5

Se houver um aspersor final que necessite de pressão superior, há duas opções:

- 1) Aumentar a pressão disponível no final da lateral
- 2) Instalar uma bomba booster para elevação de pressão no final da lateral





Cálculos hidráulicos da lateral do pivô

Definição da pressão requerida na base do ponto pivô

$$H_0 = (H_{final} + h_f + H_{lance} + \Delta Z_{crítico})$$

H_0 : Carga de pressão requerida na base do ponto pivô (m)

H_{final} : Carga de pressão requerida no final da lateral do pivô (m)

h_f : Perda distribuída de carga na lateral (m)

$\Delta Z_{crítico}$: Desnível vertical na condição mais crítica de operação da lateral (m)

H_{lance} : Altura máxima nos lances do pivô (m)

Tamanho	Altura das torres A (m)	Altura máxima no lance B (m)
Padrão	3	4,6
Média	4	5,6
Alta	5	6,6
Super alta	6	7,6



Cálculos hidráulicos da lateral do pivô

Condição de projeto para operação do pivô:

Vazão requerida no ponto pivô: Q_0

Carga de pressão requerida no ponto pivô: H_0

Com essas informações é possível dimensionar medidor de vazão, válvulas, adutora, sucção e sistema de bombeamento.



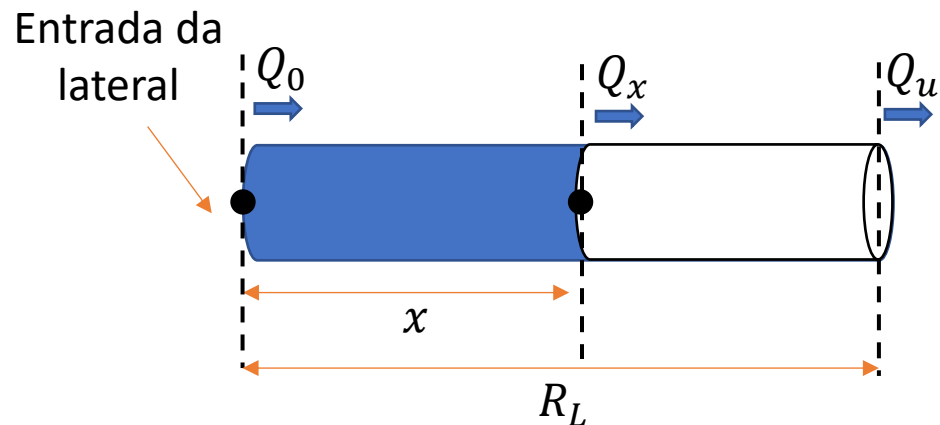
Cálculos hidráulicos da lateral do pivô

Cálculo de vazão na lateral do pivô

Solução 1: Cálculo trecho-a-trecho

Solução 2: Método algébrico

Vazão em um trecho qualquer na distância x a partir do início da linha lateral:



É uma tubulação com múltiplas saídas e com vazão crescente nas saídas.

$$Q_x = Q_u + Q_b \left(1 - \frac{x^2}{R_L^2} \right)$$

Q_x : Vazão da lateral a uma distância x a partir do ponto pivô (m^3/h)

Q_u : Vazão do último aspersor (m^3/h)

Q_b : Vazão da área básica (m^3/h)

x : Distância de interesse a partir do ponto pivô (m)

R_L : Comprimento total da lateral do pivô (m)

Cálculos hidráulicos da lateral do pivô

Cálculo de perda de carga na lateral

Solução 1: Cálculo trecho-a-trecho

Solução 2: Método algébrico

Perda distribuída de carga em uma canalização:

$$h_f = 0,08263 f \frac{Q^2}{D^5} L$$

Perda de carga em uma distância infinitesimal na lateral do pivô, lembrando que Q varia em função de x :

$$dh_f = 0,08263 f \frac{Q(x)^2}{D^5} dx$$

$$Q_x = Q_u + Q_b \left(1 - \frac{x^2}{R_L^2} \right)$$

$$dh_f = 0,08263 \frac{f}{D^5} \left[Q_u + Q_b \left(1 - \frac{x^2}{R_L^2} \right) \right]^2 dx$$

Solucionando a perda distribuída de carga para uma lateral com diâmetro único:

$$\int_0^{h_f} dh_f = 0,08263 \frac{f}{D^5} \int_0^{R_L} \left[Q_u + Q_b \left(1 - \frac{x^2}{R_L^2} \right) \right]^2 dx$$

$$h_f = 0,08263 \frac{f}{D^5} R_L \left(Q_u^2 + \frac{4}{3} Q_u Q_b + \frac{8}{15} Q_b^2 \right)$$

h_f : Perda distribuída de carga na lateral (m)

f : Fator de atrito da Equação Universal (-)

D : Diâmetro interno da canalização (m)

R_L : Comprimento da lateral do pivô (m)

Q_u : Vazão do último aspersor (m³/s)

Q_b : Vazão da área básica (m³/s)

Cálculos hidráulicos da lateral do pivô

Cálculo de perda de carga na lateral

Solução 1: Cálculo trecho-a-trecho

Solução 2: Método algébrico

Solucionando a perda distribuída de carga para uma lateral com múltiplos diâmetros associados em série:

$$\int_0^{h_f} dh_f = 0,08263 f \left\{ \int_0^{L_1} \frac{\left[Q_u + Q_b \left(1 - \frac{x^2}{R_L^2} \right) \right]^2}{D_A^5} dx + \int_{L_1}^{L_2} \frac{\left[Q_u + Q_b \left(1 - \frac{x^2}{R_L^2} \right) \right]^2}{D_B^5} dx + \int_{L_2}^{L_3} \frac{\left[Q_u + Q_b \left(1 - \frac{x^2}{R_L^2} \right) \right]^2}{D_C^5} dx + \dots \right\}$$

Generalizando a solução para N trechos associados em série:

$$h_f = 0,08263 f \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{1}{D_i^5} \left[Q_u^2 (L_{2,i} - L_{1,i}) + 2 Q_u Q_b (L_{2,i} - L_{1,i}) - \frac{2 Q_u Q_b (L_{2,i}^3 - L_{1,i}^3)}{3 R_L^2} + Q_b^2 (L_{2,i} - L_{1,i}) - \frac{2 Q_b^2 (L_{2,i}^3 - L_{1,i}^3)}{3 R_L^2} + \frac{Q_b^2 (L_{2,i}^5 - L_{1,i}^5)}{5 R_L^4} \right] \right\}$$

D_i : Diâmetro interno da canalização no trecho i (m)

$L_{1,i}$: Distância entre o ponto pivô o início do trecho i (m)

$L_{2,i}$: Distância entre o ponto pivô o final do trecho i (m)

Fatores de seleção do pneu para dado motoredutor:

↑ Diâmetro do pneu = ↑ Velocidade, ↑ Custo

↑ Largura de banda = ↓ Compactação do solo

Tamanho do pneu	Diâmetro (m)
12,4x24"	1,165
12,4x28"	1,263
14,9x24"	1,252
14,9x28"	1,374

Fatores de seleção dos motoredutores:

↑ Potência = ↑ Velocidade de revolução do pivô e possibilita aplicar lâminas menores

Motoredutor	Rotação do motoredutor (RPM)	Relação de transmissão
3/4 CV	43	41,5
1 CV	59	52,5
1,5 CV	86	52,6

Perímetro do pneu:

$$p = \pi D_{pneu}$$

Velocidade máxima de deslocamento da torre móvel:

$$V = p \frac{RPM_{motoredutor}}{\text{Relação de transmissão}}$$



Exemplo: Valores para pneu 14,9x24"

Motoredutor	Tamanho do pneu	Perímetro do pneu (m)	Velocidade (m/h)
1,5 CV	14,9x24"	3,933	385,8
1 CV	14,9x24"	3,933	265,2
¾ CV	14,9x24"	3,933	244,5



Exemplo de detalhamento dos motoredutores para um pivô com 11 torres (100 ha)

Torre #	Percurso (m)	Motoredutor (CV)	Velocidade máxima da torre (m/h)	Tempo mínimo de percurso (h)
1	257.61	3/4 CV	244.53	1.05
2	515.22	3/4 CV	244.53	2.11
3	772.83	3/4 CV	244.53	3.16
4	1030.44	3/4 CV	244.53	4.21
5	1332.04	3/4 CV	244.53	5.45
6	1633.63	3/4 CV	244.53	6.68
7	1979.20	3/4 CV	244.53	8.09
8	2324.78	1.5 CV	385.85	6.03
9	2670.35	1.5 CV	385.85	6.92
10	3015.93	1.5 CV	385.85	7.82
11	3361.50	1.5 CV	385.85	8.71



Percentímetro: Tempo de revolução e lâmina bruta

Percentímetro (P) em 100% $\Rightarrow V_{UT}$ é máxima $\Rightarrow h_b$ mínima

$$P_{100\%}: V_{UT} = 1,0 V_{max}$$

$$P_{90\%}: V_{UT} = 0,9 V_{max}$$

$$P_{80\%}: V_{UT} = 0,8 V_{max}$$

...

$$V_{UT} = \frac{2 \pi R_{UT}}{t_r}$$

Tempo de revolução

$$t_r = \frac{2 \pi R_{UT}}{V_{UT}}$$

Lâmina bruta é função do ajuste do percentímetro e consequente tempo de revolução:

$$h_b = \frac{Q_0 t_r}{A 10}$$

Dica:

$$h_b 100\% 100 = h_b P\% P\%$$

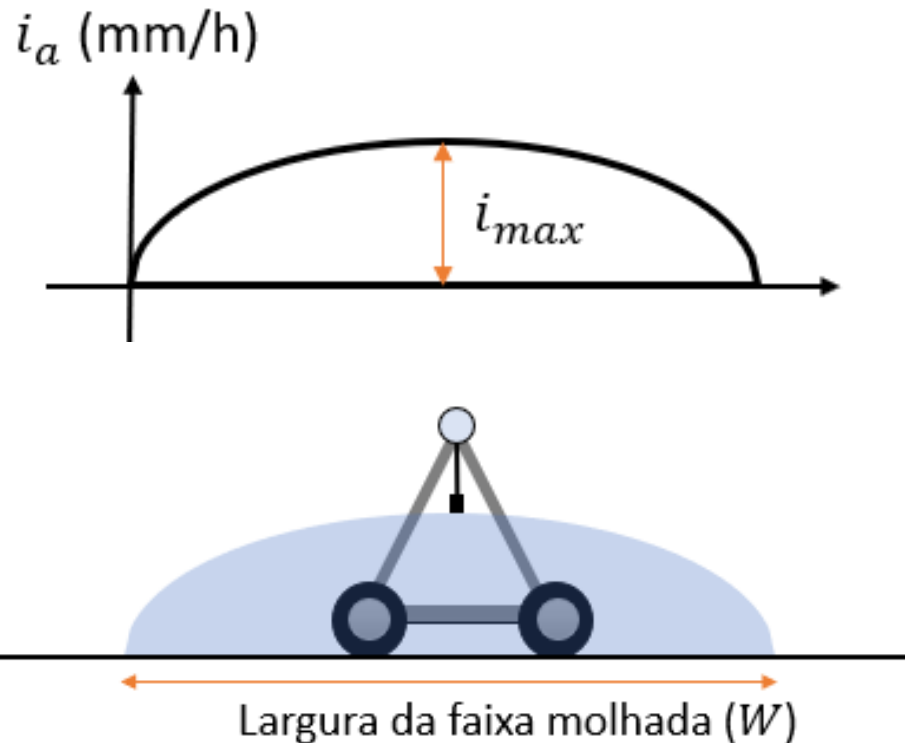


Estimativa do risco de escoamento superficial em pivô central

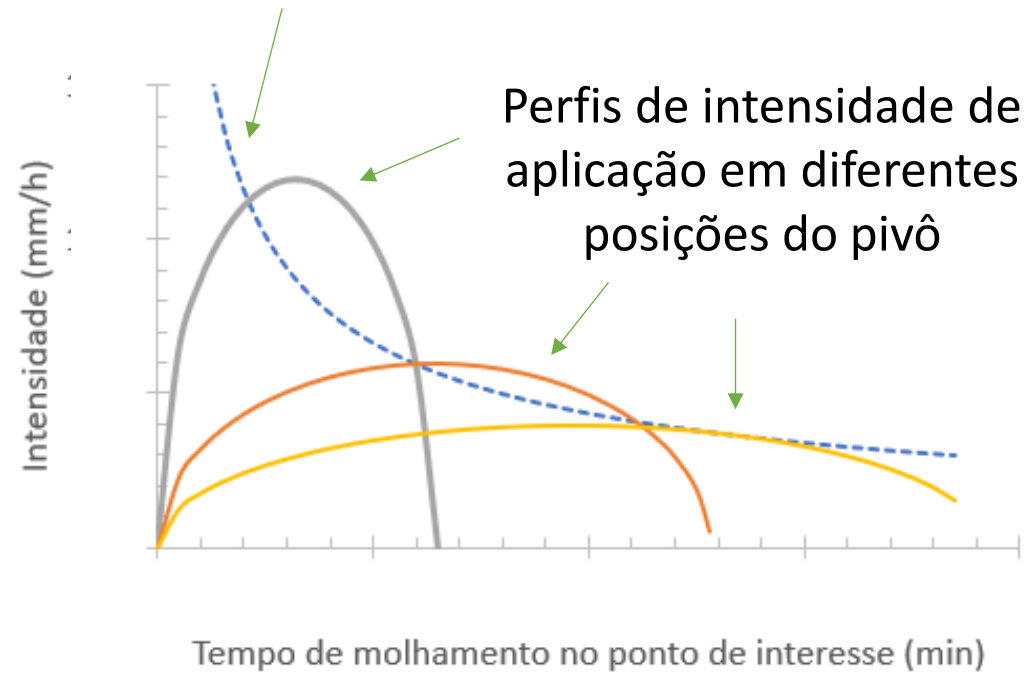


Risco de escoamento superficial

Perfil de intensidade de aplicação pode ser aproximado pela função da semi-elipse:



Curva corrigida de taxa de infiltração de água no solo



Zonas de risco de escoamento superficial em distâncias a partir do ponto pivô





Estimativa do perfil de intensidade de aplicação em pivô central

1) Tempo de molhamento na distância R_j a partir do ponto pivô

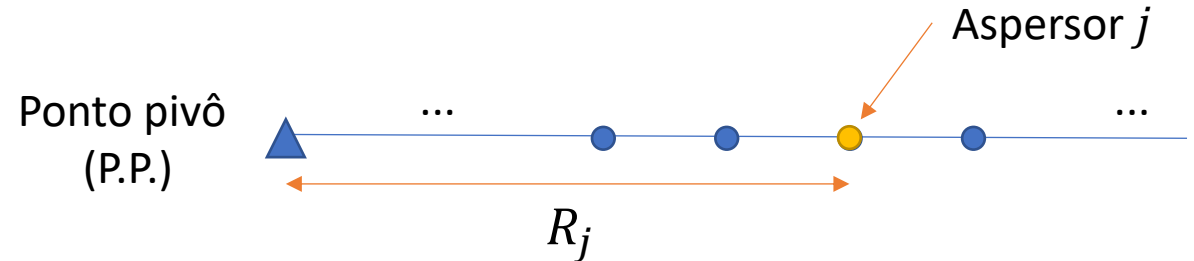
$$T_{M_j} = \frac{t_r W_j}{2 \pi R_j}$$

2) Intensidade média de aplicação na distância R_j :

$$i_{a_{med_j}} = \frac{h_b}{T_{M_j}}$$

3) Intensidade máxima de aplicação na distância R_j :

$$i_{a_{max_j}} = \frac{4}{\pi} i_{med_j}$$



4) Tempo de molhamento correspondente a i_{max_j} :

$$T_{M_{i_{max_j}}} = \frac{T_{M_j}}{2}$$

5) Intensidade de aplicação na distância R_j para um tempo qualquer:

$$i_a(t)_j = i_{a_{max_j}} \sqrt{1 - \left(\frac{2t - T_{M_j}}{T_{M_j}} \right)^2}$$

Curva de infiltração corrigida

Equação de Kostiakov:

$$i(t) = k t^n$$

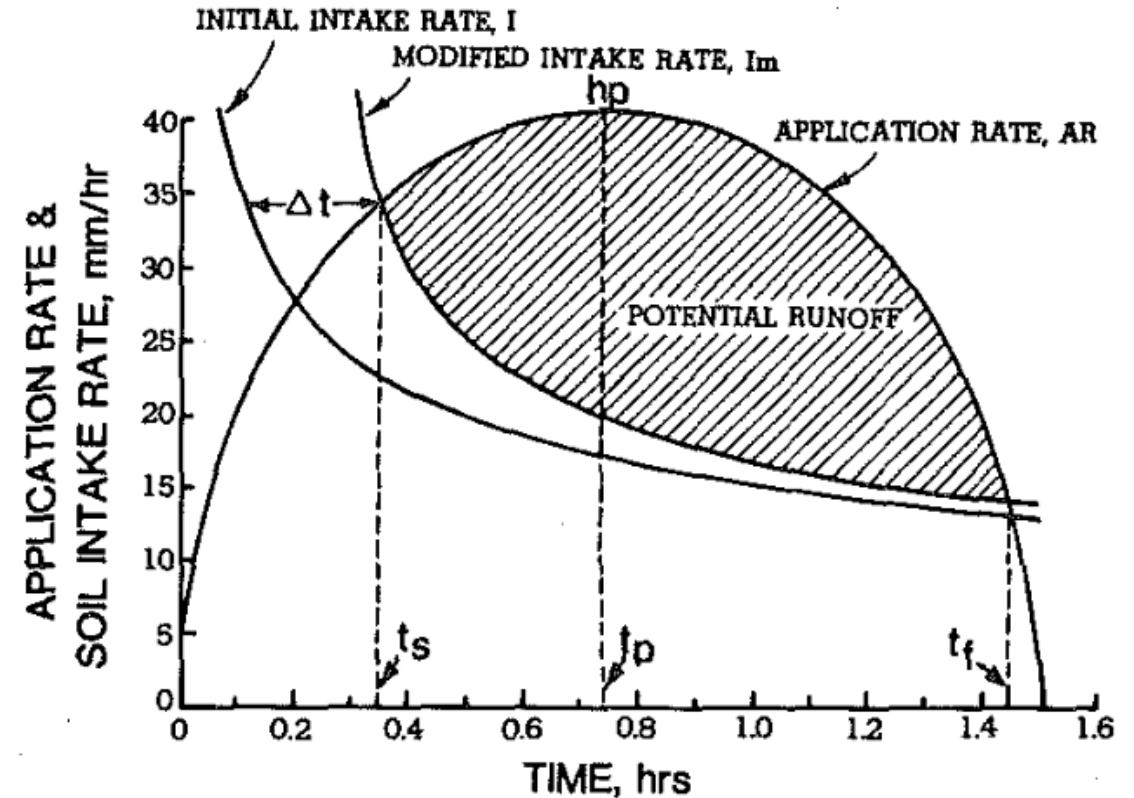
1) No intervalo de 0 a t_s :

$$i_m(t) = i(t) \frac{\int_0^{t_s} i(t) dt}{\int_0^{t_s} i_a(t) dt}$$

2) No intervalo de t_s a t_f :

$$i_m(t) = k(t - \Delta t)^n$$

$$\Delta t = t_s - \left(\frac{i_a(t)}{k} \right)^{\frac{1}{n}}$$



JOURNAL OF IRRIGATION AND DRAINAGE ENGINEERING 110:1
(March/April 1984), pp. 22-34

SUITABILITY OF REDUCED PRESSURE CENTER-PIVOTS

By James R. Gilley¹



Estimativa do perfil de intensidade de aplicação em pivô central

Solo de textura argilosa

Curva de taxa de infiltração obtida pelo método do infiltrômetro de anel:

$$i = 1,824 t^{-0,62} \quad (i: \text{mm/min} ; t: \text{min})$$

$$VIB = 10 \text{ mm/h}$$

Dados do pivô central:

Área irrigada: 200 ha

Comprimento da lateral: 799 m

Lâmina bruta: 7 mm

Tempo de revolução: 21 h (Percentímetro=60%)

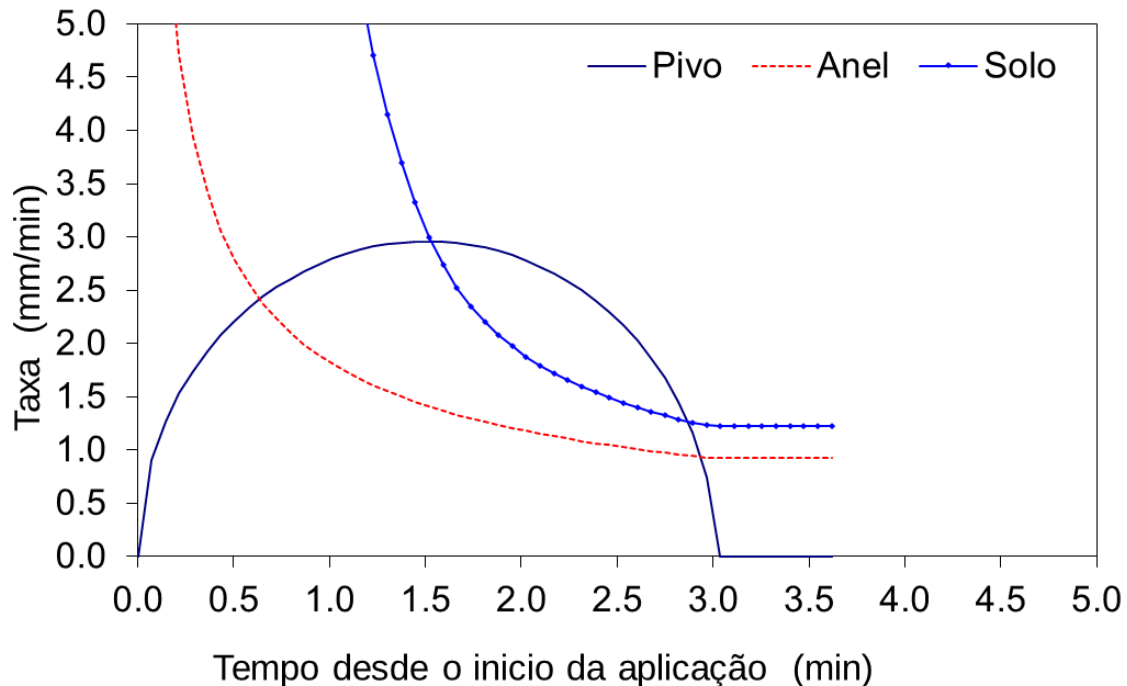
Diâmetro molhado do aspersor no final da lateral: 12 m



Infiltrômetro de anel



Simulação no final do pivô: $R = 799 \text{ m}$ (200 ha)



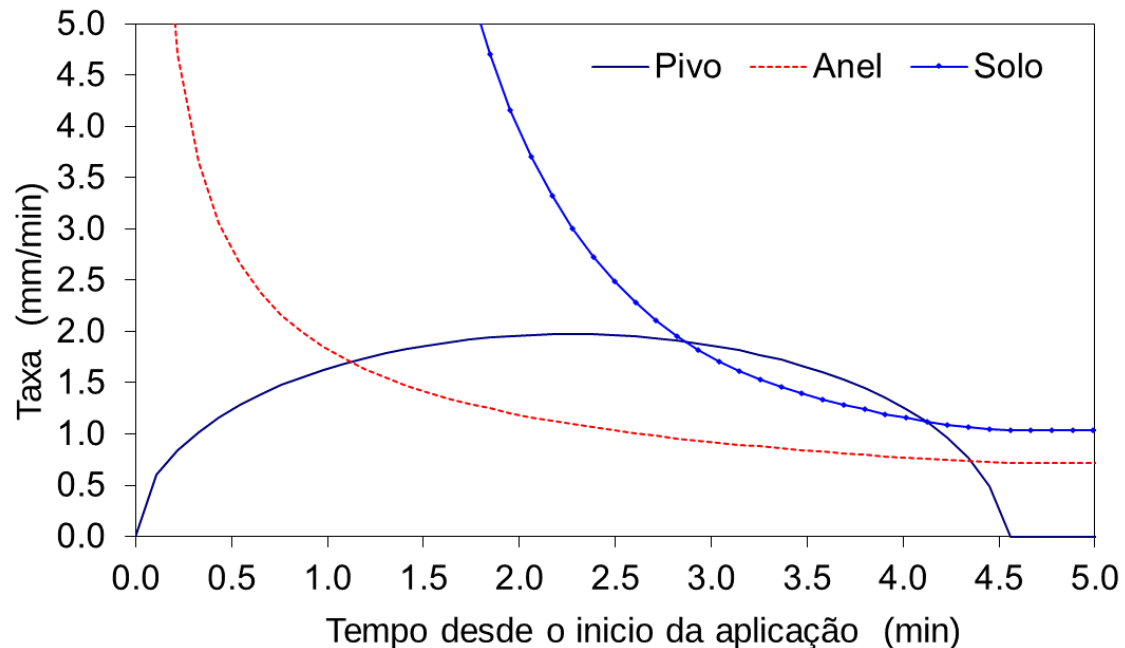
Condição 1: Sem boomback

Largura da faixa molhada: **12 m**

$$I_{runoff} = 0,88 \text{ mm}$$

$$I_{aplicada} = 7 \text{ mm}$$

$$\text{Perdas potenciais} = \frac{0,88}{7} 100 = 12,6\%$$



Condição 2: Par de boombacks com **3 m**

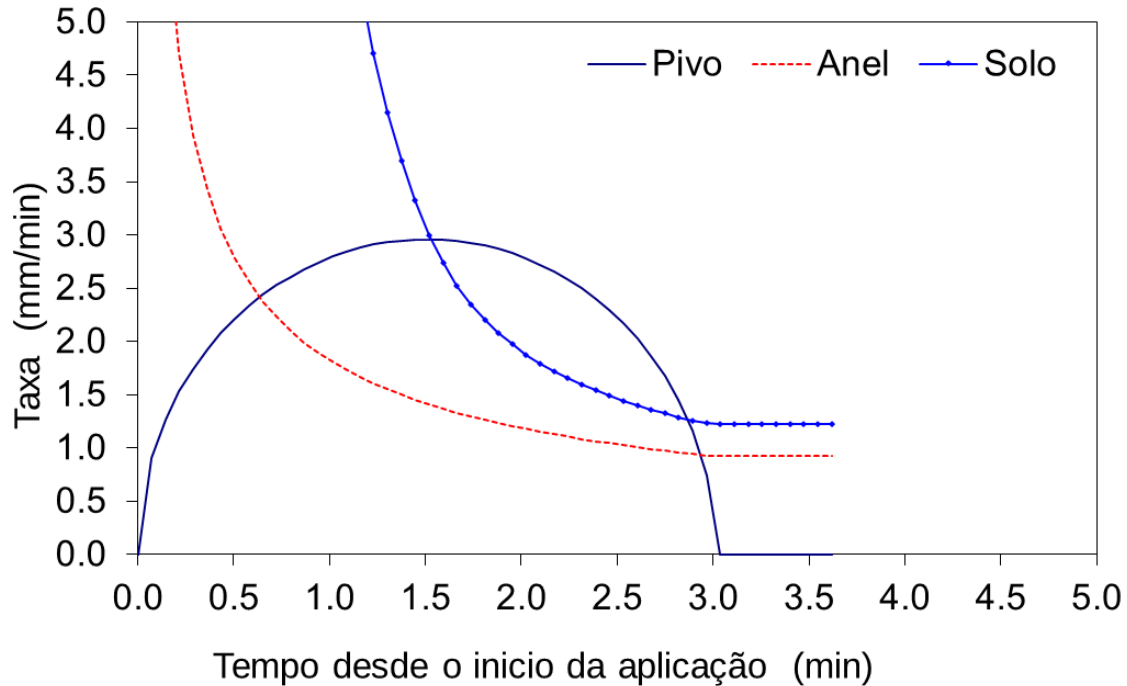
Largura da faixa molhada: **18 m**

$$I_{runoff} = 0,23 \text{ mm}$$

$$I_{aplicada} = 7 \text{ mm}$$

$$\text{Perdas potenciais} = \frac{0,233}{7} 100 = 3,3\%$$

Simulação no final do pivô: $R = 799 \text{ m}$ (200 ha)



Declividade do terreno (%)	Capacidade de armazenamento superficial (mm)
0 a 1	12,7
1 a 3	7,6
3 a 5	2,5
> 5	0

Dillon et al. (1972)

Condição 1: Sem boomback


Largura da faixa molhada: **12 m**

$$I_{runoff} = 0,88 \text{ mm}$$

$$I_{aplicada} = 7 \text{ mm}$$

$$\text{Perdas potenciais} = \frac{0,88}{7} 100 = 12,6\%$$

As perdas potenciais representam a lâmina que acumula sobre a superfície do terreno, podendo infiltrar, escoar ou evaporar.



Exemplo de
dimensionamento
de um pivô
central





LII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA



UNICAMP

Obrigado!

Prof. Dr. Antonio Pires de Camargo
Professor Associado
Laboratório de Hidráulica e Irrigação – LHI
apcpires@unicamp.br

Dr. Bernardo Gomes Norenberg
Engenheiro de Aplicação
Lindsay Brasil
bernardo.norenberg@lindsay.com

