

# Sistemas de orientação para faixas paralelas e direção automática

José P. Molin  
ESALQ/USP  
jpmolin@usp.br



[www.agriculturadeprecisao.org.br](http://www.agriculturadeprecisao.org.br)

# Objetivo

Abordar as técnicas relacionadas às aplicações de GNSS na orientação de máquinas agrícolas, como auxílio visual (barra de luz e similares) e em sistemas autônomos (piloto automático)

# Sistemas de orientação

- Estacas
- Bandeirinhas
- Espuma
- Cabo-de-aço
- Pingente (corrente)
- Discos marcadores
- Sistemas auxiliados por GNSS



Marcadores de espuma – na pulverização

# A solução dos marcadores de espuma

1999



... ou marcador de linha



# Cabo-de-aço para marcar as passadas do pulverizador...







... ou balizamento



O surgimento da “barra de luzes”:  
aplicações aéreas - substituição dos “bandeirinhas”



# Barras de luzes em avião agrícola



Pinal County NW

-32 57'

-32 56'

06220622 1"=2231.3'

112

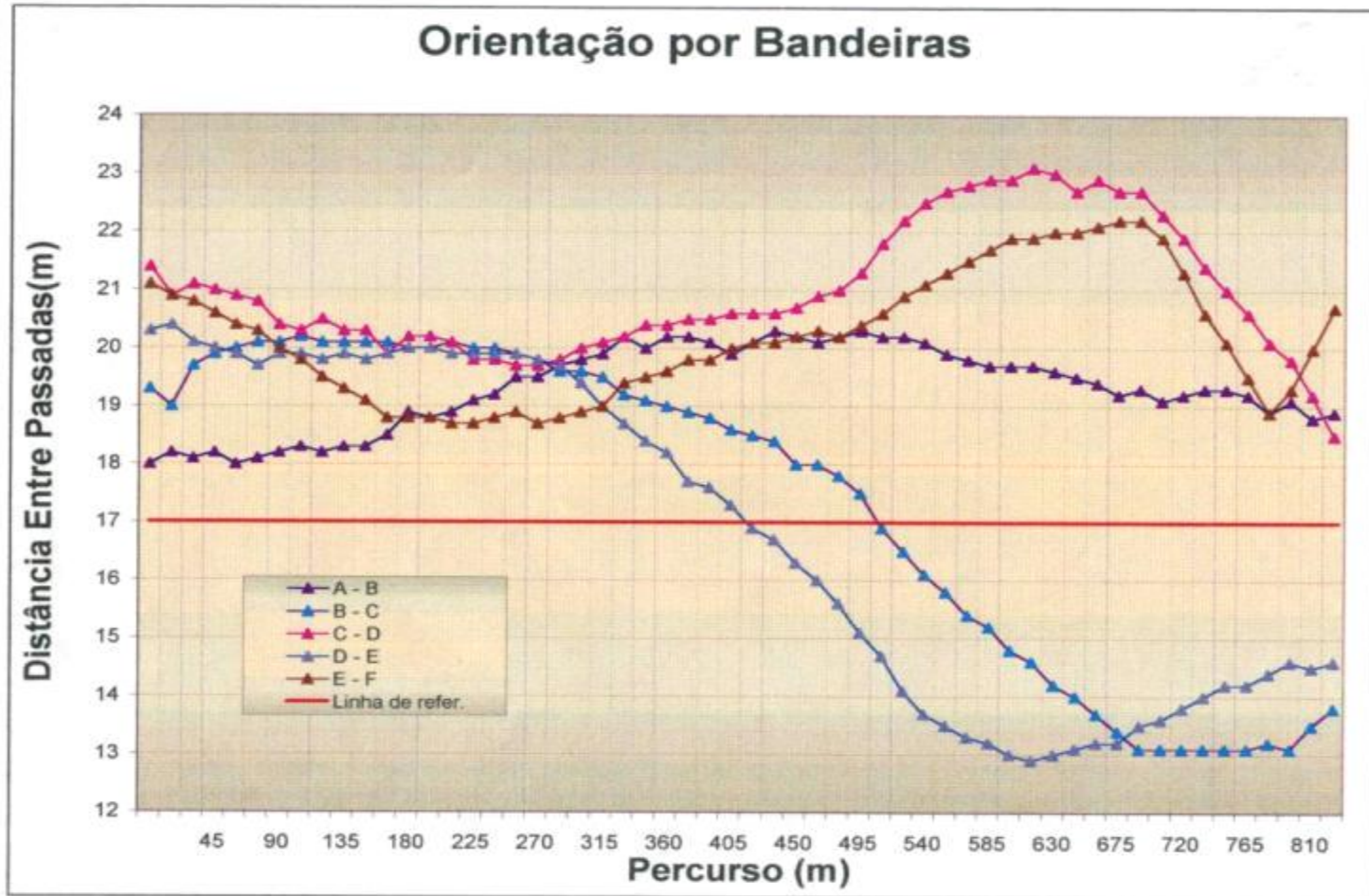
111 58'

111 58'

Registro dos dados de percursos

1995!!

# Resultados de precisão incontestáveis...



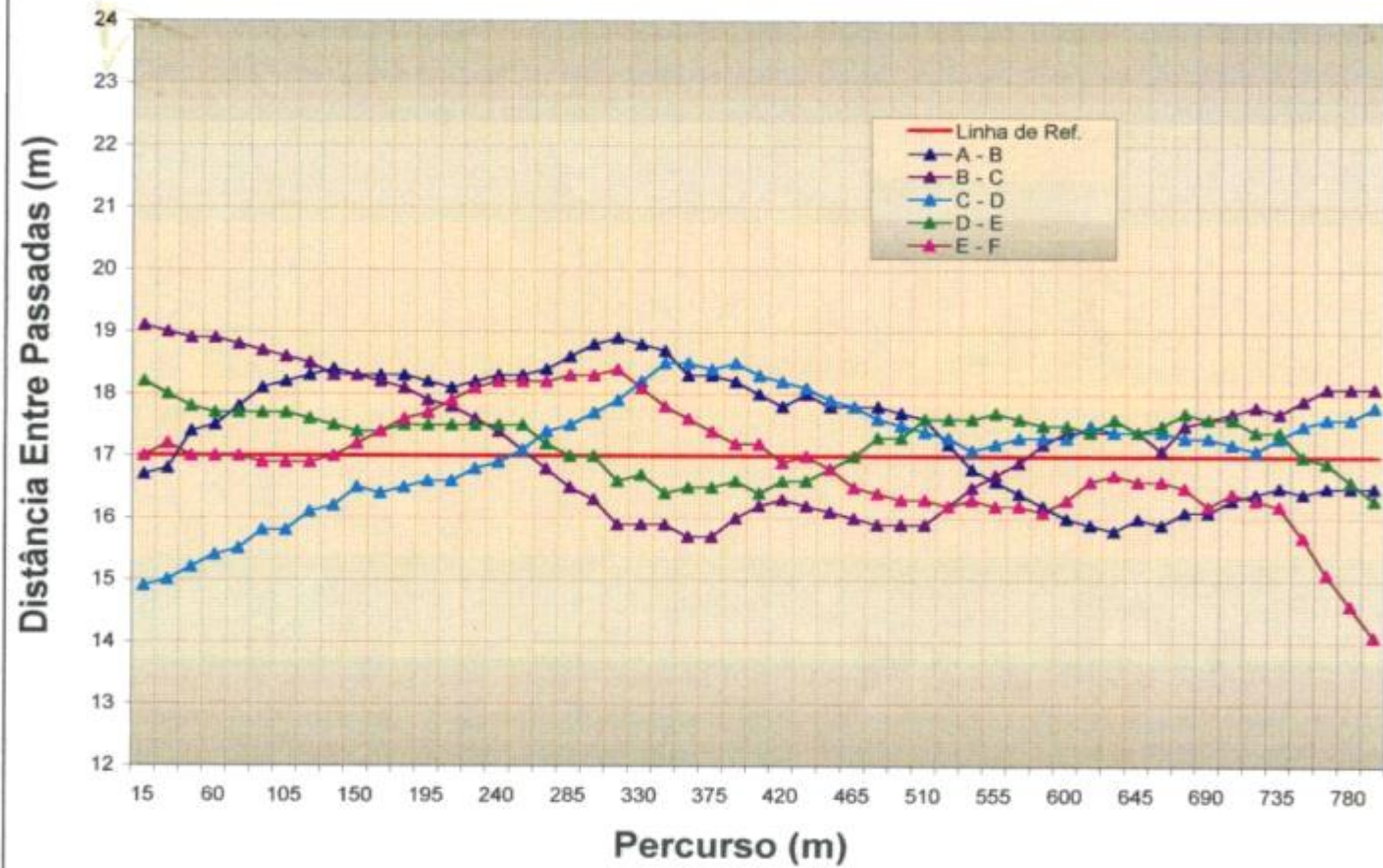
Molin, 1998

# Barras de luzes em avião agrícola



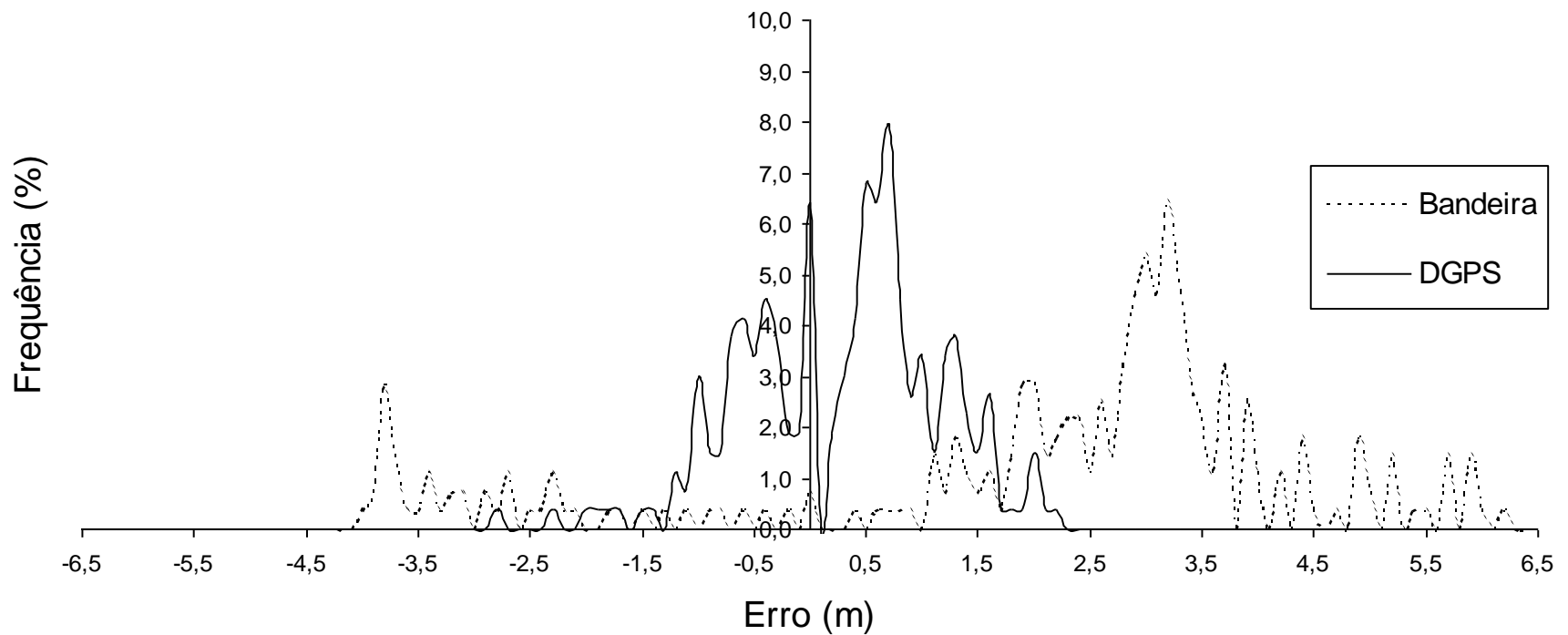
Piracicaba, 1997

## Orientação por GPS



Molin, 1998

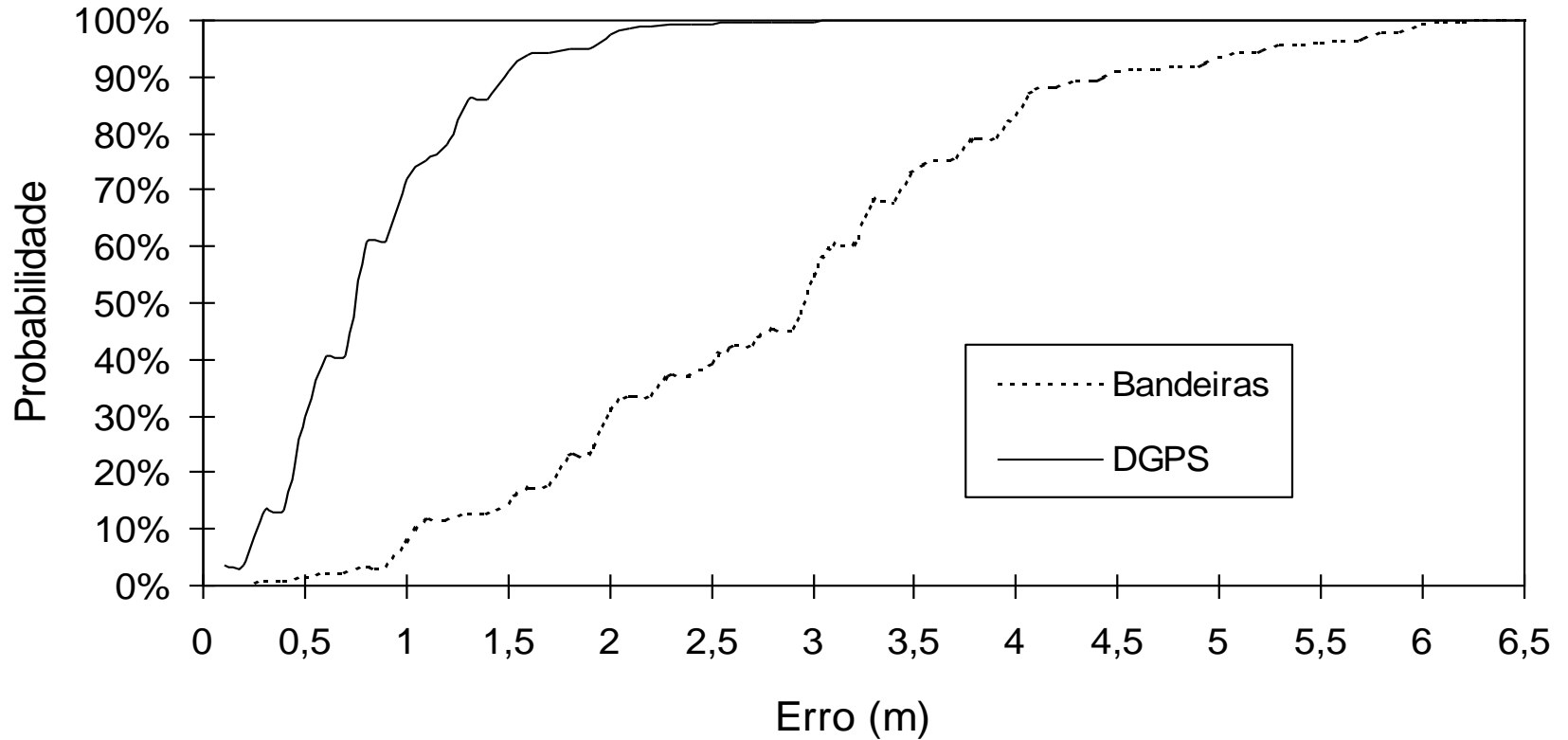
## Frequência de Erro



Molin, 1998



# Probabilidade de Erro



Molin, 1998

# Brasil tem 2083 aviões e 6 helicópteros agrícolas, 240 empresas aeroagrícolas e 548 operadores privados

21/02/17



Fonte: Eduardo Araújo

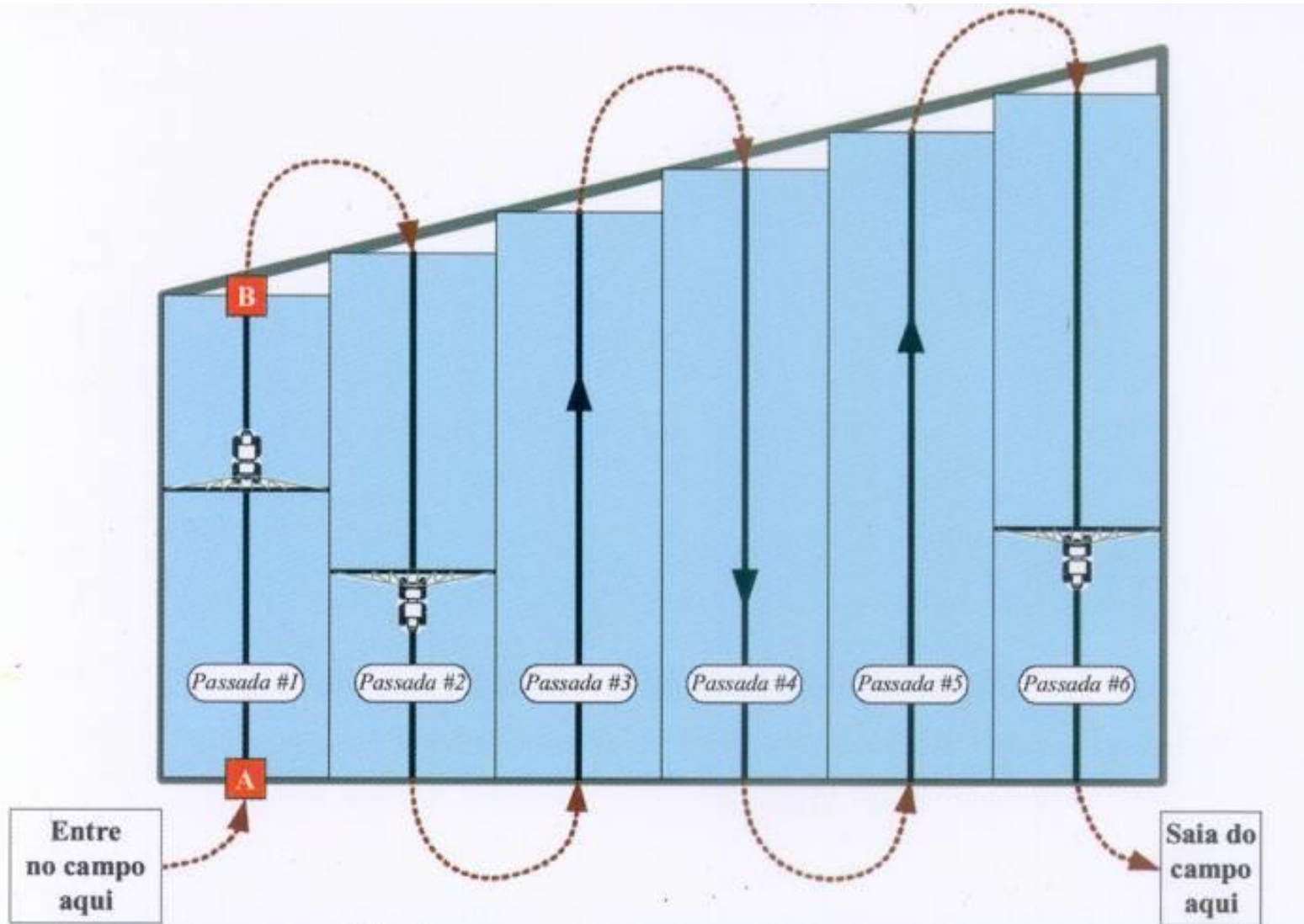


Fonte: Eduardo Araújo

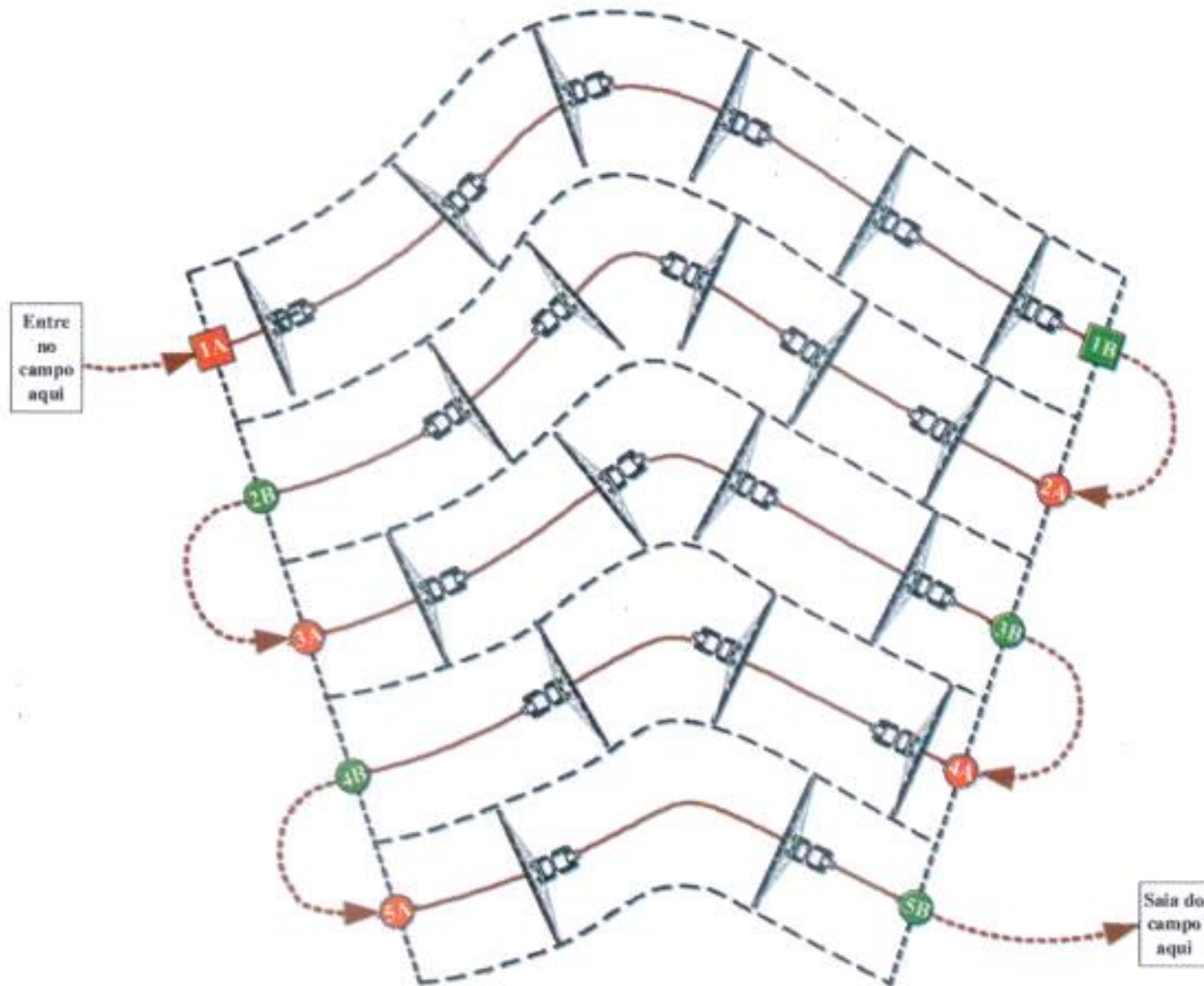
Barra de luzes para aplicações terrestres



# Solução perfeita para percursos retos

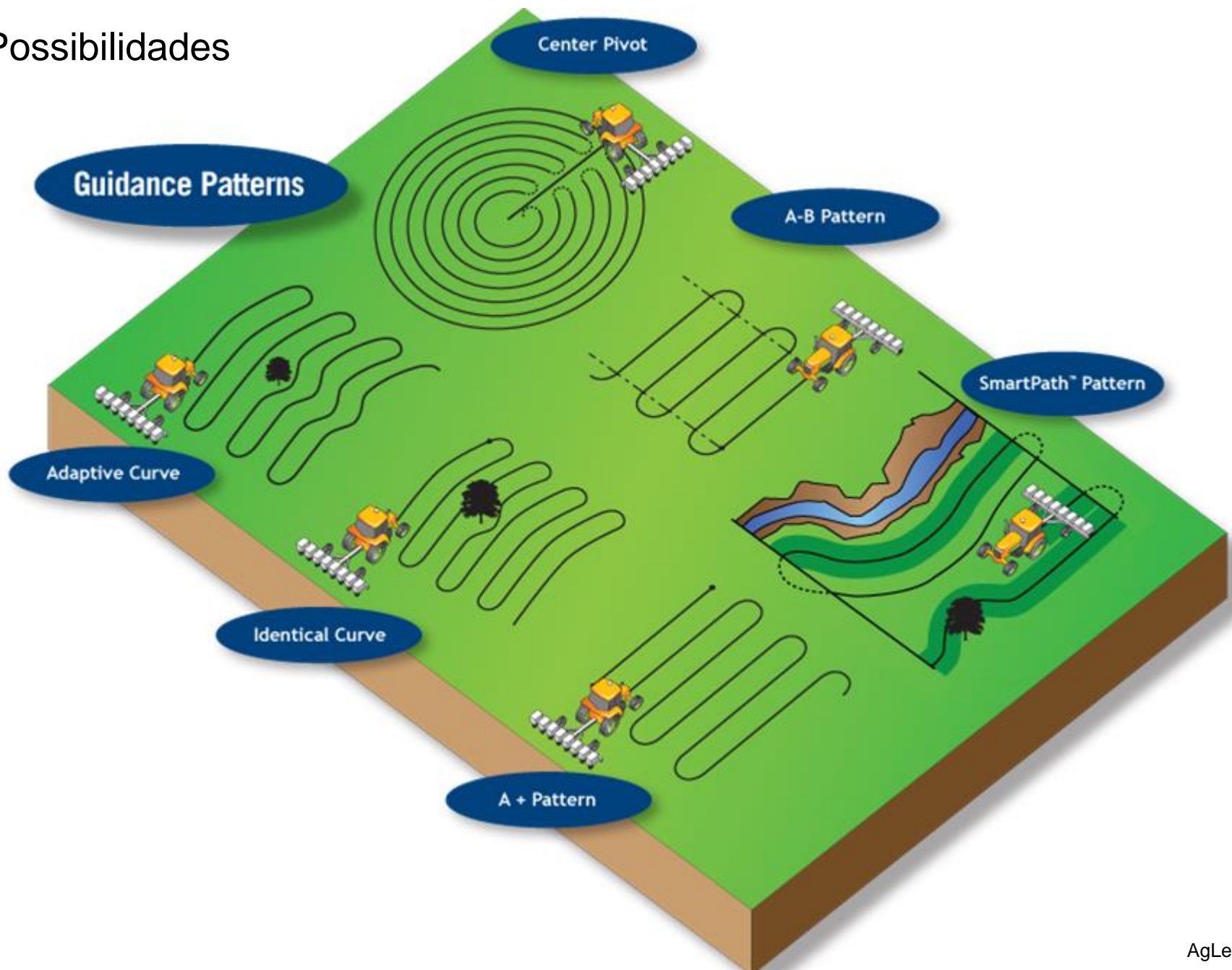


... nem tanto para curvas



*Diagrama trabalho em Contorno (curvas)*

# Possibilidades



# Barra de luzes tradicional



Barra de luzes (leds) com  
tela auxiliar (estrada virtual)



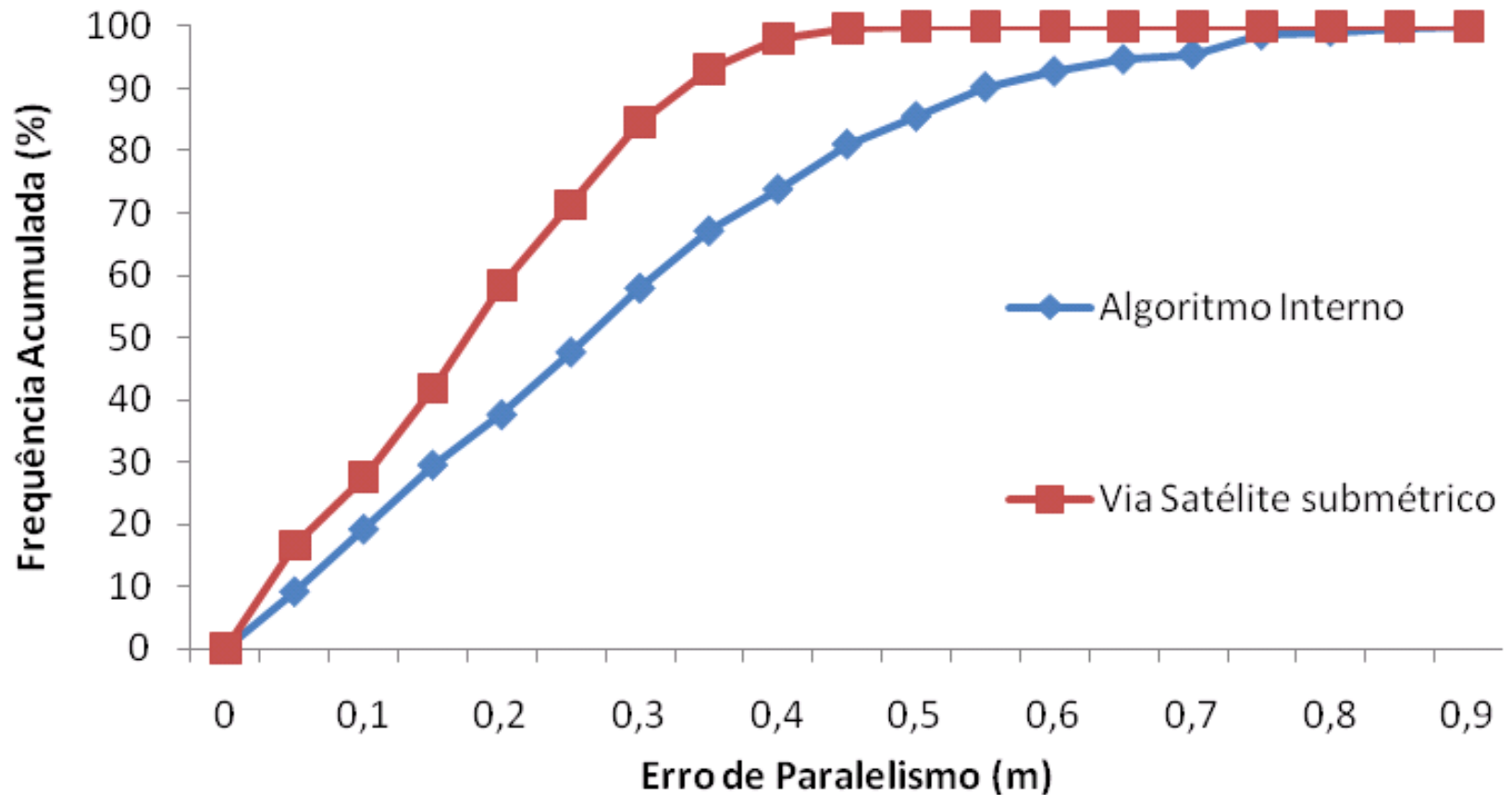




Barra de luzes (leds) com  
tela auxiliar (estrada virtual)

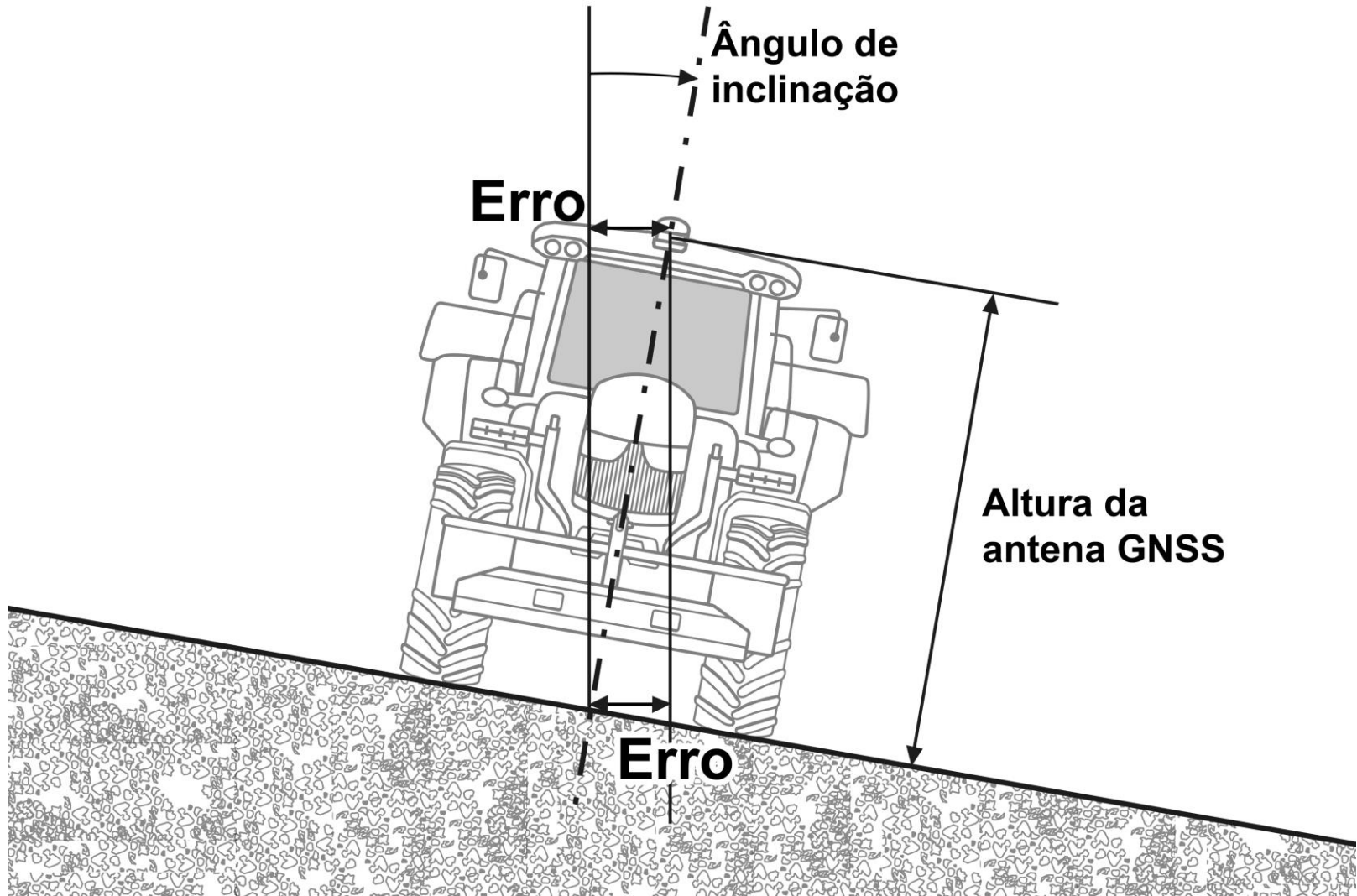


# Freqüência acumulada dos erros de paralelismo para barra de luzes



MOLIN et al., 2011

# Necessidade de correção para inclinação lateral



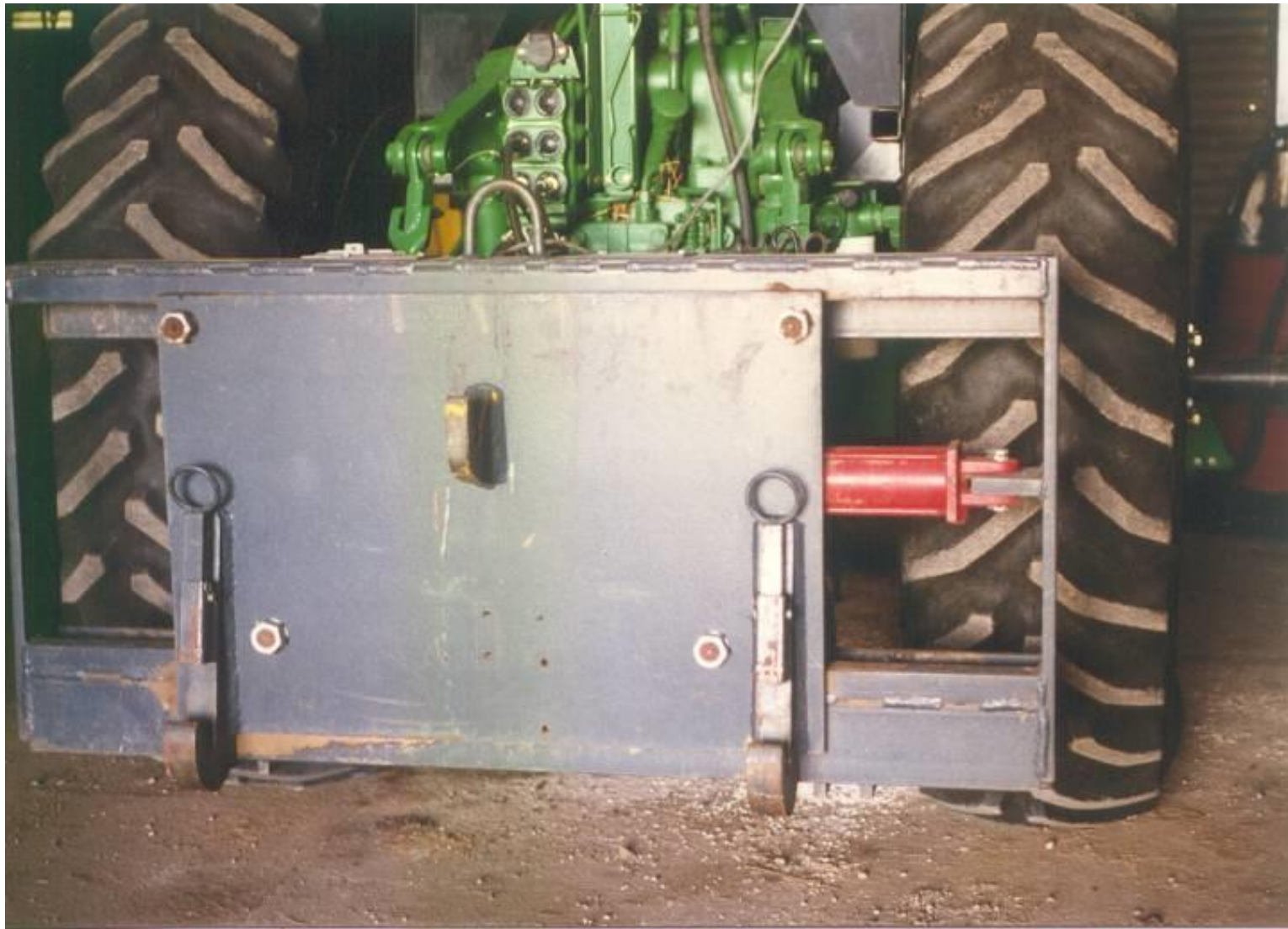
# A evolução dos sistemas automáticos de alinhamento e direção

# Controlador de posição de implemento montado (cultivador/capina) com sensor de posição e atuador hidráulico



Nebraska, 1993

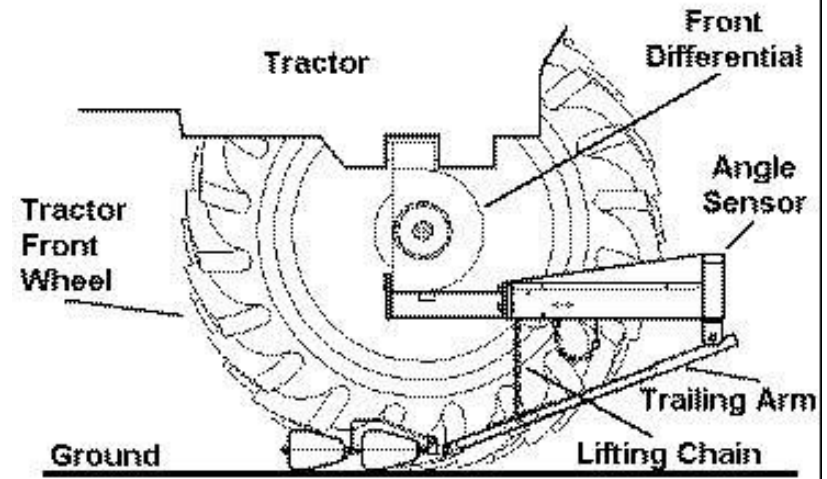
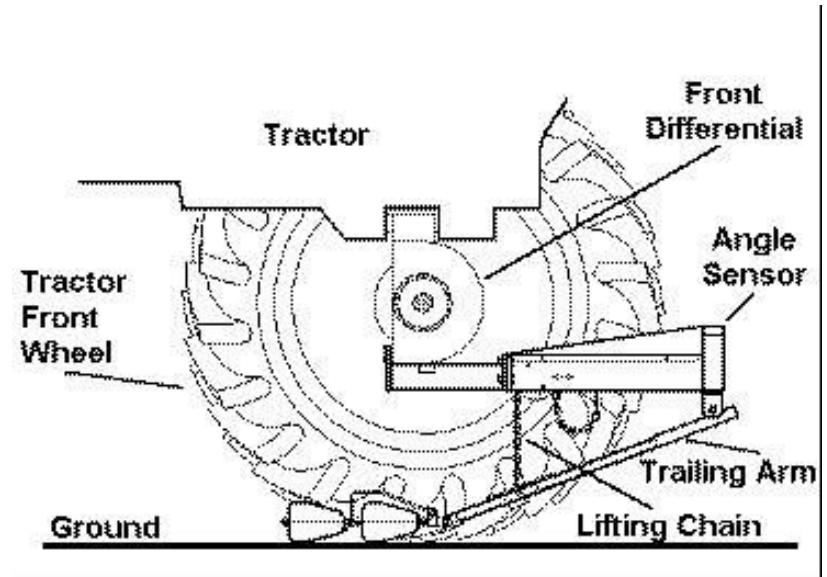
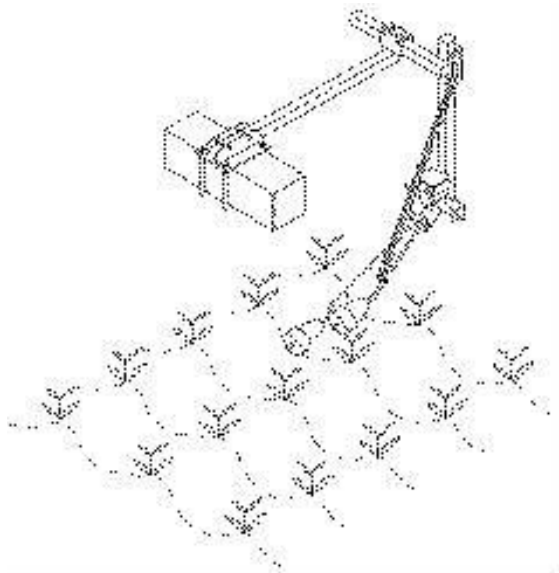
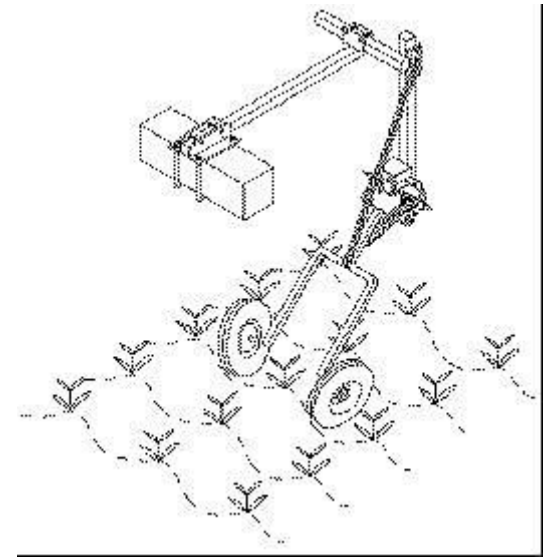
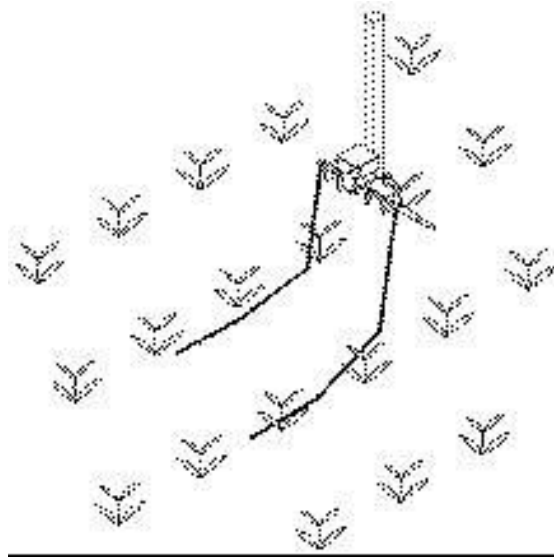
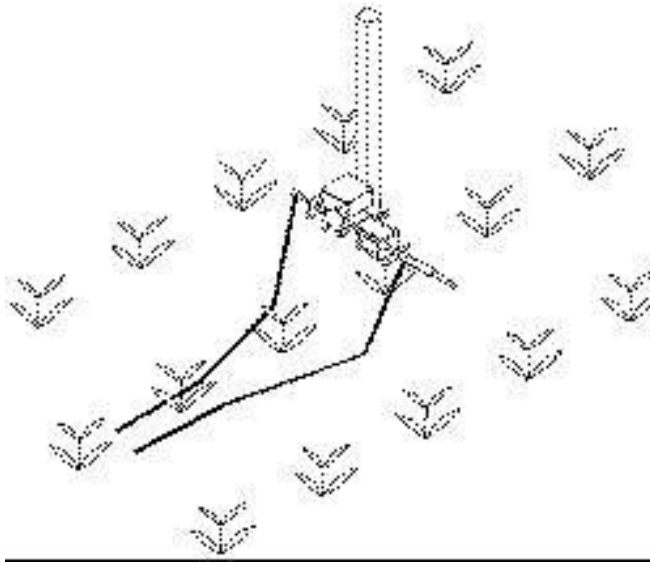
# Controlador de posição de implemento montado (cultivador/capina) com sensor de posição e atuador hidráulico



Nebraska, 1994



# Sensores





# Sistemas Class

AUTO PILOT  
LASER PILOT  
CAM PILOT

30 years of expertise  
in steering systems.



Class

# Auto Pilot



Class



# Laser Pilot



Class



# Cam Pilot



Class

# Comparativo

		Process	Precision
CLAAS AUTO PILOT		Deflection	Row-dependent
CLAAS LASER PILOT		Laser signal	10-20 cm
CLAAS CAM PILOT		Imaging signal	2-3 cm
S LITE CLAAS GPS PILOT	EGNOS	Satellite differential correction signal	15-30 cm*
CLAAS GPS PILOT	OMNISTAR HP	Satellite differential correction signal	5-10 cm*
CLAAS GPS PILOT	BASELINE HD	Proprietary differential correcti- on signal	4-6 cm*
CLAAS GPS PILOT	RTK	Proprietary differential correcti- on signal	2-3 cm*

\*GPS precision

Class

# Sistema utilizando ultrasom



The system components:  
 -mobil Siemens job computer  
 -electro-hydraulically controlled proportional valve  
 -Vehicle terminal controlled in radio box  
 -potentiometer steering unit for the left armrest  
 -sensor bar with four ultrasonic sensors for the front hitch



An optional feature is the small potentiometer steering wheel, mounted on the left hand armrest. With this feature the driver can do quick and easy headland turns. He just switches from automatic steering to potentiometer steering and he can turn with a comfortable small control wheel on his armrest.



The Sensor easily can be adjusted to follow rows, crop borders or swaths just by switching the two handles in the direction of the border to be sensed.



The Ultrasonic sensing bar mounted at the front hitch, recognizes differences greater than 10 cm on the field and transforms this into steering signals via a small integrated valve in the steering circuit.



The driver can rely on the tractor automatically following the rows. He can concentrate on the application, control and optimize the output to save products and money while improving crop quality. Late evening and night spray application with limited visibility is no longer a problem.



The system turns off and back to normal manual controlled steering as soon as:  
 -the steering wheel is turned  
 -23-km/h limit is exceeded  
 -the cab doors are opened  
 -failures of system components  
 -main switch is switched off  
 -main menu is being quit



Sistema utilizando  
imagem



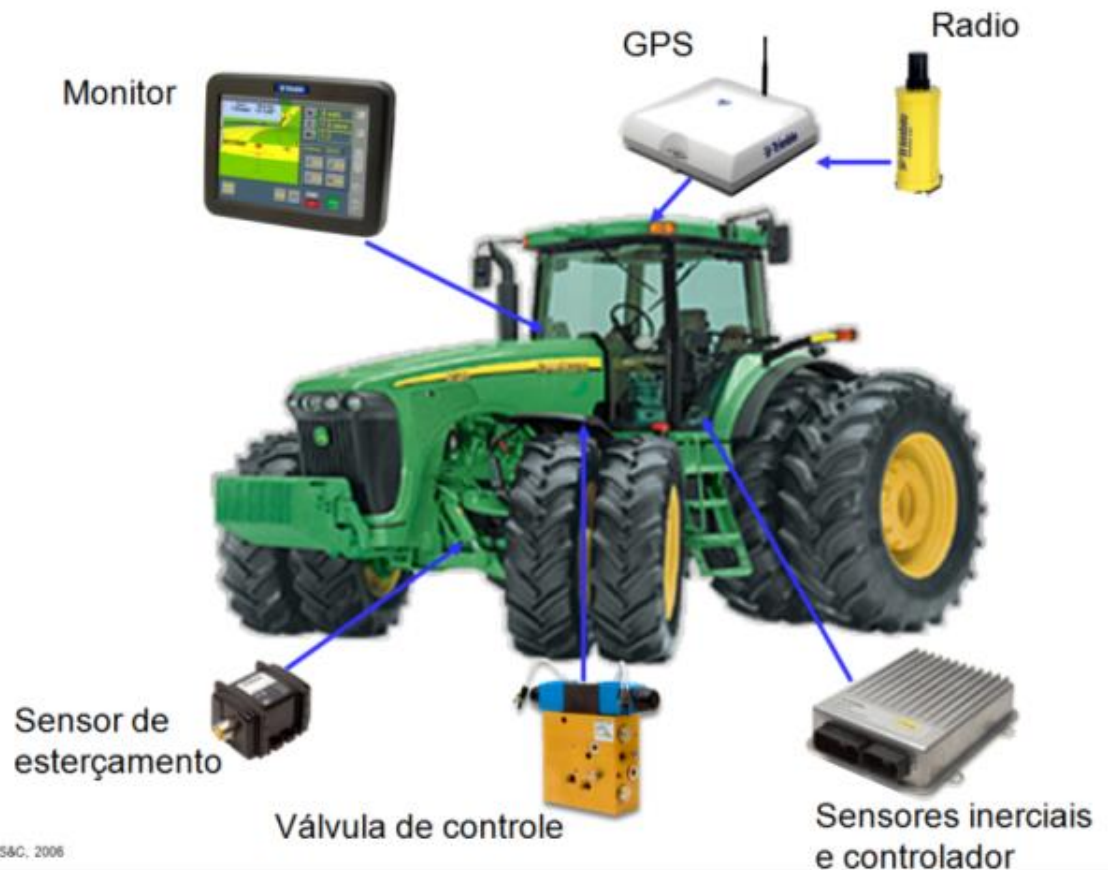




# RG-100

## Row Guidance

# O surgimento dos sistemas de direção automática com GNSS



Pista de ensaio de tratores da  
Universidade de Nebraska, 1995



Pista de ensaio de tratores da  
Universidade de Nebraska, 1995

GPS com correção via rádio

trator com um motor  
hidráulico no volante





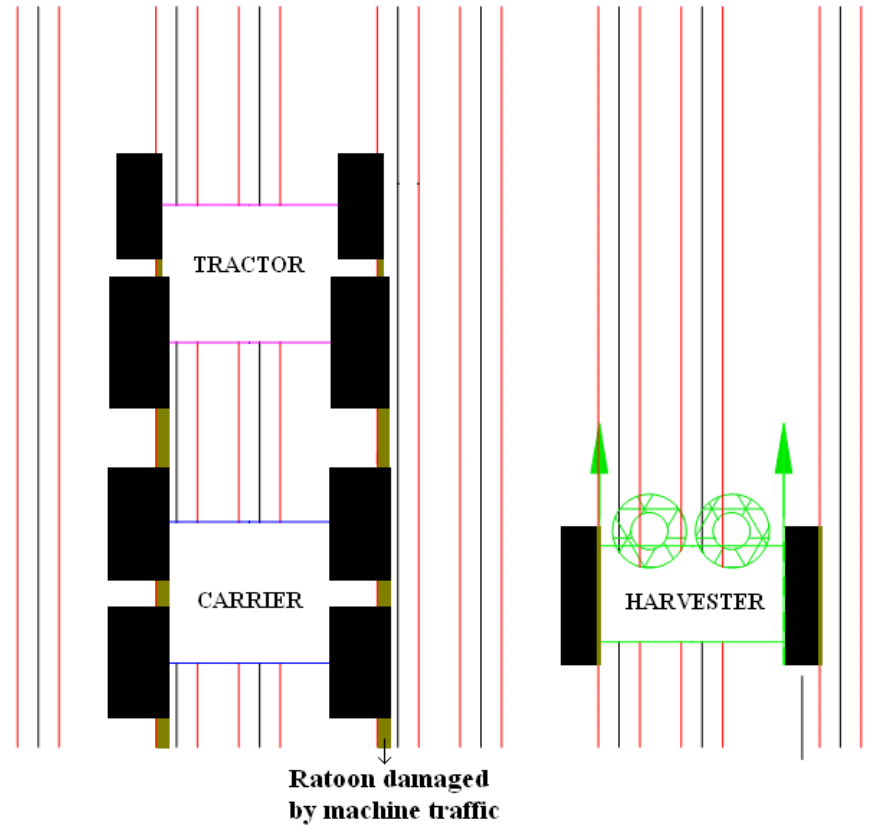
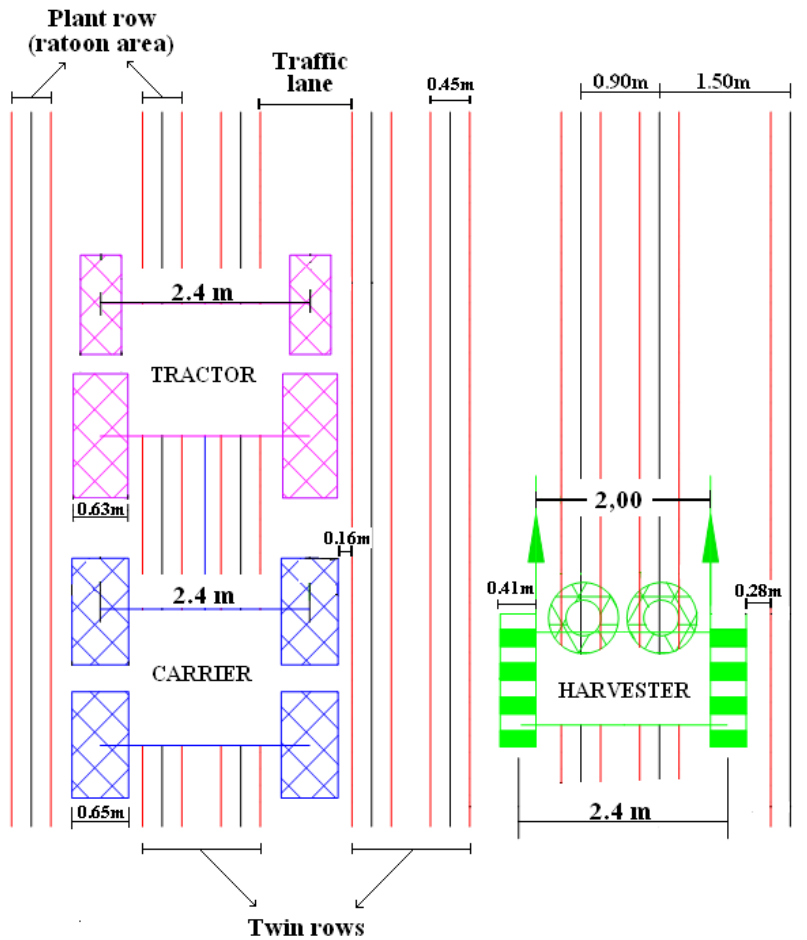
2002



2001

## Rápida adoção no Brasil

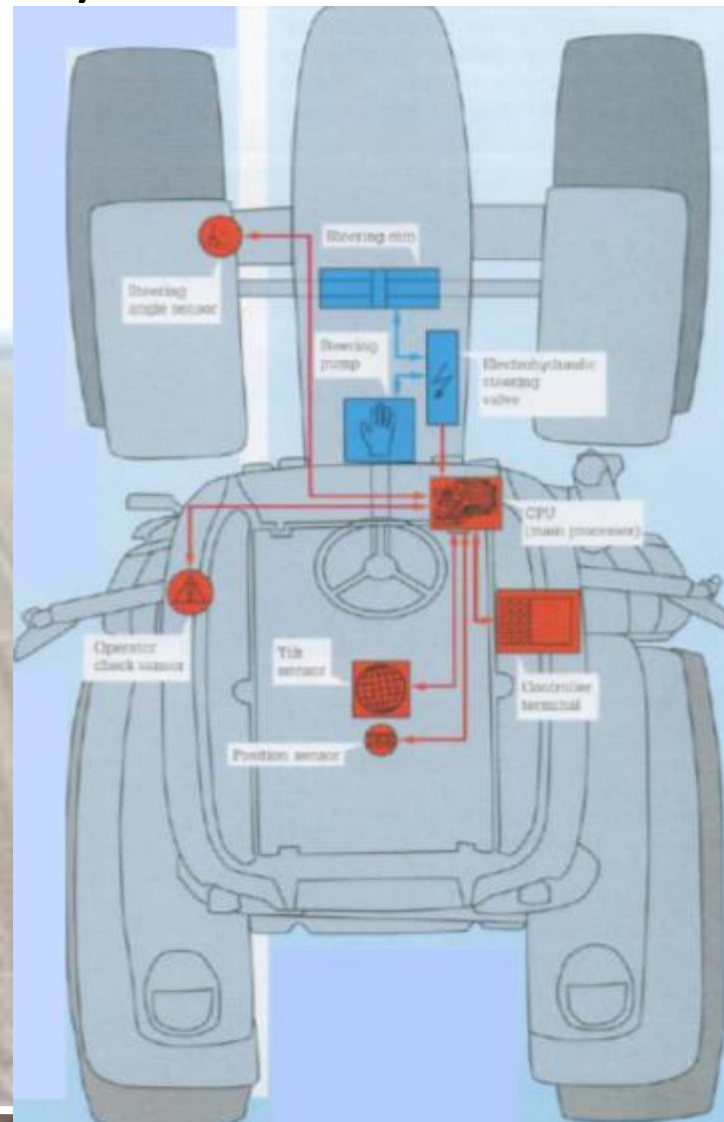




Spekken et al. (2014)

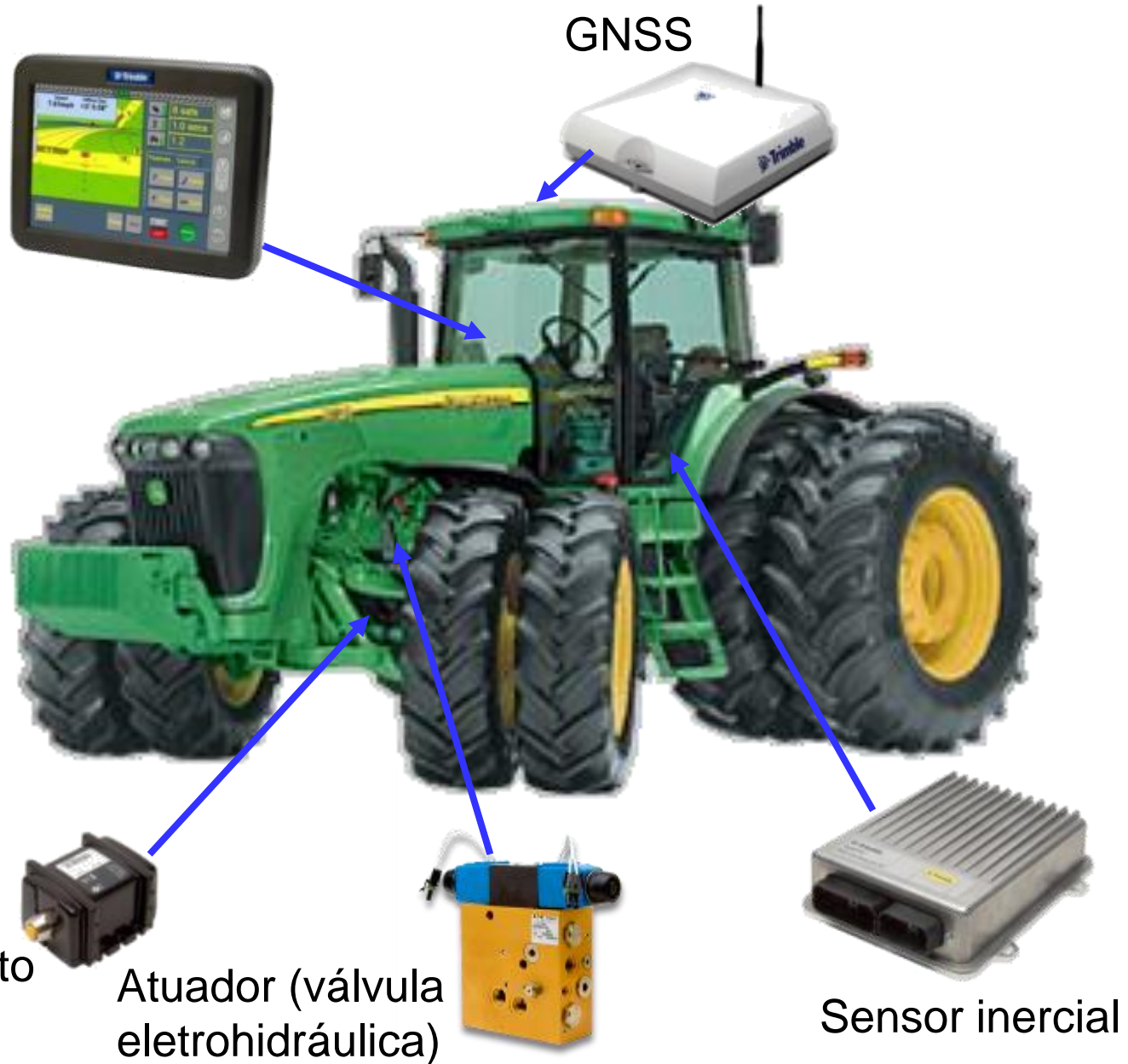
# Tipos de sistemas de direção automática:

## Atuadores Integrados (hidráulicos)





Monitor  
(computador)



GNSS

Sensor de  
esterçamento

Atuador (válvula  
eletrohidráulica)

Sensor inercial

Adaptado de S&C, 2006

# Tipos de sistemas de direção automática:

Atuadores de volante

...atrito no volante



# Sistema de atuador por atrito no volante



# Tipos de sistemas de direção automática:

## Atuadores de volante

...motor elétrico na coluna



# Motor elétrico na coluna da direção



# Sistemas de atuação no volante do trator

Motor elétrico diretamente na coluna de direção



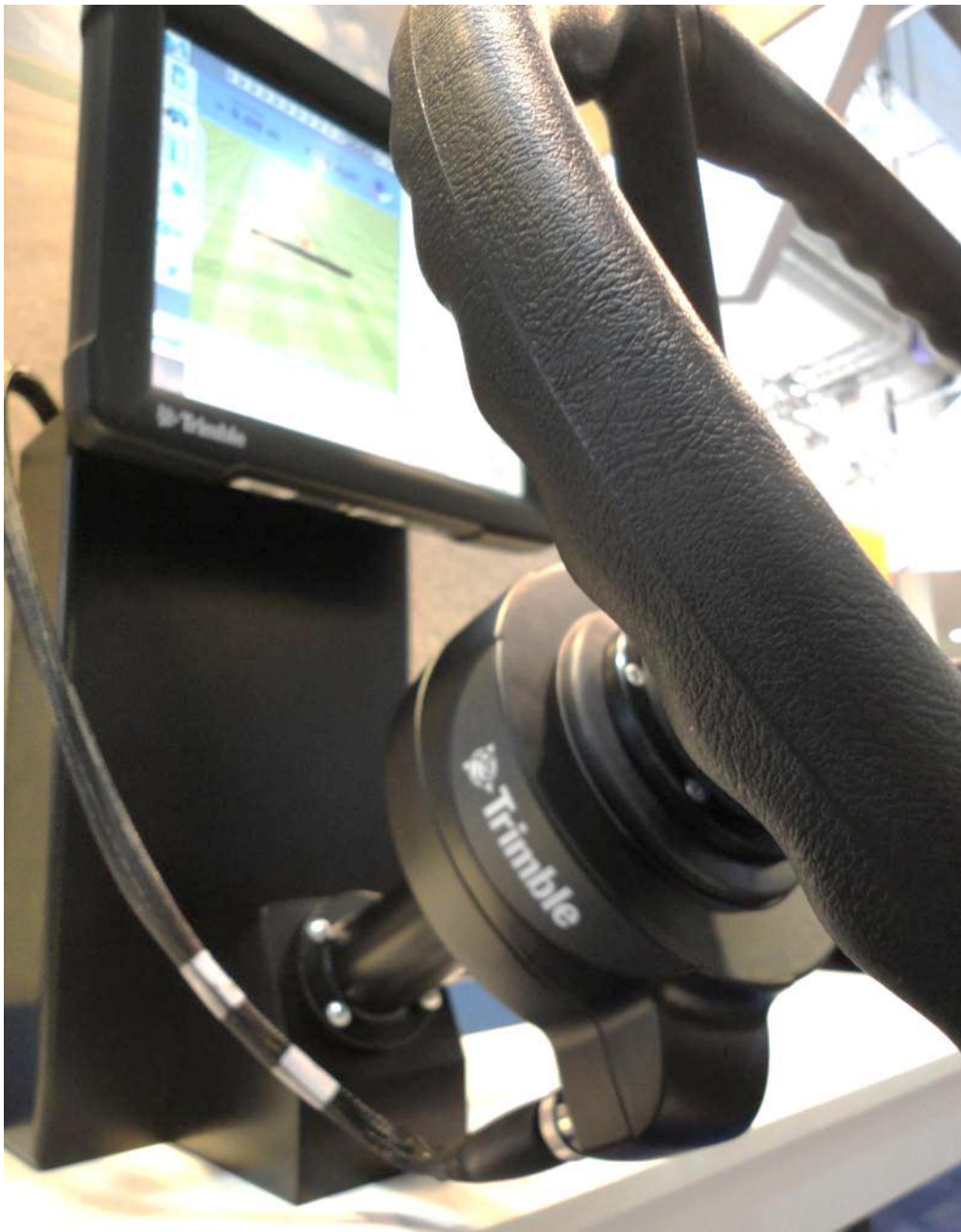
# Sistemas de atuação no volante do trator

Motor elétrico com corrente na coluna de direção



Motor elétrico com roda de atrito





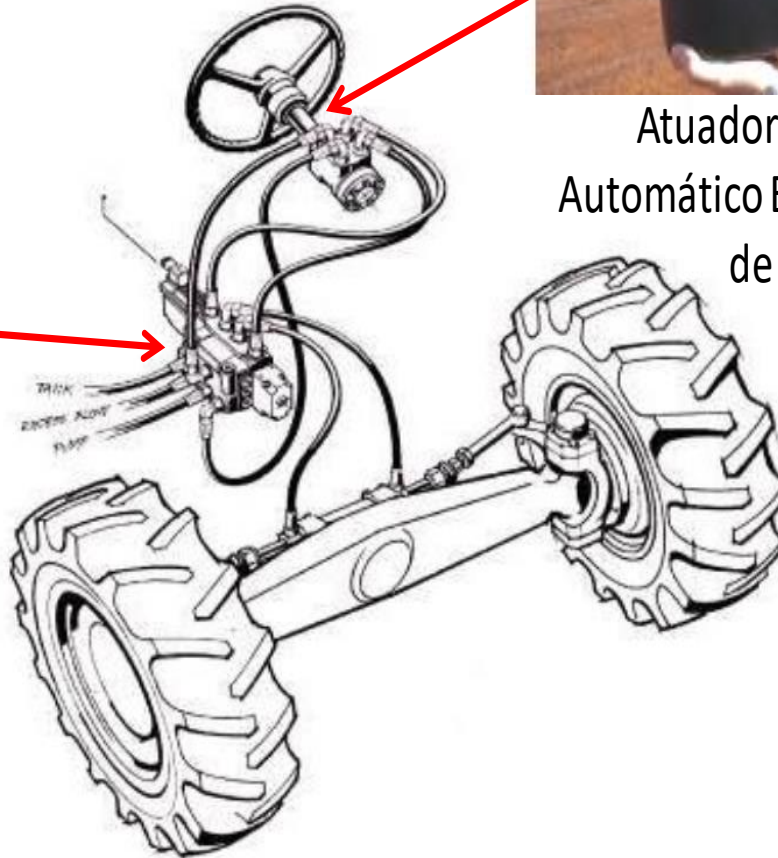
Agritechnica 2011







Bloco de Válvula de um Piloto Automático Hidráulico



Atuador de um Piloto Automático Elétrico na Coluna de Direção

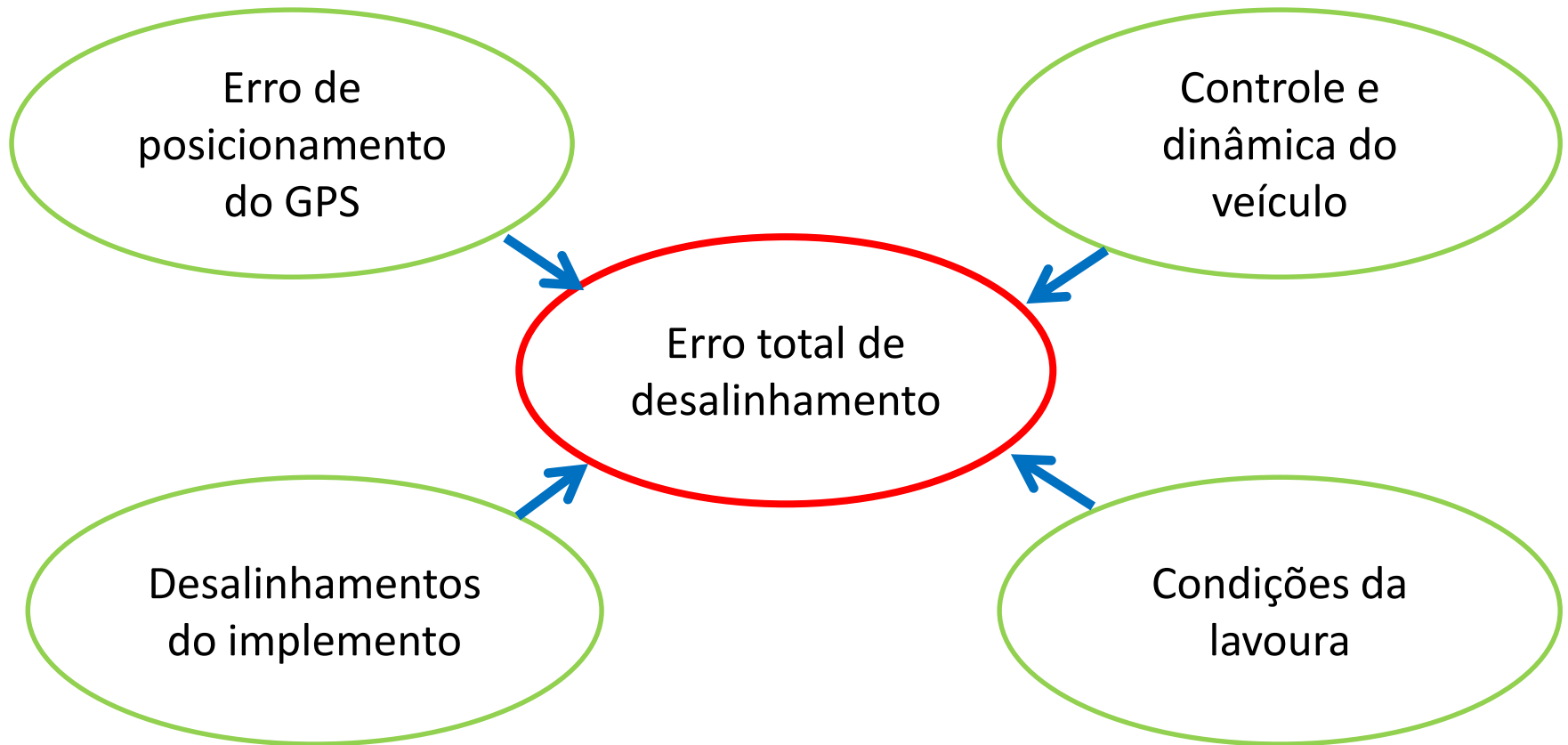
Adaptado de Timble; John Deere, Salvi (2014)

Performance ↑

Preço →



# Composição do erro de sistemas de direção automática



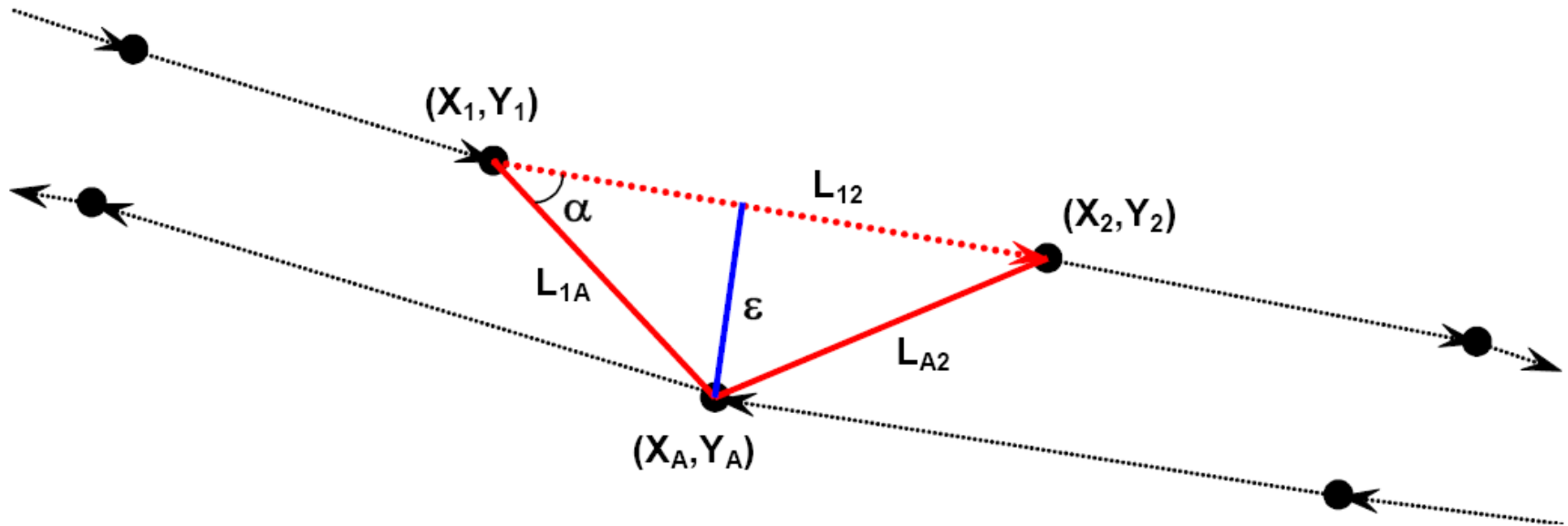
adaptado de Adamchuk, 2007

# O que considerar ao avaliar sistemas de orientação (barra e piloto)

- Natureza do ensaio
  - estático ou cinemático
- Duração do ensaio
  - passada por passada (15 min) ou longa duração (ano seguinte)
- Definição do ensaio
  - precisão ou acurácia
- Estatística utilizada
  - predição media, 68% ( $1\sigma$ ) ou 95% ( $2\sigma$ )
- Tipo de erro
  - posicionamento ou paralelismo

adaptado de Adamchuk, 2007

# Definição de “Erro”



$$L_{A2}^2 = L_{1A}^2 + L_{12}^2 - 2L_{1A}L_{12} \cos \alpha \quad \Rightarrow \quad \cos \alpha = \frac{L_{1A}^2 + L_{12}^2 - L_{A2}^2}{2L_{1A}L_{12}}$$

$$\sin \alpha = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha}$$

$$\varepsilon = L_{1A} \sin \alpha \quad \Rightarrow \quad \varepsilon = L_{1A} \sqrt{1 - \left( \frac{L_{1A}^2 + L_{12}^2 - L_{A2}^2}{2L_{1A}L_{12}} \right)^2}$$

adaptado de Adamchuk, 2007

# Vantagens dos sistemas de direção automática

- permitem a redução da compactação do solo e danos às plantas (ou soqueiras no caso da cana) com controle de trafego
- permitem velocidades operacionais maiores
- reduzem a fadiga do operador
- permitem a operação mesmo com falta de visibilidade (dia e noite)
- otimizam o raio de manobras
- minimizam os erros de paralelismo
- permitem a operação com mais do que um conjunto na mesma área
- a operação pode iniciar em qualquer ponto da lavoura
- aumentam o rendimento operacional
- permitem a integração das operações automatizadas sob uma mesma base de dados – plantio, tratos culturais e colheita (percursos gravados)

# Controle de tráfico



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN

ast



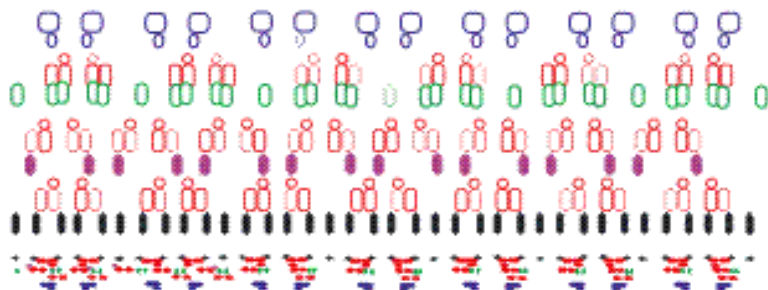


# Tráfego em lavoura de grãos - Australia

## **Caminhos de rodas na lavoura**

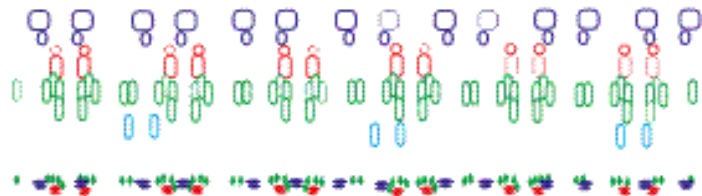
Cobertura

### Preparo convencional



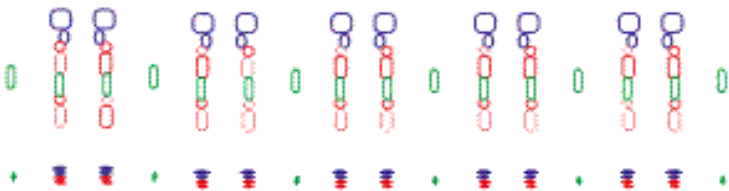
82%

### Plantio direto



46%

### Tráfego controlado

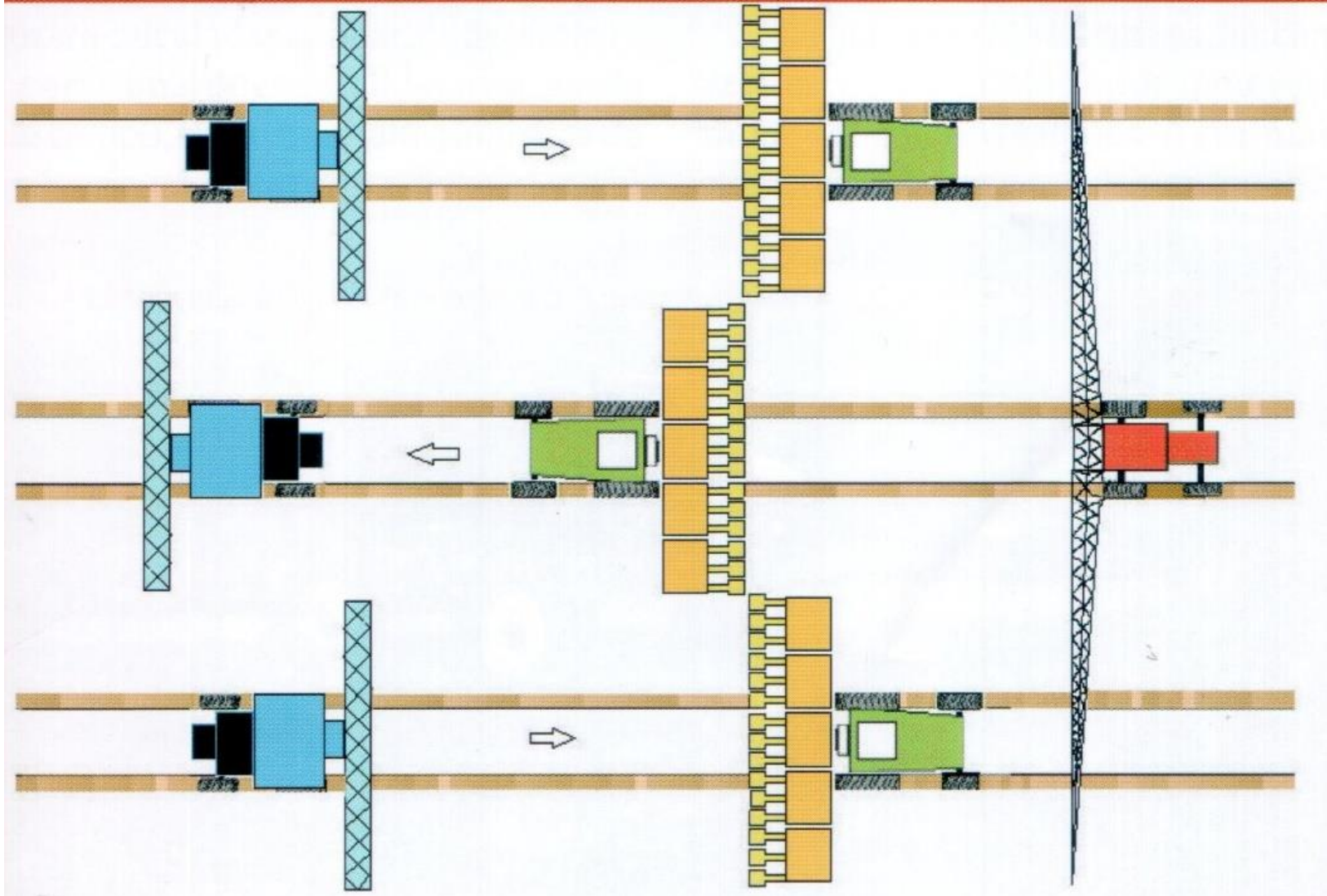


14%

6 vezes menos tráfego que o Preparo Convencional e 3 vezes menos que o Plantio Direto !

Revista Plantio Direto, edição 110, março/abril de 2009.

## Como funciona o sistema de Controle de Tráfego de Máquinas



F. Faggion, 2018

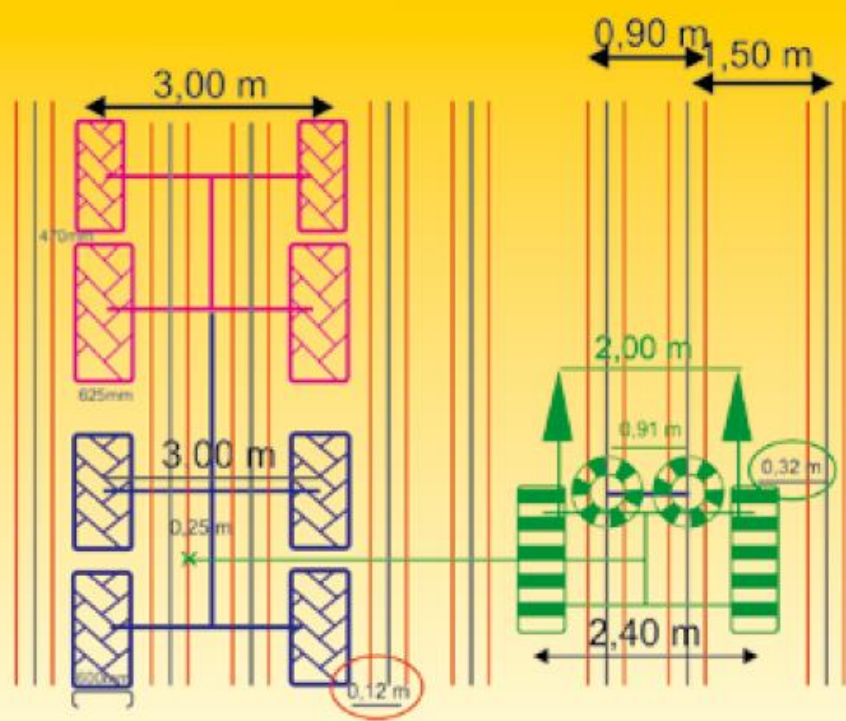
## Canteiro de Cana Otimizado



Coleti, 2009



A



B

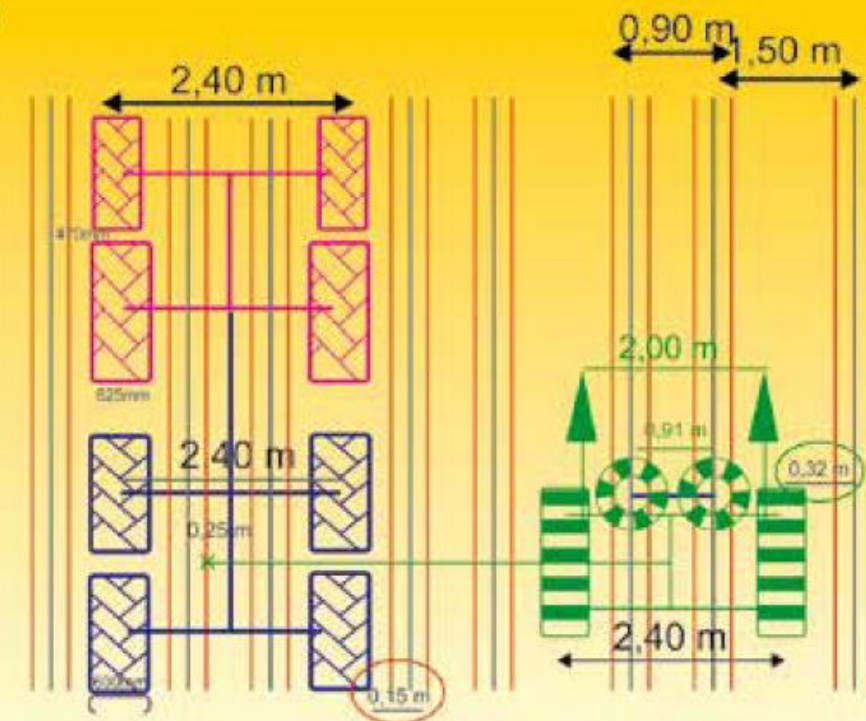


Figura 2 - Distância do afastamento de segurança entre colhedora de duas linhas e trator + transbordo em espaçamento duplo alternado de 0,9 X 1,50 m com conjunto transbordo de bitola de 3,0 m (a) e conjunto trator + transbordo de bitola de 2,40 m (b). Fonte: Belardo (2016b)

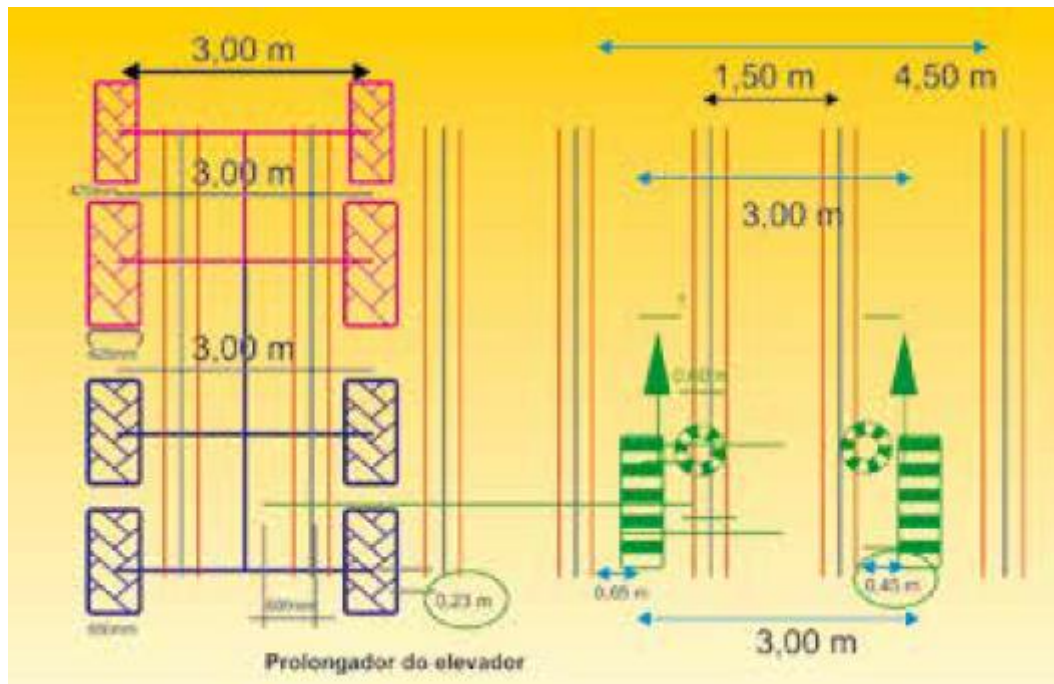


Figura 3 - Distância do afastamento de segurança entre colhedora de duas linhas e trator + transbordo em espaçamento simples de 1,50m. Fonte: Belardo (2016c)

O que acontece quando você opera com sistema de direção automática e sente sono....



Farmers Weekly - <http://www.fwi.co.uk>  
07/06/2007



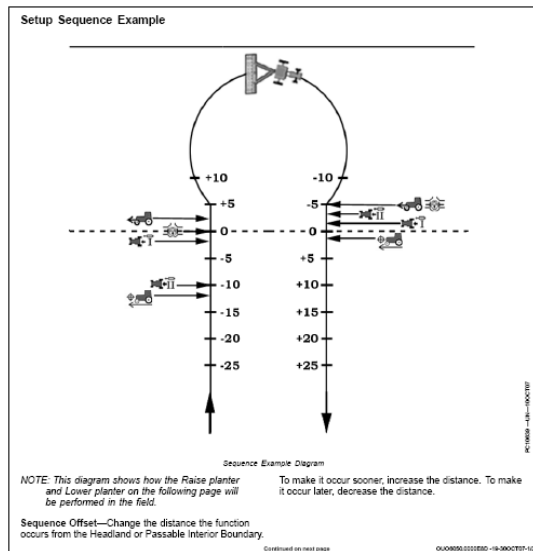








# Intelligent Total Equipment Control (John Deere iTEC Pro™ Guidance Systems)



### Setup Sequences

Sequence	Raise Planter	A	B	B/E	C
1	3.5 (m/s)	-12.0 (m)			
2	Extend	-10.0 (m)			
3	Extend	-2.0 (m)			
4	Off	0.0 (m)			
5	Off	2.0 (m)			

Raise Planter Sequence

A—Sequence Drop-Down Menu    C—Function  
B—Record/Stop Button        D—Action

### Setup Sequences

Sequence	Lower Planter	A	B	B/E	C
1	On	-5.0 (m)			
2	On	-5.0 (m)			
3	Retract	-4.0 (m)			
4	Retract	-2.0 (m)			
5	5.5 (min)	1.0 (m)			

Lower Planter Sequence

E—Distance                                    G—Next Function Page  
F—Previous Function Page

QU00001012E00-18-900CT07-02

# Tecnologia de manobra autônoma de cabeçadeiras

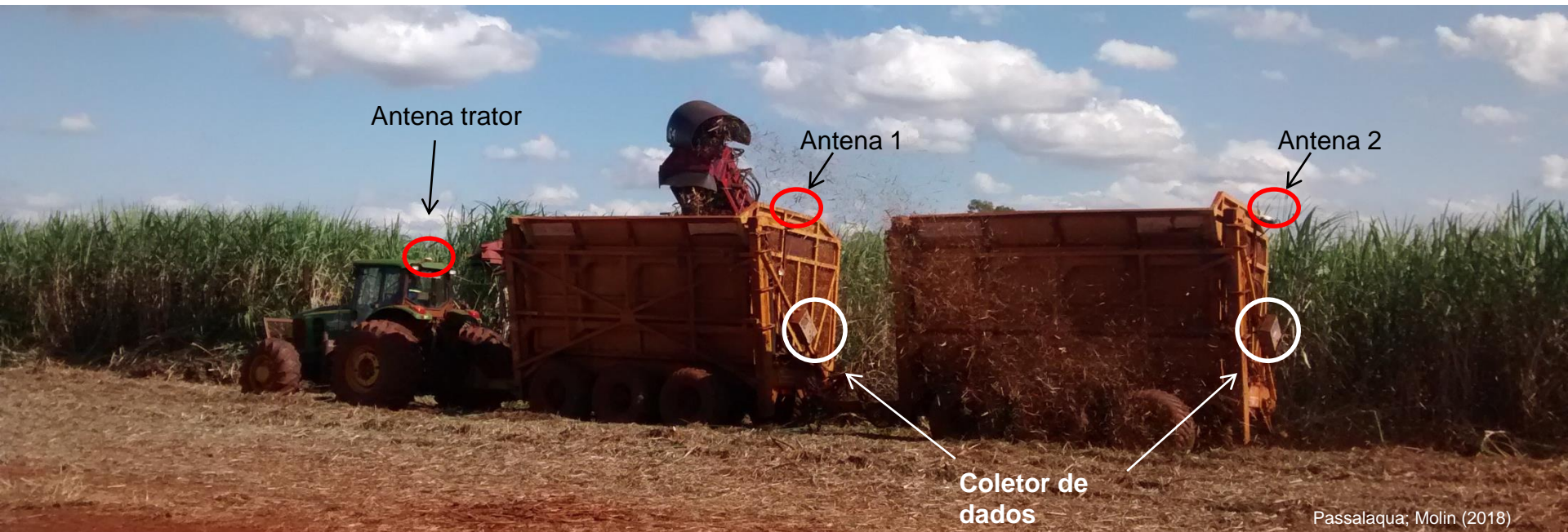
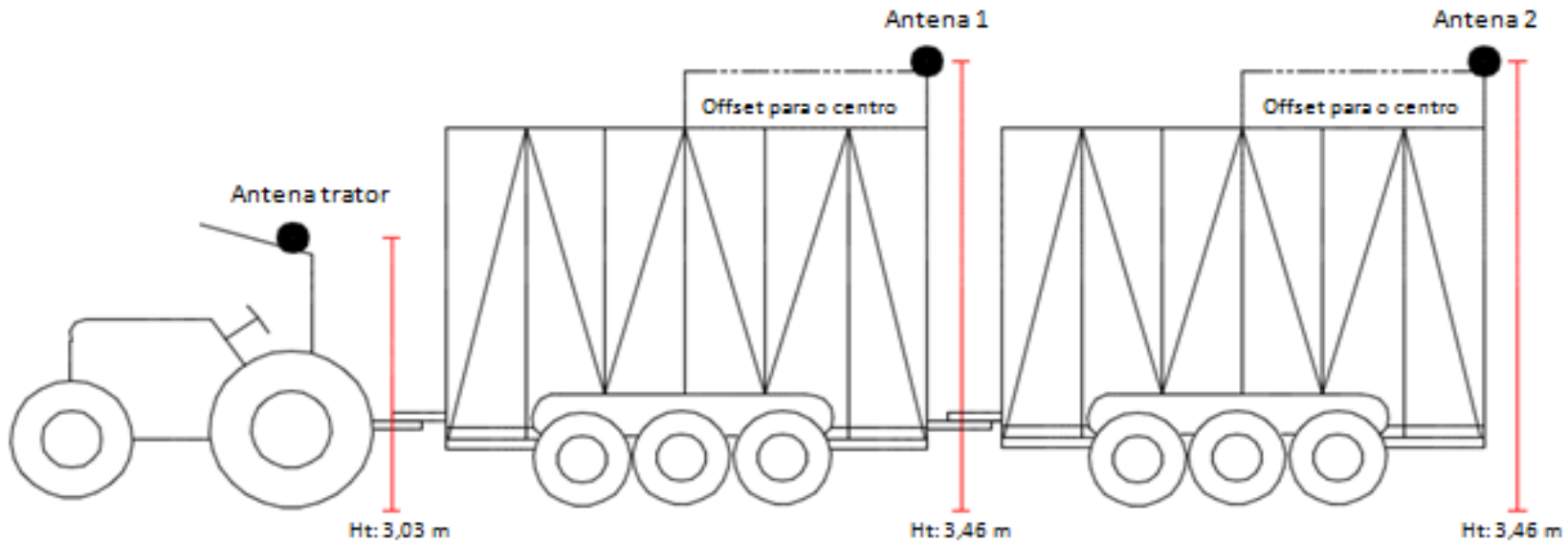


iTEC Pro



# O desafios da direção automática em máquinas acopladas e rebocadas...



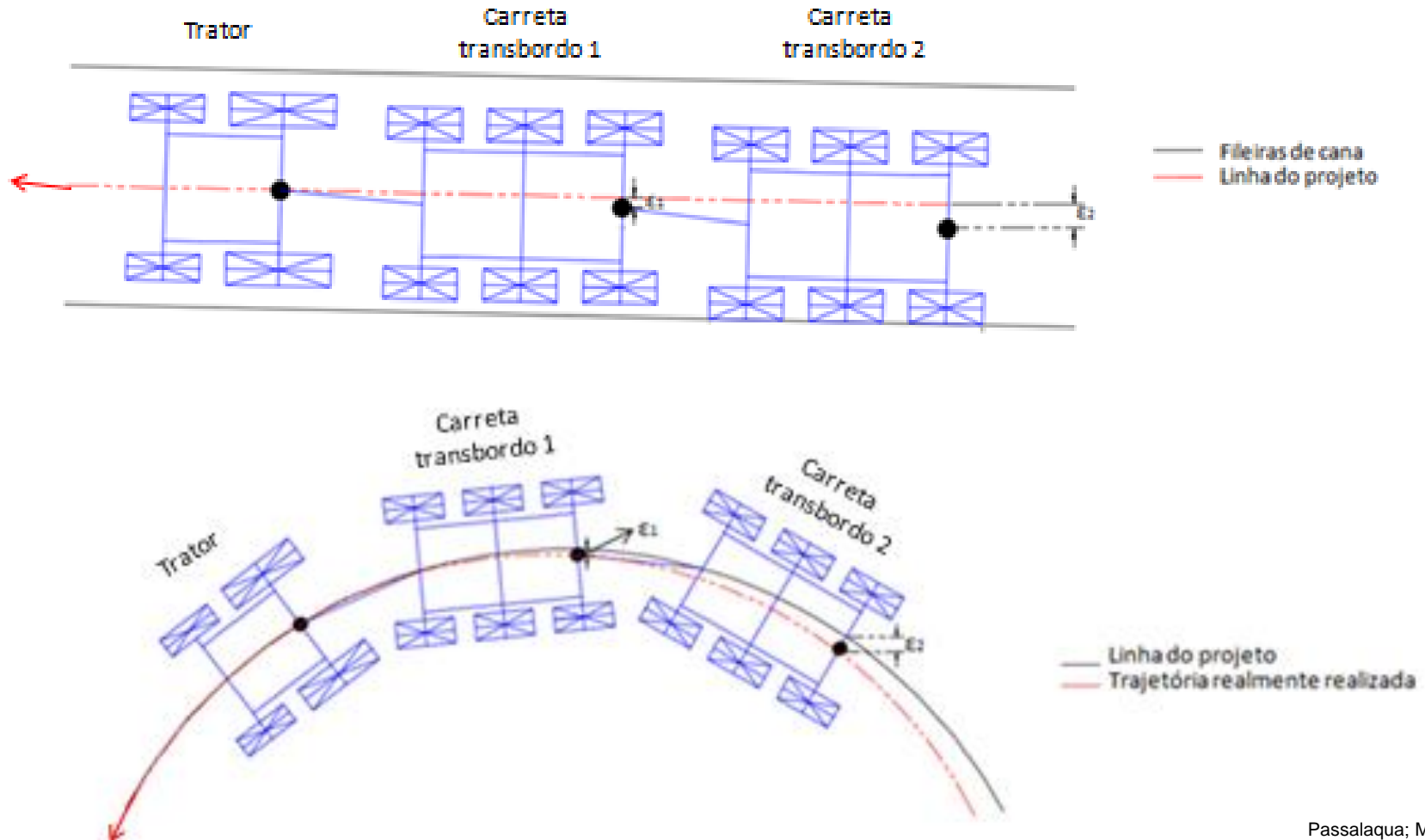


Passalaqua; Molin (2018)



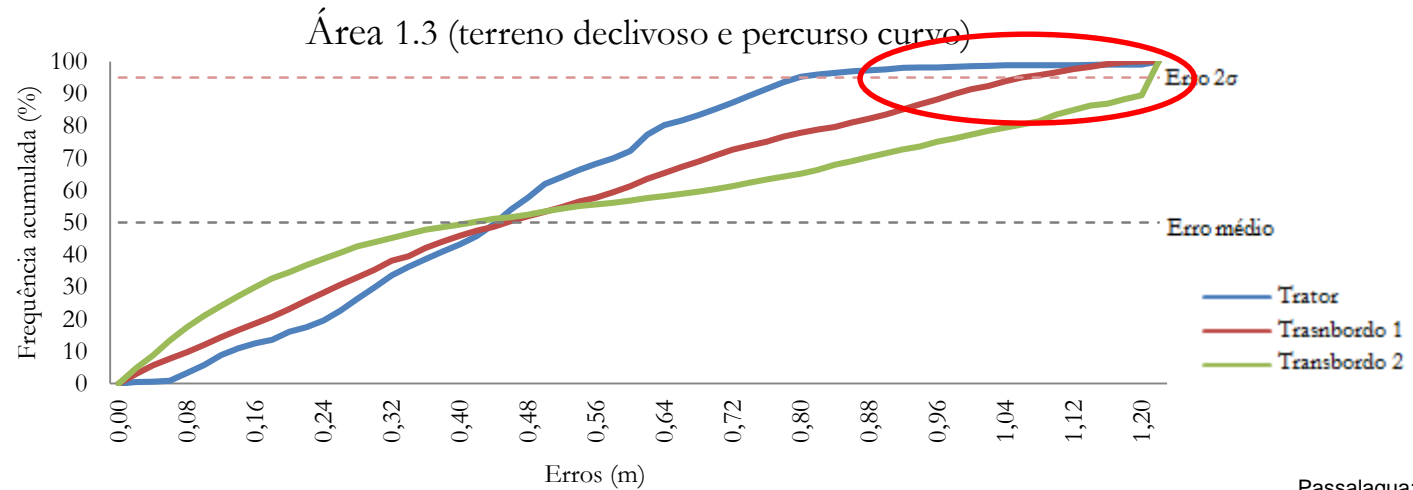
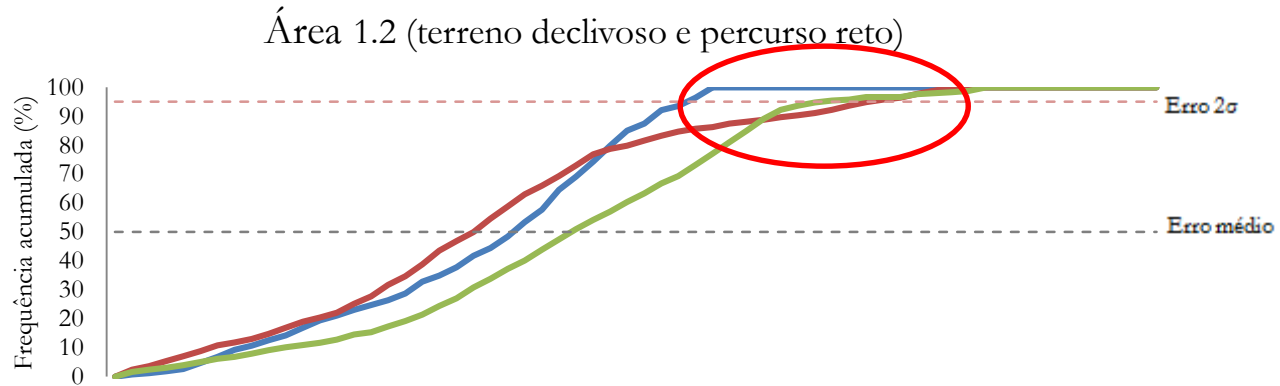
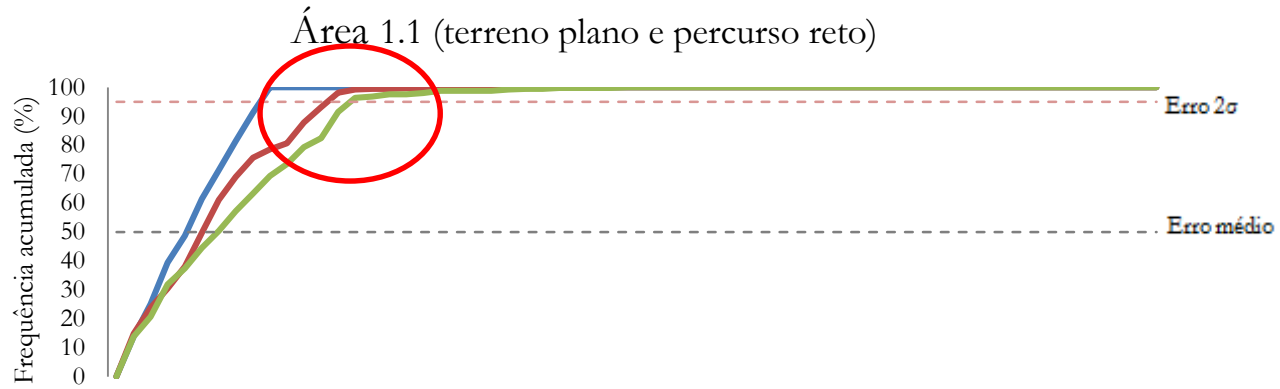
# MATERIAL E MÉTODOS

## ○ Comportamento das carretas em relação a trajetória



Passalaqua; Molin (2018)

Percursos retos e curvos, sem DA

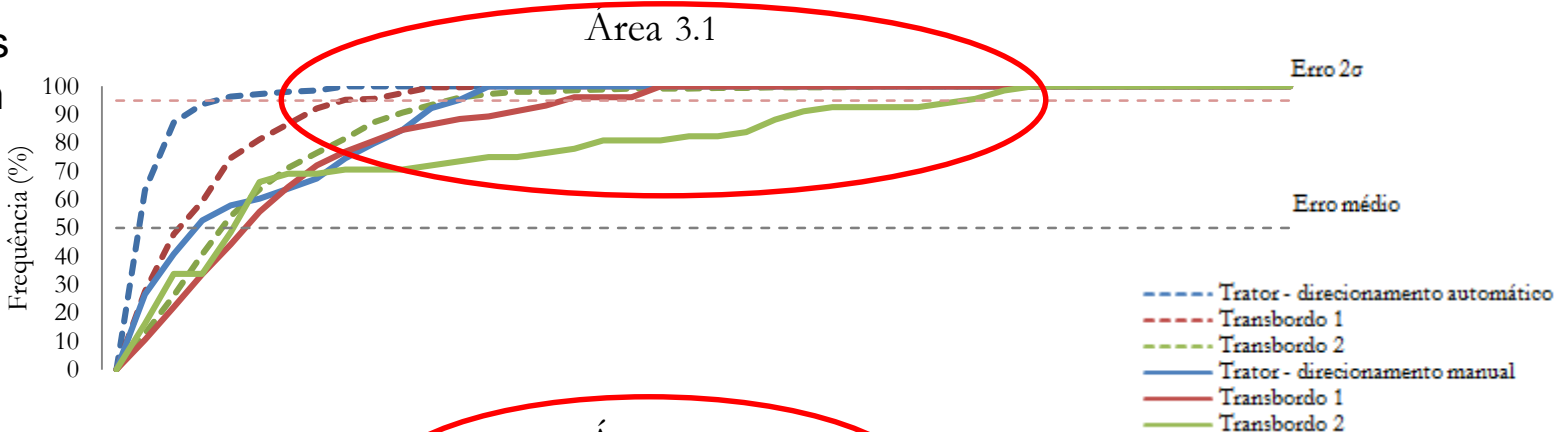


Passalaqua; Molin (2018)

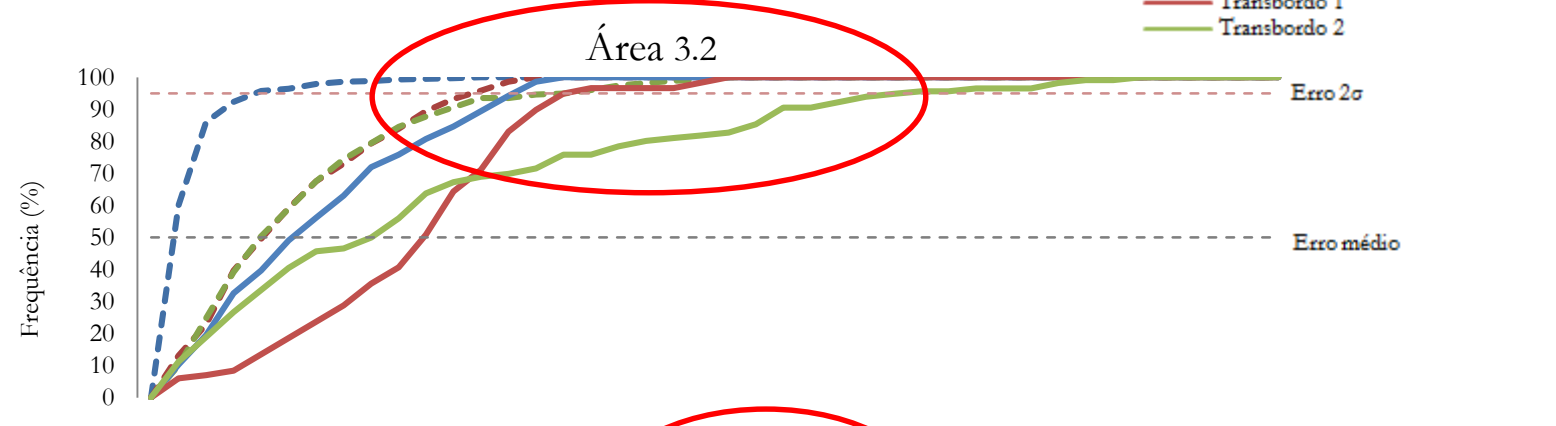


# Percursos retos inclinados, com e sem DA

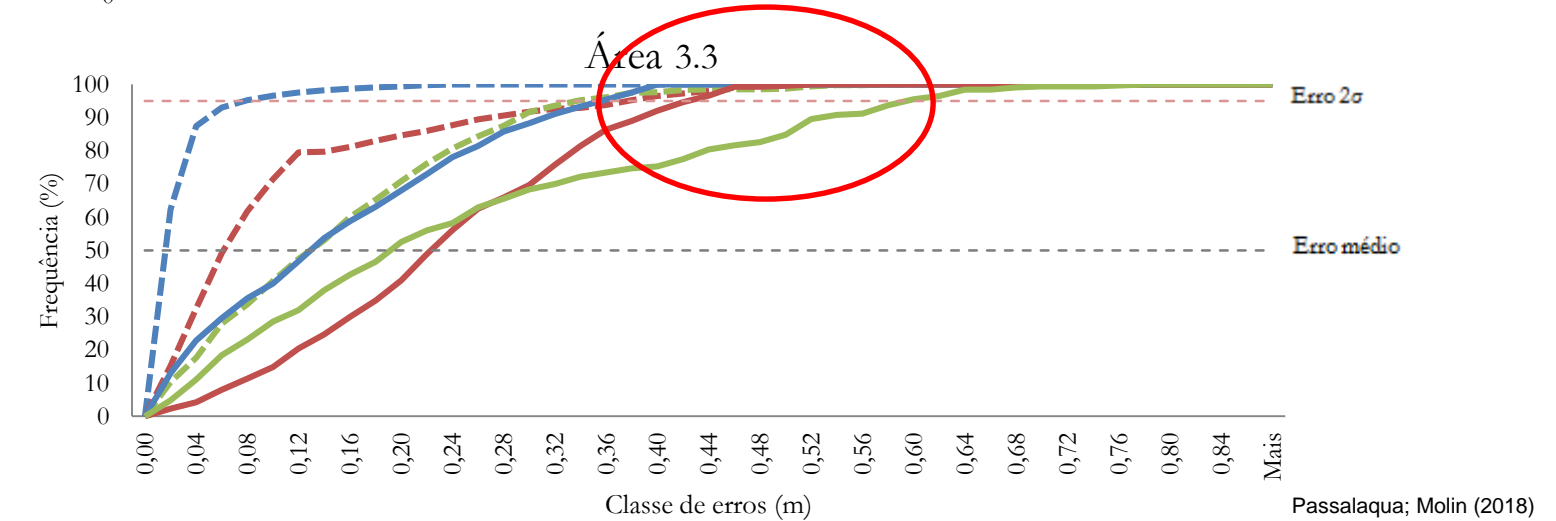
5%



7%



8%



Passalacqua; Molin (2018)

# Sistema de direção automática para máquinas e implementos

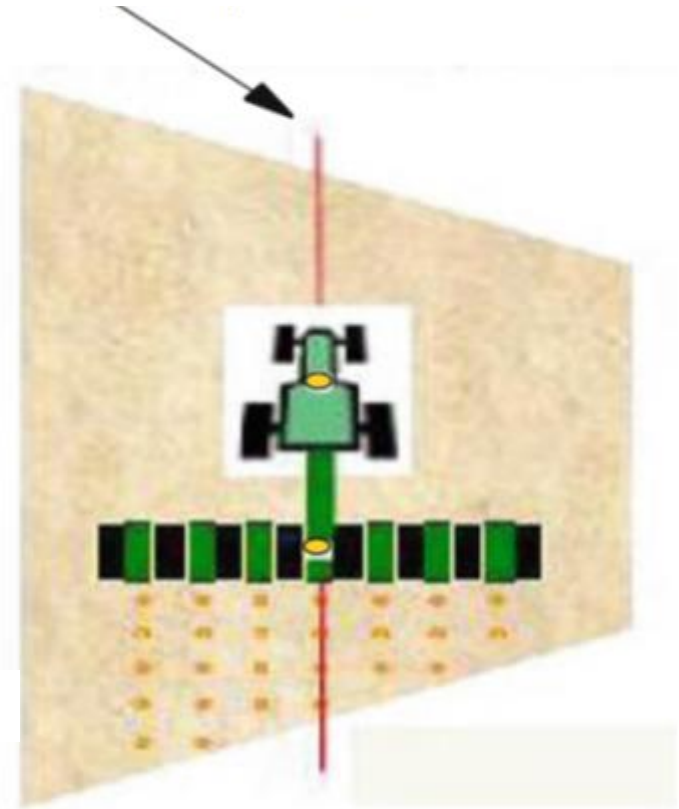
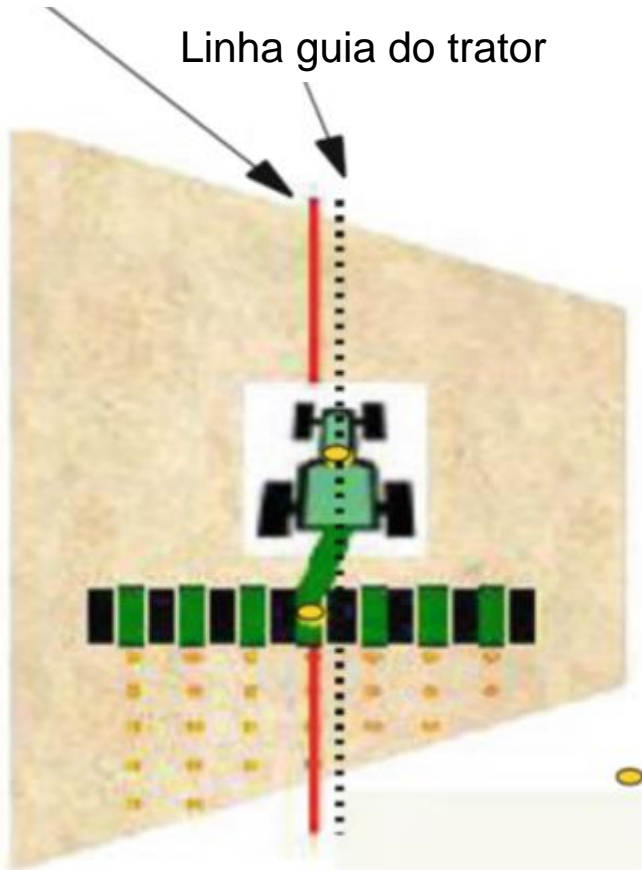
Passivo

Ativo

Linha guia do implemento

Linha guia do trator

Mesma linha guia para o trator e implemento



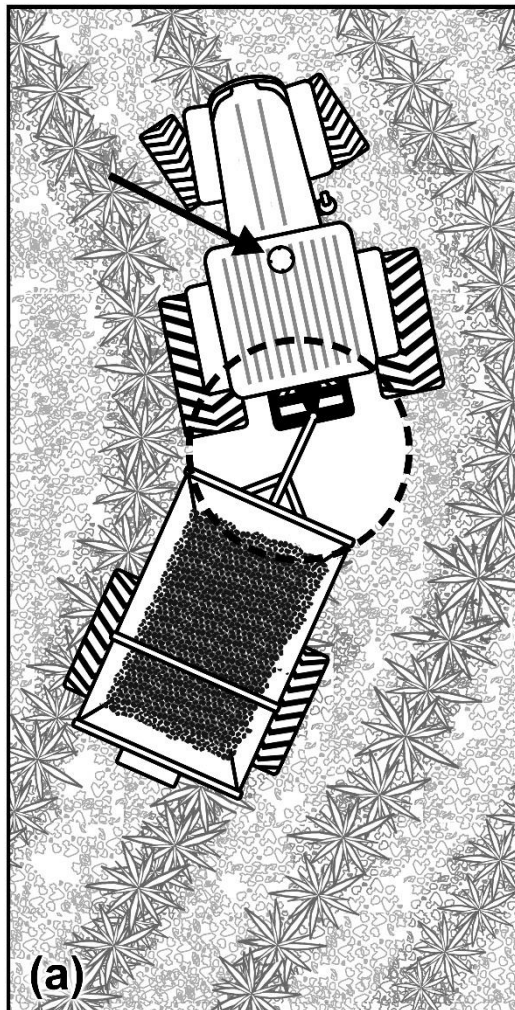
Antena GNSS

Direção da inclinação

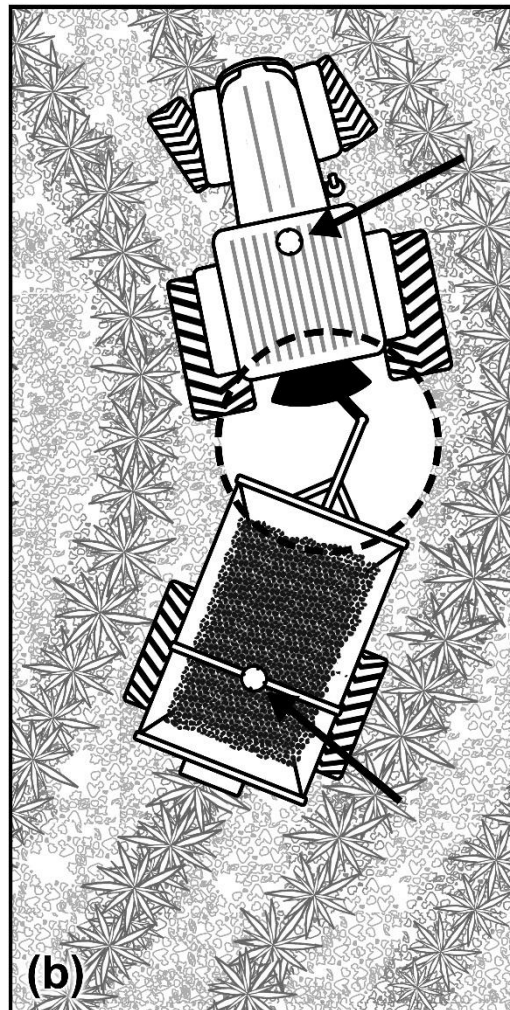
Direção da inclinação

Adaptado de Heege (2013)

# Sistema de direção automática para máquinas e implementos



Equipamento de arrasto sem sistema de direção automática



Equipamento de arrasto com sistema de direção automática ativo

# Sistema de direção automática ativo para máquinas



Agrishow, 2009

Atuadores hidráulicos lineares direcionando a barra de tração

# Sistema de direção automática ativo para máquinas

Disco esterçante



[www.orthman.com](http://www.orthman.com)

## ANTENA ZEPHYR



A antena Zephyr é montada no implemento para fornecer precisão de 2,5 cm ao NavController II (montado no implemento) em repetidas passagens ano após ano.

## AgGPS NAVCONTROLLER II



O NavControl T3 de terreno instruções de usando inform tela integrada RTK da antena implemento.

[www.orthman.com](http://www.orthman.com)



Trimble

# Sistema de direção automática ativo para máquinas

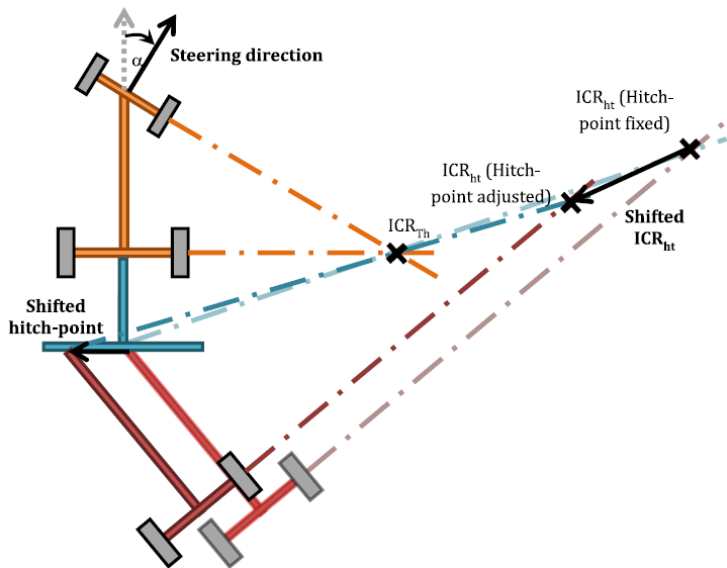
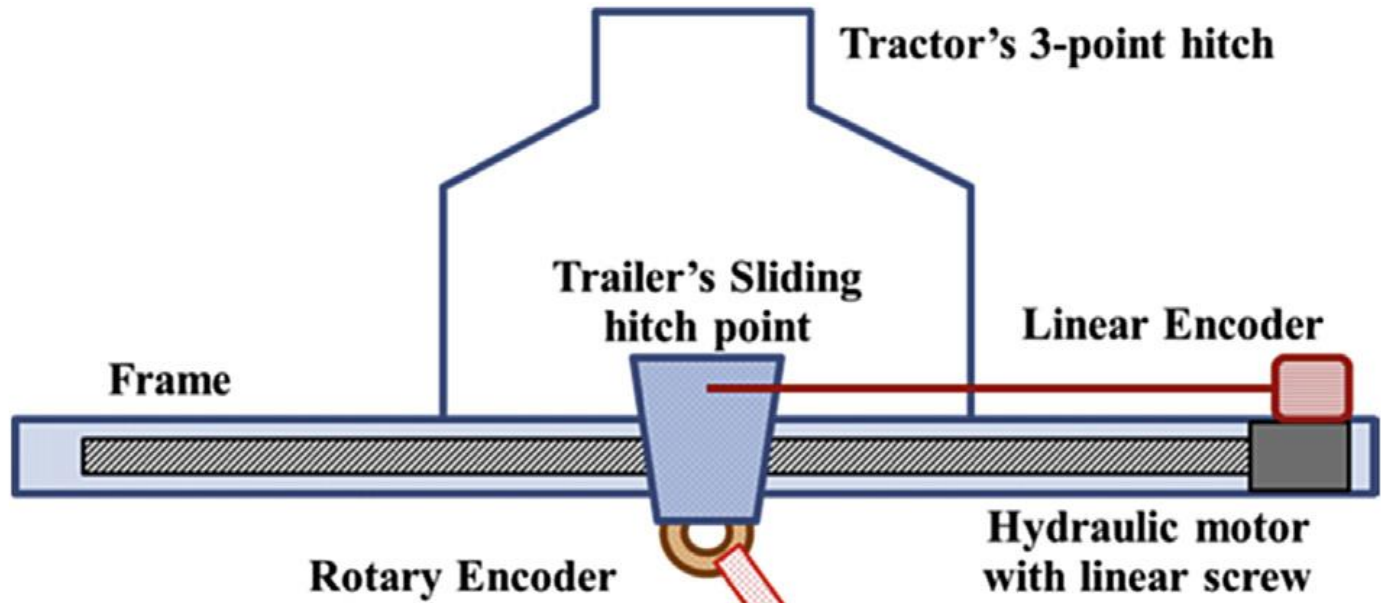


[www.JohnDeere.com](http://www.JohnDeere.com)



Barra de tração com atuadores hidráulicos



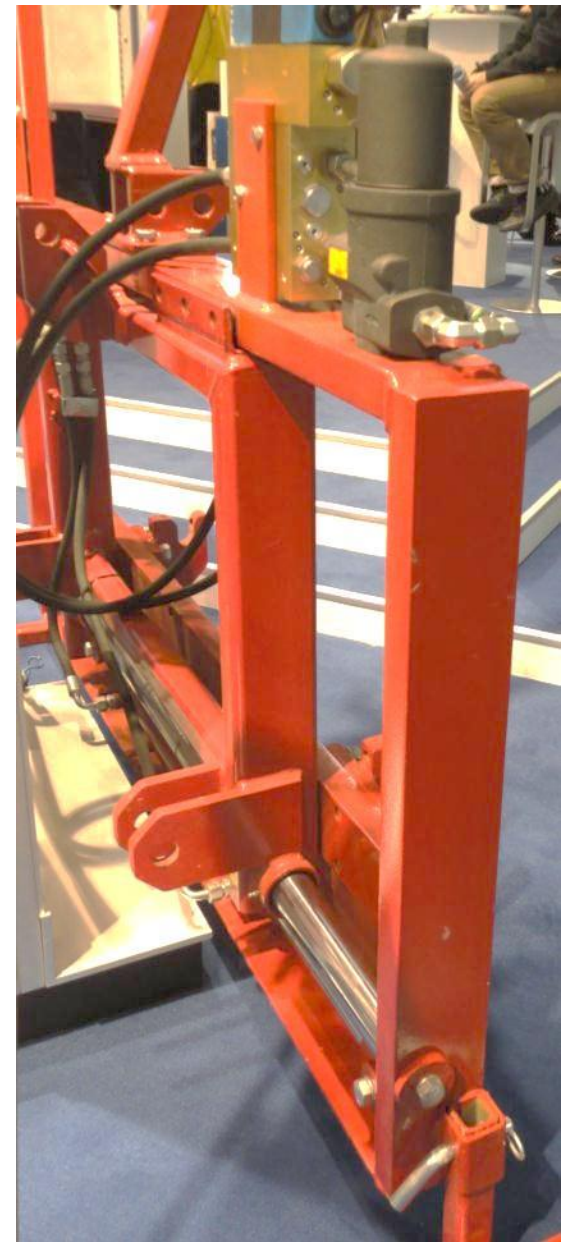


Thanpattranon et al (2016)

# Rodado traseiro de semeadora esterçante



[www.CaseIH.com](http://www.CaseIH.com)



Agritechnica 2011



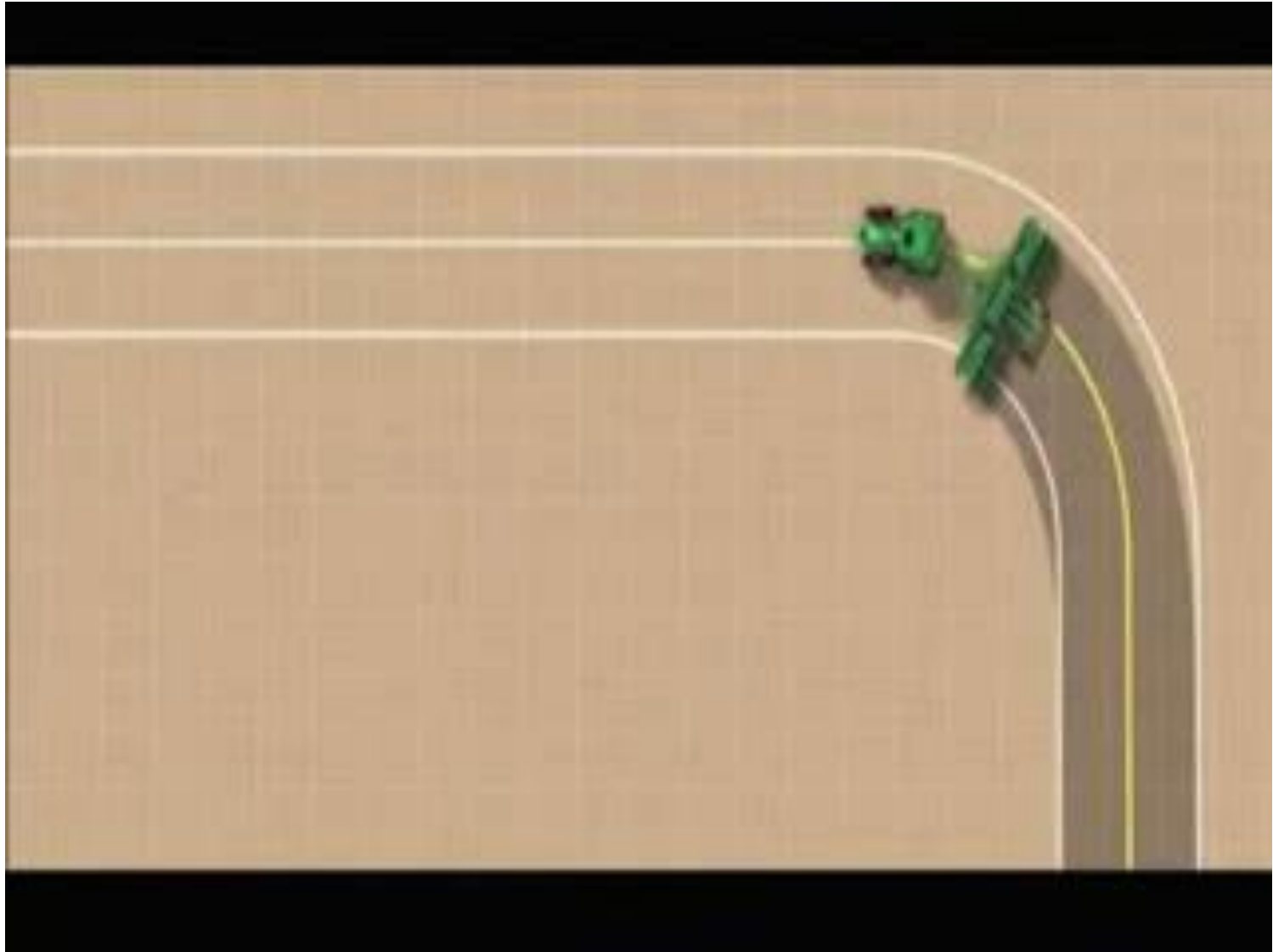
Agritechnica2015



# Sistema Passivo



# Sistema Passivo



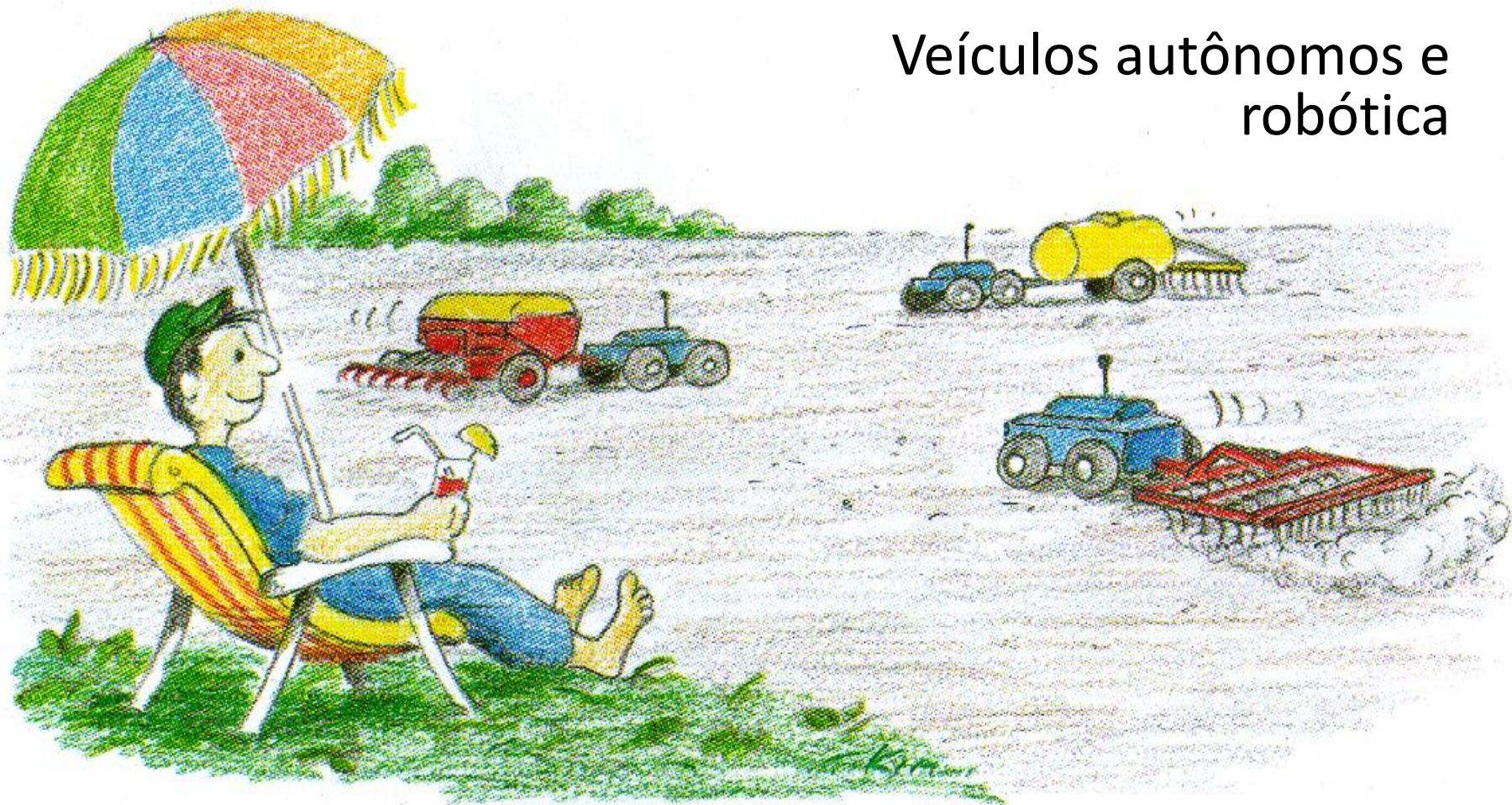
# SÍNTESE

- Sistemas de orientação visual
  - Barras de luzes e telas com estrada virtual
- Sistemas de direção automática
  - Atuadores de volante ou de coluna
    - Receptor L1 com DGPS ou algoritmos
  - Atuadores hidráulicos
    - Receptor L1 com DGPS ou algoritmos (sem sentido prático)
    - Receptores GNSS (L1 + L2 + GLONASS) com correção via satélite
    - Receptores GNSS com correção RTK



# Veículos autônomos - a próxima geração...

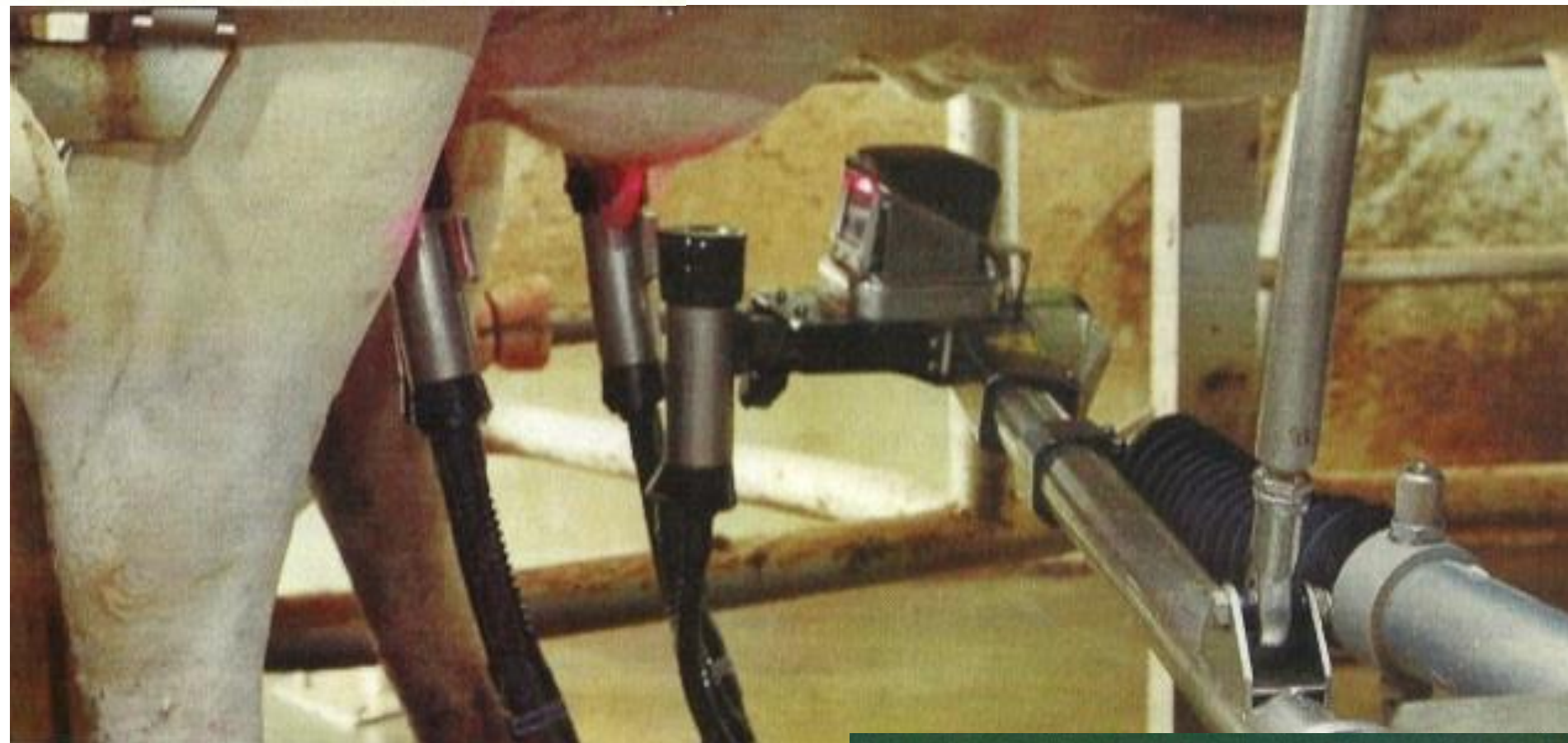
## Veículos autônomos e robótica



Blackmore, 2006

# A primeira fazenda robotizada da América Latina

Armando Rabbers é o único produtor latino-americano que utiliza essa tecnologia na produção de leite



Boletim Informativo do Sistema FAEP n° 1272 | Semana de 25 a 31 de agosto de 2014 | 7







<https://my.hs-osnabrueck.de/ecs/fileadmin/users/40/upload/publikationen/BoniRob.pdf>

# BoniRob with Penetrometer App during field trails in the Netherlands

Scholz & Ruckelshausen (2014)

# Gestão com redução de escala

■ Agricultura convencional

Talhão

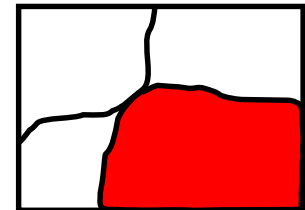
Tratamento uniforme



■ Agricultura de precisão

Sub-talhão (ou pixel)

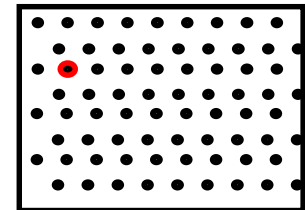
Tratamento localizado



■ Tratamento individualizado por planta

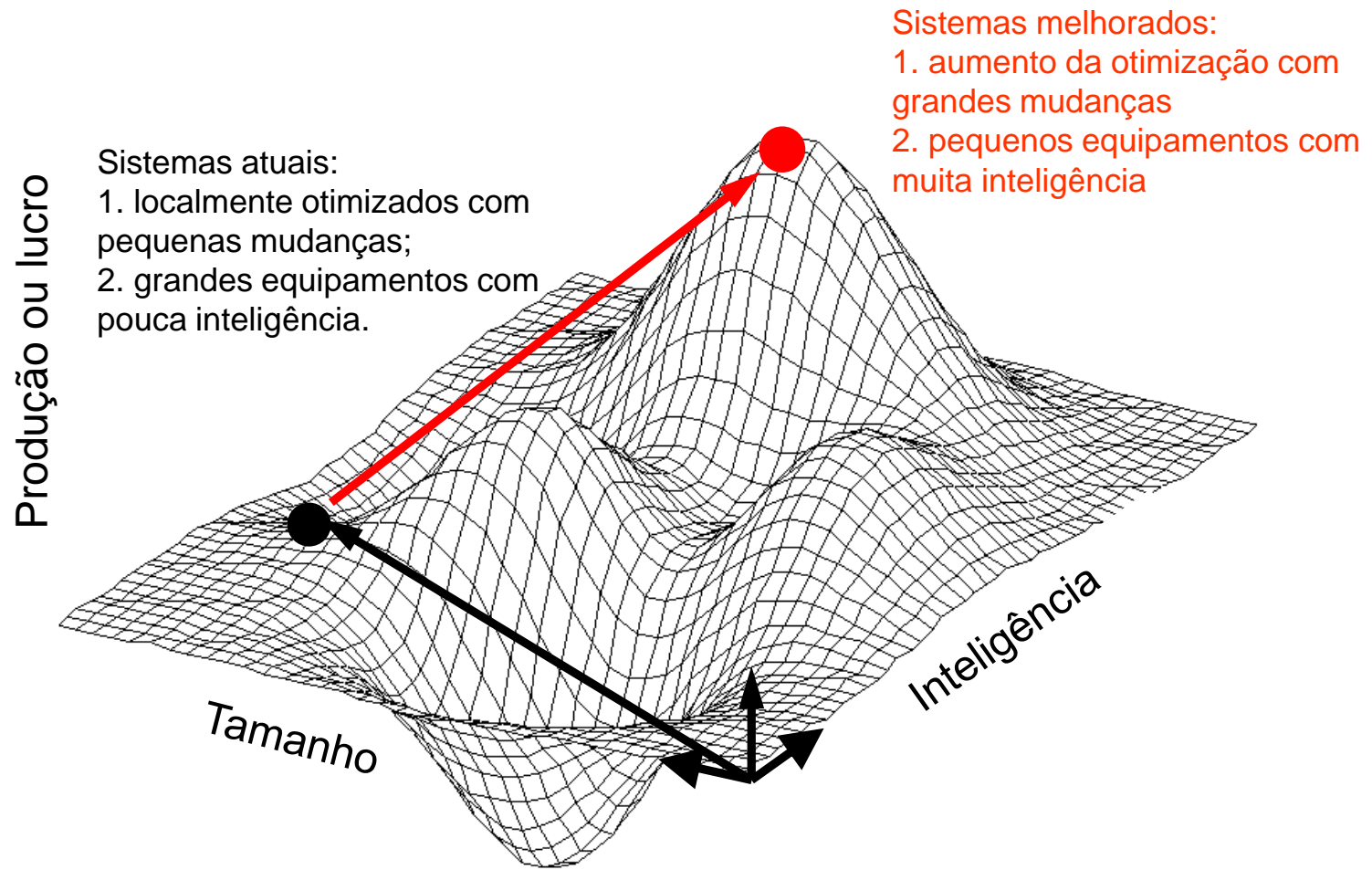
Planta individual

Dose ou ação individual



Blackmore (2006)

# Otimização de sistemas complexos



Blackmore (2006)

www.johndeere.com



Wageningen,  
2009



Wageningen,  
2009



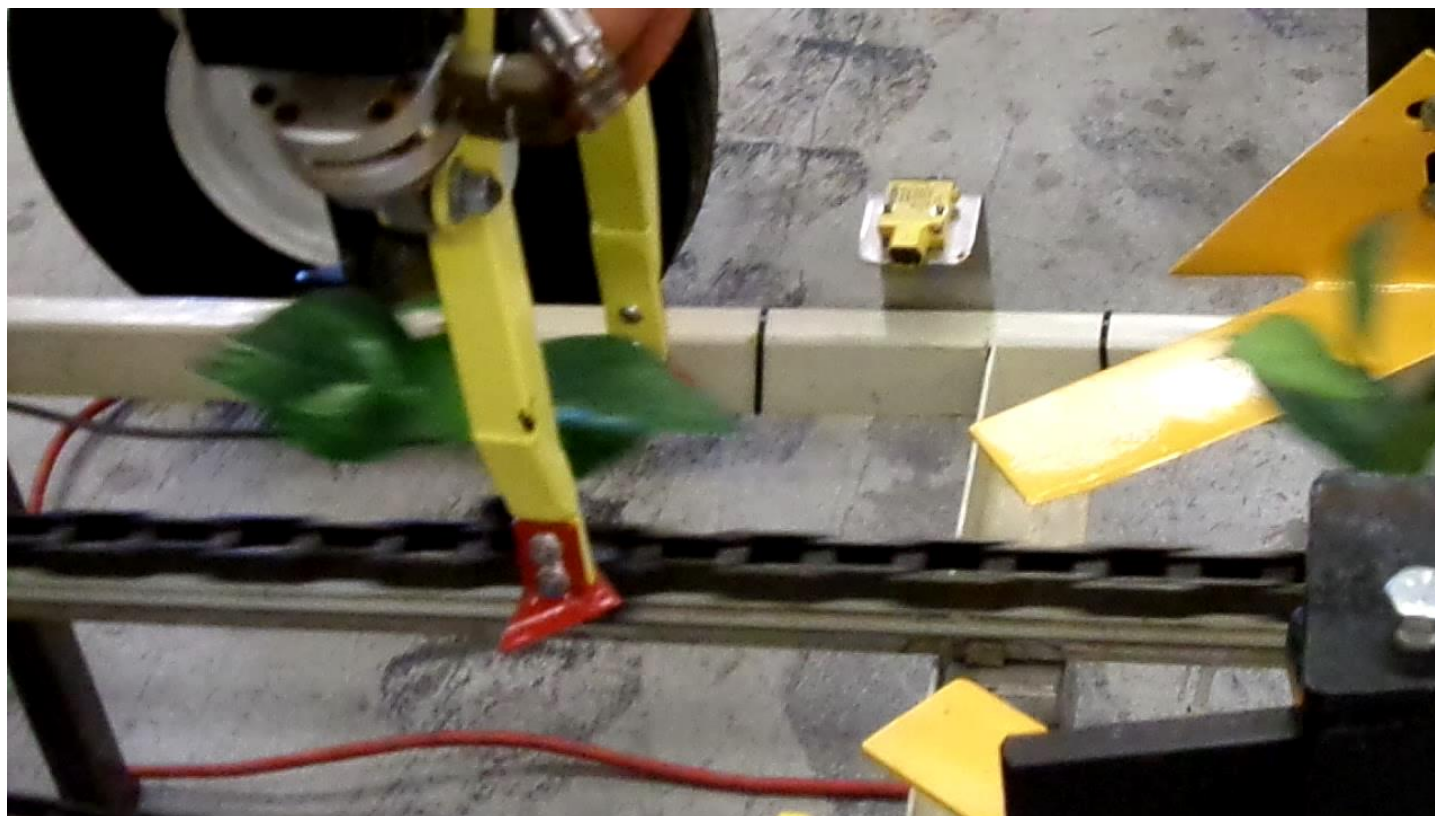
Agrishow 2013

Agrishow 2011



Prof. J. P. Molin







## Capina robotizada



Smaller single bed Robocrop InRow Weeders utilise a single camera.

**Garford**



Tillett and Hague Technology Ltd





Canadá, 2018



Sem trator, este robô canadense planta sozinho e estará no mercado em 2018.

<https://farmfor.com.br/posts> (2017)





[https://www.youtube.com/watch?reload=9&v=Bli1A\\_RqWeE](https://www.youtube.com/watch?reload=9&v=Bli1A_RqWeE)



# Medalha de Ouro – Agritechnica 2011 - Hannover



**GuideConnect**  
AGCO Fendt, 9 C11

For the first time farmers are offered a system in which a driverless tractor on the field automatically follows another tractor driving ahead. The two vehicles communicate via radio and are steered by a high-precision GPS steering facility. The driver of the leading tractor monitors both vehicles and has full access to the operating controls of the following tractor. Running two tractors simultaneously greatly increases the productivity of the driver. The two smaller tractors can be used more flexibly than one large tractor with similar overall rating and reduces the load on the soil.

*One driver for two tractors:  
Virtual Coupling.*















## Volvo faz sua primeira entrega de caminhões autônomos no Brasil

Montadora entrega sete unidades do seu caminhão Volvo VM autônomo que começam a operar nas lavouras de açúcar da Usina Santa Terezinha em Maringá (PR). Durante a colheita, o veículo é capaz de “visualizar” as linhas de plantação e seguir sozinho, sem interferência direta do condutor.



Vera, a visão de futuro da Volvo

Futuretransport, 13/09/2018