

SISTEMA RADAR MODULADO EM FREQUÊNCIA PARA MENSURAÇÃO DE DISTÂNCIAS DURANTE OPERAÇÕES AGRÍCOLAS

PEDRO HENRIQUE SANTOS¹, LEANDRO MARIA GIMENEZ²

¹ Mestre em Engenharia de Sistemas Agrícolas, ESALQ/USP, 19 98172-8646, pedroheng@gmail.com

² Professor Doutor dep. Engenharia de Biossistemas, ESALQ/USP, 19 3429-4165, limgimenez@usp.br

Apresentado no
XLVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2019
17 a 19 de setembro de 2019 - Campinas - SP, Brasil

RESUMO: A caracterização da variabilidade espacial do desenvolvimento de plantas durante o ciclo é de interesse para as modernas práticas de manejo, sendo empregadas para tal as técnicas de sensoriamento remoto. A altura das plantas é um parâmetro que apresenta relação com seu vigor e potencial produtivo. Usualmente sensores ultrassônicos são empregados para mensurar a distância até o topo das plantas cultivadas, sendo, entretanto, afetados por variáveis ambientais como vento e umidade. Outra limitação recorrente é o uso de apenas uma medida de distância, o que reduz a precisão na estimativa da altura de plantas pois, a distância entre o sensor e o alvo oscila quando este é embarcado em veículos. Uma alternativa é o uso de radares, sensores ativos amplamente utilizados para mensurar distâncias remotamente. O objetivo do trabalho foi investigar um tipo de sistema radar que pode ser acoplado a veículos terrestres, mensurando distâncias ao solo e ao topo do dossel de modo simultâneo. Para isso, foi desenvolvido um sistema de mensuração de distâncias baseado em micro-ondas moduladas, obtendo-se medidas em alvos representativos do dossel e da superfície do terreno. Uma relação exponencial entre a distância dos alvos e a frequência de batidas do sinal foi verificada, obtendo-se coeficientes R^2 de 0,99 e 0,77 na ausência e presença de obstáculos respectivamente. Um ensaio em condições controladas demonstrou o potencial da técnica para mensurações dinâmicas.

PALAVRAS-CHAVE: Sensor proximal; Agricultura de precisão; Variabilidade espacial

FREQUENCY MODULATED RADAR SYSTEM FOR DISTANCE MEASUREMENT DURING AGRICULTURAL OPERATIONS

ABSTRACT: The characterization of the spatial variability of the development of plants during the cycle is of interest for the modern management practices, being used for this the techniques of remote sensing. Plant height is a parameter that is related to its vigor and productive potential. Usually ultrasonic sensors are used to measure the distance to the top of the cultivated plants, being, however, affected by environmental variables such as wind and humidity. Another recurrent limitation is the use of only one distance measure, which reduces the accuracy in estimating plant height because the distance between the sensor and the target oscillates when it is loaded onto vehicles. An alternative is the use of radars, active sensors widely used to measure distances remotely. The objective of this work was to investigate a type of radar system that can be coupled to terrestrial vehicles, measuring distances to the ground and to the top of the canopy simultaneously. For this, a system of distance measurement was developed based on modulated microwaves, obtaining measures in representative targets of the canopy and the terrain surface. An exponential relation between the distance of the targets and the frequency of beats of the signal was verified, obtaining R^2 coefficients of 0.99 and 0.77 in the absence and presence of obstacles respectively. An assay under controlled conditions demonstrated the potential of the technique for dynamic measurements.

KEYWORDS: Proximal sensor; Precision agriculture; Spatial variability

INTRODUÇÃO: O manejo da variabilidade espacial, pela técnica denominada “Agricultura de Precisão” foi aprimorado com o desenvolvimento da eletrônica, dos sistemas de posicionamentos via satélite, automação e outras tecnologias, alterando os processos de produção (HUANG, 2013). As informações relativas à altura de plantas e seu vigor, se obtidas em tempo hábil e de forma pontual podem ser utilizadas nas práticas de manejo ainda durante o ciclo, permitindo a aplicação localizada de insumos e direcionamento das atividades de inspeção das lavouras (HOFFMEISTER et al., 2016). Sensores ativos ultrassônicos são comumente acoplados a máquinas agrícolas a fim de determinar a distância entre o sensor e o dossel das plantas, visando a manutenção da distância entre órgãos ativos e alvos, uma restrição é que durante as operações agrícolas podem ocorrer variações na superfície do terreno comprometendo a precisão das leituras, sendo necessário a combinação de sensores para conferir uma análise mais precisa quando estiverem sendo realizadas operações dinâmicas (FRICKE; WACHENDORF, 2013). Outra tecnologia utilizada para a mensuração da altura de plantas de forma remota e não destrutiva é o Light Detection and Ranging (LIDAR) que consiste em emitir sucessivos pulsos de laser, sendo a distância sensor alvo fornecida através da medição do intervalo de tempo entre a emissão do pulso e a recepção do sinal refletido. Dependendo da configuração do sistema LIDAR uma nuvem de pontos em 3D é obtida, gerando um conjunto de dados que fornecem a informação de parâmetros geométricos do objeto-alvo e com isso a altura do mesmo. A desvantagem se dá no custo do equipamento e também na imprecisão da calibração, isso devido à dificuldade na integração dos vários sistemas, como por exemplo o GNSS, limitando a sua utilização em larga escala (RAVI et al., 2018). Radares de Abertura Sintética (SAR) são tecnologias recentes e ainda em desenvolvimento para a mensuração da altura de plantas onde o sistema envia um número sucessivo de pulsos micro-ondas e à partir do tempo de resposta do sinal fornece a distância entre o sensor e a copa das plantas. A altura da planta se dá a partir da diferença de distâncias entre o solo e o dossel. A tecnologia utiliza o movimento da plataforma de radar e também o processamento especializado de sinais para gerar imagens de alta resolução. Neste caso, os equipamentos são de grande porte e devem ser embarcados em aeronaves e ou satélites que estejam em grandes altitudes, pois analisam áreas muito extensas, aumentando assim o seu custo (E. BROWN; M. FINGAS, 2013). Radares de Onda Contínua Modulada em Frequência (FMCW) são empregados para a determinação de distâncias, sendo uma alternativa aos radares convencionais, mais complexos e de maior custo (KIM, 2016). Radares (FMCW) fornecem a informação de distância à partir das batidas de frequência do sinal, com isso a assinatura de cada alvo representa uma distância, logo, para pequenas distâncias, se torna mais viável do que os radares pulsados, que necessitam de grandes distâncias para o tempo de comutação entre a transmissão e recepção do sinal, pois harmônicos e ruídos podem interferir na precisão dos dados (ANGHEL, 2014). Pesquisas recentes vem sendo desenvolvidas para testar a efetividade de sensores radares de baixo custo quando em operações agrícolas mecanizadas, demonstrando a viabilidade na implementação e utilização desta tecnologia no auxílio e desenvolvimento da Agricultura de Precisão (ROUVEURE, FAURE e MONOD, 2002; SANTOS, 2019). O objetivo deste trabalho foi a investigação do uso de um método não destrutivo que permite a determinação das distâncias entre o sensor e o dossel das plantas e também entre o sensor e o solo. A diferença entre estas distâncias fornece a altura das plantas. Neste trabalho é apresentada a etapa inicial de desenvolvimento do sistema Radar FMCW que compreendeu duas etapas. Na etapa de laboratório e em condições estáticas foram obtidos parâmetros preliminares para estabelecimento das frequências de modulação. Foi realizada na sequência uma etapa em campo, de forma dinâmica, que permitiu obter à partir da interação da radiação com o solo e com alvos representativos das plantas, as distâncias necessárias ao cálculo de alturas, fornecendo suporte para futuras implementações e melhorias dos sistemas Radares (FMCW) quando em operações agrícolas mecanizadas.

MATERIAL E MÉTODOS: O protótipo foi desenvolvido e testado no Laboratório de Instrumentação Eletrônica (LIE), da ESALQ/USP, Piracicaba. Foi construída uma eletrônica para modulação e demodulação dos sinais de um sensor micro-ondas *AgilSense*, modelo HB 100, amplamente comercializado. A FIGURA 1 descreve os passos necessários para a aquisição dos sinais do Radar FMCW desenvolvido.

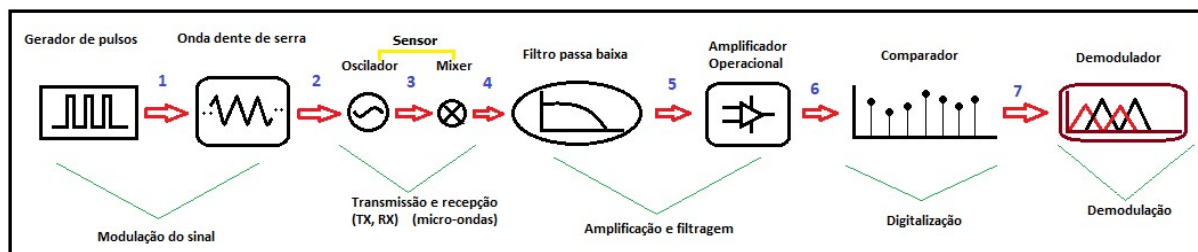


FIGURA 1. Sequência das etapas de um sistema Radar FMCW.

Na etapa 1, ocorre a geração de pulsos de curta duração, responsáveis pela modulação de um sinal dente de serra. Na etapa 2, o sinal modulado ativa o oscilador que gera um sinal de aproximadamente 10 GHz, Banda X. Na etapa 3 o sinal é enviado ao mixer e a antena transmissora (Tx), que emite o sinal produzido para o ambiente. Ao encontrar um obstáculo, o sinal é refletido e retorna à antena receptora (Rx) entregando novamente o sinal para o mixer, que através do produto e diferença dos sinais enviados e recebidos, fornece uma frequência intermediária (IF). Nesta etapa, o oscilador, o mixer e as antenas se encontram embarcados no sensor HB 100. Posteriormente os sinais (IF) do sensor, são enviados ao circuito eletrônico desenvolvido, onde passam pela etapa 4, filtragem e etapa 5 amplificação, para serem digitalizados na etapa 6. Na etapa 7, o sistema faz a demodulação do sinal, obtendo a diferença de batidas e fornecendo as distâncias entre o sensor e o alvo em estudo.

Dois sistemas sensores foram desenvolvidos para obter as distâncias referentes aos alvos representativos do solo e das plantas. Para melhor adequação do campo de visada do sensor, também foram desenvolvidas antenas espirais e cones direcionadores, que foram acoplados no sensor micro-ondas, possibilitando assim o ajuste na abertura efetiva da antena. Para o armazenamento e pré-processamento dos dados utilizou-se uma plataforma microcontrolada Arduino. Foi realizada uma etapa de calibração do sensor em ambiente controlado, de forma estática, definindo o campo de visada do sensor. Para avaliar a resposta do sistema sensor, o mesmo foi acoplado em uma plataforma móvel a uma altura de 1,20 m. A plataforma foi gradualmente afastada de uma parede de alvenaria, alvo representativo da superfície do solo, em distâncias desde 0,50 até 4,0 m. Na sequência ao longo destas distâncias e em diferentes posições, foi adicionado um obstáculo composto por uma placa de fibra de madeira prensada (MDF), com dimensões 1,3 m x 1,8 m e 0,03 m de espessura, simulando o dossel das plantas. A FIGURA 2A demonstra o exposto.



FIGURA 2. Em A, arranjo do experimento. Em B, sinal amostrado para calibração do sensor.

Foi utilizada uma modulação de 1560 Hz, FIGURA 2B, para tomadas de distância até o alvo representativo do solo. Para leituras de distâncias com a presença do obstáculo representativo do dossel foi utilizada uma modulação de 500 Hz.

Foram feitas três repetições em condições controladas para cada combinação de posição do sensor, com a presença ou ausência de obstáculos. Para determinar a distância aos alvos o sistema determina o número de batidas do sinal. Para obter a altura da planta o sistema realiza a diferença entre o número de batidas obtidas no sensor de 1560 Hz, referente à distância até o dossel da planta e do sensor de 500 Hz, referente à distância do sensor até o solo conforme demonstrado na FIGURA 3A.

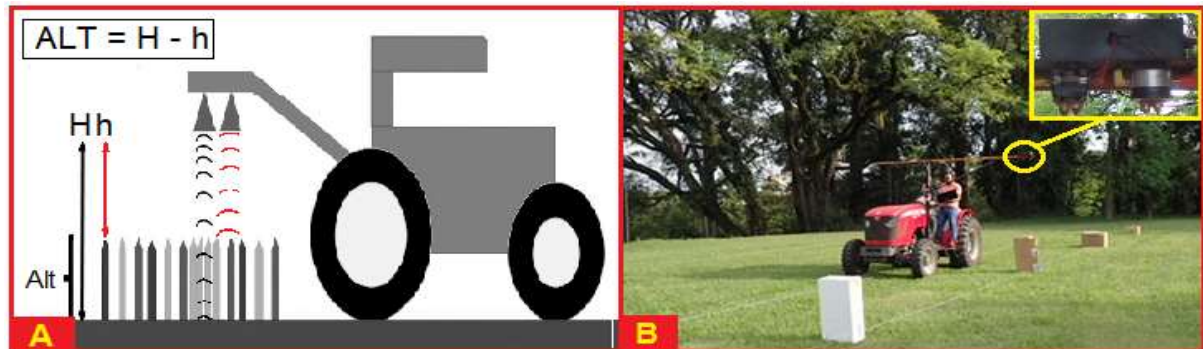


FIGURA 3. Em A, estratégia para obtenção da altura, em B ensaios dinâmicos em campo.

Para análise do sistema sensor em condições dinâmicas, o mesmo foi montado a 2,3 m do solo, em um trator de marca Massey Fergusson, modelo 4283 compacto, com potência de 63 kW. Definiu-se um percurso retilíneo de 50 m ao longo do qual foram dispostos oito alvos compostos por caixas de papelão com diferentes alturas e formatos, simulando as condições de lavoura como área foliar, formato e altura. O arranjo é demonstrado na FIGURA 3B.

O trator se deslocou no trajeto com velocidades de 1,3, 2,0 e 3,1 ms^{-1} . Foram realizadas três repetições e os dados foram coletados de forma automatizada, utilizando a plataforma Arduino. Na FIGURA 4A, temos um exemplo do sistema que foi embarcado, em teste.

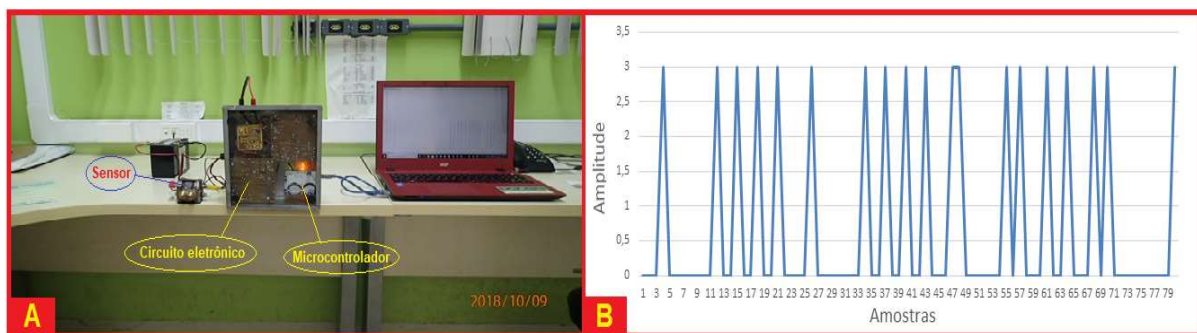


FIGURA 4. Em A, sistema em teste. Em B, sinal de resposta do sensor.

Os dados foram obtidos no domínio do tempo, como visto na FIGURA 4B. Posteriormente os mesmos foram processados em uma planilha eletrônica.

Para que fosse possível fazer a análise do sinal no domínio da frequência, foi utilizado uma Transformada Rápida de Fourier (FFT), que consiste em estimar a diferença de batidas dos sinais presentes nos cenários analisados, fornecendo assim a informação que permite o cálculo de altura dos obstáculos encontrados no percurso definido.

RESULTADOS E DISCUSSÃO: Na etapa de laboratório, para uma modulação de 1560 Hz, e sem obstáculos, FIGURA 5A, notou-se que houve repetibilidade do processo com um pequeno desvio observado nas distâncias até 1 m. O modelo exponencial foi o que permitiu melhor ajuste de regressão, com o coeficiente de determinação de 0,99. Trabalhos realizados por Carr e Hippisley (2011), demonstram que próximo das antenas Tx e Rx, existe uma formação de lóbulos menores de irradiação, o que gera ruídos espúrios, tal característica foi percebida na etapa de calibração do sensor.

Para uma modulação de 500Hz e com obstáculo, FIGURA 5B, em todas as configurações, houve dispersão no processo, com coeficiente de determinação de 0,77. Tal fato pode ser explicado pela alta densidade do MDF, gerando o espalhamento da radiação penetrante, pois quando a onda eletromagnética penetra no dossel da cultura, pode sofrer sucessivas reflexões, descritas como dispersão em volume, que ocorre entre o solo e dossel e consequentemente causa o espalhamento da radiação. Em condições de lavoura tal efeito pode não ocorrer, pois a interferência do obstáculo à radiação penetrante tende a ser menor (KIM et al., 2013).

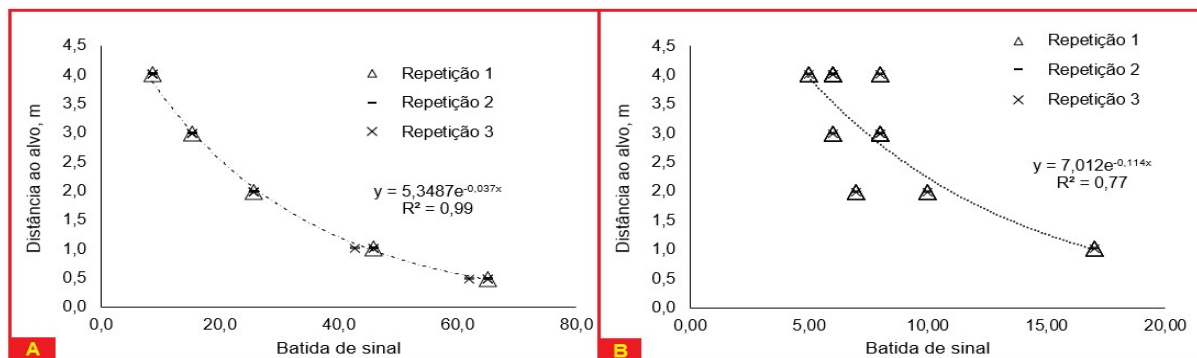


FIGURA 5. Em A, respostas à 1560Hz, sem obstáculo. Em B, à 500 Hz com obstáculo.

No experimento em campo, em condições controladas e para as três velocidades estabelecidas, foram utilizadas caixas com alturas que oscilam entre 0,20 e 1,15 m, dispostas de modo aleatório dentro do percurso estabelecido. Com os dados coletados foram geradas informações que podem ser vistas na TABELA 1.

Analisando a tabela, é possível notar que existe uma influência das características geométricas dos alvos com destaque para a área diretamente exposta à radiação dos sensores, aqueles com maior área de contato fornecem melhores respostas. Também é possível notar que para a velocidade de $1,3 \text{ m s}^{-1}$, houve maior resposta, referente à diferença entre as batidas de sinal, isto ocorreu devido ao maior tempo de exposição do alvo ao campo de atuação do sensor.

Trabalhos realizados por Scheer e Holm (2010), descrevem que para haver maior fidelidade e precisão nas informações o sinal deve ser superior ao ruído, logo com um maior número de amostras também haverá maior integração de ruídos presentes no sinal amostrado.

Na velocidade intermediária de $2,0 \text{ m s}^{-1}$, houve uma atenuação nos valores de resposta, neste caso o tempo de integração entre o sinal de resposta e o ruído foi reduzido, porém ainda existem erros que prejudicam uma melhor precisão nas respostas obtidas.

Para a velocidade de $3,1 \text{ m s}^{-1}$, foram observados os melhores resultados, onde para os alvos com menores alturas, 0,20 m, e 0,23 m houve uma diferença de batidas média de 12,5 e 12,4 respectivamente, já para o maior alvo, com 1,15 m obteve-se uma média de 18,8.

Com relação à precisão, Santos 2007 descreve que para coeficientes de variação menores do que 20%, existe uma média dispersão dos valores e com isso boa precisão dos resultados, o que pode ser observado na TABELA 1.

TABELA 1. Estatística descritiva para a diferença entre o número de batidas de sinal em função das características dos alvos.

	Velocidade	Altura	Dimensão Longitudinal	Dimensão Transversal	Área	Diferença entre batida de sinal		
	(m s ⁻¹)	(m)	(m)	(m)	(cm ²)	Média	Desvio Padrão	C.V. (%)
1°	1,3	0,30	0,45	0,32	1440	16,6	2,8	16,7
2°		0,35	0,37	0,58	2146	18,0	0,5	2,7
3°		0,64	0,25	0,30	700	15,2	0,7	4,5
4°		0,62	0,20	0,35	700	18,5	2,4	13,1
5°		0,35	0,37	0,58	2146	17,8	0,7	3,7
6°		0,20	0,25	0,30	700	16,4	1,6	9,6
7°		0,23	0,35	0,35	1225	17,4	0,2	1,3
8°		1,15	0,18	0,18	324	18,6	0,9	5,0
1°	2,0	0,30	0,45	0,32	1440	12,3	1,4	11,6
2°		0,35	0,37	0,58	2146	13,7	1,5	10,9
3°		0,64	0,25	0,30	700	14,4	5,1	35,6
4°		0,62	0,20	0,35	700	12,8	0,5	3,8
5°		0,35	0,37	0,58	2146	16,4	0,3	2,0
6°		0,20	0,25	0,30	700	12,0	2,1	17,9
7°		0,23	0,35	0,35	1225	13,1	0,7	5,0
8°		1,15	0,18	0,18	324	15,3	0,9	5,8
1°	3,1	0,30	0,45	0,32	1440	13,5	1,7	11,6
2°		0,35	0,37	0,58	2146	15,0	2,5	16,9
3°		0,64	0,25	0,30	700	16,1	2,1	13,3
4°		0,62	0,20	0,35	700	17,8	1,2	8,3
5°		0,35	0,37	0,58	2146	14,9	1,4	9,3
6°		0,20	0,25	0,30	700	12,5	0,2	1,4
7°		0,23	0,35	0,35	1225	12,4	1,8	14,7
8°		1,15	0,18	0,18	324	18,8	2,7	14,5

* Desvio padrão das repetições as diferenças entre batidas de sinal **C.V. – coeficiente de variação das repetições entre as diferenças entre batidas de sinal.

Ressalta-se que em condições de campo existem ruídos espúrios, como interferências eletromagnéticas, vibrações do trator e dos próprios instrumentos. Será necessária uma etapa de identificação das causas prováveis e com isso filtros podem ser implementados para reduzir e mesmo eliminar os ruídos.

Da Silva Rosa et al., (2011) considera que para a devida correção interna dos sistemas de radar, são necessárias integrações das correções externas ao sistema, sendo que estas são baseadas em medições feitas com uso de alvos especiais e que se adequadamente realizadas, podem atenuar o efeito de diversas condições externas que se fazem necessárias para uma eficiente calibração do sistema sensor.

Trabalhos realizados por De Almeida et al., (2018) analisaram o desempenho de um sistema radar de abertura sintética (SAR), na Banda X embarcado em uma plataforma que se deslocava em um campo com percurso conhecido. Segundo os autores, para a devida calibração do Radar, foram utilizados refletores de canto e uma tela de aço, dispostas dentro do percurso construído para a implementação do sistema. Tais materiais possuem alto índice de reflexão e com isso fornecem melhores respostas na etapa de calibração. Os autores também relatam que o procedimento permitiu a correção de ruídos durante a etapa de desenvolvimento e calibração do sistema Radar.

Com as informações da TABELA 1, é possível fazer um comparativo entre as diferenças de batidas de sinal para cada alvo nas três velocidades, que pode ser visto na FIGURA 6.

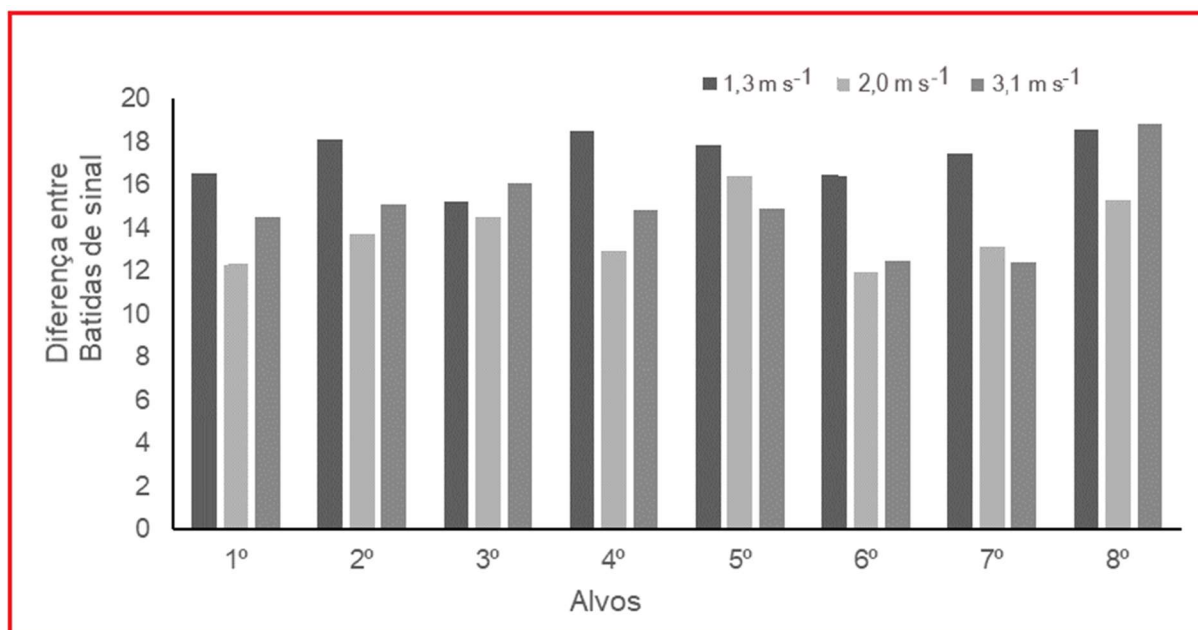


FIGURA 6. Comparação das diferenças de batida de sinal para as três velocidades.

Observando a FIGURA 6, é possível notar que na menor velocidade, ocorreram maiores diferenças de batidas, ambiguidades e menor correlação com as alturas dos alvos, isso devido ao maior tempo de amostragem do sinal para cada alvo. Logo para melhoria do desempenho do sistema, podem ser empregadas técnicas conhecidas como processos adaptativos.

Rouveure, Faure, e Monod, (2003), desenvolveram uma técnica para redução de ruídos e interferências em radares FMCW em operações agrícolas, usando redes neurais de multicamadas, demonstrando melhor desempenho nos resultados quando comparados com àqueles obtidos pela Transformada de Fourier, pois o algoritmo reduz o tempo de processamento do sinal e possui a capacidade de aprender com o meio durante as operações.

Outra técnica proposta recentemente para reduzir os ruídos em Radares FMCW se baseia em um algoritmo de correção de não linearidade, e pode corrigir ruídos encontrados no ambiente, nos dispositivos eletrônicos de geração de sinal ou também na fonte de alimentação do mesmo. Tal algoritmo consiste em fazer uma estimativa através da divisão do sinal de batida em várias sub-bandas e com isso os picos de frequência são computados. A correção também pode ser feita pela extração da informação de fase do sinal analisado, que também fornece informações da distância sensor alvo, onde o sinal amostrado deve satisfazer algumas condições, não sendo aplicável em larguras de Bandas muito maiores que as de referência (ANGHEL et al., 2013).

Logo, para reduzir ambiguidades e ruídos presentes em um sinal de radar, como aqueles que podem ser vistos na FIGURA 6, a janela de amostragem do sinal deve ser reduzida e o comportamento pode ser validado acrescentando-se um ruído branco sintético, que por ser conhecido, pode ser filtrado e com isso a informação é recuperada com melhor qualidade (DE ALMEIDA et al., 2018).

CONCLUSÕES: Foi desenvolvido um sistema radar FMCW de baixo custo com sensibilidade adequada à mensuração de distâncias. Foram posicionados alvos a até quatro metros do sensor que apresentou capacidade de mensurar distâncias entre alvos representativos do topo das plantas e da superfície do terreno, em condições controladas, onde foi possível estabelecer uma forte correlação entre a batida de sinais e a distância sensor alvo.

Em condições dinâmicas foi possível perceber que o sistema apresentou melhor desempenho na velocidade mais alta, o que pode indicar a necessidade de ajuste da taxa de amostragem do sistema, que permitirá a correta integração dos sinais e com isso a redução da relação sinal ruído (SNR) presente nas coletas realizadas.

Uma solução viável seria integrar a velocidade do trator no algoritmo que fornece a diferença de batidas, onde a partir da mudança da velocidade, o algoritmo irá ajustar a taxa de amostragem do sinal coletado, melhorando assim a relação sinal ruído (SNR) do sistema, se adaptando as condições impostas durante as operações agrícolas mecanizadas.

Em trabalhos futuros, para a melhoria dos resultados em condições dinâmicas, também serão implementados refletores de canto em posições estratégicas do percurso em estudo, visando a análise da resposta e correção de interferências detectadas.

Com base nos ruídos detectados na etapa de campo, também poderão ser implementados filtros analógicos, para supressão dos mesmos e, após a análise da resposta dos filtros analógicos, uma etapa de implementação de filtros digitais. Isso deve permitir a melhoria e a acurácia dos dados obtidos e com isso o melhor desempenho e precisão do sistema Radar (FMCW) desenvolvido.

REFERÊNCIAS:

ANGHEL, Andrei et al. FMCW transceiver wideband sweep nonlinearity software correction. In: **2013 IEEE Radar Conference (RadarCon13)**. IEEE, 2013. p. 1-5.

ANGHEL, Andrei et al. Short-range wideband FMCW radar for millimetric displacement measurements. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 52, n. 9, p. 5633-5642, 2014.

CARR, J.; HIPPISEY, G. **Practical Antenna Handbook** 5 ed. McGraw-Hill/TAB Electronics, 2011.

DA SILVA ROSA, Rafael Antonio et al. **Correção radiométrica de imagens de radar de abertura sintética aerotransportado**. 2011.

DE ALMEIDA, Felipe Queiroz et al. Multichannel staggered SAR: System concepts with reflector and planar antennas. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v. 55, n. 2, p. 877-902, 2018.

E. BROWN., M. FINGAS. "Synthetic aperture radar," **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v. 1, p. 217-229, 2013.

FRICKE, Thomas; WACHENDORF, Michael. Combining ultrasonic sward height and spectral signatures to assess the biomass of legume-grass swards. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 99, p. 236-247, 2013.

HUANG, Yanbo et al. Development and prospect of unmanned aerial vehicle technologies for agricultural production management. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 6, n. 3, p. 1-10, 2013.

HOFFMEISTER D., WALDHOFF G., KORRES W., CURDT C.; BARETH G. Crop height variability detection in a single field by multi-temporal terrestrial laser scanning. **Precision Agriculture** 17, 296. 2016.

JIMENEZ-BERNI, Jose A. et al. **High throughput determination of plant height, ground cover, and above-ground biomass in wheat with LiDAR**. *Frontiers in plant science*, v. 9, p. 237, 2018.

KIM, Yihyun et al. Monitoring soybean growth using L-, C-, and X-band scatterometer data. **International journal of remote sensing**, v. 34, n. 11, p. 4069-4082, 2013.

KIM, Y. Identification of FMCW radar in mutual interference environments using frequency ramp modulation. In: **Antennas and Propagation (EuCAP), 2016 10th European Conference on**. IEEE, 2016. p. 1-3.

RAVI, Radhika et al. Implementation of UAV-Based Lidar for High Throughput Phenotyping. In: **IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium**. IEEE, 2018. p. 8761-8764.

ROUVEURE, R., FAURE, P.; MONOD, M. **A microwave distance measurement sensor for agricultural implements.** In: International Conference on Engineering in Agriculture (AGENG). 2002.

ROUVEURE, R., FAURE, P.; MONOD, M. A multi-layer feed-forward perceptron for microwave signals processing. In: **Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS'03. Proceedings. 2003 IEEE International.** IEEE, 2003. p. 3519-3521.

SANTOS, C. Manual de auto-aprendizagem. Estatística Descritiva. Lisboa: **Edições Sílabo**, 2007.

SANTOS, P. H. **Mensuração do porte de plantas com sensor proximal baseado em radar de onda contínua modulada em frequência**, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, ESALQ/USP, Piracicaba, 2019.

SCHEER, J.; HOLM, W. A. **Principles of modern radar.** SciTech Pub., 2010.