



MODELAGEM MATEMÁTICA DOS REQUISITOS DE POTÊNCIA DE GRADES ARADORAS COMERCIAIS

Danielle da Silva Oliveira Martins¹, Lucas Gonçalves Lima¹, Esdras Micael Lima de Souza¹, Claudia Alves de Sousa Muniz¹, Ludimilla Carvalho Serafim de Oliveira¹

¹Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, Brasil

(danielle.oliveira@ufersa.edu.br)

Resumo: O dimensionamento correto do conjunto trator-implemento é estratégico para otimizar a eficiência energética na agricultura. O presente trabalho teve como objetivo analisar as relações entre características construtivas e requisitos de potência de 19 grades aradoras comerciais no mercado brasileiro por meio de estatística multivariada, além de avaliar a acurácia de estimativas teóricas (modelos de Stolf) frente às recomendações dos fabricantes. Coletaram-se dados estruturais de modelos das classes leve, intermediária, pesada e super pesada. Aplicou-se a análise de correlação de Pearson e indicadores de erro (MAE, RMSE, MAPE e índice d de Willmott). A potência recomendada apresentou correlação positiva quase perfeita com o peso ($R = 0,992$; $p < 0,001$) e correlações fortes com diâmetro dos discos ($R = 0,807$) e espaçamento ($R = 0,802$). Na análise de erros, as equações baseadas estritamente na massa (Stolf M1 e M2) subestimaram a demanda energética, apresentando elevados valores de MAPE (30,42% e 44,40%) e viés negativo acentuado devido à margem de segurança industrial. Em contrapartida, o modelo geométrico completo (Stolf M4) demonstrou elevada precisão preditiva, registrando o menor Erro Médio Absoluto (MAE = 13,85 cv) e índice de concordância quase perfeito ($d = 0,980$). Conclui-se que a interação geométrica dos órgãos ativos reflete de forma mais fiel os requisitos de potência do mercado contemporâneo do que a estimativa linear isolada pelo peso bruto estrutural do implemento.

Palavras-chave: Mecanização agrícola; Engenharia agrícola; Correlação de Pearson; Modelagem matemática.

INTRODUÇÃO

O preparo do solo é fundamental para sistemas agrícolas, modificando propriedades físicas e garantindo o estabelecimento de culturas. Entre os implementos utilizados, as grades aradoras destacam-se pela versatilidade em operações de revolvimento e preparo primário. Contudo, a busca por eficiência energética exige o entendimento de como características construtivas (número de discos, diâmetro, espaçamento, massa e largura) influenciam a força de tração e a potência requerida, evitando o sub ou superdimensionamento dos conjuntos.

Embora fabricantes disponibilizem recomendações de potência, os critérios de projeto muitas vezes diferem de modelos matemáticos teóricos da literatura, como os equacionamentos de Stolf. Diante da carência de estudos integrados e da diversidade de modelos no mercado nacional, técnicas estatísticas multivariadas e análises de erro tornam-se essenciais para identificar padrões estruturais e validar a acurácia dos modelos teóricos frente ao cenário comercial.

Assim, o objetivo deste trabalho foi analisar as relações entre características construtivas e requisitos de potência de grades aradoras comerciais via estatística multivariada, avaliando a concordância

entre estimativas teóricas e recomendações de fabricantes, de discos, peso total, espaçamento entre discos, diâmetro dos discos, espessura dos discos e potência recomendada pelo fabricante.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo consistiu em uma análise quantitativa e levantamento documental de 19 modelos comerciais de grades aradoras no mercado brasileiro, englobando as classes leve, intermediária, pesada e super pesada. Coletaram-se dados de número de discos (N), peso total (P_g , kg), espaçamento (E , mm), diâmetro (D , pol), espessura e potência do fabricante ($Pot_Fabricante_cv$). A potência requerida foi estimada por quatro modelos matemáticos de Stolf et al. (1981) e Stolf e Silva (1996):

$$\text{Método (1): } P = 19,50 + 0,0245 P_g$$

$$\text{Método (2): } P = 19,27 + 0,0061 P_g + 1,38 N$$

$$\text{Método (3): } P = \left(\frac{D^{2,967} N^{0,8521}}{1716,7} \right)$$

$$\text{Método (4): } P = \left(\frac{E^{0,7422} D^{1,868} N^{0,8775}}{597,4} \right)$$

A avaliação dos modelos frente às recomendações comerciais foi realizada pelos indicadores de acurácia: Erro Médio Absoluto (MAE), Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), Erro Percentual Médio Absoluto (MAPE), Viés Médio (Bias) e Índice de Concordância de Willmott (d). Aplicou-se a análise de correlação de Pearson ($\alpha = 0,05$) no software Jamovi®.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise de Correlação de Pearson

A matriz de correlação (Tabela 1) revelou associações significativas entre os atributos construtivos e a potência comercial recomendada.

Tabela 1. Matriz de correlações de Pearson entre as variáveis construtivas e modelos de estimativa de potência de grades aradoras comerciais.

Variável	N_Discos	Peso_kg	Espacamento_mm	Diametro_pol	Pot_Fabrica
N_Discos	—	0,517*	0,202	0,233	0,574*
Peso_kg	—	—	0,813*	0,815*	0,992*
Espacamento_mm	—	—	—	0,944*	0,802*
Diametro_pol	—	—	—	—	0,807*

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

O peso total (*Peso_kg*) exibiu uma correlação positiva quase perfeita com a potência indicada pelo fabricante ($R = 0,992$; $p < 0,001$). Cientificamente, isso demonstra que a massa do implemento atua como o principal balizador comercial para a determinação da potência exigida do trator. Sob a ótica da física do solo, o peso é o fator governante para romper a resistência ao cisalhamento e garantir a penetração dos discos.

O diâmetro dos discos ($R = 0,807$) e o espaçamento ($R = 0,802$) também apresentaram forte associação linear com a potência comercial ($p < 0,001$). Elementos geométricos maiores ampliam a seção transversal de solo mobilizada, demandando maior torque e força na barra de tração do trator. Notavelmente, o número de discos isoladamente obteve menor força de correlação ($R = 0,574$; $p = 0,010$), evidenciando que a arquitetura geométrica do implemento (massa/disco) sobrepõe-se à quantidade nominal de órgãos ativos no tocante à demanda de energia.

Validação dos Modelos Matemáticos e Análise de Erros

A análise dos indicadores de erro e do índice de concordância de Willmott (d) revelou

comportamentos estatísticos distintos e de alta relevância científica entre as diferentes abordagens de modelagem energética avaliadas (Tabela 2). Contrapondo-se à hipótese inicial de que equações consolidadas baseadas em parâmetros físicos diretos manteriam acurácia uniforme, os modelos puramente estruturados em função da massa do implemento (Stolf M1 e Stolf M2) apresentaram os maiores desvios em relação às recomendações de mercado. O modelo Stolf M1 (Peso) e o modelo Stolf M2 (Peso + N) registraram os maiores Erros Médios Absolutos (MAE de 37,79 cv e 59,32 cv, respectivamente) e expressivas dispersões residuais, evidenciadas pelos valores elevados de RMSE (59,57 cv e 96,25 cv).

Tabela 2. Indicadores estatísticos de erro e concordância entre a potência recomendada pelos fabricantes e as potências estimadas pelos modelos teóricos de Stolf.

Modelo Teórico	MAE (cv)	RMSE (cv)	MAPE (%)	Viés / Bias (cv)	Índice d de Willmott
Stolf M1 (Peso)	37,79	59,57	30,42%	-37,79	0,876
Stolf M2 (Peso + N)	59,32	96,25	44,40%	-59,32	0,724
Stolf M3 (Diâmetro + N)	14,94	20,41	17,00%	-15,15	0,974
Stolf M4 (Esp. + Diâm. + N)	13,85	18,29	15,78%	-16,52	0,98

ota: MAE = Erro Médio Absoluto; RMSE = Raiz do Erro Quadrático Médio; MAPE = Erro Percentual Médio Absoluto; cv = cavalos-vapor; d = índice de concordância de Willmott. Valores de Viés (Bias) negativos indicam tendência de subestimação do modelo teórico em relação à recomendação do fabricante.

Em contrapartida, os modelos fundamentados em parâmetros geométricos e no arranjo dos discos (Stolf M3 e Stolf M4) demonstraram elevada precisão preditiva. O modelo Stolf M4 (Espaçamento + Diâmetro + N) consolidou-se como o melhor preditor para o cenário atual, registrando o menor Erro Médio Absoluto (MAE = 13,85 cv), menor dispersão (RMSE = 18,29 cv), baixo erro percentual (MAPE = 15,78%) e um índice de concordância de Willmott quase perfeito ($d = 0,980$).

Estes resultados alinham-se com Silva et al. (2021) e Pinheiro et al. (2023), demonstrando que a interação geométrica dos órgãos ativos reflete de forma mais fiel a dinâmica de mobilização da seção transversal do solo do que a massa isolada do implemento. Adicionalmente, as inovações metalúrgicas e o uso de novas ligas de aço na fabricação contemporânea permitem o desenvolvimento de chassis estruturalmente mais leves sem alterar a geometria de corte dos discos (MOLIN et al., 2021; CORTEZ et al., 2023). Isto justifica o enfraquecimento dos modelos lineares de peso (M1 e M2) e valida a robustez estatística das matrizes geométricas (M3 e M4) para prever os requisitos energéticos do mercado atual.

CONCLUSÃO



O peso total da grade aradora comercial é a característica construtiva preponderante e o principal parâmetro de balizamento utilizado pelos fabricantes para a recomendação de potência dos tratores agrícolas no mercado brasileiro.

Diâmetro de discos e espaçamento exercem influência secundária, mas altamente significativa, na demanda de potência, enquanto o número de discos de forma isolada não constitui um preditor robusto de exigência energética.

Os modelos matemáticos clássicos de Stolf baseados na massa mantêm elevada aderência estatística, mostrando-se ferramentas perfeitamente válidas e robustas para o planejamento e pré-dimensionamento de conjuntos trator-implemento na agricultura atual.

REFERÊNCIAS

- ALONÇO, A. dos S. et al. Dinâmica de máquinas agrícolas e demanda energética de implementos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 26, n. 4, p. 285-292, 2022.
- CORTEZ, J. W. et al. Modelagem matemática e requisitos de potência em barra de tração para conjuntos mecanizados contemporâneos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 43, n. 2, p. 115-123, 2023.
- MIALHE, L. G. **Máquinas Agrícolas de Preparo do Solo**. Rio de Janeiro: LTC, 1991.
- MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R. do; COLAÇO, A. F. **Agricultura de Precisão e Mecanização de Impacto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2021.
- PINHEIRO, F. R. et al. Relações geométricas de órgãos ativos de corte e dissipação de energia no preparo primário profunda. **Scientia Agropecuária**, Trujillo, v. 14, n. 1, p. 45-53, 2023.
- ROSA, D. P. et al. Avaliação estatística de modelos preditivos de potência para implementos de discos no mercado nacional. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 52, n. 8, e20210542, 2022.
- SILVA, P. R. A. et al. Eficiência energética e parâmetros construtivos de grades de discos em diferentes classes de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 56, e02314, 2021.
- STOLF, R. et al. Recomendações de potência para subsoladores e grades aradoras em função de parâmetros estruturais. **Boletim Técnico Copersucar**, Piracicaba, n. 15, p. 12-19, 1981.
- STOLF, R.; SILVA, J. R. da. Modelos matemáticos aplicados ao pré-dimensionamento de conjuntos trator-implemento. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 4, n. 3, p. 201-211, 1996.