



Universitat de Lleida

Desenvolupament d'equips per a la mesura d'esforços entre tractors i ormejos agrícoles per a la realització d'assajos en camp

Jordi Pijuan Cases

Dipòsit Legal: L.1440-2015

<http://hdl.handle.net/10803/311796>

ADVERTIMENT. L'accés als continguts d'aquesta tesi doctoral i la seva utilització ha de respectar els drets de la persona autora. Pot ser utilitzada per a consulta o estudi personal, així com en activitats o materials d'investigació i docència en els termes establerts a l'art. 32 del Text Refós de la Llei de Propietat Intel·lectual (RDL 1/1996). Per altres utilitzacions es requereix l'autorització prèvia i expressa de la persona autora. En qualsevol cas, en la utilització dels seus continguts caldrà indicar de forma clara el nom i cognoms de la persona autora i el títol de la tesi doctoral. No s'autoritza la seva reproducció o altres formes d'explotació efectuades amb finalitats de lucre ni la seva comunicació pública des d'un lloc aliè al servei TDX. Tampoc s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant als continguts de la tesi com als seus resums i índexs.

ADVERTENCIA. El acceso a los contenidos de esta tesis doctoral y su utilización debe respetar los derechos de la persona autora. Puede ser utilizada para consulta o estudio personal, así como en actividades o materiales de investigación y docencia en los términos establecidos en el art. 32 del Texto Refundido de la Ley de Propiedad Intelectual (RDL 1/1996). Para otros usos se requiere la autorización previa y expresa de la persona autora. En cualquier caso, en la utilización de sus contenidos se deberá indicar de forma clara el nombre y apellidos de la persona autora y el título de la tesis doctoral. No se autoriza su reproducción u otras formas de explotación efectuadas con fines lucrativos ni su comunicación pública desde un sitio ajeno al servicio TDR. Tampoco se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al contenido de la tesis como a sus resúmenes e índices.

WARNING. Access to the contents of this doctoral thesis and its use must respect the rights of the author. It can be used for reference or private study, as well as research and learning activities or materials in the terms established by the 32nd article of the Spanish Consolidated Copyright Act (RDL 1/1996). Express and previous authorization of the author is required for any other uses. In any case, when using its content, full name of the author and title of the thesis must be clearly indicated. Reproduction or other forms of for profit use or public communication from outside TDX service is not allowed. Presentation of its content in a window or frame external to TDX (framing) is not authorized either. These rights affect both the content of the thesis and its abstracts and indexes.

14. CONCLUSIONS I TREBALL FUTUR

14.1. Conclusions

Es presenten en aquest capítol les conclusions a les que s'ha arribat després del desenvolupament i de la validació dels dinamòmetres estudiats en aquesta tesi.

14.1.1. Conclusions de l'estat de l'art en dinamòmetres per a tractors i ormejos

De la revisió de l'estat de l'art, s'identifica que en tots els dinamòmetres de múltiples components de mesura, d'una manera o d'una altra, es manifesta l'efecte de la sensibilitat creuada, de manera que apareixen senyals en les mesures de les direccions perpendiculars quan s'aplica una força en una direcció concreta. Aquest és un dels factors que condiciona el desenvolupament, el disseny i la construcció d'aquests equips, per tal de minimitzar aquest efecte.

Pel que fa als dinamòmetres per a enganxalls de tres punts basats en dissenys de tipus marc o doble marc, en la modelització matemàtica per a l'obtenció de les mesures de força desitjades, en general es dedica poca atenció a l'efecte que pot provocar el dinamòmetre en el comportament del tractor i l'ormeig, ja que es considera que el pes del dinamòmetre o els canvis en la geometria del conjunt no afecten a la mesura. Alguns autors assumeixen que aquests factors afecten a la mesura, però no realitzen cap estudi que valori i quantifiqui aquests aspectes. Per a aquests autors, això justifica la modificació dels propis enganxalls de tres punts del tractor per instal·lar-hi els elements de mesura en comptes d'utilitzar un disseny basat en marcs.

En referència als dissenys per a dinamòmetres per a enganxalls d'un punt, cal destacar que en comptades ocasions aquests es desenvolupen per a mesurar les tres components de força en el punt d'unió de l'enganxall. Per als dinamòmetres que permeten determinar aquestes tres components de força, aquests tenen dissenys mecànics bastant complexos condicionats pel mètode de mesura elegit, que a més, impliquen un canvi en la geometria de l'enganxall que afecta al comportament del conjunt.

14.1.2. Conclusions del desenvolupament del dinamòmetre tripuntal

Amb el model mecànic desenvolupat del dinamòmetre tripuntal és possible determinar les forces als diferents punts d'ancoratge del dinamòmetre, relacionades únicament i directament amb les forces a les cèl·lules de càrrega d'aquest equip. També s'arriba al model per determinar el torsor d'enllaç entre els diferents components del conjunt tractor-dinamòmetre-ormeig, calculats directament a partir de les mesures de les diferents cèl·lules de càrrega. Cal destacar que, en aquesta modelització, donat el disseny mecànic de doble marc, es distingeix clarament entre les forces als bolons de mesura i les forces als punts d'unió al tractor i a l'ormeig, i que és un aspecte que no

contemplen altres autors. També es fa distinció entre els torsors d'enllaç corresponents a la unió de l'ormeig al dinamòmetre i d'aquest al tractor.

Amb aquesta modelització on es distingeixen les mesures al tractor i a l'ormeig es possible identificar l'efecte del dinamòmetre en el comportament del conjunt tractor-ormeig i preveure les càrregues que hi hauria a l'enganxall del tractor si no hi hagués el dinamòmetre instal·lat. En l'estudi analític realitzat amb diferents casos particulars per analitzar l'afectació del dinamòmetre sobre el tractor, es comprova que el fet d'instal·lar el dinamòmetre entre el tractor i l'ormeig provoca un increment en les reaccions normals a les rodes del voltant del 3% a causa del propi pes d'aquest. També es comprova que el dinamòmetre provoca un canvi en el repartiment de les càrregues normals en els eixos del tractor, que implica una càrrega més gran en l'eix posterior, i que en els casos més importants s'arriba a variacions del 4,5% respecte al cas sense dinamòmetre. Amb aquestes variacions, i tot i que l'afectació del dinamòmetre en el comportament del tractor es considera poc significativa, serà convenient tenir-la en compte en estudis més acurats, sobretot en assajos en camp on es pretén analitzar el comportament del tractor.

14.1.3. Conclusions de la validació experimental del dinamòmetre tripuntal

Per al dinamòmetre tripuntal s'ha portat a terme una validació extensa i amb multitud de casos de força en diferents direccions i punts d'aplicació. En l'anàlisi del comportament dels bolons de mesura i en la validació del model teòric desenvolupat pel dinamòmetre, en alguns casos s'observen desviacions significatives entre el torsor d'enllaç teòricament aplicat i el mesurat, i el mateix s'observa en els bolons de mesura, on les desviacions segueixen certs patrons i s'identifiquen també sensibilitats creuades. En algun cas particular aquestes desviacions poden arribar al 10% respecte als valors en fons d'escala de les components del torsor d'enllaç i dels bolons de mesura.

Com a possibles causes d'aquestes desviacions, a part dels possibles desajustos en la direcció i la magnitud de la força aplicada en l'assaig experimental, es considera un possible desajust del comportament dels bolons de mesura, desviacions en el muntatge dels components del dinamòmetre, fregaments interns en les unions mòbils i l'efecte de les deformacions en els components del dinamòmetre. Aquests efectes poden provocar repartiments diferents de les càrregues en els bolons de mesura respecte al cas ideal, amb canvis en la sensibilitat esperada per a cada boló i sensibilitats creuades.

Per a la millora de la mesura amb el dinamòmetre tripuntal, primerament s'ha proposat un model d'ajust per a cada boló de mesura de forma individualitzada. Amb aquest model s'aconsegueix ajustar cada boló de mesura a un cas particular però no soluciona la problemàtica del repartiment diferent de càrregues respecte al cas ideal ni la sensibilitat creuada, ja que en aquest ajust no es contemplen els efectes sobre els altres bolons del dinamòmetre, on aquests acaben afectant al càlcul del torsor d'enllaç mesurat a l'ormeig.

Una de les aportacions d'aquesta tesi és que es proposen models d'ajust experimental que relacionen directament els senyals dels bolons de mesura amb el torsor d'enllaç a l'ormeig. Donat el comportament lineal de la resposta de cada boló i també del model

mecànic del dinamòmetre, mitjançant un càlcul de regressió múltiple utilitzant les dades dels casos de càrrega assajats, s'han desenvolupat un conjunt de models que relacionen les components de força i moment en la unió del dinamòmetre amb l'ormeig en funció dels senyals dels bolons de mesura. Aquesta metodologia s'aplica sobretot amb l'objectiu de compensar els efectes de repartiment diferent de les forces i les sensibilitats creuades entre els diferents bolons de mesura.

Amb aquests models d'ajust s'aconsegueix millorar significativament la precisió en les mesures de les components de torsor d'enllaç a l'ormeig i s'obtenen millors resultats que amb el model basat en ajustar individualment el comportament dels bolons de mesura i els càlculs teòrics per a la determinació de les components de força i moment a l'ormeig. Com a conclusió, cal destacar que per aplicar aquest mètode d'ajust és convenient realitzar multitud d'assajos, per tal d'analitzar globalment tot el conjunt del dinamòmetre en múltiples estats de càrrega.

14.1.4. Conclusions del desenvolupament dels enganxalls dinamomètrics

En aquesta tesi s'han desenvolupat i construït els prototipus d'un conjunt de dinamòmetres per a enganxalls d'un punt de concepció mecànica senzilla, basada en enganxalls comercials i normalitzats, on la determinació de la força al punt d'unió es realitza mitjançant mesures amb ponts de galgues extensomètriques. Aquests dinamòmetres són fàcilment substituïbles en els ormejos que utilitzin els mateixos tipus d'enganxalls de referència.

Mitjançant les simulacions per elements finits realitzades en la fase de disseny i desenvolupament es comprova que amb els enganxalls originals les deformacions són molt petites, sobretot per a la component longitudinal de força, i per tant també la sensibilitat dels ponts de mesura per a aquesta component. Per a la millora de la sensibilitat, s'ha mecanitzat un forat posterior per buidar interiorment la llança de l'enganxall, amb l'objectiu d'incrementar les deformacions en els punts on s'instal·len les galgues extensomètriques.

En el desenvolupament d'aquests prototipus també es plantegen dues configuracions diferents de ponts de mesura amb galgues extensomètriques per identificar possibles comportaments diferenciats, on un d'aquests dinamòmetres es basa en utilitzar 2 graelles de mesura per pont i els altres dos es basen en utilitzar ponts complets amb 4 graelles de mesura per pont.

Per a l'obtenció dels valors de les components longitudinal, transversal i vertical de força al punt d'unió de l'enganxall es desenvolupa un model matemàtic que relaciona aquestes components amb els senyals mesurats pels ponts de galgues. Per a aquesta modelització, s'han hagut de fer certes consideracions, donada la geometria no regular a causa de les cares inclinades en la llança de l'enganxall, i també a la disposició final de les graelles de mesura. Les simulacions realitzades per elements finits per a la validació d'aquest model teòric mostren que aquest s'adapta raonablement bé. Tot i això, s'identifiquen certes desviacions en les components a mesurar i sensibilitats creuades, que en alguns casos concrets poden arribar a superar el 10%, atribuïbles a les consideracions realitzades en el desenvolupament d'aquest model teòric.

14.1.5. Conclusions de la validació experimental dels enganxalls dinamomètrics

Per a la validació del funcionament dels enganxalls dinamomètrics i del model teòric s'ha realitzat un conjunt d'assajos experimentals amb nombrosos estats de càrrega. En aquesta validació s'observen sensibilitats creuades i errors significativament majors que en les simulacions, sobretot en els ponts de mesura per a la component longitudinal de força, que són molt sensibles a les càrregues vertical i transversal. Els resultats obtinguts conclouen que el model teòric no és adequat per a determinar les components de força. Aquests errors són majors en les configuracions en pont complet, però l'anàlisi de dades experimentals i les simulacions per elements finits no permet atribuir a aquest aspecte la diferència en el comportament.

S'han analitzat possibles causes d'aquest comportament amb elevada sensibilitat creuada i es conclou que el disseny dels enganxalls dinamomètrics és molt sensible a desajustos en la geometria d'aquests i a possibles desviacions en la mesura de la deformació en cada graella de mesura. L'efecte de les desviacions en el mecanitzat del forat posterior realitzat als enganxalls provoca que la secció d'estudi no sigui simètrica, i fa que els ponts de mesura de l'esforç axial no compensin adequadament l'efecte del moment flector, cosa que provoca aquesta sensibilitat creuada important. A aquest aspecte s'hi suma l'efecte que les deformacions degudes a la component longitudinal de força són significativament més reduïdes que les de les altres components.

Un cop identificats aquests errors entre el cas ideal i el real, es realitza un ajust en múltiples variables per determinar el model que relacioni els senyals de cada pont de mesura amb cada una de les tres components de força al punt d'unió de l'enganxall. Amb models d'ajust experimental, on per a la mesura de cada component de força hi intervenen tots els senyals mesurats, s'aconsegueix compensar l'efecte de la sensibilitat creuada i obtenir un equip de mesura amb uns valors d'error acceptables en tot l'interval de combinacions de forces assajades.

El comportament lineal dels diferents ponts de mesura permet que, encara que les sensibilitats creuades siguin importants, mitjançant un ajust de múltiples variables es pugui ajustar el comportament del dinamòmetre de forma adequada, i tot i que la sensibilitat creuada és un aspecte a evitar, amb un ajust d'aquest tipus es pot compensar el seu efecte en les mesures.

14.1.6. Conclusions del desenvolupament de la instrumentació per als assajos en camp

En aquesta tesi s'han efectuat assajos en camp amb el dinamòmetre tripuntal, on es demostra la seva funcionalitat en la mesura dels esforços entre el tractor i l'ormeig en camp. Amb les dades obtingudes en aquests assajos en camp es disposen tant de les mitjanes de les forces en intervals de temps, per analitzar el comportament funcional de l'ormeig, com dels valors pic amb la seva variabilitat, per avaluar-ne la resistència estructural.

També tot l'equipament d'adquisició de dades i la programació d'aquest compleixen amb els requeriments establerts i permeten enregistrar les dades i visualitzar-les per

pantalla mitjançant una interfície gràfica durant l'assaig. Aquest també permet l'adquisició de dades d'altres sensors i equips juntament amb el dinamòmetre tripuntal.

Un aspecte detectat en els assajos en camp que cal destacar és la importància de les inclinacions del dinamòmetre respecte al tractor i a l'ormeig, que depenen del muntatge d'aquest en el conjunt i del nivell d'elevació de l'enganxall tripuntal. També és d'importància l'angle de capcineig i de balanceig del tractor degut a la inclinació del terreny. Aquests factors condicionen la mesura de les components de força i moment en les unions, i és un factor a tenir en consideració per obtenir mesures representatives.

14.2. Treball futur

A continuació es presenten algunes tasques i estudis que, després de la realització d'aquesta tesi, es plantegen com a convenients per a avançar en la millora d'aquests equips, així com la realització de nous desenvolupaments i modificacions en els equips d'estudi.

14.2.1. Treball futur per al dinamòmetre tripuntal

El dinamòmetre tripuntal és un equip plenament funcional i no requereix de noves tasques per a la seva posada a punt. Simplement, i com a comprovació, una possible tasca seria desmuntar els bolons de mesura del dinamòmetre per tal de calibrar-los i identificar si hi ha hagut derives en el comportament respecte a les especificacions del fabricant. Tot i això, aquesta tasca no és imprescindible ja que els models basats en ajust experimental per a la mesura directa del torsor d'enllaç a partir dels senyals dels bolons de mesura ja compensen aquestes possibles desviacions.

14.2.2. Treball futur per als enganxalls dinamomètrics

Una de les tasques pendents per als enganxalls dinamomètrics és realitzar un estudi per determinar la influència de les imprecisions en la fabricació i quantificar l'efecte d'aquestes, amb l'objectiu d'ampliar l'estudi ja desenvolupat per identificar i posar de manifest la importància de les desviacions de la geometria d'estudi en els errors en la mesura.

Donades les desviacions obtingudes en les mesures en aquests enganxalls dinamomètrics, una opció consisteix en construir una segona versió dels prototipus on es procuri assolir una major precisió en la fabricació i es controli millor el procés de disseny i de mecanitzat. Una altra opció consisteix en proposar un nou disseny per a aquests dinamòmetres que millori la sensibilitat i la precisió, sobretot en la mesura de la component longitudinal de força, i que a la vegada la sensibilitat creuada sigui reduïda.

Per últim, cal també realitzar assajos en camp per a la validació del funcionament d'aquests enganxalls dinamomètrics per a ormejos remolcats, amb l'objectiu de validar-ne la funcionalitat.

14.2.3. Treball futur per a la instrumentació per als assajos en camp

En la realització dels assajos en camp, un dels aspectes detectats és la conveniència d'establir uns procediments en el desenvolupament d'aquest. Aquests consistirien en realitzar les mesures de les cotes necessàries per als posteriors càlculs, així com determinar les masses del tractor i de l'ormeig analitzat, el llast utilitzat i el repartiment del pes en els eixos del tractor. També és convenient determinar clarament les condicions d'operació del tractor, com les marxes seleccionades, el règim del motor o el control de profunditat a l'enganxall tripuntal. Per últim, s'ha d'analitzar en detall i seleccionar la freqüència d'adquisició de dades adequada en funció de l'objectiu de l'assaig.

Una altra de les tasques pendents és realitzar proves en camp per validar el funcionament dels inclinòmetres i analitzar l'efecte tant de la sensibilitat creuada com de les oscil·lacions en les dades aportades per aquests sensors.

Per tal d'ampliar les possibilitats de tota la instrumentació i poder estudiar més aspectes sobre el comportament del tractor i de l'ormeig, altres variables interessants a mesurar serien el lliscament de les rodes, el consum de combustible o el règim de funcionament i el parell del motor. Moltes d'aquestes mesures, en els tractors moderns, és possible obtenir-les a partir del sistema de comunicació CAN del tractor. També existeix la possibilitat d'instal·lar acceleròmetres per tal de realitzar estudis de vibracions i analitzar efectes dinàmics. Amb tota aquesta informació, amb la corresponent adaptació de l'equip d'adquisició de dades, es podrien realitzar estudis detallats sobre el balanç d'energia i els fluxos de potència en el conjunt, la mesura d'aspectes com l'eficiència en la tracció, o bé estudiar el comportament del conjunt en funció del sòl o de les diverses condicions d'operació del tractor.

15. REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- [1] Upadhyaya, S.K.; Kemble, L.J.; Collins, N.E.; Camargo, F.A. Jr. Accuracy of Mounted Implement Draft Prediction Using Strain Gages Mounted on Three-Point Linkage System. *American Society of Agricultural Engineers 0001-2351/85/2801-0040*. 1985.
- [2] Khan, J.; Godwin, R.J.; Kilgour, J.; Blackmore, B.S.; Design and Calibration of a Direct Mounted Strain Gauged Lower Links System for Measurement of Tractor-Implement Forces. *Journal of Engineering and Applied Sciences, vol. 1 no. 1, june 2006*. 2006.
- [3] Reid, J.T.; Carter, L.M.; Clark, R.L.; Draft Measures with a Three-Point Hitch Dynamometer. *Society of Agricultural Engineers 0001-2451/85/2801-0089. Transactions of the ASAE*.1985.
- [4] Bowers, C.G. Jr.; Tillage Draft and Energy Measurements for Twelve Southeastern Soil Series. *American Society of Agricultural Engineers 0001-2351/89/3205-1492. Transactions of the ASAE*. 1989.
- [5] Scholtz, D.C.; A Three-Point Linkage Dynamometer for Restrained Linkages. *J. Agric. Engng. Res (1966) 11 (1) 33-37*. 1966.
- [6] Al-Jalil, H.F.; Khdair, A.; Mukahal, W.; Design and performance of an adjustable three-point hitch dynamometer. *Soil and Tillage Research, 62(3-4), 153-156*. 2001.
- [7] Alimardani, R.; Fazel, Z.; Akram, A.; Mahmoudi, A.; Varnamkhasti, M. G.; Design and Development of a three-point hitch dynamometer. *Journal of Agricultural Technology. 4(1): 37 – 52*. 2008.
- [8] O'Dogherty, M.J.; A Tri-axial Dynamometer for Soil Trough Measurements of Forces on Soil Working Components. *J. Agric. Engng Res. (1986) 34, 141-147*. 1986.
- [9] Johnson, C.E.; Voorhees, W.B.; A Force Dynamometer for Three-Point Hitches. *Transactions of the ASAE-1979*. 1979.
- [10] Garner, T.H.; Dodd, R.B.; Wolf, D.; Peiper U.M.; Force Analysis and Application of a Three-Point Hitch Dynamometer. *American Society of Agricultural Engineers 0001-2351/88/3104-1047*. 1988.
- [11] McLaughlin, N.B.; Patterson, B. S.; Burt, S D.; Effect of load fixture design on sensitivity of an extended octagonal ring (EOR) transducer. *Canadian Biosystems Engineering, vol.54*. 2012.

- [12] O'Dogherty, M.J.; A Dynamometer to Measure the Forces on a Sugar Beet Topping Knife. *J. Agric. Engng Res.* (1975) 20,339-345. 1975.
- [13] Khan, J.; Godwin, R.J.; Kilgour, J.; Blackmore, B.S.; Design and Calibration of a Bi-axial Extended Octagonal Ring Transducer System for the Measurement of Tractor-Implement Forces. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 2 no. 1, feb 2007. 2007.
- [14] Abbaspour-Gilandeh, Y.; Haghghat-Shishvan, S.; Extended Octagonal Ring Transducers for Measurement of Tractor-Implement Forces. *Instruments and Experimental Techniques*, 2011, Vol. 54, No. 1, pp. 136-140. 2011.
- [15] Godwin, R.J.; An Extended Octagonal Ring Transducer for Use in Tillage Studies. *J. agric. Engng Res.* 20, 347-352. 1975.
- [16] Pitla, S.K.; Wells, L.G.; Shearer, S.A.; Integration of an Extended Octagonal Ring Transducer and Soil Coulterometer for Identifying Soil Compaction. *Applied Engineering in Agriculture* 25(5): 647-652, *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 2009.
- [17] Chen, Y.; McLaughlin, N.B.; Tessier, S.; Double extended octagonal ring (DEOR) drawbar dynamometer. *Soil & Tillage Research* 93 (2007) 462-471. 2007.
- [18] Al-Janobi, A.; Al-Suhaibani, S.A.; Performance of a Three Point Linkage Implement Depth Transducer. *Misr. J. Ag. Eng.* 13 (3): 545-557. 1996.
- [19] Kheiralla, A.F.; Yahya, A.; Zohadie, M.; Ishak, W.; Design and Development of a Three-Point Hitch Dynamometer for an Agricultural Tractor. *AJSTD Vol. 20 Issue 3&4 pp 271-288*. 2003.
- [20] Godwin, R.J.; Reynolds, A.J.; O'Dogherty, J.M.; Al-Ghazal, A.A.; A Triaxial Dynamometer for Force and Moments Measurements on Tillage Implements. *J. Agric. Engng Res.* (1993) 55, 189-205. 1993.
- [21] Nalavade, P.P.; Salokhe, V.M.; Niyampa, T.; Strain node identification by FEM and measurement of disc forces by double extended octagonal ring transducer. *Journal of Food, Agriculture & Environment Vol.8 (2): 730 - 735*. 2010.
- [22] McLaughlin, N.B.; Correction of an Error in Equations for Extended Ring Transducers. *Transactions of the ASAE vol. 39(2):443-444*. 1996.
- [23] Chaplin, J.; Lueders, M.; Zhao, Y.; Three-Point Hitch Dynamometer Design and Calibration. *American Society of Agricultural Engineers 0883-8542/87/0301-0010*. 1987.
- [24] Smith, L.A.; Barker, G.L.; Equipment to Monitor Field Energy Requirements. *Transactions of the ASAE 1556-1559*. 1982.

- [25] McLaughlin, N.B.; Heslop, L.C.; Buckley, D.J.; St. Amour, G.R.; Compton, B.A.; Jones, A.M.; Van Bodegom, P.; A General Purpose Tractor Instrumentation and Data Logging System. *American Society of Agricultural Engineers 0001-2351 / 93 / 3602-0265*. 1993.
- [26] Bentaher, H.; Hamza, E.; Kantchev, G.; Maalej, A.; Arnold, W.; Three-point hitch-mechanism instrumentation for tillage power optimization. *Biosystems Engineering, 100, 24-30*. 2008.
- [27] Cupera, J.; Bauer, F.; Severa, L.; Tatícek, M.; Analysis of force effects measured in the tractor three-point linkage. *Res. Agr. Eng., 57: 79-87*. 2011.
- [28] Turner, R.J.; A simple System for Determining Tractive Performance in the Field. *ASAE/CSAE Meeting Presentation 93-1574*. 1993.
- [29] Askari, M.; Komarizade, M.K.; Nikbakht, A.M.; Nobakht, N.; Teimourlou, R.F.; A novel three-point hitch dynamometer to measure the draft requirement of mounted implements. *Res. Agr. Eng. Vol.57, 2001, no. 4:128-136*. 2011.
- [30] Andrade P.; Upadhyaya, S. K.; Sakai, K.; Variability in Draft Data Observed During Tillage. *ASAE Annual International Meeting*. 2003.
- [31] Thomson, N. P.; Shinnars, K.J.; A Portable Instrumentation System for Measuring Draft and Speed. *American Society of Agricultural Engineers 0883-8542/89/0502-0133*. 1989.
- [32] Collins, T.S.; Loads in Tractor Linkages when Transporting Rear-Mounted Implements: Development of Modelling and Measurement Techniques. *J. agric. Engng Res. 49, 165-188*. 1991.
- [33] Pang, T.; Instrumentation to Measure FWDA Tractor Performance. *Tesi Doctoral*. 1989.
- [34] Singh, C.D.; Singh, R.C.; Computerized instrumentation system for monitoring the tractor performance in the field. *Journal of Terramechanics 48 (2011) 333-338*. 2011.
- [35] Palmer, A.L.; Development of a Three-Point-Linkage Dynamometer for Tillage Research. *J. agric. Engng Res. (1992) 52, 157-167*. 1992.
- [36] Knechtges, H.; Measuring devices equipment for the implementation of field tests, taking into consideration the particular requirements of developing countries. *Institute Fur Landtechnik, Giesen*. 1992.
- [37] Tsiropoulos, Z.; Fountas, S.; Gemtos, T.; Gravalos, I.; Paraforos, D.; Management information system for spatial analysis of tractor-implement draft forces. *EPCA Precision agriculture '13 349-356*. 2013.

- [38] Al-Suhaibani, S.A.; Ghaly, A.E.; Effect of Plowing Depth of Tillage and Forward Speed on the Performance of a Medium Size Chisel Plow Operating in Sandy Soil. *Americal Journal of Agricultural and Biological Sciences* 5 (3):247-255. 2010.
- [39] Agüera, J.; Perez-Ruiz, M.; Carballido, J.; Gil, J.A.; Soil compaction sensor for site-especific tillage: design and assessment. *EPCA Precision agriculture '13* 49-56. 2013
- [40] Girma, G.; Multicomponent Dynamometer for Measurement of Forces on Plough Bodies. *J. agric. Engng Res. (1989)* 42, 85-96. 1989.
- [41] Owende, P.M.O.; Ward, S.M.; Characteristic Loading of Light Mouldboard Ploughs at Slow Speeds. *Journal of Terramechanics*, 33, 1, 29-53, 1996. 1996.
- [42] Godwin, R.J.; Magalhaes, P.S.G.; Miller, S.M.; Fry, R.K.; Instrumentation to Study Systems and Vertical Dynamic Behaviour of Soil-engaging Implements. *J. agric. Engng Res. (1987)* 36, 301-310. 1987.
- [43] Kasisira, L.L.; du Plessis, H.L.M.; Energy optimization for subsoilers in tandem in a sandy clay loam soil. *Soil & Tillage Research* 86 (2006) 185-198. 2006.
- [44] Owen, G.T.; Drummond, H.; Cobb, L.; Godwin, R.J.; An Instrumentation System for Deep Tillage Research. *Transactions of the ASAE. American Society of Agricultural Engineers* 0001-2351/87/3006-1578. 1987.
- [45] Hann, M.J.; Giessibl, J.; Force Measurements on Driven Discs. *J. agric. Engng Res. (1998)* 69,149-157. 1998.
- [46] Nalavade, P.P.; Salokhe, V.M.; Niyampa, T.; Soni, P.; Performance of Free Rolling and Powered Tillage Discs. *Soil & Tillage Research* 109 (2010) 87-93. 2010.
- [47] Harral, B.B.; Chisholm, C.J.; Chestney, A.A.W.; Laboratory Simulation of Service Loading on a Rotary Cultivator. *J. agric. Engng Res. (1985)* 32, 185-193. 1985.
- [48] Sahu, R.K.; Raheman, H.; An approach for draft prediction of combination tillage implements in sandy clay loam soil. *Soil & Tillage Research* 90 (2006) 145-155. 2006.
- [49] Al-Suhaibani, S.A.; Al-Janobi, A.; An Instrumentation System for Measuring Field Performance of Agricultural Tractors. *Mirs. J. Ag. Eng.* 13 (3):516-528. 1996.
- [50] Al-Janobi, A.; A Data-acquisition System to Monitor Performance of Fully Mounted Implements. *J. Agric. Engng Res. (2000)* 75, 167-175. 2000.

- [51] Al-Suhaibani, S.A.; Al-Janobi, A.; Draught Requirements of Tillage Implements Operating on Sandy Loam Soil. *J. agric. Engng Res.* (1997) 66, 177-182. 1997.
- [52] Al-Suhaibani, S.A.; Al-Janobi, A.A.; Al-Majhadi, Y.N.; Tractors and Tillage Implement Performance. *Paper No. 06-129 CSBE/SCGAB 2006 Annual Conference, 06-129, Edmonton Alberta.* 2006.
- [53] Al-Suhaibani, S.A.; Al-Janobi, A.A.; Al-Majhadi, Y.N.; Development and Evaluation of Tractors and Tillage Implements Instrumentation System. *American J. Of Engineering and Applied Sciences* 3 (2): 363-371. 2010.
- [54] Al-Janobi, A.A.; Wahby, M.F.; Aboukarima, A.M.; Influence of Chisel Plow Shank Shape on Horizontal and Vertical Force Requirements. *Agricultural Sciences*, 7(1): 13-19 (2002). 2002.
- [55] Al-Suhaibani, S.A.; Al-Janobi, A.; Ghaly, A.E.; Determination of Kinetic Parameters of a Super Heavy Chisel Plow Under Various Operating Conditions. *America Journal of Applied Sciences* 7 (8): 1148-1156, 2010. 2010.
- [56] Ortiz-Cañavate, J.; Tractores: Técnica y Seguridad, 2a edición, Madrid. Ediciones Mundi-Prensa. 2012.
- [57] Keen, A.; Ward, J.; Goldwin, R.; Cooper, S.; Hall, N.; Improvements to the Tractive Efficiency of Agricultural Tractors Carrying out Cultivators. *2009 ASABE Annual International Meeting.* 2009
- [58] Younis, S.M.; Elashry, E.S.R.; Bahnasy, A.F.; Elsybaee, I.M.; Development a local system for measuring tractors performance. *Misr J. Ag. Eng.*, 27(1): 34-53. 2010.
- [59] Márquez, L.; Tractores Agrícolas: Tecnología y utilización. B&H Editorial. 2012.
- [60] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Ahorro de Combustible en el Tractor Agrícola. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. 2005.
- [61] Zhang, N.; Chancellor, W.. Automatic Ballast Position Control for Tractors. *American Society of Agricultural Engineers* 0001-2351/89/3204-1159. 1989.
- [62] Gee-Clough, D.; Pearson, G.; McAllister, M.; Ballasting Wheeled Tractors to Achieve Maximum Power Output in Frictional-Cohesive Soils. *J. agric. Engng Res.* (1982) 27, 1-19. 1982.
- [63] Evans, M. D.; Clark, R.L.; Manor, G.; An Improved Traction Model for Ballast Selection. *American Society of Agricultural Engineers* 0001-2351/91/3403-0773 vol, 34(3). 1991.
- [64] Pranav, P.K.; Pandey, K.P.; Computer simulation of ballast management for agricultural tractors. *Journal of Terramechanics* 45 (2008) 185-192. 2008.

- [65] Molari, G.; Bellentani, L.; Guarnieri, A.; Walker, M.; Sedoni, E.; Performance of an agricultural tractor fitted with rubber tracks. *Biosystems engineering III (2012)* 57-63. 2012.
- [66] Cowell, P.A.; Len, S.C.; Field Performance of Tractor Draught Control System. *J. Agric. Engng Res. (1967) 12(3)* 205-221. 1967.
- [67] Cowell, P.A.; Sial, F.S.; A Theory for the Dynamic Behaviour of Mouldboard Ploughs During Penetration. *J. Agric. Engng Res. (1976) 21*, 313-323. 1976.
- [68] Crolla, D.A.; Pearson, G.; The Response of Tractor Draught Controls to Random Variations in Draught. *J. Agric. Engng Res. (1975) 20*, 181-197. 1975.
- [69] Crolla, D.A.; Effect of Cultivation Implements on Tractor Ride Vibration and Implications for Implement Control. *J. agric. Engng Res. (1976) 21*, 247-261. 1976.
- [70] Kocher, M.F.; Summers, J.D.; Design of Drawbar Transducers for Measuring Dynamic Forces. *Transactions of the ASAE, American Society of Agricultural Engineers 0001-2351/87/3001-00700*. 1987.
- [71] Freeland, R.S.; Tompkins, F.D.; Wilhelm, L.R.; Sarten, J.R.; Instrumentation for Measuring Tractors Chassis Acceleration. *American Society of Agricultural Engineers 0883-8542/91/0703-0300*. 1991.
- [72] Cowell, P.A.; Mankanjuola, G.A.; The Lateral Dynamic Behaviour of Tractor-Mounted Implements, with Particular Reference to the Three-point Linkage. *J. agric. Engng Res. (1966) 11 (3)* 152-169. 1966.
- [73] Reece, A.R.; Gupta, R.; Tayal, S.S.; The Lateral Stability of Tractor Implements. *J. agric. Engng Res. (1966) 11 (2)* 80-88. 1966.
- [74] Mankanjuola, G.A.; Cowell, P.A.; Optimization of the Lateral Dynamic Behaviour of Tractor Mounted Implements. *J. agric. Engng Res. (1970) 15 (3)* 201-220. 1970.
- [75] Jönsson, H.; A Theory for the Influence of the Hitch on Lateral Displacement of Implements. *J. agric Engng Res. (1989) 44*, 33-52. 1989.
- [76] Tekin, Y.; Kul, B.; Okursoy, R.; Sensing and 3D Mapping of Soil Compaction. *Sensors 2008*, 8, 3447-3459. 2008.
- [77] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Ahorro, Eficiencia Energética y Sistemas de Laboreo Agrícola. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. 2006.
- [78] Green, M.K.; Stout, B.A.; Searcy, S.W.; Instrumentation Package for Monitoring Tractor Performance. *American Society of Agricultural Engineers 0001-2351/85/2802-0346*. 1985.

- [79] Koertner, R.G.; Bashford, L.L.; Lane, D.E.; Tractor Instrumentation for Measuring Fuel and Energy Requirements. *Transactions of the ASAE Paper No. 75-1547*. 1977.
- [80] Tompkins, F.D.; Wilhel, L.R.; Microcomputer-Based, Tractor Data Acquisition System. *Transactions of the ASAE vol. 25 (6): 1540-1543*. 1982.
- [81] Freeland, R.S.; Tompkins, F.D.; Wilkerson, J.B.; An Inexpensive FM Telemetry Link for Computer Communication. *American Society of Agricultural Engineers 0883-8542/88/0402-0107 Vol. 4(2)*. 1988.
- [82] Freeland, R.S.; Tompkins, F.D.; Wihelm, L.R.; Portable Instrumentation to Study Performance of Lawn and Garden Ride-On Tractors. *American Society of Agricultural Engineers 0883-8542/89/0502-0143 Vol. 5(2)*. 1989.
- [83] McLaughlin, N.B.; Drury, C.F.; Reynolds, W.D.; Yang, X.M.; Li, Y.X.; Welacky, T.W.; Stewart, G.; Energy Inputs for Conservation and Conventional Primary Tillage Implements in a Clay Loam Soil. *Transactions of the ASABE vol. 51(4): 1153-1163*. 2008.
- [84] Serrano, J.M.; Peça, J.O.; Shahidian, S.; Nunes, M.C.; Ribeiro, L.; Santos, F.; Development of a Data Acquisition System to Optimizing the Agricultural Tractor Performance. *Journal of Agricultural Science and Technology B 1 (2011) 756-766*. 2011.
- [85] Watts, C.W.; Longstaff, D.J.; Mobile Instrumentation and Data Processing System for Testing Field Machinery. *J. agric. Res. (1989) 43, 67-76*. 1989.
- [86] Basso, B.; Sartori, L.; Bertocco, M.; Gil J.; Seco A.; Manual de Agricultura de Precisión. Conceptos teóricos i aplicaciones prácticas. Ed. Eumedia. 2007.
- [87] Van Bergeijk, J.; Goense, D.; Speelman, L.; Soil Tillage Resistance as a Tool to map Soil Type Differences. *J. agric. Engng Res. (2001) 79(4), 371-387*. 2001.
- [88] Yahya, A.; Zohadie, M.; Kheiralla, A.F.; Giew, S.K.; Boon, N.E.; Mapping system for tractor-implement performance. *Computers and Electronics in Agriculture 69, 2-11*. 2009.
- [89] Berga, J; Disseny d'un utilitat tripuntal dels tractors per mesurar esforços produïts per atifells agrícoles. Projecte final de carrera. Universitat de Lleida. 2010.
- [90] UNE 68006-1. Tractores agrícolas de ruedas. Enganches de tres puntos montados en la parte trasera. Parte 1: Categorías 1, 2, 3 y 4. AENOR Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). 2003.

- [91] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Consumos energéticos en las operaciones agrícolas en España. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. 2005.
- [92] Márquez, L.; Maquinaria para la preparación del suelo, la implantación de los cultivos y la fertilización. B&H Editorial. 2001.
- [93] Centro Español de Metrología (CEM); Procedimiento ME-002 para la calibración de los instrumentos de medida de fuerza. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. 1999.
- [94] UNE-EN ISO 376. Materiales metálicos. Calibración de los instrumentos de medida de fuerza utilizados para la verificación de la máquinas de ensayo uniaxial. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). 2011.
- [95] Dunn, P.F.; Measurement and data analysis for engineering and science (2nd Edition). CRC Press Taylor & Francis Group. 2010.
- [96] ReliaSoft Corporation. Experiment Design & Analysis Reference. 2014.
- [97] UNE-ISO 24347. Vehículos agrícolas. Uniones mecánicas en vehículos remolcados. Dimensiones del enganche tipo bola (80 mm). Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). 2010.
- [98] UNE-ISO 20019. Vehículos agrícolas. Uniones mecánicas en vehículos remolcados. Dimensiones de los anillos de enganche. AENOR Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). 2011.
- [99] Hoffmann, K.; An Introduction to Measurement on Strain Gages. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt. 1989.
- [100] Parametric Technology Corporation (PTC). Introduction to Creo Simulate 2.0. 2012.
- [101] Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (HBM); The Route to Measurement Transducers - A Guide to the Use of the HBM K Series Foil Strain Gages and Accessories. 2008.
- [102] Gere J.M.; Timoshenko - Resistencia de Materiales. 5a Edición. Thomson Editores Spain Paraninfo. 2002.
- [103] National Instruments. LabVIEW Real-Time 1 Course Manual. 2012.