

# Harizko elektrohigadura-prozesuaren eraginkortasunaren hobekuntza sistema birtualen bidez

*E. Portillo, N. Iriondo, A. Zubizarreta, I. Cabanes, D. Orive, M. Marcos*

Sistemen Ingeniaritza eta Automatika saila (UPV/EHU)

*J.A. Sanchez*

Ingeniaritza Mekanikoa saila (UPV/EHU)

**Laburpena:** Azken urteetan sistema birtualen inguruko aurrerapenak mekanizazio ezkonbentzionaleko prozesu askotara ere hurbiltzen hasi dira, besteak beste, harizko elektrohigadura izeneko makina-erreminta prozesura (*Wire Electro-Discharge Machining WEDM*). Sistema birtual hauek abantaila asko ematen dizkiote makina-erreminta arloko ikerlariari. Hasteko, sistema hauei esker makinan egindako saio kopurua murriz daiteke, batez ere, esperimintuen analisi-magnitudeak erabakitzeke unean. Hala-ber, sistemak oso malguak direnez, ikerlariak behar beste moldaketa eta azterketa egin ditzake saio berean. Ezaugarri hauek guztiak oso erabilgarriak izan daitezke harizko elektrohigadurako tresnaren haustura bezalako auziak ikertzean.

**Abstract:** During the last years, the advances related to virtual systems have been also applied to non-conventional machining process and, among them, to Wire Electrical Discharge Machining WEDM. Virtual systems can provide important advantages to the researches in the field of machining processes. Firstly, those systems can help to reduce the number of experiments to be performed on the machine, especially when deciding which the relevant process-magnitudes are for a specific problem. Secondly, since those systems are very flexible, as many adaptations and analysis as required can be made by the researchers on the same experiment. Thus, all these characteristics are very useful when dealing with research topics related to WEDM, such as wire breakage.

## 1. SARRERA

XIX. mendean gertatutako Industria Iraultzan aurki dezakegu makina-erremintaren jatorria. Hain zuzen ere, lurrun-makinaren garapenak aukera eman zizun lanetan animaliez, uraz, haizeaz edo norberaren indarraz baliatzeari uzteko.

Hortaz, ehungintza izan zen iraultza hartako lehenengo aldi batean garatu zena; beste industria mota asko garatu ziren geroago, eta haien artean, makina-erreminta.

Euskal Herrian makina-erremintak egiteko lehen lantegia Eibarren sortu zen XX. mendean, eta handik aurrera izugarri hedatu zen Euskal Herria osoan. Izan ere, Hego Euskal Herrian daude Espainiar Estatuko makina erremintako enpresen %80 [1].

Euskal Herrian gehienbat bi makina-erreminta mota garatu dira: bate-tik, txirbil-harroketaz ebakitzeko makina (hala nola, tornuak, fresatzeko makinak eta zulatzeko makinak), eta bestetik, deformazioz ebakitzeko makina (adibidez, prentsa hidrauliko eta mekanikoak, eta tolesteko makinak). SPRIk 2009. urtean argitaraturiko txostenean adierazten duen bezala, ekoizpen osoaren %70 ingurukoari eragiten dio lehengoak, eta ea gainerako %30ari bigarrenak [2]. Hala ere, hain ehuneko handia izan ez arren, badago beste talde garrantzitsu bat ere: mekanizazio ezkonbentzionaleko prozesuetakoa. Prozesu mota hauen artean, aipatzekoa da harizko elektrohigadura izeneko makina-erreminta prozesua (*Wire Electro-Discharge Machining WEDM*). Izan ere, 1952. urtean Durangon sortu zen munduko elektrohigadura-makinen fabrikatzaile zaharrena: ONA Electro-erosion izeneko enpresa. Garai hartan harizko elektrohigadura oraindik ez zegoenez garatuta, ONAn sarpenezko elektrohigadura-makinak baino ez zituzten egiten (*Die-sinking Electro-Discharge Machining SEDM*).

Aipatzekoa da *Ikerketa Zientifikoaren, Garapenaren eta Berrikuntza Teknologikoaren 2004-2007 Plan Nazionalan* gailendu zela harizko elektrohigadura. Harizko elektrohigadura 1970eko hamarkadan agertu, eta oso denbora laburrean onarpen handia eskuratu zuen, 1990eko hamarkadan hain zuzen. Izan ere, teknologia erabat indartuta dago gaur egun, eta dago-kion merkatua oraindik ere hedatzen ari da.

Lehen esan den bezala, harizko elektrohigaduraren benetako hasiera 1970eko hamarkadan gertatu zen. Hala ere, elektrohigadura bera Lazarenko senar-emazte errusiarrek aurkitu zuten 1940ko hamarkadan. Orduan, «deskarga elektrikoen higadura-efektuaren alderantzikapenez» izeneko lana argitaratu zuten [3].

Garai hartan, Bigarren Mundu Gerran auto-motoreekin zerikusia zeukan auzia ikertzeko eskatu zien gobernu sobietarrak, hain zuzen, tungstenozko kontaktu elektrikoen arteko txinpartek sortutako higadura. Senar-emazteak konturatu ziren txinpartak airean baino auresangarriagoak eta uniformeagoak zirela oliotan.

Orduan, fenomeno hori alderantzikatzekeo ideia izan zuten: kontrolatutako txinparten bidez materialak higatzeko metodo berria, alegia, elektrohigadura [4]. Lan hori guztia egiten Zolotykh izeneko ikerlariak lagundu zion bikoteari, eta 2001. urtean Bilbon ospatutako elektrohigadurari buruzko nazioarteko biltzarrean parte hartu zuen Zolotykh (International Symposium for Electromachining ISEM XIII). 1. irudiaren argazkian ikus ditza-kegu Zolotich eta ONA-ren sortzailea, Karmel Onaindia.



**1. irudia.** Zolotykh (ezkerrean) eta Karmel Onaindia (eskuinean), Durangon (2001)

Bestalde, zenbakizko kontrolaren garapenak izugarri areagotu zuen WEDM makinaren eraginkortasuna, eta 1975. urtean, hasiera eman zioten industria-hedapenari [5].

Mekanizazio ezkonbentzionalerako prozesuen artean, industria metal-mekanikoan erabilienetarikoa da harizko elektrohigadura hau. Edozein

propietate mekaniko eta forma konplexu duten zehaztasun handiko piezak ebakitzeko gaitasuna da WEDMaren abantaila nagusia. Hori dela-eta, mekanizatzeo zailak diren materialetan erabiltzen da mekanizazio ezkonbentzionaleko prozesu hau (altzairu eta titanio-aleazio batzuetan), piezari aurreko edota geroko tratamendurik egin gabe.

Materialek bete behar duten baldintza bakarra eroaleak izatea da. Beraz, industria mota askotarako matrize eta tresnak harizko elektrohigaduraren bidez egin ohi dira egun (ikusi 2. irudia).



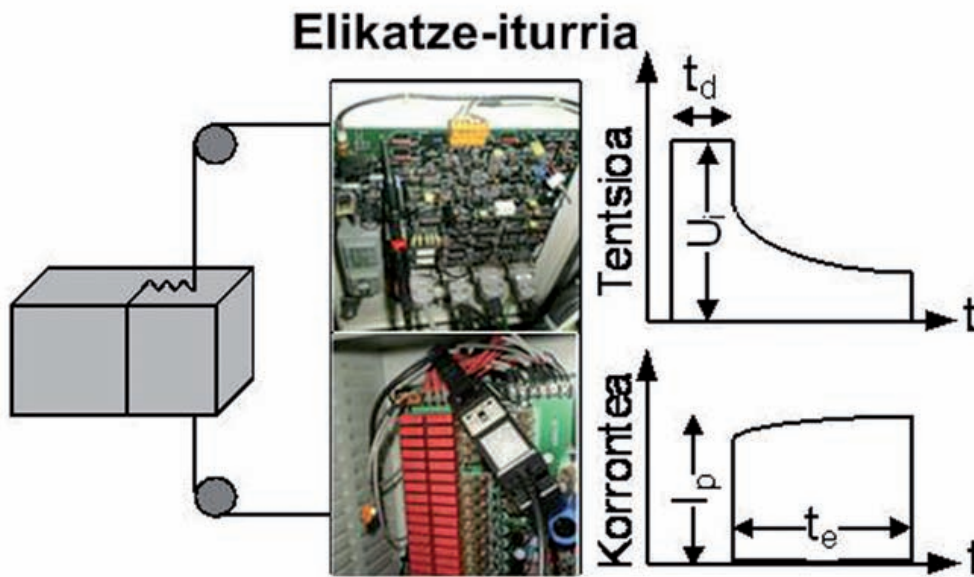
**2. irudia.** Harizko elektrohigaduraz mekanizatutako piezak

## **2. WEDM-ren OINARRIAK**

Prozesu termiko honetan, materia eroaleko bi elektrodoren arteko segidako deskarga elektrikoaren bidez gertatzen da materialaren harroketa; bi elektrodoek (piezak eta hariak) ez dute inolako kontaktu fisikorik. Bi elektrodoren arteko hutsuneak gap izena dauka, eta fluido dielektrikoa ur desionizatua da. Mekanizazio prozesuan, fluido dielektrikoa gapean injektatzen da. Beraz, deskarga elektrikoak sortzeko, makinaren elikatze-iturriak potentzial-diferentzia eragiten du elektrodoren artean, fluido dielektrikoa io-

nizatu ondoren. Dielektrikoa ionizatzeko behar den denbora tarteari ionizazio-aldia deritzo.

Ondoz ondoko bi deskargaren artean, dielektrikoak gapa hoztu eta higaduran gertatutako hondakinak kentzen ditu etenaldia izeneko denbora tartean. Denbora tarte hau doigarria da. Kasu askotan, ondoz ondoko bi deskargen artean mikrosegundo gutxi igarotzen dira. WEDM prozesuaren eskema erakusten du 3. irudiak.



**3. irudia.** WEDM prozesuaren eskema.

Prozesu honetan tresna modua erabilitako haria oso mehea da, sarritan 0,25 milimetrokoa. Bestalde, deskarga ugari eta oso tenperatura altuak (12.000 gradu ingurukoak) jasan behar izaten ditu hariak. Beraz, ez da harritzekoa hariaren haustura gertatu ahal izatea. Prozesuak behar duen haria haril bidez ziurtatuta egon arren, irtenbide hori ez da nahikoa izaten hariaren haustura ekiditeko. Aintzat hartu behar da haria apurtzen denean prozesuaren eraginkortasuna murriztu egiten dela, haria berriro albainatu behar delako. Are gehiago, hausturaren ondorioz piezaren kalitatea murriz daiteke. Hori dela-eta, oso garrantzitsua da haria ahalik eta gutxienean haustea.

### 2.1. Deskargen ezaugarriak

Pieza bat mekanizatu bitartean, aldi oro prozesuan arazorik gertatzen ari den jakiteko, beharrezkoa da deskargen ezaugarriak denbora errealean monitorizatzea. Horren harira, deskargen tentsioak eta korrontek adieraz-

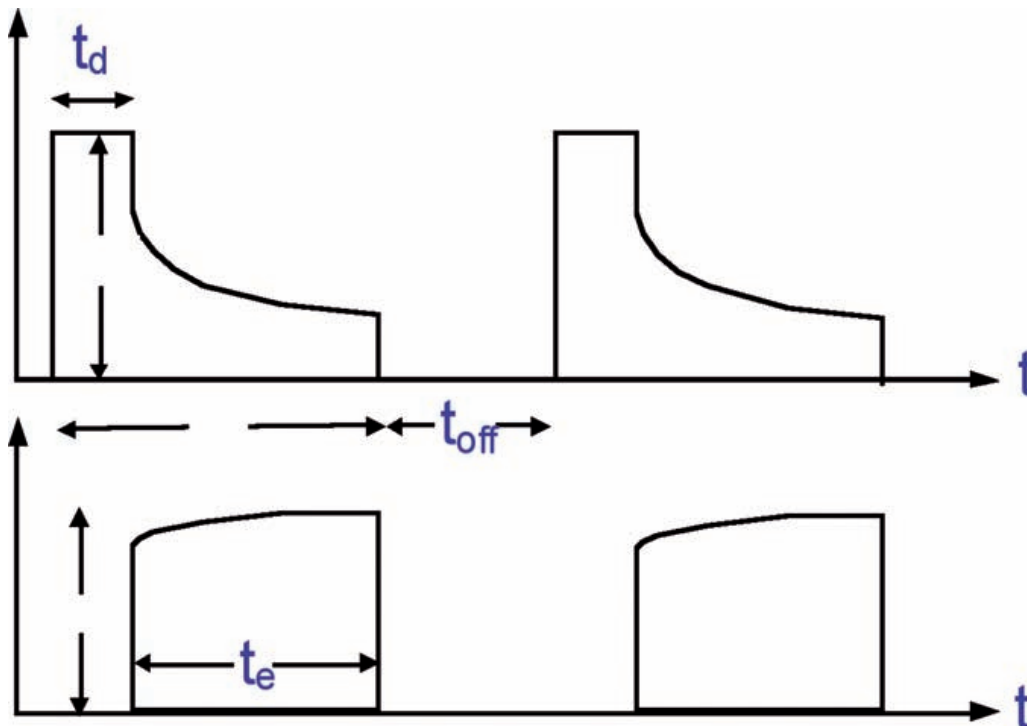


ten dituzte deskargen ezaugarriak. Deskargen tentsioaren eta korrontearen seinaleen irudi teorikoak erakusten dira 4. irudian. Deskargen parametro esanguratsuak adierazten dira irudi horretan. Makinaren elikatze-iturriaren arabera, parametro horiek konstanteak ala aldakorak izan daitezke. Izan ere, elikatze-iturriak zenbat eta deskargen parametro esanguratsu gutxiago kontrolatu, orduan eta estokastikoagoa da prozesua.

Goian azaldu den bezala, deskarga elektrikoak sortzekotan, makinaren elikatze-iturriak potentzial-diferentzia edo *hutseko tentsioa* ( $U_i$ ) eragiten du elektrodoen artean *gapa* ionizatu arte, hau da, *ionizazio-aldia* ( $t_d$ ) igaro arte. Neurri handi batean, denbora tarte hori dielektrikoaren egoeraren arabera da; beraz, ezin da erabiltzailearen parametro izan, alegia, erabiltzaileak ez dauka parametro horren balioa doitzetik. Denbora tarte hori igaro ondoren, elikatze-iturria deskargatu egiten da, eta ondorioz, *korrante punta* ( $I_p$ ) azaltzen da.

Hurrengo deskarga sortzeko ziklo osoa errepikatu baino lehen, *gapa* hoztu eta aurreko deskargaren higaduran gertatutako hondakinak kendu behar dira *etenaldia* ( $t_{off}$ ) izeneko denbora tartean. Zergatik behar da etenaldi bat?

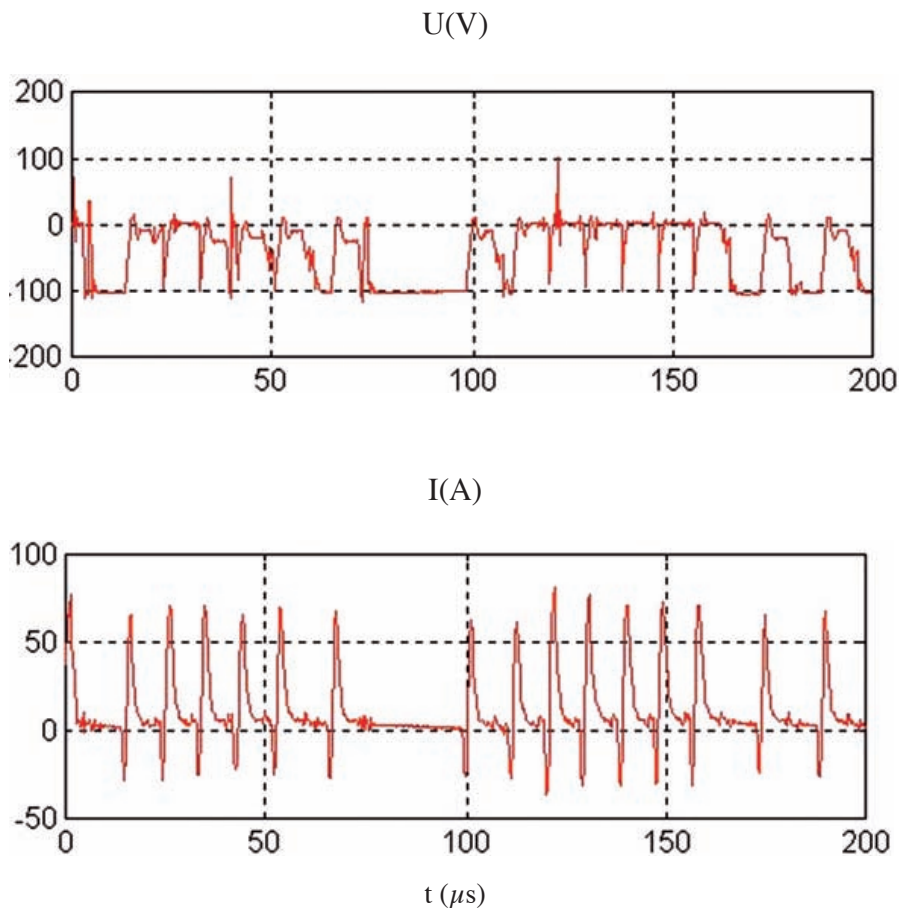
Alde batetik, hariaren apurketak edota piezaren gainazal-kalitate txarrak gehiegizko tenperaturak eragin ditzakeelako (8.000-12.000 °Ckoa izan daiteke tenperatura).



4. irudia. WEDM prozesuaren parametro esanguratsuak

Bestaldetik, higaduran gertatutako hondakinek zirkuitulaburrak sor ditzaketelako hariaren eta piezaren artean. Denbora tarte hori erabiltzaile-parametroa da edozein makina motatan. Azkenik, *ionizazio-aldia* ( $t_d$ ) eta *deskargaren iraupena* ( $t_e$ ) batuz kalkulatu da *pultsu-aldia* ( $t_{on}$ ) izeneko parametroa.

Goian esan den bezala, izaera estokastikokoa da WEDM. Zer esan nahi du honek ordea? Demagun makinaren parametro berberak erabiliz mekanizatu nahi ditugula berdinak diren bi pieza. Kasu bietan, deskarga bakoitzaren tentsioa eta korrontea gorde eta bi lanen deskarga-hurrenkerak alderatuko bagenu, laster konturatuko ginateke deskarga-hurrenkerak berdinak direla. Are gehiago, asko alda daitezke segidako deskargen tentsioaren eta korrontearen parametro esanguratsuen balioak, baldintza egonkorretan mekanizatuta ere. 5. irudian erakusten den 200 mikrosegundoko deskarga-hurrenkera dugu horren adibide.



**5. irudia.** Deskargen tentsioa (goian) eta korrontea (behean), fabrikatzaileak gomendatutako parametroak erabiliz. Mekanizatutako pieza: altzairuzkoa, 50 milimetroko lodierakoa

### **3. HASIERAK: IRAGANEAN EMANDAKO SOLUZIOAK**

Hari hausturaren monitorizazioa eta aurre Diagnostikoari buruzko zenbait lan aurki daitezke literaturan.

Lan hauetako batzuek deskarga hariaren zein puntutan kokatzen den iragartzea dute aztergai [6-10].

Hariko puntu batean segidako deskargen kontzentrazioak hariaren apurketa eragin dezake.

Ikuspegi horretan oinarrituta, harizko elektrohigaduraren zirkuitu balio-kideak diseinatu eta egin dituzte hainbat ikerlarik, harian deskargak kokatzeko monitorizazio sistemak garatuz. Zirkuitu balio-kide horietariko batzuk eredu matematikoetan oinarrituta daude. Hala ere, WEDM prozesuaren natura estokastikoa adierazgarria da. Horregatik, ezinezkotzat jotzen da eredu egoki eta zehatza lortzea [11].

Beste ikerketa-arlo batean, deskargen sailkapena egiteko deskargen ezaugarriak hartzen dira kontuan. Horretarako, denbora tarte batean mota bakoitzeko deskargen kopurua zenbatzen duten zirkuituak diseinatu eta garatu dituzte egile batzuek [12-18]. Hain zuzen, mota desberdinetako ebaki-erregimen degradatuak identifikatzea da helburua. Arlo honetan, lehenengo lanen artean Dekeyserrena eta Watanabena aurki ditzakegu. Dekeyserrek [13] 13 deskarga mota identifikatu zituen. Funtsean egile honek egiaztatu egin nahi izan zuen deskarga mota jakin batzuen segidak haria apurtu dezakeela.

Geroago, Watanabek [14] 4 motatara murriztu zuen sailkapena: normalak, arku elektrikoak, zirkuitulaburrak eta zirkuitu irekiak. Egun, hauex da sailkapenik erabiliena. Nola egiten da ordea sailkapen hori? Deskargen tentsioan edota korrontean atari-balioak zehaztuz murriztu ohi da deskarga mota bakoitza. Horrekin lotuta, beste sailkapen sistema bat garatu zen Liaok egindako lanean [18]. Kasu horretan, deskargen tentsioa baino ez zen erabili sailkapena egiteko.

Aipatutako lan guztietan hardware jабeduna diseinatu eta garatu da. Horren harira, aipatu beharra dago hardware jабedun hori diseinatzeko eta garatzeko behar den denbora luzea dela.

Are gehiago, sistema gehienek egoera jakin batzuetan erabiltzeko baino ez dute balio, adibidez material jakin batzuetan, elikatze-iturri mota bakar batean edota makinaren parametro gutxietan. Horrek esan nahi du, sistema osoa berriro diseinatu eta garatu beharko litzatekeela saioak beste egoera batean egin nahi izango balitz.



#### **4. EGUNGO TEKNOLOGIA HARIZKO ELEKTROHIGADURA PROZESUEN PORTAERA EZAGUTZEKO**

Aurreko atalean esan den bezala, hardware jabedunean oinarritu ohi dira arlo honetako lanak. Esan dezakegu azken bolada honetara arte gauzak beste era batean egin ahal izateko ez dela behar besteko aurrerapen teknologikorik izan. Dena den, industrializazio fasean hardware erabiltzea hobe bada ere (batez ere, kostuak direla-eta), murriztapenak sortzen dira ikerketa mailan. Mota honetako zirkuituak oso espezifikoak dira eta modu zehatz batean funtzionatzeko diseinatu beharra dago, hau da, diseinatzailerak lortu nahi duen informazioaren arabera. Horregatik, ez dute seinaleen bilakaera osoa neurtzen (5. irudian ikusten den bezala), eta seinalearen zati batzuk, hau da, seinalearen balio esanguratsuak neurtzen dira, puntu eta denbora une jakin batzuetan, adibidez, korronte puntetan. Bildutako datuak abiapuntu hartuta, zirkuituak eskaintzen duen informazioa murrizta da, eta hortik ateratako ondorioak ez dira beti behar bezain onak izaten. Horretaz gain, zirkuitu mota hauek diseinatzeko aurretiko saio asko egin behar direnez, diseinu eta garapenerako denbora luzatzeaz gain, material eta energia gehiago erabili beharra dakar [19, 20]. Zirkuitu hauek gainera, egoera jakin batzuetan erabiltzeko baino ez dute balio, adibidez material jakin batzuetarako, elikatze-iturri mota bakar baterako edota makinaren parametro jakin batzuetarako. Hauetako baldintzaren bat aldatu behar izanez gero, sistema osoa berriro diseinatu eta garatu beharko litzateke.

Beraz, seinalearen bilakaera osoa monitorizatzeko sistema berriak goian aipatutako mugak gainditzen lagunduko luke. Hasteko, degradazio-adierazleak eta denbora-leiho egokiak gerora definitu daitezke. Seinaleak oso-osorik neurtzea eta fitxategietan gordetzea da ideia nagusia; horri esker, nahi beste parametro esanguratsuen portaera eta denbora-leihoen neurri ezberdin aztertuko dira gero, makinan saio berririk egin behar izan gabe. Halaber, malgutasun handiko sistema izango litzateke. Alegia, sistema konfiguragarria izanda, edozein saiakera-baldintzatara eta edozein elektrohigadura-makina motatara molda liteke.

Azken urteetan instrumentazioaren eta industriako informatika arloetan lortu diren aurrerapenek izugarriko aukera eskaintzen digute aipatutako mugak gainditu ahal izateko. Esan dezakegu mende honetara arte ez dela egon merkatuan abiadura handiko datuak eskuratzeko txartelik (20 MHz-ko erlojudun txartelik alegia). Baina ez hori bakarrik: ikerketa horrela planteatzeak sistema birtualetara hurbiltzen gaitu. Sistema birtualek aukera ematen digute malgutasunik gabeko hardware edo gailu fisikoetan bakarrik oinarrituta dauden sistemak alde batera uzteko. Hau da, industria-ingurumenetan hardwareaz gain, software moldagarria erabiltzeko aukera daukagu. Artikulu honetako auzian, prozesuaren magnitude esanguratsuak aldi berean neurtzen dituzten sentzore birtualak lor daitezke Sistema Birtual bat

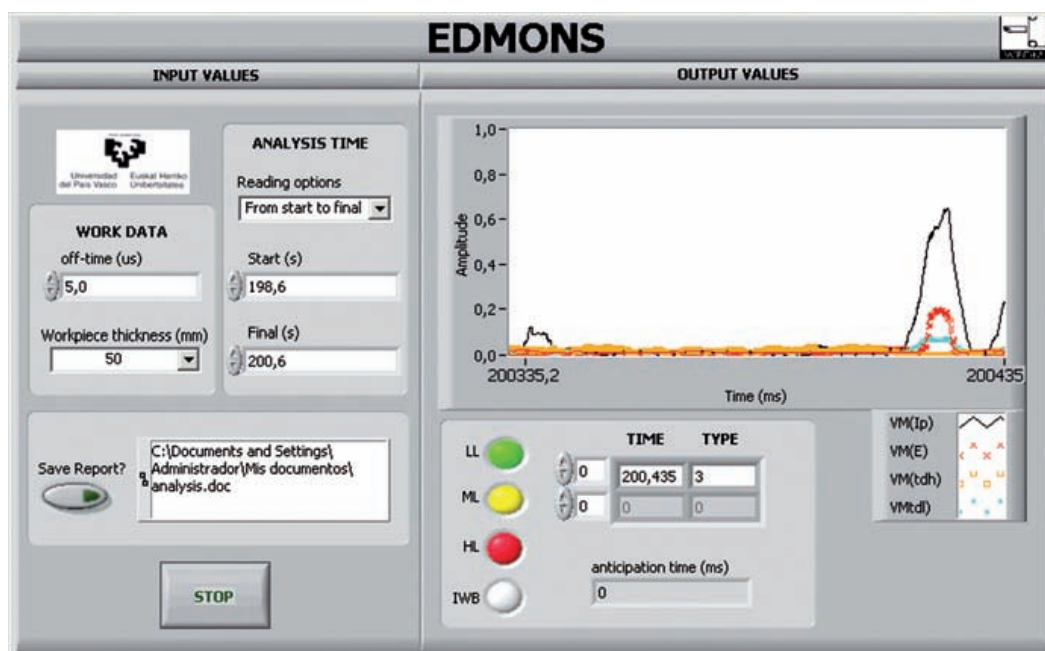
diseinatu. Sentsore birtual hauek ematen diguten informazioa, seinaleen neurri hutsek ematen digutena baino askoz aberatsagoa da. Neurri horiek «adimentsuak» izatea da honetan eragile nagusia, hau da, prozesutik neurri «errealak» aztertuz, neurri horiek neurri birtual bihurtzea.

Hori egiteko, azterketetan zehar lortutako ezaguera erabili eta software teknikak erabili behar dira.

Sistema birtual horien erabilgarritasuna soma daiteke [19, 20] lanetan. Lan horietan EHUko Automatika eta Sistemen Ingenieritza, eta Ingenieritza Mekanikoa sailen artean egindako ikerketak aurkezten dira (6. irudia). Ikerketa horien emaitzak aintzat hartuta, WEDM monitorizatzeko sistema garatu zen (ikusi 7. irudia). Prozesuen laginak aztertuz, sistema honek mota desberdinetako portaerak diagnostikatzeko dituen, eta behe, erdi eta goi mailetako alarmak desarratzen dituen hariaren haustura gertatzeko arriskuaren araberak. Bi zatik osatzen dute sistema. Lehenengoa Instrumentazio Birtualeko Sistema (IBS) izenekoa da, eta prozesuaren magnitude esanguratsuak neuritzen dituzten sentsore birtualek osatua da. Deskarga-hurrenkeraren energia, korrante-punta eta ionizazio aldia izeneko aldagaiekin dute zerikusia magnitude horiek. Bigarren zatia Diagnostikatzeko Sistema (DS) da. Zati



**6. irudia.** EHUko Sistemen Ingeniaritza eta Automatika, eta Ingenieritza Mekanikoa sailen ikertzaileak lanean

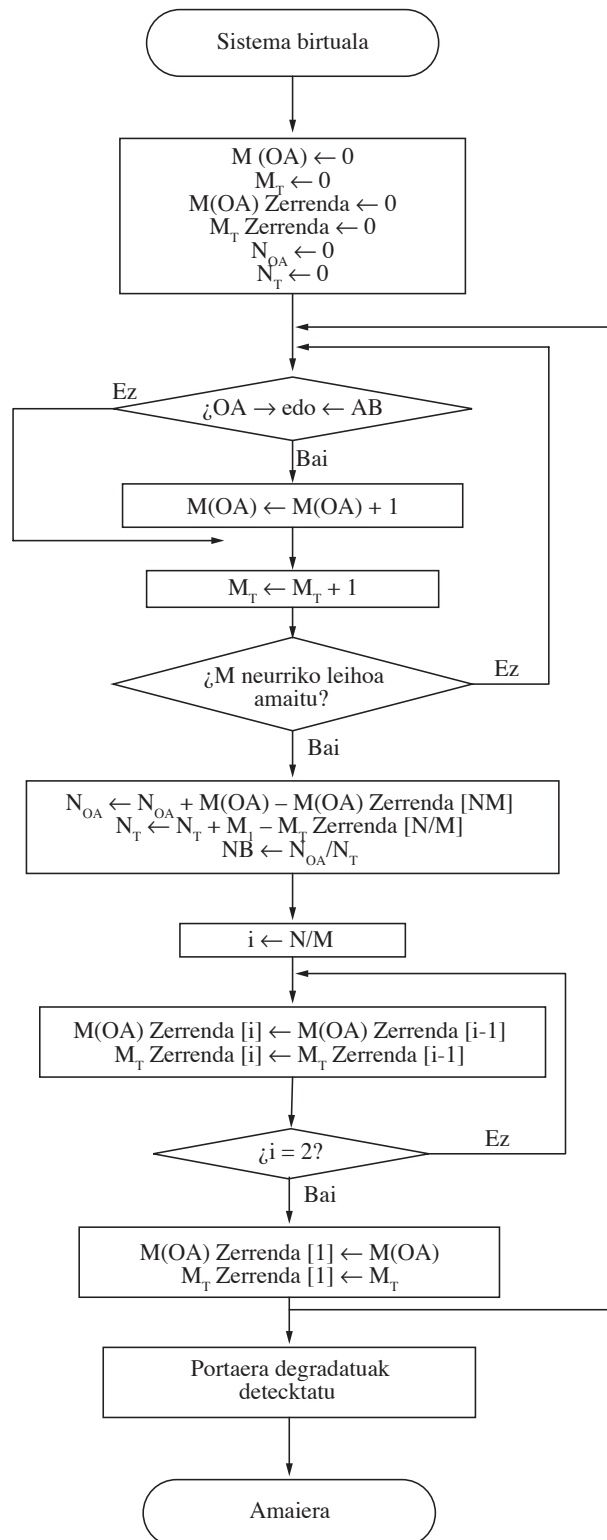


## 7. irudia. WEDM monitorizatzeko sistema

honek, portaera degradatuak detektatu eta aurreikusi egiten ditu sentore birtualen magnitudeen arabera (DSri buruzko xehetasun gehiago [20] artikuluan aurki daitezke).

Seinale fisikoen azterketen emaitzak abiapuntu hartuta, adierazpen matematikoak zein neurri birtualak eskuratzeko algoritmoak definitu dira. Adierazpen eta algoritmo nagusiaren oinarria 8. irudian erakusten da. Algoritmo horretan, M neurriko oinarritzko leiho bakoitzean deskargen kopurua (MT) zenbatzen da, eta horietatik, baldintza jakin batzuk zenbatek betetzen dituzten begiratzen da (M(OA)). Aipatutako baldintzak betetzen ote diren neurtzeko, zenbait aldagai erabiltzen dira, adibidez oinarritzko aldagaiak (OA) eta atari-balioak (AB). Zenbaketa horiek, MT eta M(OA), N neurriko leiho labainkorrean biltzen dira. N neurriko leiho berri honetan egiten da zenbaketa labainkorra: NOA eta NT bi aldagaietatik MT eta M(OA) zaharrenak kendu, eta haien ordeztu MT eta M(OA) berriak gehitzen dira, hurrenez hurren. NOA/NT eginez lortzen da algoritmoaren helburu den Neurketa Birtuala (NB).

Beraz, sistema birtual horren bidez zenbait abantaila eskura daitezke. Haria sartzeko denbora murriztu eta kalitate txarreko piezak agertzeko arrisku gutxiago dagoenez, prozesuaren abiadura handitzen da. Alde bategatik, horrek esan nahi du azkarrago merkaturatzen direla piezak kostu baxuagoan. Bestaldetik, makina fidagarriagoa lortzen da, eta gainera, makina autonomoagoa denez, langileak gutxiagotan hartu behar du parte.



**8. irudia.** Harizko elektrohigaduran hariaren hausturaz ohartarazteko algoritmo nagusia

## 5. ONDORIOAK

Egungo instrumentazio birtualak aukera ematen du mekanizazio ez-konbentzionaleko prozesuetan denbora errealean eskuratutako datuetatik informazio zehatza eta erabilgarria lortzeko. Hardware hutsean oinarritutako sistemekin alderatuta, sistema birtualek hainbat abantaila eskaintzen dituzte. Haien artean, saioen kopurua murriztea eta malgutasuna aipa ditzakegu. Beraz, ikerkuntza-fasean baliozkotze-prototipoak era azkar eta erraz batean egin daitezke.

Harizko elektrohigaduraren kasuan, gero eta garrantzitsuagoa da erremintaren edo tresnaren egoera denbora errealean ezagutzea, lanean ari den bitartean. Ezagutza horri esker, makinaren erabiltzaileak tresna alda dezake ondorio larriak azaldu aurretik. Are gehiago, erreakzio automatikoko makina diseina daiteke, akatsak gertatu edota aurreikusten direnean. Beraz, helburu horiek guztiak lortzeko, oso garrantzitsuak dira azken urteetan instrumentazio birtualarekin zerikusia daukaten aurrerapen teknologiak.

## ESKERRONAK

Lan honek EHUKo GIU 10/20 ikerketa proiektuaren diru-laguntza jaso du.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] <http://www.zientzia.net/>
- [2] SPRI (2009): *Makina-erreminta Ekoizleen Euskal Sektoreko Koaderno*.
- [3] LAZARENKO, B.R. (1943). «About the inversion of metal erosion and methods to fight ravage of electric contacts». *WEI-Institute, Moscow in Russian*.
- [4] PANDEY, A. eta SINGH, S. (2010). «Current research trends in variants of Electrical Discharge Machining: A review». *International Journal of Engineering Science and Technology* **2(6)**, 2172-2191.
- [5] HO, K.H., NEWMAN, S.T., RAHIMIFARD, S. eta ALLEN, R.D. (2004). «State of the art in wire electrical discharge machining (WEDM)». *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **44**, 1247-1259.
- [6] GUO, Z. N., YUE, T.M., LEE, T.C. eta LAU, W.S. (2003). «Computer simulation and characteristics analysis of electrode fluctuation in wire electric discharge machining». *Journal of Materials Processing Technology* **142**, 576-581.
- [7] KUNIEDA, M., SAGA, S., YOSHINO, H., OHTA, T. eta KOBAYASHI, M. (2001). «Control of discharge locations in EDM with locally imposed high electric field». *Proceedings of the XIII ISEM 2001* **2**, 485-495.



- [8] LAUWERS, B., KRUTH, J.P., BLEYS, P.H., VAN COPPENOLLE, B., STEVENS, L. eta DERIGHETTI, R. (1999). «Wire rupture prevention using on-line pulse localisation in WEDMB». *Vdi Berichte* **1405**, 203-213.
- [9] OBARA, H. eta ABE, M., OHSUMI, T. (1999). «Control of wire breakage during wire EDM». *International Journal of Electrical Machining* **4**, 53-58.
- [10] SHODA, K., KANEKO, Y., NISHIMURA, H., KUNIEDA, M. eta FAN, M.X. (1995). «Development of adaptive control system to prevent EDM wire breakage». *EDM technology* **3**, 17-22.
- [11] YAN, M.T. eta LIAO, Y.S. (1996). «Monitoring and self learning fuzzy control for wire rupture prevention in wire electrical discharge machining». *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **36 (3)**, 339-353.
- [12] LIAO, Y.S. eta WOO, J.C. (1997). «The effects of machining settings on the behaviour of pulse trains in the WEDM process». *Journal of Materials Processing Technology* **7**, 433-439.
- [13] DEKEYSER, W., SNOEYS, R. eta JENNES, M. (1988). «Expert system for WEDM, based on pulse classification and thermal modelling». *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* **4 (1)**, 219-224.
- [14] WATANABE, H., SATO, T., SUZUKI, I. eta KINOSHITA, N. (1990). «WEDM monitoring with a statistical pulse-classification method». *Annals of the CIRP* **39 (1)**, 175-178.
- [15] YAN, M.T. eta LIAO, Y.S. (1995). «Adaptive control of WEDM process using the fuzzy control strategy». *ISEM XI* 343-352.
- [16] WU, J. eta LI, M.H. (2001). «The identification of the servo control state in wire electrical discharge machining process». *ISEM XIII*, 423-433.
- [17] WANG, W.M. eta RAJURKAR, K.P. (1992). «Monitoring sparking frequency and predicting wire breakage in WEDM». *Sensors and Signal Processing for Manufacturing* **55**, 49-64.
- [18] LIAO, Y.S., CHU, Y.Y. eta YAN, M.T. (1997). «Study of wire breaking process and monitoring of WEDM». *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. **37 (4)**, 555-567.
- [19] CABANES, I., PORTILLO, E., MARCOS, M. eta SÁNCHEZ, J.A. (2008). «On the actual feasibility of on-line preventing wire breakage in WEDM». *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* **24 (2)**, 287-298.
- [20] PORTILLO, E., CABANES, I., MARCOS, M., ORIVE, D. eta SÁNCHEZ, J.A. (2007). «Design of a virtual instrumentation system for a machining process». *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement* **56 (6)**, 2616-2622.