

Original Research / Artículo original - Tipo 1

Mechanic simulator fluids for clean-up operations and phases separation in vertical and horizontal wells with *coiled tubing* technology

Juan David Tarache Serrano / Guacamaya Oil Services, Neiva-Colombia / juandavid.tarache@guacamayaoils.com

Germán Eduardo Martínez / Universidad Surcolombiana, Neiva-Colombia / german.martinez@usco.edu.co

Jenny Catalina González Peña / Guacamaya Oil Services, Neiva-Colombia / cata_gonzalezp@hotmail.com

Magda Alexandra Trujillo Jiménez / Universidad Surcolombiana, Neiva-Colombia / ale.trujim@hotmail.com

ABSTRACT This article presents the development of a processes simulator that takes place in oil wells that use the *coiled tubing* technique, which demonstrates to its workers, company personnel and anyone that wants to observe these processes, what the cleaning methods and phase separation consists of in these wells, and how the incoming and outgoing substances are controlled. In addition, it permits their physical features to be shown and enables people without previous knowledge about the topic to easily understand the purpose of fluid injection by *coiled tubing* in oil wells.

KEYWORDS Prototype; simulator; fluid mechanics; coiled tubing; submersible pump; on-off control; mobile application; Android; Arduino; sensor; SharpDevelop; Zed graphic; SolidWorks; 3D.

Simulador de la mecánica de fluidos para operaciones de limpieza y separación de fases, en pozos verticales y horizontales que usan tecnología *coiled tubing*

RESUMEN El artículo presenta el desarrollo de un simulador de los procesos que se llevan a cabo en los pozos de petróleo que manejan la técnica *coiled tubing*, el cual permite que sus operarios, el personal de la empresa y cualquiera que desee observar estos procesos, pueda evidenciar de manera clara: en qué consisten los métodos de limpieza y separación de fases en dichos pozos y de qué manera se controlan las sustancias que entran y salen del pozo. Además, permite mostrar sus propiedades físicas y facilita que una persona, sin conocimiento previo del tema, pueda entender el objetivo de la inyección de fluidos mediante el *coiled tubing* en pozos de petróleo.

PALABRAS CLAVE Prototipo; simulador; mecánica de fluidos; *coiled tubing*; bomba sumergible; control on-off; aplicación móvil; Android; Arduino; sensor; *sharp develop*; Zed Graphic; Solid Works; 3D.

Simulador da mecânica dos fluidos para operações de limpeza e separação de fases em poços verticais e horizontais que utilizam tecnologia *coiled tubing*.

RESUMO O artigo apresenta o desenvolvimento de um simulador dos processos que são executados nos poços de petróleo que lidam com tecnologia *coiled tubing*, que permite aos seus operadores, ao pessoal da empresa e a quem quiser observar esses processos, evidenciar claramente: como são os métodos de limpeza e separação de fases nestes poços e a forma em que são monitoradas as substâncias que entram e saem dos poços. Além disso, mostra as propriedades físicas e permite a uma pessoa sem conhecimento prévio do assunto, compreender o objetivo da injeção de fluidos através do *coiled tubing* em poços de petróleo.

PALAVRAS-CHAVE Protótipo; simulador; mecânica dos fluidos; *coiled tubing*; bomba submersível; controle on-off; aplicação móvel; Android; Arduino; sensor; *Sharp Develop*; Zed Graphic; Solid Works; 3D.

I. Introduction

Among the key processes for the efficient exploitation of oil fields are the optimal selection and performance of control fluids used in operations of drilling, maintenance, reconditioning and well stimulation, activities in which, for some years, coiled tubing technology has been working. This technology has been positioning itself as an efficient and versatile alternative to the challenges set by the oil industry at present, given the myriad of procedures that can be performed with it in the field, such as cleaning of wells, fishing operations, matrix acid stimulation and hydraulic fracturing, which require the circulation of fluids in the well without *killing* or controlling the well.

The accumulation of sand and solids in wells significantly impairs the production of oil and gas. In fact, almost half of coiled tubing operations involve the cleaning of wells to remove debris.

The movement of sand and debris accumulation can have a significant impact on fluid flow. On the surface, a river can deposit such a large volume of silt that it hinders its own flow, changing its course, becoming a threat to agricultural areas and communities. Similarly, sand influx can affect or stop the flow of oil from a reservoir (Ali et al., 2005).

The cleaning of wells constituted one of the first applications for coiled tubing services. Global estimations indicate that nearly 50% of operations including coiled tubing are carried out in order to remove solids, such as produced sand or residual proppant produced from hydraulic fracturing treatments (Rolovic, Weng, Hill, Robinson, Zemlak, & Najafov, 2004). In general, the continuous developments registered in the operation systems with coiled tubing have permitted operators to advance, while the depths of the wells and their tortuosities increase, together with the complexity of environmental downhole conditions (Barriol et al., 2005).

The need was identified, based on the above, to develop a fluid mechanics prototype simulator for various cleaning and phase separation operations that can be carried out in vertical and horizontal oil wells, using coiled tubing technology. This prototype will allow, in an educational, real and novel sense, the training of personnel of the company Guacamaya Oil Services S.A.S, and in turn can be used as support material for future experimentation with new techniques and substances, serving as a prototype for numerous applications.

I. Introducción

Entre los procesos clave para la explotación eficiente de los yacimientos de petróleo están la óptima selección y el desempeño de los fluidos de control utilizados en las operaciones de perforación, mantenimiento, reacondicionamiento y estimulación de pozos, actividades en las que, desde hace algunos años, la tecnología de *coiled tubing* viene trabajando. Esta tecnología se ha venido posicionando como una alternativa eficiente y versátil para los retos que establece la industria del petróleo en la actualidad, dados los innumerables procedimientos que se pueden realizar con ella en campo, tales como la limpieza de pozos, las operaciones de pesca, la estimulación matricial ácida y el fracturamiento hidráulico, las cuales requieren de la circulación de fluidos en el pozo sin necesidad de *matar* o controlar el pozo.

La acumulación de arena y sólidos en los pozos perjudica significativamente la producción de petróleo y gas. De hecho, prácticamente la mitad de las operaciones con tubería flexible conllevan trabajos de limpieza de pozos para la remoción de los escombros.

El movimiento de la arena y la acumulación de escombros pueden producir un impacto considerable sobre el flujo de fluido. En la superficie un río puede depositar un volumen tan grande de limo que llega a obstaculizar su propio flujo, modificando su curso, convirtiéndose en una amenaza para las zonas agrícolas y las comunidades. De un modo similar, el influjo de arena puede afectar o detener el flujo de petróleo proveniente de un yacimiento (Ali et al., 2005).

Las operaciones de limpieza de pozos constituyeron unas de las primeras aplicaciones para los servicios de *coiled tubing*. Las estimaciones globales indican que casi un 50% de las operaciones con *coiled tubing* se lleva a cabo para remover sólidos, tales como arena producida o restos de apuntalante provenientes de los tratamientos de fracturamiento hidráulico (Rolovic, Weng, Hill, Robinson, Zemlak, & Najafov, 2004). En general, los desarrollos continuos registrados en los sistemas de operaciones con *coiled tubing* han permitido que los operadores avancen, al mismo tiempo que se incrementan las profundidades y tortuosidades de los pozos y se aumenta la complejidad de las condiciones ambientales de fondo de pozo (Barriol et al., 2005).

Con base en lo anterior se identificó la necesidad de desarrollar un prototipo simulador de la mecánica de fluidos para las diversas operaciones de limpieza y separación de fases que se pueden llevar a cabo en pozos de petróleo verticales y horizontales, mediante tecnología *coiled tubing*. Este prototipo permitirá, de forma didáctica, real y novedosa, la capacitación del personal de la empresa Guacamaya Oil Services S.A.S, y a su vez podrá ser usado como material de apoyo para futuras experimentaciones con nuevas técnicas y sustancias, prestándose como prototipo para numerosas aplicaciones.

Este simulador cuenta con un sistema de control, a través de una bomba electro sumergible de inyección de fluido, y con medidas de presión y caudal para los fluidos que se desplazan en los pozos de petróleo (Creus-Solé, 1997) en las operaciones descritas. Igualmente cuenta con una interfaz gráfica informá-

tica que permite evidenciar el comportamiento de las variables de operación presión de inyección de fluido, presión de esfuerzo *tubing – coiled tubing* y caudal de inyección de fluido, para su posterior análisis, permitiendo evidenciar sus características físicas y su función correspondiente en la operación establecida; asimismo cuenta con el diseño de una aplicación móvil que, usando tecnología bluetooth, establece comunicación entre el simulador y el usuario, lo cual permite realizar control *on/off* sobre el simulador. Este prototipo cuenta, en superficie, con los diferentes cabezales requeridos, los implementos, las herramientas y los equipos donde van las unidades a través de las cuales se lleva la tubería flexible (en este caso para realizar las operaciones) y al mismo tiempo la iluminación correspondiente para la estética y la representación más realista posible; se constituye así en un diseño novedoso y práctico de ingeniería, debido al manejo de software y hardware para creación y ensamblaje de piezas en 3D, elaboradas por los autores.

II. Metodología

Para realizar el prototipo simulador y dar cumplimiento a los objetivos del proyecto, fue necesario dividir el proyecto en las siguientes fases: capacitaciones basadas en *coiled tubing*, diseño del prototipo simulador, diseño del sistema de control del simulador y diseño de la interfaz gráfica.

2.1 Capacitaciones basadas en *coiled tubing* (limpieza de arenas – separación de fases)

Esta fase consistió en la realización de diferentes capacitaciones y prácticas (trabajo en campo) brindadas por Guacamaya Oil Services, las cuales fueron tomadas por los autores, con el fin de prepararse para el diseño e implementación de un prototipo realista y funcional.

Coiled tubing

Como se puede apreciar en la **FIGURA 1**, ésta nueva tecnología, que cuenta con tubería flexible de diámetro pequeño, que se puede introducir en pozos petroleros en operaciones *work-over*, permite la inyección de fluidos simulados en este proyecto. Cuenta con características similares a las tuberías convencionales, pero con la ventaja de que no es necesario conectarla tramo por tramo, para bajarla o retirarla del pozo, sino que se enrolla como una manguera en un carrete adecuado, accionado mecánicamente en la realidad.

Las ventajas operativas de la unidad de *coiled tubing* son (San Antonio, s.f):

- permite realizar operaciones sin necesidad de matar el pozo, con permanente control de surgencia;
- es bastante versátil para una amplia gama de trabajos;
- posibilita la realización de soluciones globales (servicios integrados);
- ofrece rapidez operativa y de movilización;
- es de bajo costo de locación y bajo impacto sobre el terreno en el que realiza trabajos;
- disminuye el impacto audio-visual; y
- ofrece la posibilidad de comando a distancia, lo cual contribuye a la seguridad personal.

This simulator has a control system, through an electric submersible fluid injection pump, and pressure and flow measurements for moving fluids in oil wells (Creus-Solé, 1997) in the depicted operations. It also has an informatics graphical interface that makes evident the behavior of the operating variables, pressure of fluid injection, tubing – coiled tubing pressure and flow of fluid injection, for later analysis, allowing it to demonstrate its physical characteristics and its corresponding role in the established operation; it also has the design of a mobile application, that uses Bluetooth technology to establish communication between the simulator and the user, which allows *on/off* control of the simulator. This prototype has, on the surface, different required heads, implements, tools and equipment in which are the units through which the coiled tubing is carried (in this case to perform the operations), with lighting corresponding to the aesthetics and the most realistic possible representation; therefore a novel and practical engineering design is constituted, handling software and hardware for building and assembling parts in 3D, developed by the authors.

II. Methodology

To create the simulator prototype and comply with the objectives of the project, it was necessary to divide the project into the following phases: training based on coiled tubing, design of the simulator prototype, control system design of the simulator and GUI design.

2.1 Training based on *coiled tubing* (sand cleaning – phases separation)

This phase consisted in conducting various training and practice sessions (field work) provided by Guacamaya Oil Services, which were taken by the authors, in order to prepare for the design and implementation of a realistic and functional prototype.

Coiled tubing

As shown in **FIGURE 1**, this new technology, which has a small diameter flexible tube and can be inserted into oil wells in work-over operations, allows the injection of fluids simulated in this project. It has similar characteristics to conventional tubes, but with the advantage that it is not necessary to connect it section by section, to lower or remove it from the well, but it rolls up like a hose in a reel, mechanically operated in reality.

Operational advantages of the coiled tubing units (San Antonio, s.f) are as follows:



Figure 1. Coiled tubing unit operating in oil well and SIMULADOR_GOS / Figura 1. Unidad de coiled tubing realizando operación en pozo petrolero y SIMULADOR_GOS

- permits operations to be performed without killing the well, with permanent control of upwelling;
- is very versatile for a wide range of works;
- makes it possible to realize global solutions (integrated services);
- offers operative and mobilization rapidity;
- it has low cost of location and low impact on the terrain where it is performed;
- diminishes the audio-visual impact; and
- offers the possibility to command from a distance, which contributes to personnel security.

Cleaning of oil wells

As indicated, during the production of oil wells and in the different operations of fracturing and perforation, there are problems with sand or solids accumulating as a result of these processes (Ali et al., 2005). At present, thanks to the versatile and rapid technological process, field engineers can access safer and more efficient methods for the removal of such debris and sand from the well; among these processes, the most common and efficient technique for cleaning consists in using a jet tool that is fed into the well through the Coil Tubing [CT], as shown in FIGURES 2, 3, 4, AND 5.

This technique has many advantages, including continuous pumping during such operations, which contrasts with pipes with standard works, which have to be

Limpieza de pozos petroleros

Como se indicó, durante la producción de pozos petroleros y en las diferentes operaciones de fractura y perforación, existen problemas de acumulación de arena o sólidos provenientes de dichos procesos (Ali et al., 2005). En la actualidad, gracias al versátil y rápido avance de la tecnología, los ingenieros de campo pueden acceder a métodos más eficaces y seguros para la eliminación de dichos escombros y arenas del pozo; entre dichos procesos, la técnica más eficiente y común hoy en día para la limpieza consiste en utilizar una herramienta por chorro que se baja en el pozo a través de Tubería Flexible [CT], tal como se muestra en las FIGURAS 2, 3, 4 Y 5. Ésta técnica posee innumerables ventajas, entre ellas se destaca el bombeo continuo durante este tipo de operaciones, lo que contrasta con tuberías con trabajos estándar, donde éste debe detenerse en varias ocasiones para realizar las correspondientes conexiones

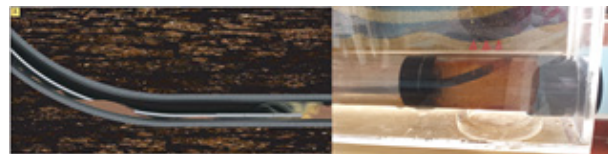


Figure 2. The cleaning tool is lowered using coiled tubing until the top of the filler / Figura 2. Se baja la herramienta de limpieza con coiled tubing hasta el tope del relleno

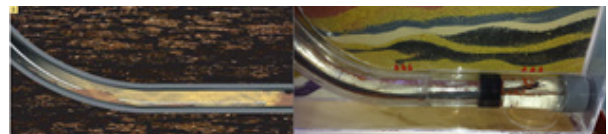


Figure 3. Penetration of the tool in the filler during the circulation, washing the solids and taking a bite / Figura 3. Penetración de la herramienta en el relleno durante la circulación, lava y moviliza los sólidos y toma un bocado



Figure 4. A previously planned bit length is reached and the jet cleaning tool is lifted to the top of the short cladding pipe (liner) to start the sweep process / Figura 4. Se alcanza una longitud de bocado previamente planificada y se sube la herramienta de limpieza por chorro hacia el extremo superior de la tubería de revestimiento corta (liner), para dar comienzo al proceso de barrido



Figure 5. The filler is being swept through a portion of the critical angular section (40–65°) of the well / Figura 5. El relleno está siendo barrido a través de una porción de la sección angular crítica (40 a 65 grados) del pozo

de tubería. Una vez se inicia el bombeo del fluido de limpieza escogido, de acuerdo con las características del pozo (estado mecánico, tamaño de las partículas) y a través de la tubería de producción, esta herramienta se baja e inicia el trabajo de lavado de la arena u otros escombros.

Mecánica de fluidos. Ejecución de operaciones (limpieza de arenas, separación de fases) en pozos petroleros utilizando coiled tubing

En general, una vez que los sólidos son barridos hacia el extremo superior de la tubería de revestimiento corta, la boquilla vuelve a fondo, se toma el siguiente bocado y el proceso se repite hasta remover todos los sólidos del pozo.

Las operaciones de limpieza de pozos constituyeron unas de las primeras aplicaciones para los servicios de *coiled tubing*. Las estimaciones globales indican que casi un 50% de las operaciones con *coiled tubing* se llevan a cabo para remover sólidos, tales como arena producida o restos de apuntalante provenientes de los tratamientos de fracturamiento hidráulico (Rolovic et al., 2004). En general, los desarrollos continuos registrados en los sistemas de operaciones con *coiled tubing* han permitido que los operadores avancen al mismo tiempo que se incrementan las profundidades y tortuosidades de los pozos y aumentan las complejidades de las condiciones ambientales de fondo de pozo (Ali et al., 2005).

2.2 Diseño del prototipo simulador

Nótese en la **FIGURA 6** el diseño del prototipo realizado en Autocad, el cual permite tener una visión más real del proyecto. Tras realizar el diseño del prototipo, se procede a la implementación a escala, en material acrílico, para lo que se realizan las correspondientes conversiones de pulgadas reales de tuberías correspondientes, tanto para el pozo vertical, como para el horizontal.

Es de vital importancia resaltar que dado a la relación de tamaño entre las profundidades, el diámetro de los pozos y las facilidades (implementos ubicados en la superficie del prototipo 3D) instaladas en el prototipo, se manejaron dos tipos de escalas, una correspondiente a los diámetros de los pozos (1:1,8), y otra a las facilidades (1:30), ya que, en la realidad, sus tamaños son muy grandes una con respecto de las otras. Si se hubiese manejado todo a la misma escala la tubería hubiese te-

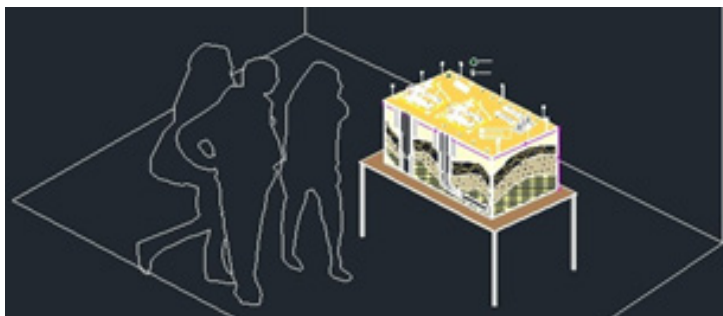


Figure 6. Design of the simulator of fluid mechanics for operations of cleaning and phase separation in vertical and horizontal wells with coiled tubing technology / Figura 6. Diseño del simulador de la mecánica de fluidos para operaciones de limpieza y separación de fases en pozos verticales y horizontales con tecnología coiled tubing

stopped several times to make the corresponding pipe connections. Once the chosen cleaning fluid, according to the characteristics of the well (mechanical condition, particle size), is pumped through the production tubing, this tool is lowered and the work of washing sand or other debris is started.

Fluid mechanics. Execution of operations (Sand cleaning, phase separation) in oil wells using coiled tubing

In general, once the solids are swept toward the upper end of the short cladding pipe, the nozzle returns to the background, the next bite is taken, and the process repeats until all the solids are removed from the well.

The cleaning of wells constitutes one of the first applications for coiled tubing services. Global estimations indicate that nearly 50% of operations with coiled tubing are performed to remove solids such as sand or rubble produced from hydraulic fracturing treatments (Rolovic et al., 2004). As mentioned, the continuous development in the systems of operations with coiled tubing has allowed operators to progress, while the depth of wells and their tortuosities are increasing and the complexity of environmental downhole conditions is augmented (Ali et al., 2005).

2.2 Design of the simulator prototype

Note in **FIGURE 6** the prototype design made in Autocad, which allows a more realistic view of the project to be realized. After making the prototype design, the next step taken is the scale implementation, in acrylic material, for which the corresponding *real inches* of tubing conversions are performed, for both the vertical shaft and the horizontal.

It is vital to highlight that given the size ratio between depths, the diameter of the wells and facilities (implementations located on the surface of the 3D prototype) installed in the prototype, two types of scales were used, one corresponding to the diameters of the wells (1:1.8), and the other to the facilities (1:30), since, in reality, their sizes are very large with respect to each other. If everything was handled at the same scale, the tubing would have very small dimensions, which would not have allowed it to be appreciated how the system operates. Finally, the tubing implemented, with the optimum diameter, can explain how this technology works.

FIGURE 7 shows the scaled prototype of the tubing corresponding to both the vertical well and the horizontal well of the simulator, as the different geological formations that usually oc-

cur in the fields, which were designed considering the stratigraphy of the upper Magdalena valley, in the department of Huila (López, Cortés, & Narváez, 2012).

Designs in SolidWorks for 3D printer

SolidWorks is CAD software for 3D mechanical modeling which allows the modeling of parts and extracts both technical planes and other necessary information for production. The process consists in transferring the initial idea to the CAD system, to virtually build the part. After the piece is designed and processed as an .stl file, the 3D printer is used for its elaboration. Finally, the object is conditioned with paint and additional details to make the piece a scale model (1:30, in this case) of the original.

HSEQ Designs

FIGURES 8–13 show different designs made in the SolidWorks program for subsequent acquisition of parts in 3D and their implementation in the simulator prototype.

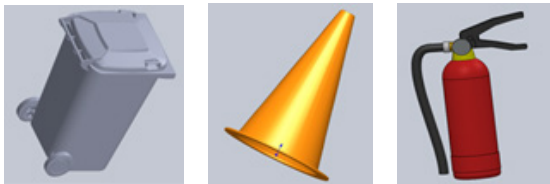


Figure 8. Designs of HSEQ parts for creation of spaces in SolidWorks (trash bin, cone, and extinguisher) / Figura 8. Diseños en Solid Works de piezas HSEQ en arme de locación (caneca de residuos, cono, extintor multipropósito)



Figure 9. Designs of parts for illumination in SolidWorks for creation of spaces (lamp post, power plant, reflector) / Figura 9. Diseños en Solid Works de piezas para iluminación en el arme de locación (Luz posta, planta estadio, reflector)

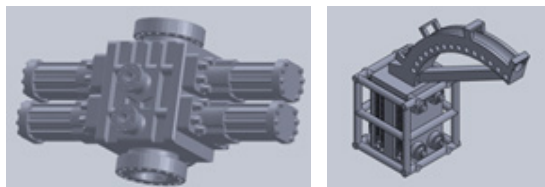


Figure 11. Design of parts over well-head assembly in SolidWorks (BOP, injector of coiled tubing unit) / Figura 11. Diseños en Solid Works de piezas sobre arme de cabezal de pozo (BOP, inyector de unidad de coiled tubing)

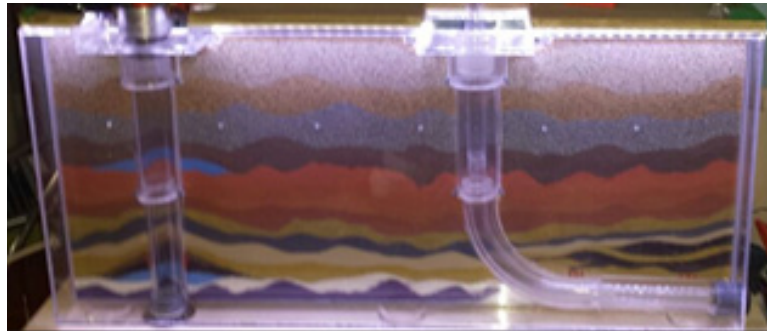


Figure 7. Scale prototype of tubing of horizontal and vertical oil wells implemented in the simulator / Figura 7. Prototipo a escala de tuberías de pozo horizontal y vertical de petróleo implementado en el simulador

nido unas dimensiones muy pequeñas, con lo cual no se habría logrado apreciar la forma en que opera el sistema. Finalmente, la tubería que se implementó, de un diámetro óptimo, permite explicar el funcionamiento de trabajo de esta tecnología.

En la FIGURA 7 se evidencia el prototipo a escala de las tuberías correspondientes tanto al pozo vertical como horizontal del simulador, al igual que las diferentes formaciones geológicas que se presentan en los yacimientos habitualmente, las cuales se realizaron teniendo en cuenta la estratigrafía valle superior del magdalena, correspondiente al departamento del Huila (López, Cortés, & Narváez, 2012).

Diseños en Solid Works para impresora 3D

Solid Works es un software CAD para modelado mecánico en 3D que permite modelar piezas y extraer, tanto planos técnicos, como otro tipo de información necesaria para la producción. El proceso consiste en trasvasar la idea inicial al sistema CAD, construyendo virtualmente la pieza. Después de diseñada la pieza y procesada como archivo .stl, se utiliza la impresora 3D para su elaboración. Finalmente, el objeto es acondicionado con pintura y detalles adicionales que le per-



Figure 10. Designs of parts for the unit of coiled tubing in SolidWorks (reel, toolbox, manifold) / Figura 10. Diseños en Solid Works de piezas para la unidad de coiled tubing (Rollo, caja de herramientas, manifold)

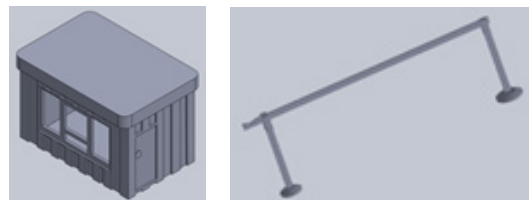


Figure 12. Design of parts for creation of spaces in SolidWorks (booth, parking barrier at entrance to the space) / Figura 12. Diseños en Solid Works de piezas de locación (caseta, stop parking de entrada a locación)

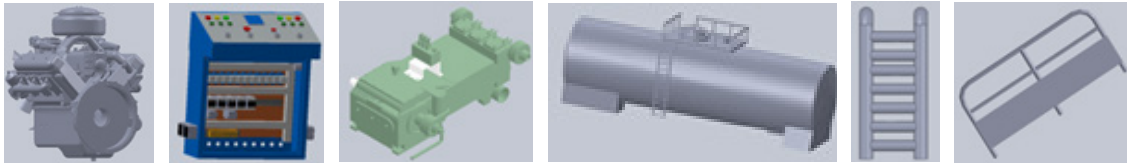


Figure 13. Designs of parts for the pumping unit in SolidWorks (motor, control unit, pump, grate, fluid storage tank, ladder) / Figura 13. Diseños en Solid Works de piezas para la unidad de bombeo (motor, control de mandos, bomba, reja, tanque de almacenamiento de fluidos, escalera)

mitan a la pieza ser un modelo a escala (1:30, en este caso) del objeto original.

Diseños HSEQ

En las FIGURAS 8 A 13 se observan los diferentes diseños realizados en el programa Solid Works para la posterior obtención de piezas en 3D y su implementación en el prototipo simulador.

2.3 Diseño del sistema de control del simulador

Esta fase del proyecto (FIGURA 14) permite que la bomba sumergible se active o desactive por medio de la orden que recibe a través de un dispositivo móvil con sistema operativo Android. Las diversas plataformas software para el desarrollo de aplicaciones móviles que se están implementando en la actualidad, permiten la comunicación, en este caso vía bluetooth con una tarjeta hardware Arduino basada en microcontroladores, con entornos de desarrollo que implementan *Wiring* (lenguajes propios de programación), lo que permite la ejecución de múltiples diseños y proyectos electrónicos *ejecutables*, en la misma tarjeta hardware, con sencillez, a bajo costo y con la posibilidad

2.3 Design of the control system of the simulator

This phase of the project (FIGURE 14) allows the submersible pump to be activated or deactivated by an order received through a mobile device with Android OS. The various software platforms for developing mobile applications that are being implemented today permit communication, in this case via Bluetooth with Arduino card hardware based on microcontrollers, with development environments that implement *Wiring* (own programming languages), allowing the execution of multiple designs and *executable* electronic projects, in the same hardware card, simply, inexpensively and with the possibility of working with wireless communication, something optimal for the development of the application (Arduino Leonardo ...).

The control consists of an activation system operated from a cellphone via a mobile application. Then the hardware card is programmed to receive data sent from the phone, interprets it and proceeds to make the corresponding digital outputs to perform the indicated operation, whether they are the various lighting circuits of the prototype or the action to control the submersible pump that permits the passage of fluid to be injected into both the vertical well and the horizontal. In this manner, the sand cleaning process is started, where phase separation is evident, as in a conventional fieldwork procedure.

The SIMULADOR_GOS application offers a simple interface (FIGURE 15) where the user performs the activation and deactivation tasks through tactile commands; these commands are sent, through the connection of the device, to the server or Arduino module, Bluetooth, which processes the information and carries out the corresponding task.

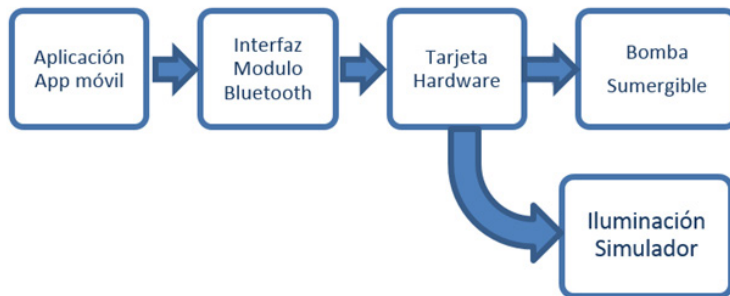


Figure 14. Control system: Diagram of blocks / Figura 14. Diagrama de bloques del sistema de control

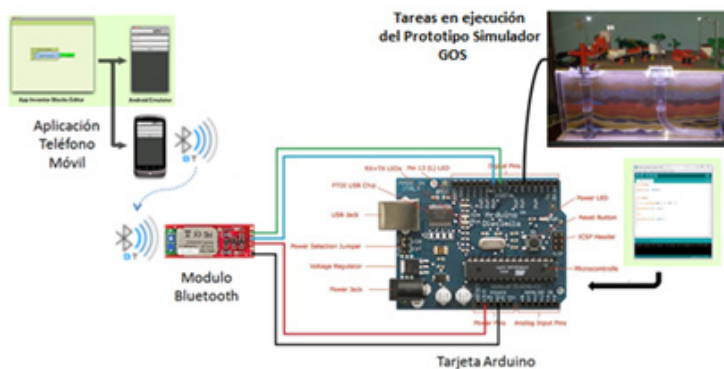


Figure 15. Graphic representation of functioning of the mobile application / Figura 15. Representación gráfica del funcionamiento de la aplicación móvil

2.4 Design of the graphical interface

The mobile application permits control over the SIMULADOR_GOS prototype; however, the prototype has sensors that allow monitoring of the pressure and flow of the fluid injected to the corresponding wells of the simulator in real time. For this task an informatics graphical interface is designed and implemented, an executable file created under C# language in SharpDevelop that permits the acquisition, processing and graphing of the data corresponding to the variables: injection pressure, pressure in the annular tubing – coiled tubing and flow.

Design of the window (Form)

SharpDevelop has Windows Forms that allow the visual design of the window. The ComboBox control of Windows Forms is used to show data in a deployable mixed frame. By default, ComboBox control is a frame that lists a set of elements, from which the user can choose one. This control permits selection of the port where the Arduino Leonardo card is connected –for this application acting as an acquisition card– and sends by serial port the data taken from each sensor.

The *control button* of Windows Forms permits the user to execute an action by a *click*. The *control button* is used to «start» or «stop» processing and data graphing. PictureBox are classes that represent the control of image frames in Windows, which are useful to show the logos of the company and the University, together with an image that identifies coiled tubing.

The labels are components used to display static text or messages within shapes, such as text or headers and requests the program makes to the user to provide any data or information. The header and title of each graph correspond to labels. Finally, the window has three graphs –the variables in measurement– that each correspond to a ZedGraphControl, which allows the implementation of charts or 2D graphics on the form.

Pressure measurement

Pressure in the fluids corresponds to the force these apply to the surface they go through; that is why it is an essential measurement to optimize the recovery of hydrocarbon. Currently, formation pressure can be exactly determined in practically any part of the life cycle of an oil well. **FIGURE 16** shows the sensor implemented: an integrated MPX 5010 pressure sensor with a signal conditioner and compensation by temperature, whose

de trabajar con comunicación inalámbrica, algo óptimo para el desarrollo de la aplicación (Arduino Leonardo...).

El control consiste en un sistema de activación operado desde teléfono celular mediante una aplicación móvil. A continuación se programa la tarjeta hardware para que reciba los datos enviados desde el teléfono, los interprete y proceda a efectuar las salidas digitales correspondientes para ejecutar la operación indicada; ya sean los diferentes circuitos de iluminación del prototipo o la acción de controlar la bomba sumergible que permita el paso de los fluidos a inyectar, tanto al pozo vertical, como al horizontal. De esta manera se inicia el proceso de limpieza de arenas, donde se evidencia la separación de fases, tal como sucede en un procedimiento habitual de trabajo en campo.

La aplicación SIMULADOR_GOS ofrece una interfaz simple (**FIGURA 15**) en la cual el usuario realiza las tareas de activación y desactivación por medio de comandos táctiles; estos comandos son enviados, mediante la conexión del celular o dispositivo móvil, hacia el servidor o módulo Arduino, vía bluetooth, el cual procesa la información y lleva a cabo la tarea correspondiente.

2.4 Diseño de la interfaz gráfica

La aplicación móvil permite control sobre el prototipo SIMULADOR_GOS; sin embargo, el prototipo cuenta con sensores que permiten el monitoreo en tiempo real de variables de presión y caudal del fluido que se inyecta a los correspondientes pozos del simulador. Para dicha tarea se diseña e implementa una interfaz gráfica informática, un ejecutable creado en lenguaje C# en SharpDevelop que permite la adquisición, el procesamiento y el graficado de los datos correspondientes a las variables: presión de inyección, presión en el *annular tubing* – *coiled tubing* y caudal.

Diseño de la ventana (formulario)

SharpDevelop cuenta con formularios de Windows que permiten el diseño visual de la ventana. El control ComboBox de Windows Forms se utiliza para mostrar datos en un cuadro combinado desplegable. De forma predeterminada, el control ComboBox es un cuadro que lista una serie de elementos, de la cual el usuario puede seleccionar alguno. Este control permite seleccionar el puerto al cual está conectada la tarjeta Arduino Leonardo –que para esta aplicación actúa como tarjeta de adquisición– y envía por puerto serial los datos tomados de cada sensor.

El *control button* de Windows Forms permite al usuario ejecutar una acción a través de un *click*. Se utiliza el *control button* para «iniciar» o «detener» el procesamiento y el graficado de los datos. Los PictureBox son clases que representan un control de cuadro de imágenes de Windows útil para mostrar los logos de la Empresa y la Universidad, junto con una imagen que identifica *coiled tubing*.

Los *label* son componentes que se utilizan para desplegar textos o mensajes estáticos dentro de las formas, textos tales como encabezados y solicitudes que hace el programa al usuario, para que proporcione algún dato o información. El encabezado y los títulos

de cada gráfica corresponden a *labels*. Finalmente, la ventana cuenta con tres gráficas –las variables en medición–, las cuales corresponden a un *ZedGraphControl* cada una, que permite implementar *charts* o gráficos de tipo 2D en el formulario.

Medición de presión

La presión en los fluidos corresponde a la fuerza que estos ejercen sobre la superficie que recorren o en la que se encuentran; por ello es una medición esencial para optimizar la recuperación de hidrocarburos. Actualmente se pueden determinar las presiones de formación en forma exacta, prácticamente en cualquier momento del ciclo de vida de un pozo petrolero. En la **FIGURA 16** se observa el sensor implementado: un sensor de presión con acondicionador de señal y compensación por temperatura integrados MPX 5010, cuyo funcionamiento está basado en un transductor piezoresistivo, diseñado para un amplio rango de aplicaciones (0 – 10 kPa), con sensibilidad: 450Mv/mm (4.413 mV/mm H₂O).

Medición de caudal a través de flujo

La industria no cuenta con una variedad de sensores de caudal de dimensiones pequeñas, por lo que se utilizó un sensor de flujo (Figura 17); con base en dicha medida y por medio de ecuaciones matemáticas se halla el caudal. Para la variable de flujo existen varios métodos, según el tipo de caudal a medir; sin embargo, el estudio se centró en el medidor tipo turbina, el cual fue escogido en la implementación por razones económicas, a pesar de su exactitud de $\pm 1\%$.

Sensor de velocidad tipo turbina

El funcionamiento de la turbina consiste en un rotor que realiza un movimiento giratorio al detectar el paso del fluido con una velocidad directamente proporcional al caudal, que es la que ejerce una fuerza de arrastre en el rotor y hace que éste gire por diferencia de presión en su área, sin necesidad de mecanismos de rodamientos que, al usarlos, producirían rozamiento (Creus-Solé, 1997). La turbina genera un campo magnético que es leído y codificado por un sensor de efecto Hall. En la **FIGURA 18** se puede evidenciar la interfaz gráfica de lectura de los sensores ya mencionados para poder ser monitoreados por el usuario del Prototipo SIMULADOR_GOS.



Figure 16. Pressure sensor MPX5010 / Figura 16. Sensor de presión MPX5010



Figure 17. Flow sensor (flow rate) SEN_0394 / Figura 17. Sensor de flujo (caudal) SEN_0394

functioning is based on a piezoresistive transducer, designed for a wide range of applications (0–10) kPa, with a sensitivity of 450Mv/mm (4.413 mV/ mmH₂O).

Measurement of flow ratio through the stream

The industry does not have a variety of digital sensors for flow ratios of small dimensions, which is why a flow sensor was used (**FIGURE 17**); based on this measure and using mathematical equations, the flow is found. For the flow variable there are many methods, according to the type of flow ratio to be measured; however, the study focused on the meter type turbine, which was chosen in the implementation for economic reasons, despite its accuracy of $\pm 1\%$.

Turbine speed sensor

The operation of the turbine consists of a rotor that performs a rotary motion to detect the passage of a fluid at a rate directly proportional to the flow, which exerts a tractive force on the rotor and causes it to rotate due to the difference of pressure in its area, without bearing mechanisms, which, when used, would produce friction (Creus-Solé, 1997). The turbine generates a magnetic field which is read and encoded by a *hall effect* sensor.

FIGURE 18 shows the graphical interface of sensor recordings already mentioned,



Figure 18. Response data electronic sensors (graphical interface) / Figura 18. Respuesta data sensores electrónicos (interfaz gráfica)

to be monitored by the user of the SIMULADOR_GOS Prototype.

2.5 Design of the circuit

The circuit has two important functions, one that is in charge of the input of the data from the sensors to the Arduino Leonardo card, and the other that manages the control over the illumination, lightning tower, and pumping, and at the same time has a power stage of 5 volts DC (Arduino) to 120 volts AC (public electric system).

Simulation

FIGURE 19 corresponds to the design of the electrical plane in its corresponding simulation of a circuit in the software ISIS Proteus. The designs made in ISIS can be simulated in real time, using the VSM module (virtual system modeling) directly associated with ISIS.

III. Results

The tangible result of the project is the design, implementation and validation of the first simulator prototype of fluid mechanics for operations of cleaning and phase separation in vertical and horizontal wells with coiled tubing technology in Colombia, which allows the user to observe, clearly and precisely, what such processes consist of. FIGURES 20 TO 22 show the prototype installed from different angles, while FIGURES 23 AND 24 show details of interfaces. Note that the

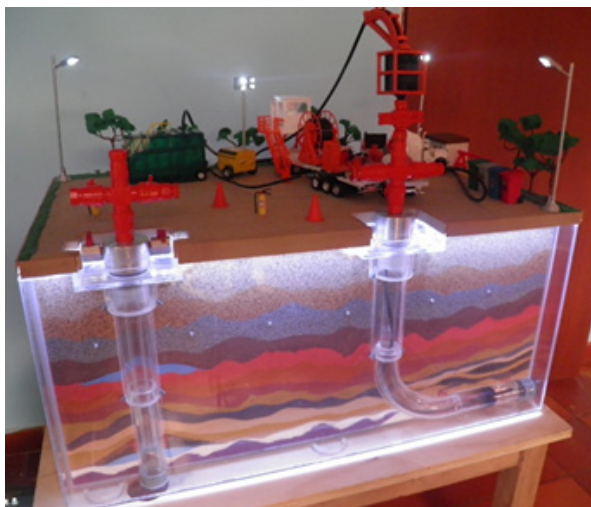


Figure 20. Implemented simulator prototype / Figura 20. Prototipo simulador implementado

2.5 Diseño del circuito

El circuito cuenta con dos funciones importantes, una que se encarga del ingreso de los datos de los sensores a la tarjeta Arduino Leonardo, y otra que maneja la parte del control sobre la iluminación, la planta estadio y el bombeo, que a su vez cuenta con una etapa de potencia de 5 voltios DC (Arduino) a 120 voltios AC (red pública).

Simulación

La FIGURA 19 corresponde al diseño del plano electrónico en su correspondiente simulación del circuito en el software ISIS Proteus. Los diseños realizados en ISIS pueden ser simulados en tiempo real, mediante el módulo VSM (Sistema Virtual de Modelado), asociado directamente con ISIS.

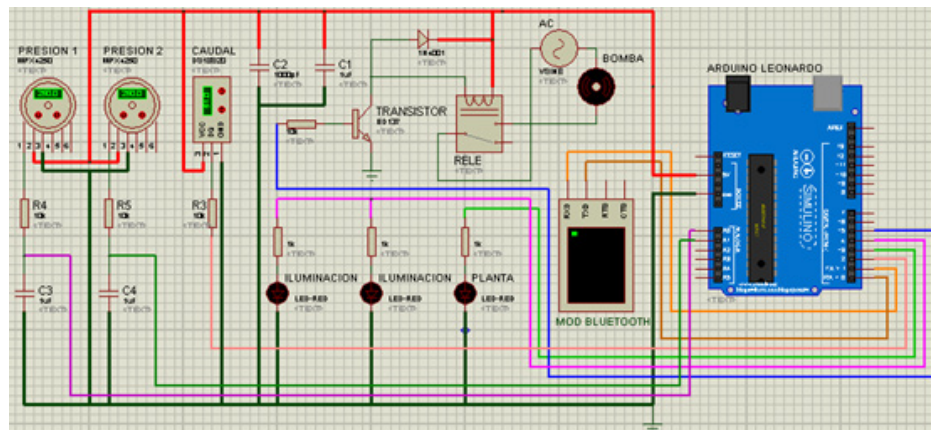


Figure 19. Simulation / Figura 19. Simulación

III. Resultados

El resultado tangible del proyecto es el diseño, la implementación y validación del primer prototipo simulador de la mecánica de fluidos para operaciones de limpieza y separación de fases en pozos verticales y horizontales con tecnología *coiled tubing* en Colombia, el cual permite al usuario observar, de manera clara y precisa, en qué consiste dichos proceso. Las FIGURAS 20 A 22 muestran el prototipo instalado desde diversos ángulos, las FIGURAS 23 Y 24, por su parte, presentan detalles de las interfaces. Cabe destacar que la respuesta de cada uno



Figure 21. Right lateral view of the prints of the 3D pieces made in SolidWorks, situated at the oil location / Figura 21. Vista lateral derecha de las impresiones de las piezas en 3D ubicadas en locación petrolera realizadas en Solid Works



Figure 22. Left lateral view of the prints of the 3D pieces made in SolidWorks, situated at the oil location / Figura 22. Vista lateral izquierda de las impresiones de las piezas en 3D ubicadas en locación petrolera realizadas en Solid Works



Figure 23. Screenshot of graphical interface of the ON/OFF control system of the Android mobile application / Figura 23. Screen interfaz gráfica del sistema de control ON/OFF de la aplicación móvil Android

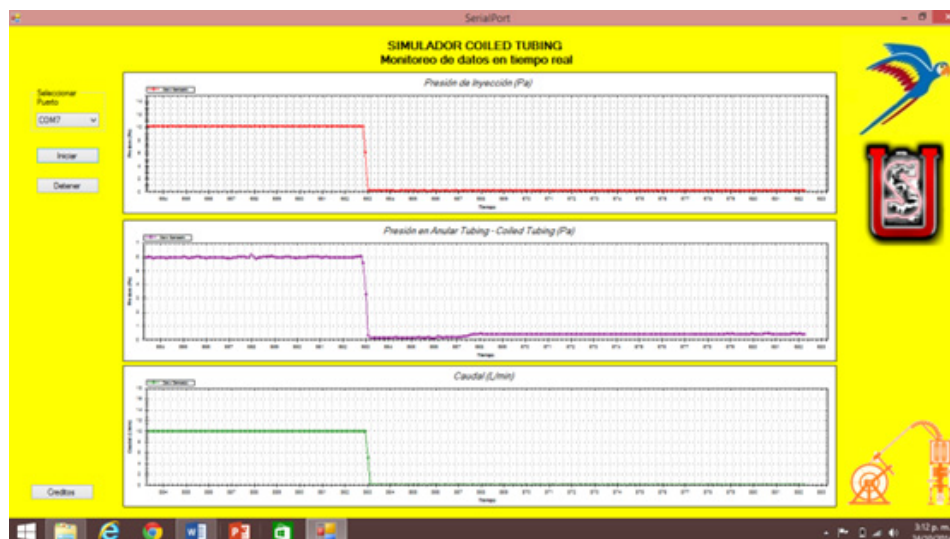


Figure 24. Graphical interface of the acquisition and data monitoring system (Data SIMULADOR_GOS) / Figura 24. Interfaz gráfica del sistema de adquisición y monitoreo de datos (Data SIMULADOR_GOS)

de los sensores electrónicos implementados, es óptima, y permite analizar, evaluar y monitorear el comportamiento de las variables esperadas, durante la simulación de las operaciones.

Conclusiones

De manera satisfactoria se ha presentado el diseño y la implementación del primer prototipo simulador de la mecánica de fluidos para operaciones de limpieza y separación de fases en pozos verticales y horizontales con tecnología *coiled tubing* en Colombia, el cual permite, no solo a los operarios, sino en general al personal de Guacamaya Oil Services o a cualquier interesado en capacitación u observación, evidenciar de mane-

response of each of the implemented electronic sensors is optimal, and permits the user to analyze, evaluate and monitor the behavior of the expected variables during the simulation of operations.

Conclusions

A satisfactory presentation is made of the design and implementation of the first prototype fluid mechanics simulator for cleaning and phase separation in vertical and horizontal wells with coiled tubing technology in

Colombia, which allows not only operators, but general staff of Guacamaya Oil Services or anyone interested in training or observation, to clearly visualize the process of fluid injection through coiled tubing technology.

The above facilitates handling and operation, and understanding of the prototype thanks to the good performance of the created application, which permits the user to control the submersible fluid injection pump and light it by an ON / OFF method via Bluetooth communication.

Similarly, the response of each of the implemented electronic sensors, the fluid injection pressure sensor, pressure sensor annular tubing – coiled tubing and fluid injection flow rate sensor, is optimal because it allows the user to analyze, evaluate and monitor the behavior of these variables during the simulation of these operations, giving the company the ability to improve these processes with coiled tubing units. Through it, workers (technicians and engineers) are provided with a clearer and more specific understanding of the operation to perform in the field for their customers, which helps to generate solutions and quick responses in such processes. This is evidenced in the awareness and importance of always using HSEQ working safety equipment.

Acknowledgments

The authors thank to Guacamaya Oil Services for financial support, technical orientation and facilities provided for development of this project. *ST*

References / Referencias

- Ali, A., Blount, C., Hil, S., Loveland, M., Mokhtar, S... Zhou, W. (2005). Sistemas Integrados de Limpieza de Pozos: Mejoramiento de la eficiencia y Reducción del riesgo. *Oilfield Review, Autumn 2005*, 4-15. Available at http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish05/aut05/composite.pdf
- Arduino Leonardo [on-line]. Retrieved from <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardLeonardo>
- Barriol, Y., Sullivan, K., Pop, J., Bartman, B., Corbiell, R... Volokitin, Y. (2005). Las presiones de las operaciones de perforación y producción. *Oilfield Review, Winter 2005-2006*, 26-47. Available at http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish05/win05/p26_47.pdf
- Creus-Solé, A. (1997). *Instrumentación industrial: turbinas*. Ciudad de México, México: Alfa Omega
- López, A., Cortés, M., & Narváez, D. (2012). *Cuencas Sedimentarias de Colombia* [documento de clase: Centro de Estudios Petroleros - unpublished]. Available at <http://es.slideshare.net/macorca123/cuencas-sedimentarias-de-colombiadoc-1>
- Rolovic, R., Weng, X., Hill, S., Robinson, G., Zemlak, K., Najafov, J. (2004). An Integrated System Approach to Wellbore Cleanouts with Coiled Tubing [SPE-89333-MS]. In *SPE/ICoTA Coiled Tubing Conference and Exhibition* [March 23-24, Houston, TX]. Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/89333-MS
- San Antonio (s.f). *Coiled Tubing* [on-line] Retrieved from <http://www.oilproduction.net/files/coiledtubing-sanantonio.pdf>

ra clara el proceso mediante la inyección de fluidos a través de tecnología *coiled tubing*.

Lo anterior facilita el manejo y funcionamiento, y la comprensión del prototipo gracias al correcto desempeño de la aplicación creada, que permite controlar la bomba sumergible de inyección de fluidos y la iluminación de éste de manera ON/OFF mediante comunicación *bluetooth*.

De igual manera, la respuesta de cada uno de los sensores electrónicos implementados, sensor presión de inyección de fluido, sensor presión *annular tubing – coiled tubing* y sensor caudal de inyección de fluido, es óptima, ya que permite analizar, evaluar y monitorear el comportamiento de dichas variables durante la simulación de éstas operaciones, lo que brinda a la empresa la posibilidad de mejorar dichos procesos con unidades *coiled tubing*. A través de ella se provee a los trabajadores (técnicos e ingenieros) de una idea más clara y concreta sobre la operación a realizar en campo a sus clientes, lo que contribuye a generar soluciones y respuestas rápidas en tales procesos. Esto se ve evidenciado en la concientización e importancia de utilizar en todo momento de trabajo los implementos de seguridad HSEQ.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Guacamaya Oil Services, empresa que brindó tanto el apoyo financiero, como la orientación técnica y las facilidades necesarias para el desarrollo de este proyecto. *ST*

CURRICULUM VITAE

Juan David Tarache Serrano Environmental Engineer (Universidad Piloto de Colombia), Specialist in Coiled Tubing and Sigma Engineer (Halliburton University), with six years of experience as Coiled Tubing Engineer, and three as Operational Manager at Guacamaya Oil Services S.A.S., (Neiva, Colombia). / Ingeniero Ambiental de la Universidad Piloto de Colombia, especialista en *Coiled Tubing* e Ingeniero Sigma (Halliburton University) con experiencia de seis años como Ingeniero de *Coiled Tubing* y tres como Gerente de Operaciones en Guacamaya Oil Services S.A.S., (Neiva, Colombia).

Germán Eduardo Martínez Barreto Electronics Engineer (Universidad Distrital Francisco José de Caldas), Specialist in Industrial Control (Universidad de Ibagué – Cooruniversitaria), and Specialist in Pedagogy of Dynamical Systems (Universidad Surcolombiana [USCO], Neiva-Colombia), with fifteen years of teaching experience as professor at USCO. / Ingeniero Electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; Especialista en Control Industrial (Universidad de Ibagué – Cooruniversitaria); Especialista en Pedagogía de Sistemas Dinámicos (Universidad Surcolombiana). Cuenta con quince años de experiencia docente en la Universidad Surcolombiana (Neiva, Colombia), donde se desempeña como profesor de tiempo completo.

Jenny Catalina González Peña Electronics Engineer (Universidad Surcolombiana - Neiva, Colombia). Engineer of Training Operations at Guacamaya Oil Services S.A.S., (Neiva, Colombia), since 2014. / Ingeniera Electrónica de la Universidad Surcolombiana (Neiva, Huila). Ingeniera de Operaciones Training en Guacamaya Oil Services S.A.S., (Neiva, Huila), desde 2014.

Magda Alexandra Trujillo Jiménez Electronics Engineer and professor at Universidad Surcolombiana (Neiva, Colombia). / Ingeniera Electrónica; docente de la Universidad Surcolombiana (Neiva, Huila).