



Revista INGENIERÍA UC

ISSN: 1316-6832

revistaing@uc.edu.ve

Universidad de Carabobo

Venezuela

González, L.; Martino, L.

Desarrollo de una herramienta computacional aplicada al diseño de perforación horizontal dirigida en la instalación de tuberías para el transporte de gas

Revista INGENIERÍA UC, vol. 24, núm. 2, agosto, 2017, pp. 218-230

Universidad de Carabobo

Carabobo, Venezuela

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=70753474009>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

# Development of a computational tool applied to the design of horizontal drilling directed in the installation of pipelines for the transportation of gas

L. González, L. Martino\*

*Centro de investigación en materiales, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.*

---

## Abstract.-

This research presents the development of a computational tool that allows you to get the engineering design of 2D directionals in the installation of underground pipeline, so that established a procedure that allows generating optimal designs, which consider the analysis of the efforts associated with the implementation of the technique and the properties of the pipeline to adapt to the geometry of installation. As a main result was obtained a computational tool that allows for the design of the geometric profile of a directional combining the main virtues of commercial licenses to the design of directional, in addition is added in the design considerations the calculation of the minimum radius of curvature by natural bending, of the pipeline and the geographical location of the directional by the coordinates of the system Universal Transverse Mercator (UTM) in each one of its progressive. It is recommended to extend the calculation for the cases of design of directional in 3D.

**Keywords:** directionals; horizontal drilling directed; gas transportation.

## Desarrollo de una herramienta computacional aplicada al diseño de perforación horizontal dirigida en la instalación de tuberías para el transporte de gas

### Resumen.-

Esta investigación presenta el desarrollo de una herramienta computacional para el diseño ingenieril de direccionales en 2D en la instalación de tuberías subterráneas, por lo que se estableció un procedimiento que permite generar diseños óptimos, que consideren el análisis de los esfuerzos asociados a la implementación de la técnica y las propiedades de la tubería para adaptarse a la geometría de instalación. Como resultado principal se obtuvo una herramienta computacional que permite obtener el diseño del perfil geométrico de una direccional combinando las principales virtudes de licencias comerciales para el diseño de direccionales, además se agrega en las consideraciones del diseño el cálculo del radio de curvatura mínimo por flexión natural, de la tubería y la ubicación geográfica de la direccional mediante las coordenadas del sistema Universal Transversal de Mercator (UTM) en cada una de sus progresivas. Se recomienda ampliar el cálculo para los casos de diseño de direccionales en 3D.

**Palabras clave:** direccionales; perforación horizontal dirigida; transporte de gas.

Recibido: octubre 2016

Aceptado: agosto 2017

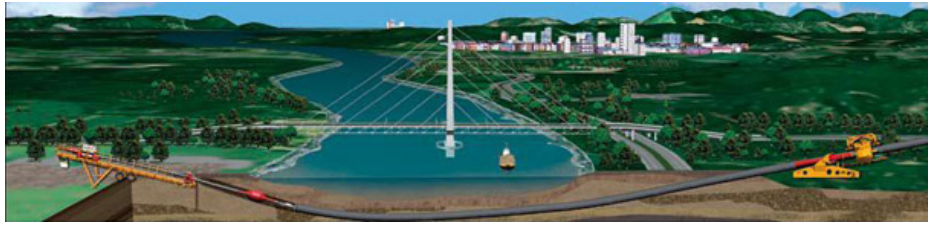
### 1. Introducción

La Perforación horizontal dirigida (PHD) es una técnica de perforación aplicada en la instalación de tuberías que se implementa en los casos donde

---

\*Autor para correspondencia

Correo-e: [lmartino.uc@gmail.com](mailto:lmartino.uc@gmail.com) (L. Martino)



Tomada de <http://www.construtec.es/aplicaciones/tecnologia-sin-zanja/perforacion-dirigida-horizontal/>

Figura 1: Esquema general de PHD.

las condiciones topográficas y/o la presencia de obstáculos no permiten la instalación de tuberías mediante métodos tradicionales de apertura y relleno de zanjas (Figura 1). Como su nombre lo indica, esta técnica posee la virtud de poder guiar la trayectoria de perforación para esquivar los obstáculos que puedan existir en la zona donde se desea realizar el cruce o la direccional, ya sean naturales, como ríos, zonas pantanosas o áreas de conservación, y/o artificiales, como líneas de ferrocarril, autopistas o zonas urbanas [1].

La PHD aunque bien definida y comúnmente usada con conocimiento empírico del procedimiento constructivo, es escasa la información existente sobre el diseño de direccionales mediante esta técnica tan beneficiosa. La ausencia de información que ha existido respecto a esta técnica, ha ocasionado la mala aplicación de la misma por diseños erróneos. También, esta situación ha generado que las pocas empresas que poseen información sobre la aplicación de la técnica en la instalación de tuberías, demanden grandes sumas de dinero por el diseño y fabricación de direccionales (tuberías instaladas mediante perforación horizontal dirigida). Además, las licencias comerciales de software existentes que sirven de apoyo a algunas partes del diseño, son prácticamente inaccesibles para ciertas empresas de ingeniería de diseño. Es por esta situación, que esta investigación tiene como objetivo principal el desarrollo de una herramienta computacional que permita obtener el diseño ingenieril de direccionales en 2D. Durante el desarrollo de este trabajo, también se estableció un procedimiento de diseño de direccionales que permite generar diseños óptimos, que consideran el análisis de los esfuerzos asociados a la implementación de

la técnica y a las propiedades de la tubería para adaptarse a la geometría de instalación.

La aplicación de la técnica de PHD mediante una herramienta computacional, facilita la implementación de la misma y por tanto el aprovechamiento de sus ventajas inherentes como lo es el tener un impacto ambiental prácticamente nulo y los beneficios en el aspecto social como lo son la posibilidad de realizar cruces de ríos y vías terrestres de comunicación sin afectar las condiciones de flujo y de servicio, respectivamente, y la eliminación del efecto negativo sobre las infraestructuras existentes; brindando mayor seguridad, especialmente en zonas muy pobladas, ya que al estar bajo tierra se reducen considerablemente los riesgos por accidentes o por daños en las tuberías.

## 2. Desarrollo de la investigación

En términos generales, el proceso de PHD comienza con una pequeña perforación, llamada perforación piloto, convenientemente guiada, durante la cual diferentes tipos de brocas son empleadas para aflojar el suelo al mismo tiempo que éste se mezcla con una solución estabilizante, generalmente a base de lodos bentoníticos, que se suministra por bombeo a través del cuerpo de la sarta de perforación, para facilitar el avance de la misma.

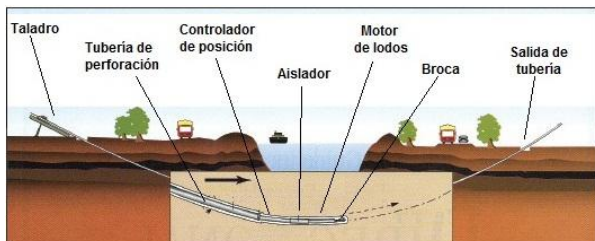
Una vez que se ha completado la perforación inicial, el cabezal de perforación sale a la superficie en el punto de salida y la perforación tiene el diámetro suficiente para albergar a la tubería, la instalación de esta última se realiza mediante un procedimiento de halado a través de la ruta previamente elaborada. Durante esta etapa,

parte del suelo original junto con el fluido son comprimidos hacia las paredes de la perforación y el suelo restante es expulsado fuera de la misma.

Como todo proceso constructivo, la PHD tiene sus etapas de planeación, ejecución y control. A pesar de que cada una de estas etapas tiene sus propias características, que las definen de manera precisa, nunca se debe pensar que éstas son independientes una de la otra. El procedimiento constructivo de la PHD se puede resumir en cuatro etapas generales: la exploración preliminar, la perforación inicial o piloto, el ensanchamiento de la perforación inicial y la instalación de la tubería [2].

La exploración preliminar tiene como objetivo el establecimiento del modelo geotécnico y las condiciones físicas en las que habrá de ejecutarse la PHD y debe abarcar desde la exploración superficial de campo hasta la exploración subterránea.

La perforación inicial o piloto se realiza mediante el empleo de un equipo de perforación que incluye a la maquinaria de perforación y a los accesorios correspondientes (herramientas de ataque, lodos de perforación y equipo complementario), el cual es colocado en el sitio donde se iniciará la perforación o punto de entrada determinado, atendiendo principalmente a la configuración geotécnica del subsuelo y topográfica de la superficie sin descuidar la presencia de instalaciones o estructuras existentes que eventualmente puedan entorpecer o poner en riesgo el proceso de perforación (Figura 2).

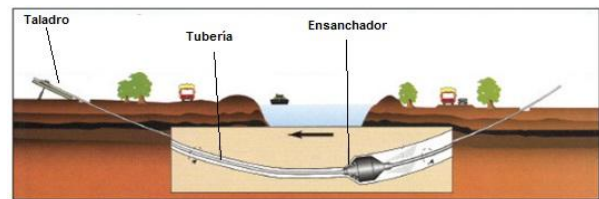


Tomada de <http://chundersol.com/services/perforacion-horizantal-dirigida/>

Figura 2: Esquema representativo de la perforación inicial.

El ensanchamiento de la perforación inicial se realiza una vez alcanzado el punto de salida, la cabeza de perforación se remueve de la sarta y en su lugar se coloca un ensanchador, cuya función

es agrandar el diámetro de la perforación inicial, que será halado por la máquina de perforación (Figura 3).



Tomada de <http://chundersol.com/services/perforacion-horizantal-dirigida/>

Figura 3: Esquema representativo del proceso de ensanchamiento de la perforación inicial.

Cuando la perforación tiene el diámetro adecuado para contener a la tubería, ésta es halada por la maquinaria de perforación (Figura 4). La tubería normalmente está protegida con una película anticorrosiva y se prueba hidrostáticamente, cuando es necesario, para garantizar su adecuado comportamiento. Durante este proceso, la tubería es sometida a una serie de cargas y esfuerzos los cuales es necesario estimar previamente en la etapa de diseño, para no rebasar los correspondientes a los estados de falla de la misma. Estas acciones a considerar son tres: tensión, flexión y presión externa.



Tomada de <http://chundersol.com/services/perforacion-horizantal-dirigida/>

Figura 4: Esquema representativo del proceso de instalación de la tubería en la perforación previamente ensanchada.

El análisis de esfuerzos que debe efectuarse para la instalación de una tubería con la técnica de PHD es diferente del análisis correspondiente para la instalación de una tubería con el método tradicional de apertura de zanjas y relleno, debido a que las magnitudes de las fuerzas mencionadas son relativamente elevadas.

### 2.1. Deducciones que sustentan el procedimiento de diseño de direccionales

Basados en las reglas para tuberías [3] se dedujeron las siguientes ecuaciones necesarias en el diseño de direccionales.

*Deducción de la ecuación del radio mínimo de curvatura.* El radio de curvatura depende de la deflexión en el elemento [3], por tal razón para su determinación se parte de la condición de una viga en voladizo (Figura 5) para obtener la ecuación de la deflexión máxima.

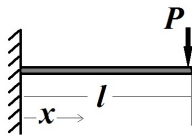


Figura 5: Viga en voladizo con carga puntual.

Según Popov [4] para una viga en voladizo la pendiente en el extremo y la deflexión máxima se calculan respectivamente utilizando las ecuaciones (1) y (2).

$$\theta = \frac{-PL^2}{2.E.I} \quad (1)$$

$$\gamma_{max} = \frac{P.L^3}{3.E.I} \quad (2)$$

Donde:  $\theta$  es la pendiente (rad),  $P$  la carga en el extremo (N),  $L$  la longitud de la viga (mm),  $E$  es el módulo de elasticidad (N/mm<sup>2</sup>) e  $I$  es el momento de inercia (mm<sup>4</sup>). Según Shigley [5] el esfuerzo admisible ( $\sigma_y$ ) es:

$$\sigma_y = \frac{My}{I} \quad (3)$$

Donde:  $y$  es la distancia desde el eje neutro (mm) y  $M$  es el momento flector (N m) en el extremo empotrado causado por la carga  $P$ . Para el caso en estudio, la viga es una tubería cilíndrica de radio  $R$ . Sustituyendo  $M$  por  $PL$  y  $y$  por  $R$  en la ecuación (3) se tiene:

$$\sigma_y = \frac{PLR}{I} \quad (4)$$

Despejando  $PL$  de la ecuación (4) se tiene:

$$PL = \frac{I\sigma_y}{R} \quad (5)$$

Reemplazando  $PL$  de la ecuación (5) en la ecuación (2) se tiene que la deflexión máxima es:

$$\gamma_{m\acute{a}x} = \frac{\sigma_y L^2}{3ER} \quad (6)$$

El radio de curvatura ( $\rho$ ) [3] se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}{\frac{d^2y}{dx^2}} \quad (7)$$

Derivando la ecuación (6) de deflexión máxima respecto a la longitud dos veces, se tiene:

$$\frac{dy}{dL} = \frac{2\sigma_y L}{3ER} \quad (8)$$

$$y \frac{d^2y}{dL^2} = \frac{2\sigma_y}{3ER} \quad (9)$$

Sustituyendo las ecuaciones (8) y (9) en la ecuación (7), se obtiene:

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{\left[1 + \left(\frac{2\sigma_y L}{3ER}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}{\frac{2\sigma_y}{3ER}} \\ &= \frac{\left[1 + \left(\frac{2\sigma_y L}{3ER}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}} 3ER}{2\sigma_y} \end{aligned} \quad (10)$$

Tomando límite en la ecuación (10) se tiene:

$$\rho = \lim_{L \rightarrow 0} \left( \frac{\left[1 + \left(\frac{2\sigma_y L}{3ER}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}} 3ER}{2\sigma_y} \right) = \frac{3ER}{2\sigma_y} \quad (11)$$

Y sustituyendo  $R = D/2$  en la ecuación(11), se tiene que el radio de curvatura mínimo ( $R_{cm}$ ) es:

$$R_{cm} = \frac{3ED}{4\sigma_y} \quad (12)$$

*Deducción de las ecuaciones para el cálculo de las dimensiones de los tramos de la direccional.* Ya que el análisis desarrollado para los tramos recto y curvo de la entrada, los cuales conforman la “curva de entrada” de la direccional, es semejante al aplicado para el tramo recto y el tramo curvo

de la salida, se presenta únicamente el análisis realizado para la curva de entrada.

Partiendo del modelo de un cuadrante de una circunferencia [6] se realizan las deducciones geométricas para el desarrollo del diseño, la Figura 6 muestra todas las dimensiones que serán utilizadas en el análisis. De un análisis gráfico inicial se pueden establecer las primeras relaciones para las dimensiones horizontales y verticales.

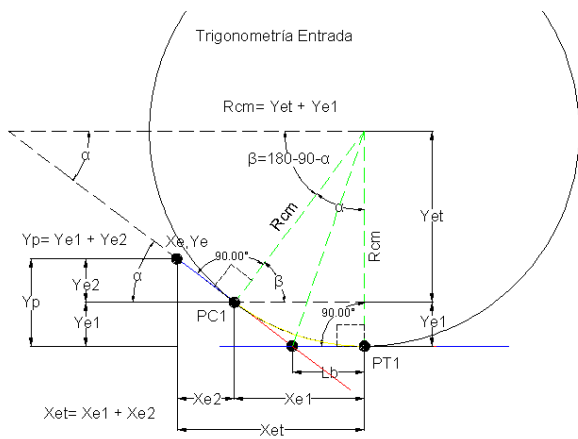


Figura 6: Modelo inicial para la deducción de las dimensiones de la curva de entrada.

En la Figura 7 se aprecian, todas las variables dimensionales en la curva de entrada, así como los tres puntos que definen a la misma, los cuales son: el punto de entrada de coordenadas  $(X_e, Y_e)$ , el punto  $PC1$  que representa el punto de inicio del tramo curvo y el punto  $PT1$  que representa el fin de este tramo.

En base al modelo establecido (Figura 7), se obtiene un esquema para la obtención de las proyecciones del tramo curvo (Figura 8) y las proyecciones del tramo recto (Figura 9) aplicando identidades trigonométricas, se definen todas las ecuaciones que permiten obtener los valores de las dimensiones establecidas.

*Proyección horizontal y vertical del tramo curvo.* De la Figura 8 se obtienen las ecuaciones para determinar la longitud del arco.

$$X_{e1} = R_{cm} \sin(\alpha) \tag{13}$$

$$Y_{e1} = R_{cm}(1 - \cos(\alpha)) \tag{14}$$

$B_{e1}$  es la longitud del arco del tramo curvo, éste se calcula como el perímetro de una sección

de circunferencia, es decir,  $B_{e1}$  se obtendrá al multiplicar el radio de curvatura del tramo, por el ángulo de entrada de la direccional en radianes;  $B_{e2}$  es la longitud del tramo recto de la entrada.

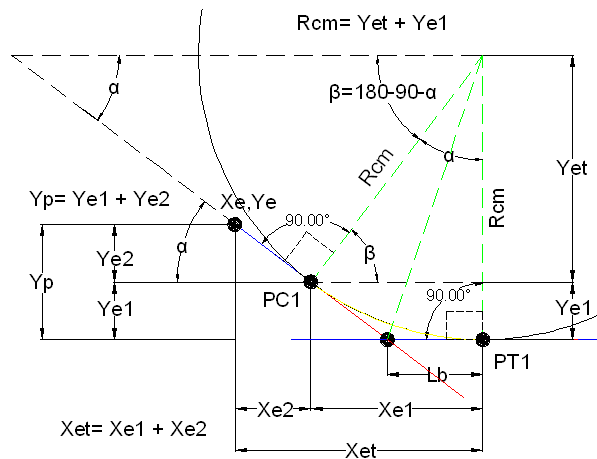


Figura 7: Acercamiento del cuadrante modelo para la deducción de las dimensiones de la curva de entrada.

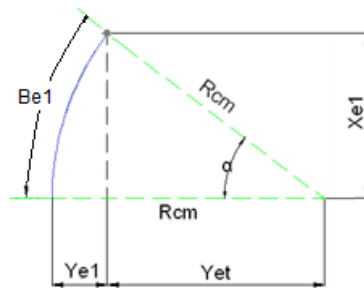


Figura 8: Esquema para la obtención de las proyecciones del tramo curvo.

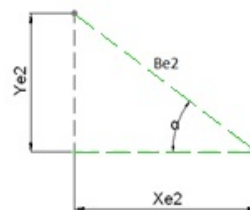


Figura 9: Esquema para la obtención de las proyecciones del tramo recto.

*Proyecciones del tramo recto.* De la Figura 10, se sabe que la profundidad se obtiene de la suma de  $Y_{e1}$  y  $Y_{e2}$ , por lo tanto como la profundidad es

conocida y la ecuación de  $Ye_1$  ya se dedujo, se tiene:

$$Xe2 = \frac{Ye2}{\tan(\alpha)} \quad (15)$$

$$Be2 = \frac{Xe2}{\cos(\alpha)} \quad (16)$$

$$Ye2 = Y_p - Ye1 \quad (17)$$

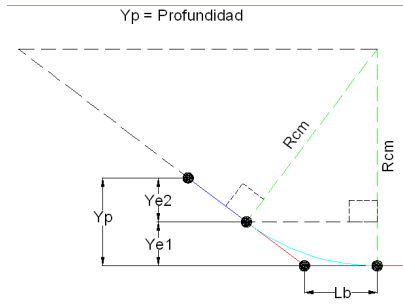


Figura 10: Modelo simplificado para deducción de la profundidad de la direccional.

*Deducción de ecuación para el cálculo del factor de corrección por proyección de tramo curvo.* En la Figura 11 se muestra el modelo para la deducción del factor de corrección, que permite elaborar el esquema para la deducción de la distancia  $Rctte$  (Figura 12).

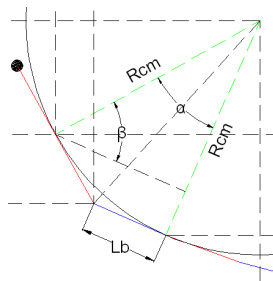


Figura 11: Modelo para la obtención del factor de corrección.

Las proyecciones de  $Rctte$ , son las que generan los factores de corrección que se usan para corregir el cálculo del avance horizontal y vertical de la direccional, en la zona curva.

Aplicando identidades trigonométricas se obtiene que,

$$Rctte = Rcm \left( \frac{1}{\cos(\alpha)} - 1 \right) \quad (18)$$

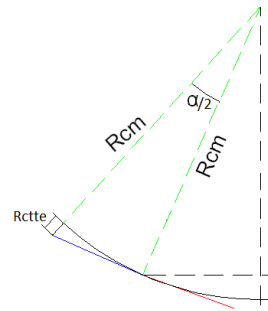


Figura 12: Esquema para la deducción de  $Rctte$ .

Una vez establecidas las ecuaciones a ser utilizadas se procede a redactar el procedimiento de diseño de direccionales.

### 2.2. Procedimiento para el diseño de direccionales mediante la técnica de perforación horizontal dirigida

Para diseñar las direccionales de deben cumplir con las etapas que se describen a continuación.

*Especificación de requerimientos de diseño o de datos iniciales.* Se deben establecer los siguientes parámetros: información del levantamiento topográfico de la zona, cota y coordenadas UTM del punto de entrada, ubicación del obstáculo con mayor profundidad, longitud y diámetro nominal de la tubería, longitud de la barra a utilizar para la perforación, ángulo de entrada, esfuerzo de fluencia y módulo de Young del material de la tubería, y factor de diseño de acuerdo a la zona. Luego se procede a calcular el radio mínimo de curvatura, el ángulo de flexión máxima, la profundidad máxima de entrada y el ángulo de entrada máximo [7].

*Cálculo de las condiciones de borde en base a los requerimientos establecidos.* En esta fase se procede a calcular las dimensiones de todos los tramos de la direccional, estos cálculos se pueden revisar en el trabajo realizado por González [7].

*Cálculo de esfuerzos.* Entre estos parámetros se encuentran las cargas de halado y los esfuerzos de instalación (halado, flexión, compresión circunferencial) y de operación (flexión, circunferencial, térmico y combinados) de cada tramo curvo o recto, y las modificaciones recomendables en caso de falla [7].

*Elaboración de reportes.* Se reportan para el tramo recto de entrada la longitud de las secciones, las progresivas longitudinales, la progresiva longitudinal relativa y la absoluta, la proyección horizontal y vertical de la longitud de cada sección, las progresivas horizontales, la profundidad de cada sección, y las cotas de la tubería. En el caso del tramo curvo de entrada se reporta el ángulo de inclinación y la longitud de cada sección, las progresivas longitudinales, la progresiva longitudinal relativa y la absoluta, la proyección horizontal de la longitud de cada sección, el factor de corrección por proyección horizontal de tramo curvo, las progresivas horizontales, la proyección vertical de la longitud de cada sección y su factor de corrección, la profundidad de cada sección y las cotas de las tuberías.

Para el tramo recto horizontal se reportan la longitud de las secciones, las progresivas horizontales, la profundidad y la cota, la progresiva longitudinal relativa y la absoluta. En el caso del tramo curvo de salida se reporta el ángulo de deflexión máxima de una sección, el ángulo de inclinación de cada sección, la longitud de las secciones, las progresivas longitudinales, la progresiva longitudinal relativa y la absoluta, la proyección horizontal de la longitud de cada sección, el factor de corrección por proyección horizontal de tramo curvo, las progresivas horizontales, la proyección vertical de la longitud de cada sección, el factor de corrección por proyección vertical de tramo curvo, la profundidad de cada sección y cota de la tubería; y para el tramo recto de la salida se tienen longitud de las secciones, las progresivas longitudinales, la progresiva longitudinal relativa y la absoluta, la proyección horizontal y vertical de la longitud de cada sección, las progresivas horizontales, la profundidad de cada sección y cotas de la tubería. Además del azimuth y la ubicación geográfica de la direccional (coordenadas UTM) [7].

*Presentación de los resultados.* Esta fase abarca la elaboración del reporte de todos los cálculos realizados para el diseño del perfil y planta de la direccional. Los reportes que se generan del diseño de la direccional son: tubería y condiciones

de borde, análisis de carga y esfuerzos por tramo, paso a paso del diseño del perfil geométrico de la direccional, diseño de la perforación y planos con la vista frontal y de planta del perfil geométrico de la direccional [7].

### 2.3. Desarrollo de herramienta computacional basada en el procedimiento establecido para el diseño de direccionales

Como primer paso para el desarrollo de la herramienta, establecido el procedimiento de diseño de direccionales, fue la creación mediante el uso de hojas de cálculo de la base de datos que requiere la herramienta para su correcto funcionamiento. La información almacenada en la base de datos creada incluye:

- Espesores, diámetros nominales y diámetros externos, según la norma API 5L [8].
- Esfuerzo de fluencia de los materiales comúnmente usados en la fabricación de tuberías según la norma API 5L [8].
- Formatos de presentación de reportes del diseño de direccionales.

Las hojas de datos y el pseudocódigo de la herramienta pueden ser leídos en González [7].

### 2.4. Validación de la herramienta diseñada

La validación de la herramienta desarrollada, para la cual se usó información de un proyecto de diseño de direccionales de la empresa PDVSA Gas, se compuso de tres etapas, las cuales se describen a continuación, hay que destacar que no se pueden mostrar detalles por ser información confidencial de la empresa en cuestión. Estas etapas son:

*Primera etapa.* Abarca la validación de los cálculos de la tubería y de las condiciones de borde de una direccional. En ésta se realizó un procedimiento de cálculos analíticos y se usó una hoja de cálculo, que es procedimiento comúnmente usado para el diseño de direccionales. Los valores obtenidos de la manera descrita, se compararon con los obtenidos mediante el uso de la herramienta diseñada, al ingresar las mismas condiciones de trabajo.

*Segunda etapa.* Comprende la validación de los cálculos de cargas y esfuerzos de instalación de una tubería mediante la técnica PHD y los esfuerzos de operación a los que estará sometida luego de ser instalada por la mencionada técnica. Para estos cálculos, los resultados obtenidos mediante la herramienta diseñada, se compararon con los obtenidos con la herramienta especializada en el cálculo de esfuerzos en tuberías HDD-Toolboxes de Technical Toolboxes Inc, la misma está disponible en línea.

*Tercera etapa.* Es la última etapa de validación del reporte “paso a paso” del perfil geométrico de la tubería y del diseño “paso a paso” de la ruta de perforación que debe seguir la máquina de perforación. Para esta validación se usó un procedimiento gráfico, basado en la medición directa de un plano en digital de una direccional. Las magnitudes obtenidas de la medición del plano se compararon con las generadas por la herramienta, mediante el reporte del diseño “paso a paso” del perfil geométrico de la direccional. Los resultados de la validación de todas las etapas se encuentran en González [7].

*Ejemplo de cálculo correspondiente a la segunda etapa.* Para esta etapa de validación se usó la herramienta de diseño “HDD-Toolboxes” de Technical Toolboxes Inc. , para obtener los valores de referencia, los cuales se compararon con los obtenidos con la herramienta diseñada, de acuerdo al procedimiento establecido [7], las condiciones de trabajo para el cálculo de los esfuerzos son:

Diámetro nominal de la tubería (in): 6.
Diámetro externo de la tubería (in): 6,625.
Norma y especificación de la tubería: API 5L
Grado del material: X65
Longitud total de la direccional (ft): 620,01
Longitud de tramo recto de la entrada (ft): 77,85
Longitud de tramo curvo de la entrada (ft): 157,39
Longitud de tramo recto horizontal (ft): 118,11
Longitud de tramo curvo de la salida (ft): 118,04
Longitud de tramo recto de la salida (ft): 148,63
Esfuerzo de fluencia del material (Psi): 65000
Densidad del agua (lb/ft <sup>3</sup> ): 62,428
Densidad del fluido de perforación (lb/gal):
Relación de Poisson del Acero: 0,3
Módulo de elasticidad (Psi): 29000000
Coefficiente de fricción del suelo: 0,3
Coefficiente de arrastre del lodo (Lbf/in <sup>2</sup> ): 0,05
Espesor de la tubería (in): 0,28
Presión de diseño (Lbf/in <sup>2</sup> ): 1000

Las unidades de los datos están en sistema inglés ya que la herramienta comercial así trabaja. Se utilizaron ambas herramientas y los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 13, 14, 15 y 16.

Project SIMULACION LUIS			
Location	Date 6/1/2015		
Installation Stress Analysis - Steel Pipe			
Point: "B"	This Project	Allowable	PASS/FAIL
Tensile Stress (psi)	167	58,500	Pass
Bending Stress (psi)	0	48,802	Pass
External Hoop Stress (psi)	192	25,159	Pass
Unity Check: Tensile & Bending Stress	0.00	1.00	Pass
Unity Check: Tensile, Bending & Hoop Stress	0.00	1.00	Pass
Point: "C"	This Project	Allowable	PASS/FAIL
Tensile Stress (psi)	482	58,500	Pass
Bending Stress (psi)	17,902	48,802	Pass
External Hoop Stress (psi)	387	25,159	Pass
Unity Check: Tensile & Bending Stress	0.38	1.00	Pass
Unity Check: Tensile, Bending & Hoop Stress	0.13	1.00	Pass
Point: "D"	This Project	Allowable	PASS/FAIL
Tensile Stress (psi)	810	58,500	Pass
Bending Stress (psi)	0	48,802	Pass
External Hoop Stress (psi)	387	25,159	Pass
Unity Check: Tensile & Bending Stress	0.01	1.00	Pass
Unity Check: Tensile, Bending & Hoop Stress	0.00	1.00	Pass
Point: "E"	This Project	Allowable	PASS/FAIL
Tensile Stress (psi)	1,181	58,500	Pass
Bending Stress (psi)	17,902	48,802	Pass
External Hoop Stress (psi)	277	25,159	Pass
Unity Check: Tensile & Bending Stress	0.39	1.00	Pass
Unity Check: Tensile, Bending & Hoop Stress	0.14	1.00	Pass
Point: "F"	This Project	Allowable	PASS/FAIL
Tensile Stress (psi)	1,574	58,500	Pass
Bending Stress (psi)	0	48,802	Pass
External Hoop Stress (psi)	0	25,159	Pass
Unity Check: Tensile & Bending Stress	0.00	1.00	Pass
Unity Check: Tensile, Bending & Hoop Stress	0.00	1.00	Pass
Notes: Reference: "Installation of Pipelines by Horizontal Directional Drilling", PRCI Report PR-227-0424			
Prepared By: Daniel Gamboa	Approved By:	Revision: 10.0.0	

Figura 13: Reporte de esfuerzos de instalación generado por el programa HDD-Toolboxes.

Project SIMULACION LUIS			
Location	Date 6/1/2015		
Pull Force - Steel Pipe			
PIPE AND PROFILE DATA:		RESULTS OF CALCULATION:	
Pipe Outside Diameter [in.]	6.625	Pipe Weight in Air [lbs/ft]	18.97
Pipe Wall Thickness [in.]	0.28	Pipe Exterior Volume [ft <sup>3</sup> /ft]	0.24
Specified Minimum Yield Strength [psi]	65000	Pipe Interior Volume [ft <sup>3</sup> /ft]	0.20
Young's Modulus for Steel [ksi]	30,000	Weight of Water [lbs/ft]	12.52
Poisson's Ratio for Steel	0.30	Displaced Mud Weight [lbs/ft]	21.50
Mud Weight [lbs/ft <sup>3</sup> ]	89.9	Effective Weight of Pipe [lbs/ft]	10.00
Soil Friction Coefficient	0.30		
Fluid Drag Coefficient [psi]	0.05	Total Pull Force [lbs]	8,786
Water Density [lbs/ft <sup>3</sup> ]	62.40		
Pipe Filled with Water:	Yes		
Straight Section "A - B" Downslope:			
Measured Length [ft]	77.85		
Angle of Inclination [°]	19.49		
Curved Section "B - C" Downslope:			
Measured Length [ft]	157.38		
Half of the Angle of Inclination [°]	9.75		
Radius of Curvature [ft]	482.59		
Straight Section "C - D":			
Measured Length [ft]	118.11		
Curved Section "D - E" Upslope:			
Measured Length [ft]	118		
Half of the Angle of Inclination [°]	7.32		
Radius of Curvature [ft]	482.59		
Straight Section "E - F" Upslope:			
Measured Length [ft]	122.63		
Angle of Inclination [°]	14.62		
Notes: Reference: "Installation of Pipelines by Horizontal Directional Drilling", PRCI Report PR-227-0424			
Prepared By: Daniel Gamboa	Approved By:	Revision: 10.0.0	

Figura 14: Reporte de cargas de instalación generado por el HDD-Toolboxes.

Las Tablas 1 y 2 muestran respectivamente los valores de esfuerzos y carga de halado obtenidos por la herramienta Technical Toolboxes Inc. y la desarrollada en esta investigación solo para el

**FORMATO N° 2 (A)**  
Reporte de Cargas de Instalación y Esfuerzos de Operación de la Tubería

Datos Iniciales	
Diametro externo (in)	6,625
Espesor de Tubería (in)	0,28
Esfuerzo de Fluencia Minimo	65000
Modulo de Young	29000000
Radio de Poisson	0,3
Peso del Lodo	21,4873
Coefficiente de fricción del Suelo	0,3
Coefficiente de arrastre del lodo	0,05
Densidad del agua	624,280
Uso de control de Flotación	SI

Tramo recto de la entrada		Tramo recto de la salida	
longitud del tramo	23,72838	longitud del tramo	148,631
Angulo de inclinación	19,4932	Angulo de inclinación	14,6199

Tramo curvo de la entrada		Tramo curvo de la salida	
longitud del tramo	47,97552	longitud del tramo	35,97829
Cambio de inclinación	19,4932	Cambio de inclinación	14,6199
Radio de Curvatura	141	Radio de Curvatura	141

Tramo Recto Horizontal	
Longitud del tramo	118,11

Resultados del Cálculo		Carga Total de Alado
Peso de la Tubería	18,97626	9478,967
Volumen externo de la tubería	0,239386	
Volumen interno de la tubería	0,200627	
Peso de agua	12,52473	
Peso del lodo desplazado	21,4873	
Peso efectivo de la Tubería	10,01369	

Esfuerzos de Operación	Aplicado	%
Esfuerzo de Flexión Longitudinal	17304,892	26,62
Prestion Circunferencial Externa	8056,828	12,40
Esfuerzo por Expansion Térmica	3770	5,8
Esfuerzo neto de Compresión Longitudinal	13018,064	20,03
Esfuerzo cortante Máximo	5913,414	9,098

Figura 15: Reporte de cargas de instalación y esfuerzos de operación generado por la herramienta diseñada.

**FORMATO N° 2 (B)**  
Reporte de Esfuerzos de Instalación de la Tubería

Tramo Recto de la Entrada	Aplicado	Admisible	OK/FALLA
Esfuerzo de tracción	167,07	58500,00	OK
Esfuerzo de Flexión	0	48602,01	OK
Esfuerzo Circunferencial Externo	191,57	24970,24	OK
Esfuerzo combinado de Flexión y Tracción	0,0029	1,00	OK
Esfuerzo combinado de Flexión, Tracción y Presión	0,0001	1,00	OK

Tramo Curvo de la Entrada	Aplicado	Admisible	OK/FALLA
Esfuerzo de tracción	507,5	58500,00	OK
Esfuerzo de Flexión	17304,88	48602,01	OK
Esfuerzo Circunferencial Externo	387,1	24970,24	OK
Esfuerzo combinado de Flexión y Tracción	0,3647	1,00	OK
Esfuerzo combinado de Flexión, Tracción y Presión	0,1201	1,00	OK

Tramo recto Horizontal	Aplicado	Admisible	OK/FALLA
Esfuerzo de tracción	835	58500	OK
Esfuerzo de Flexión	0	48602,0089	OK
Esfuerzo Circunferencial Externo	387	24970,2379	OK
Esfuerzo combinado de Flexión y Tracción	0,0143	1	OK
Esfuerzo combinado de Flexión, Tracción y Presión	0,0009	1	OK

Tramo Curvo de la Salida	Aplicado	Admisible	OK/FALLA
Esfuerzo de tracción	1,221	58500	OK
Esfuerzo de Flexión	17,305	48602,0089	OK
Esfuerzo Circunferencial Externo	277	24970,2379	OK
Esfuerzo combinado de Flexión y Tracción	0,3769	1	OK
Esfuerzo combinado de Flexión, Tracción y Presión	0,1288	1	OK

Tramo recto de la Salida	Aplicado	Admisible	OK/FALLA
Esfuerzo de tracción	1,698	58500	OK
Esfuerzo de Flexión	0	48602,0089	OK
Esfuerzo Circunferencial Externo	0	24970,2379	OK
Esfuerzo combinado de Flexión y Tracción	0,029	1	OK
Esfuerzo combinado de Flexión, Tracción y Presión	0,0011	1	OK

Figura 16: Reporte de esfuerzos de instalación generado por la herramienta diseñada.

tramo curvo de entrada, esto porque los cálculos son similares para el resto de los tramos.

La diferencia puede deberse a la precisión de los cálculos en ambos programas. Las mayores deferencias entre ambas herramientas fueron en

Tabla 1: Valores de los esfuerzos obtenidos con la herramienta HDD-Toolboxes y la herramienta desarrollada para el tramo curvo de la entrada.

Magnitud	HDD-Toolboxes (Psi)	Herramienta Desarrollada (Psi)	Diferencia (%)
Esfuerzo de tracción aplicado	482,00	507,50	5,29
Esfuerzo de tracción admisible	58.500,00	58.500,00	0,00
Esfuerzo de flexión aplicado	17.902,00	17.304,88	- 3,34
Esfuerzo de flexión admisible	48.802,00	48.602,01	- 0,41
Esfuerzo circunferencial externo aplicado	387,00	387,10	0,03
Esfuerzo circunferencial externo admisible	25.159,00	24.970,24	- 0,75
Esfuerzo combinado de F y T aplicado	0,38	0,36	- 5,26
Esfuerzo combinado de F y T admisible	1,00	1,00	0,00
Esfuerzo combinado de F, T y C aplicado	0,13	0,12	- 7,69
Esfuerzo combinado de F, T y C admisible	1,00	1,00	0,00

F: flexión  
T: tracción  
C: circunferencial

Tabla 2: Valores de la carga de halado obtenida con la herramienta HDD-Toolboxes y la herramienta desarrollada para el tramo curvo de la entrada.

Magnitud	HDD-Toolboxes (lb)	Herramienta Desarrollada (lb)	Diferencia (%)
Carga de halado requerida para instalación	8786	9478	7,87

la carga de halado (7,87 %) y en el esfuerzo combinado de flexión, tracción y circunferencial (-7,69 %), para el resto de los valores los porcentajes son aceptables. Es de hacer notar que la herramienta desarrollada se probó con datos de proyectos anteriores realizados para la empresa en la que se desarrolló este proyecto, obteniéndose resultados similares al de los proyectos.

En la herramienta desarrollada se verifica que los esfuerzos aplicados sean menores que los admisibles indicando al usuario cuando ocurra el caso contrario, esto para cambiar el valor de los datos ingresados necesarios para que los esfuerzos

aplicados sean menores que los admisibles y realizar los ajustes en el diseño de la perforación.

### 3. Características de la interfaz

La herramienta presentada posee una interfaz gráfica sencilla, en base a imágenes ilustrativas, ingreso de información a través de cajas de texto y listas desplegables. En la que, para ejecutar cada acción se debe hacer clic sobre el botón correspondiente, respetando el orden de diseño de direccionales [7].

Al presionar el icono del programa aparece la pantalla inicial, en donde hay que presionar el botón de inicio del programa (Figura 17).

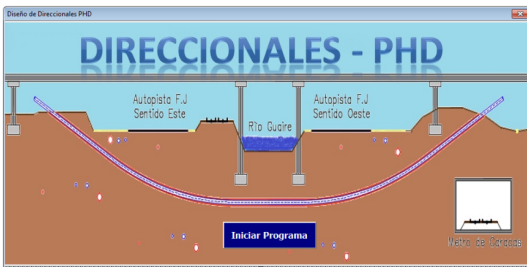


Figura 17: Ventana inicial de la herramienta desarrollada.

Luego aparece la segunda ventana (Figura 18) con las pestañas correspondientes al diseño, las cuales se deben seguir en orden para lograr el resultado esperado. La primera solicita se seleccionen los datos de topografía o del cuerpo de agua, luego de esto aparece la imagen de la topografía ingresada (Figura 19) en la misma ventana.

En la segunda pestaña (Figura 20) se introducen y seleccionan datos de la tubería para obtener el espesor de tubería necesario usando la ecuación de Barlow (ecuación (19)) [9], presentando en la misma los datos y resultados obtenidos.

$$t = \frac{P_d D_{ext}}{2S_y F_d E_j T} \quad (19)$$

Donde:  $t$  es el espesor de la tubería (mm),  $P_d$  es la presión de diseño (MPa),  $D_{ext}$  es el diámetro nominal de la tubería (mm),  $S_y$  es el esfuerzo de fluencia (MPa),  $F_d$  es el factor de diseño,  $E_j$  es el factor de junta longitudinal y  $T$  es el factor de temperatura, los factores son adimensionales y se



Figura 18: Ventana inicial correspondiente al paso “Datos de la topografía”.

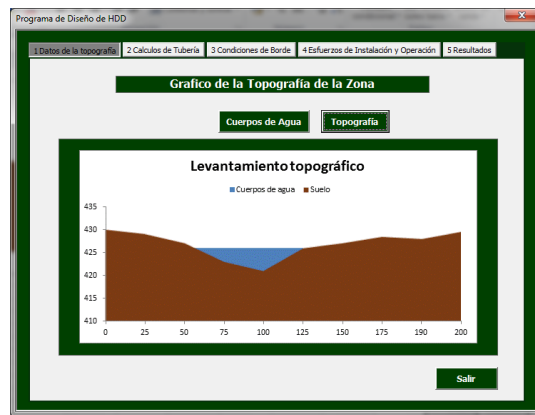


Figura 19: Imagen de un levantamiento topográfico con cuerpos de agua, generado por la herramienta.

seleccionan según sean las condiciones de diseño, luego se presiona el botón guardar para almacenar la información de la ventana.



Figura 20: Ventana correspondiente al cálculo de espesor de la tubería.

En la tercera pestaña se ingresan los parámetros

iniciales para diseñar el perfil geométrico de la direccional. Con ayuda de la imagen ilustrativa de los parámetros del diseño se deben ingresar los valores de la cota de entrada, coordenadas UTM de la entrada y cualquier otro punto en la dirección establecida para la misma, cota del obstáculo mas bajo, longitud de la tubería, profundidad máxima, ajuste horizontal, ángulo de entrada y salida, luego se presiona el botón calcular obteniendo como resultado las condiciones de borde para diseñar el perfil geométrico de la direccional, en esta ventana se puede ingresar un nuevo radio de curvatura y recalculan las condiciones de borde de ser necesario, la Figura 21 muestra los parámetros ingresados y calculados en esta ventana.

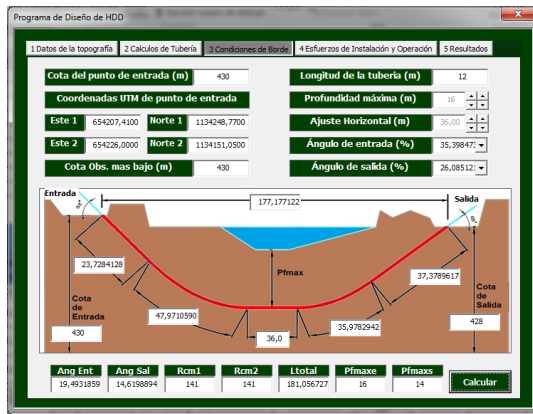


Figura 21: Ventana correspondiente al cálculo de condiciones de borde.

La siguiente pestaña presenta al usuario, la pantalla en la cual se encuentran todos los parámetros iniciales para el cálculo de cargas y esfuerzos de la direccional. Los valores mostrados son los más comunes para el diseño de direccionales, pero si el usuario lo desea, puede borrarlos e ingresar los que mejor se adapten al diseño a realizar, luego selecciona si va a realizar la instalación de la tubería por flotación o no, y presionar calcular para obtener los resultados de los esfuerzos presentes en el diseño planteado (Figura 22), si se presiona el botón unidades se pueden presentar los resultados en el sistema de unidades diferente al seleccionado anteriormente.

Luego se presenta la pestaña “Resultados” la cual a su vez se divide en dos pestañas internas “Reportes” y “Geometría del cruce”. La pestaña



Figura 22: Ventana correspondiente al paso de cálculo de “Esfuerzos de Instalación y Operación”.

“Reportes” tiene a su vez seis pestañas, en las cinco primeras se presentan los parámetros de cada tramo de la tubería de la direccional (curvo, horizontal y recto), en la Figura 23 se observa un ejemplo de estas pestañas, y del lado derecho de la ventana se resalta el color del fondo de los resultados de color amarillo cuando el esfuerzo aplicado sea menor al admisible y de color rojo cuando supere el esfuerzo admisible, en este caso se harán los ajustes necesarios para que dichos esfuerzos no superen al admisible. En los tramos curvos se ofrece información sobre el radio de curvatura del tramo y la fuerza normal que produce fricción en los mismos. En la última pestaña se presenta el reporte de los esfuerzos de operación de la tubería (Figura 24).

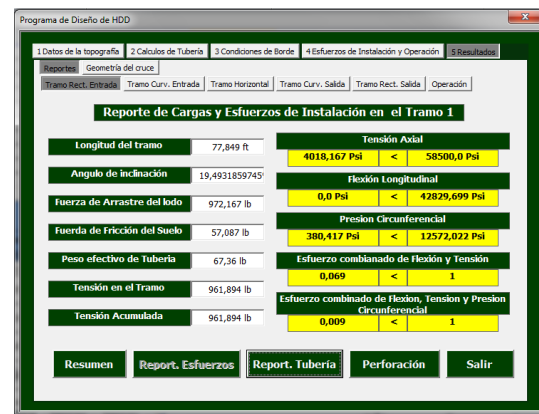


Figura 23: Ventana de reporte de cargas y esfuerzos de instalación en el tramo recto de la entrada.

Para culminar con el nivel de “Reportes”, se encuentran en la parte inferior de cada subpestaña,



Figura 24: Ventana de reporte de esfuerzos de operación de la tubería.

cinco botones, cuatro de ellos para la generación de los respectivos reportes del diseño (Resumen, Reporte Esfuerzos, Reporte Tubería y Perforación) y el botón de “Salir” que cierra la aplicación. Al hacer clic en cualquiera de los cuatro primeros botones mencionados, aparecerá una ventana de mensaje como el de la Figura 25, indicando el tipo de reporte que se va a generar, el cual se creará al hacer clic en el botón “Aceptar” de la misma.

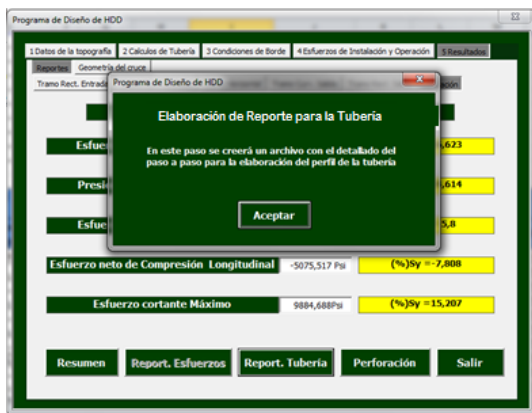


Figura 25: Ventana con el mensaje que se muestra para la generación de reportes.

El botón “Resumen” genera el reporte de la tubería y de las condiciones de borde. Éste tiene como propósito servir de insumo para la elaboración del análisis de factibilidad de la direccional. El botón “Reporte Esfuerzos” genera el reporte del análisis de cargas y esfuerzos por tramo que se le realiza a la direccional. Este reporte constituye la parte principal de los cálculos de ingeniería que sustentan el diseño de

la direccional. El botón “Reporte Tubería” genera el reporte del paso a paso del diseño del perfil geométrico de la direccional, el cual se utiliza para elaborar los planos de la direccional. El botón “Perforación” genera el reporte del diseño de la perforación, el cual sirve de guía para programar la trayectoria de la barra de la máquina de perforación.

En la pestaña “Geometría del cruce” el usuario solo debe hacer clic en el botón “Graficar” para obtener las vistas de perfil y planta de la geometría de la direccional, como se muestra en la Figura 26.



Figura 26: Ventana correspondiente a la pestaña de “Geometría del cruce”.

Luego de realizar la verificación visual del diseño, observando las vistas del perfil geométrico de la direccional, mientras el usuario no desee hacer alguna modificación al diseño, el diseño de la direccional se dará por terminado, se presiona el botón guardar para almacenar toda la información suministrada y generada por el programa para el diseño de la PHD; luego se regresa a la pestaña “Reportes” y se presiona el botón salir para finalizar el uso del programa.

#### 4. Conclusiones y recomendaciones

La herramienta desarrollada aporta el conocimiento del proceso completo de diseño de una direccional, permitiendo la creación de diseños propios y como consecuencia final de todo esto la disminución de los costos de diseño, permite obtener el perfil geométrico de la tubería de

una direccional, además, genera el análisis de cargas y esfuerzos tanto de instalación por tramo como de operación de la tubería lo cual es el sustento del diseño ingenieril de la direccional y le permite al constructor, seleccionar con mayor precisión la máquina de perforación de acuerdo a la capacidad de alado necesaria para la instalación de la tubería. La misma combina las principales virtudes de licencias comerciales para el diseño de direccionales, que permite graficar de forma dinámica el perfil geométrico de una direccional, además agrega en las consideraciones del diseño el cálculo del radio de curvatura mínimo por flexión natural, de la tubería y la ubicación geográfica de la direccional mediante las coordenadas UTM en cada una de sus progresivas.

Entre las recomendaciones planteadas se tienen la adaptación de los cálculos para diseño de direccionales en tres dimensiones (3D) y desarrollar la herramienta utilizando software libre.

## Agradecimiento

Se hace reconocimiento al Ing. Deibis Castillo y a su equipo de trabajo de la Gerencia de Ingeniería Operacional, PDVSA Gas, sede La Quizanda, Valencia, Venezuela, por el apoyo prestado en el desarrollo de esta investigación.

## Referencias

- [1] Paul D. Watson. Installation of pipelines by horizontal directional drilling an engineering design guide. Tech Report, Pipeline Research Council International, Inc., 1995.
- [2] Juan Carlos Castro Castro y Fernando Shein-tiá Guadarrama Robles. Perforación horizontal direccional ejemplo de aplicación: cruzamiento subfluvial. Trabajo Especial de Grado, Instituto Tecnológico de la Construcción A.C., México, 2007.
- [3] E. W. McAllister. *Pipeline Rules of Thumb Handbook-Quick and Accurate Solutions to Your Everyday Pipeline Engineering Problems*. Gulf Professional Publishing, 7<sup>th</sup> edition, 2009.
- [4] Egor Popov. *Mecánica de sólidos*. Pearson Educación, México, 2000.
- [5] Joseph Edward Shigley y Charles R. Mischke. *Diseño en ingeniería mecánica*. McGraw-Hill, 2001.
- [6] PEMEX Exploración y Producción. Cruces direccionales para ductos de recolección y transporte P.3.0710.01. Reporte Técnico, PEMEX, México, Diciembre 2007.
- [7] L. González. Desarrollo de una herramienta computacional aplicada al diseño de perforación horizontal dirigida en la instalación de tuberías para el transporte de gas. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2015.
- [8] API 5L. Specification for line pipe, 2015.
- [9] Código ASME B31.8. Tuberías de transporte y distribución de gas, 2014.