

DESARROLLO DE UN MODELO MATEMÁTICO DISCRETO BASADO EN
PARÁMETROS PARA EL TRAZADO Y DEFINICIÓN DE GEOMETRÍAS EN
LATERALES Y DUMMY LEGS EN FABRICACIÓN AVANZADA DE TUBERÍA,
AJUSTADO AL ESTÁNDAR ES08402-07 DE NCCER

SEBASTIÁN PINEDA BERRIO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA, SANTANDER

2021

DESARROLLO DE UN MODELO MATEMÁTICO DISCRETO BASADO EN
PARÁMETROS PARA EL TRAZADO Y DEFINICIÓN DE GEOMETRÍAS EN
LATERALES Y DUMMY LEGS EN FABRICACIÓN AVANZADA DE TUBERÍA,
AJUSTADO AL ESTÁNDAR ES08402-07 DE NCCER

SEBASTIÁN PINEDA BERRIO

Proyecto de grado para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO

JABID EDUARDO QUIROGA MÉNDEZ

PhD. en Ingeniería Civil

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA, SANTANDER

2021

CONTENIDO

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	12
2. OBJETIVOS.....	16
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	17
4. MARCO TEÓRICO.....	19
4.1 ESTADO DEL ARTE.....	19
4.1.1 Antecedentes internacionales.....	19
4.1.1.1 Artículos de investigación sobre manufactura y productividad en proyectos que involucran tubería.....	19
4.1.2 Antecedentes nacionales.....	27
4.2 REFERENTES TEÓRICOS.....	31
4.2.1 Historia y evolución de los proyectos de Ingeniería que emplean tubería.	31
4.2.2 Normalización de las operaciones de manufactura en tubería.....	32
4.2.3 El libro azul del tubero (The Pipe Fitters Blue Book).....	33
4.2.4 Estándares Internacionales de NCCER.....	34
4.2.5 Método discreto para resolver numéricamente las dimensiones de laterales y dummy legs según NCCER.....	34
4.2.5.1 Cálculo de laterales no convencionales según NCCER.....	34
4.2.5.2 Cálculo de dummy legs no convencionales según NCCER.....	35
4.2.6 Herramientas de rápida implementación para el cálculo de operaciones en tubería disponibles en medios digitales.....	36
4.2.6.1 Herramientas de cálculo para laterales.....	36
4.2.6.2 Herramientas de cálculo para dummy legs.....	37
5. DESARROLLO METODOLÓGICO.....	39
5.1 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DEL ESTÁNDAR ES08402-07 DE NCCER.....	39
5.1.1 Laterales a 90° (sección 4.0).....	39
5.1.2 Laterales a 45° de inclinación (sección 4.1).....	39
5.1.3 Dummy legs concéntricos con tubería (sección 5.0).....	39
5.1.4 Laterales sin referencias o no convencionales (sección 6.1).....	40
5.1.5 Trazado de soportes sin referencias o no convencionales (sección 6.2).....	40

5.2 DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO PARA LATERALES INCLINADOS	44
5.2.1 El método para laterales en ES08402-07.	44
5.2.2 Derivación del modelo para laterales a cualquier ángulo.....	49
5.3 DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO PARA DUMMY LEGS	60
5.3.1 El método para soporte dummy legs concéntricos bajo NCCER.	60
5.3.2 Derivación del modelo para soportes dummy leg generalizados	66
5.4 DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO PARA LATERALES EXCÉNTRICOS 90°.....	76
6. HERRAMIENTA AUXILIAR AL DESARROLLO DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS.....	82
7. SÍNTESIS DE LAS RELACIONES MATEMÁTICAS.....	87
8. VALIDACIÓN DE RESULTADOS	91
8.1 METODOLOGÍA DE CÁLCULO DEL ERROR.....	92
8.1.1 Error absoluto	92
8.1.2 Desviación media absoluta (MAD).....	93
8.1.3 Error cuadrático medio (MSE).....	93
8.1.4 Raíz del error cuadrático medio (RMSE)	93
8.1.5 Error porcentual absoluto medio (MAPE).....	93
8.2 RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN.....	94
8.2.1 Validación para laterales concéntricos a 90°.	94
8.2.2 Resultados de la validación para todos los demás casos (sumariado). .	108
8.2.3 Interpretación de resultados.....	109
8.2.4 Libro de cálculos.....	110
9. DESARROLLO DE LA APP EN ANDROID.....	113
9.1 CARACTERÍSTICAS DEL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN.....	114
9.2 CARACTERÍSTICAS DE LA INTERFAZ.....	116
9.3 DESCRIPCIÓN DE LOS BLOQUES DE PROGRAMACIÓN	122
9.4 VALIDACIÓN DE RESULTADOS DE LA APP Y SU VALOR AGREGADO	125
10. CONCLUSIONES	126
BIBLIOGRAFÍA.....	128

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Módulo de procesos de producción en la construcción de un proyecto industrial.	20
Figura 2. Representación ISO de línea de tubería empleada en un proyecto de manufactura	22
Figura 3. Centro de educación y entrenamiento de Aramco, NITI.	25
Figura 4. Plantilla de corte de MARTIN (izquierda). Elemento de marcado MATSUDA (derecha).	27
Figura 5. Trabajadores realizando operaciones en tubería, Refinería de Barrancabermeja.	28
Figura 6. Trabajo en tubería parada de planta U-200.	29
Figura 7. Distribución de los trabajadores certificados según especialidad	30
Figura 8. Firma contratista certificada en NCCER para parada de planta de refinación de crudos de 2016.....	31
Figura 9. Esquemático de lateral en tubería (izquierda). Esquemático de dummy leg concéntrico (derecha).....	33
Figura 10. Esquemático para el cálculo de las ordenadas en lateral de 45°, caso no convencional	35
Figura 11. Esquemático para el cálculo de dummy legs concéntricos, caso no convencional.	36
Figura 12. Esquema ejemplo del aplicativo de Blocklayer.	37
Figura 13. Esquema del aplicativo de MetalgGeek.....	37
Figura 14. Esquema de previsualización del servicio de AAA Drafting.....	38
Figura 15. Aspecto general del aplicativo en GeoGebra para laterales inclinados en tubería (sección 5.2.2)	82
Figura 16. Procedimiento para recrear el protocolo de construcción en GeoGebra	84
Figura 17. Vista parcial del protocolo de construcción en formato web	85
Figura 18. Aspecto general del aplicativo en GeoGebra para dummy legs (sección 5.3.2)	86
Figura 19. Aspecto general del aplicativo en GeoGebra para lateral excéntrico recto (sección 5.4)	86

Figura 20. Ícono de la App en Android Easy Pipe.....	113
Figura 21. Esquema de sistema de la aplicación desarrollada	113
Figura 22. Explicación didáctica de las tecnologías HTML, CSS y JavaScript.....	115
Figura 23. Vista principal del home de Easy Pipe.....	116
Figura 24. Esquema de tres pasos para los casos de cálculo en la App.	120

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Síntesis de las secciones del ES08402-07 de NCCER que contienen instrucciones de derivación de ordenadas versus propuesta de valor del proyecto.	42
Tabla 2. Metodología para calcular ordenadas de laterales en ES08402-07....	44
Tabla 3. Metodología para el desarrollo del modelo matemático de laterales concéntricos a cualquier ángulo de inclinación	50
Tabla 4. Metodología para calcular dummy legs concéntricos en ES08402-07	60
Tabla 5. Metodología para el desarrollo del modelo matemático de dummy legs concéntricos.....	67
Tabla 6. Metodología para el desarrollo del modelo matemático de injertos excéntricos a 90°	77
Tabla 7. Resumen de las relaciones matemáticas halladas	88
Tabla 8. Tabulaciones disponibles en el manual del tubero, Pipe Fitters Blue Book que sirven como datos teóricos.	91
Tabla 9. Ordenadas para lateral a 90°, 8 divisiones, Pipe Fitters Blue Book	95
Tabla 10. Ordenadas para lateral a 90°, 8 divisiones, fórmula.	97
Tabla 11. Cálculos de error para injertos a 90° concéntricos con 8 divisiones circunferenciales en tubería.....	99
Tabla 12. Cálculos de error para todos los demás casos (sumariado)	108
Tabla 13. Distribución de la información en el libro de cálculos.....	111
Tabla 14. Funcionalidades de las pestañas principales de la App.....	117
Tabla 15. Funcionamiento de los pasos para los casos de cálculo.	121
Tabla 16. Descripción de bloques de programación de la App.....	123

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Injerto a 90° STD, concéntrico, 8 ordenadas.....	133
Anexo B. Injerto a 90°, STD y concéntrico, 16 ordenadas.....	135
Anexo C. Injerto a 90° XS, concéntrico, 8 ordenadas.....	136
Anexo D. Injerto a 90° XS, concéntrico, 16 ordenadas.....	138
Anexo E. Injerto a 90° STD, excéntrico, 16 ordenadas.....	141
Anexo F. Lateral a 45° STD, concéntrico, 8 ordenadas.....	146
Anexo G. Lateral a 45° STD, concéntrico, 16 ordenadas.....	148
Anexo H. Dummy Leg, concéntrico tipo I, 16 ordenadas.....	151
Anexo I. Dummy Leg excéntrico, tipo II, 16 ordenadas.....	154
Anexo J. Dummy Leg tangencial, tipo III, 16 ordenadas.....	156

LISTA DE ANEXOS

(Ver anexos adjuntos y pueden visualizarlos en la Base de datos de la Biblioteca UIS)

Anexo K. Capítulo 6 – Herramientas Auxiliares a los desarrollos.

Anexo L. Software.

Anexo M. Libro de cálculos.

RESUMEN

TÍTULO: DESARROLLO DE UN MODELO MATEMÁTICO DISCRETO BASADO EN PARÁMETROS PARA EL TRAZADO Y DEFINICIÓN DE GEOMETRÍAS EN LATERALES Y DUMMY LEGS EN FABRICACIÓN AVANZADA DE TUBERÍA, AJUSTADO AL ESTANDAR ES08402-07 DE NCCER¹.

AUTOR: SEBASTIÁN PINEDA BERRÍO²

PALABRAS CLAVE: MANTENIMIENTO, TUBERÍA, NCCER, ESTÁNDAR DE MANUFACTURA INTERNACIONAL, LATERALES DE TUBERÍA, DUMMY LEGS.

DESCRIPCIÓN:

El presente proyecto tiene por objetivo desarrollar los modelos matemáticos que describen las geometrías de tuberías injerto en casos de manufactura tales como elevadores, conocidos como laterales, y de dummy legs, también conocidos como soportes de tubería, escenarios de manufactura retardadores para los técnicos de tubería cuando no se cuenta con tablas de ordenadas previamente calculadas. Para la consecución del propósito, se emplean como insumos las instrucciones disponibles en un importante estándar de manufactura industrial internacional como lo es el ES08402-07 de NCCER, que presenta la algoritmia para derivar las ordenadas que definen las geometrías deseadas, pero absteniéndose de revelar funciones matemáticas para casos genéricos. En este proyecto se desarrollan los modelos matemáticos que calculan hasta n ordenadas de las geometrías de laterales concéntricos a cualquier ángulo de elevación θ , así como casos a 90° exclusivamente excéntricos. También se desarrollan los modelos matemáticos para dummy legs concéntricos, excéntricos y tangenciales. Los resultados obtenidos en el proyecto revelan un error porcentual absoluto medio (MAPE) del 1% para el más crítico de los casos estudiados, confirmando la precisión de las formulaciones matemáticas en replicar los resultados consignados en el estándar de manufactura.

Una vez confirmada la validez y utilidad de las expresiones matemáticas, se desarrolla a una aplicación en Android empleando la herramienta de desarrollo de software (SDK) de Ionic[®], con el propósito de exportar digitalmente la solución encontrada, acercándola al público objetivo a través de una interfaz sencilla y práctica.

¹Trabajo de Grado.

² Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: PhD. Jabid Eduardo Quiroga Méndez.

ABSTRACT

TITLE: DISCRETE MATHEMATICAL MODEL, PARAMETER BASED, DEVELOPMENT FOR DRAWING AND DEFINITION OF LATERAL AND DUMMY LEGS GEOMETRIES IN ADVANCED PIPE MANUFACTURING, ADJUSTED TO NCCER STANDARD ES08402-07³.

AUTHOR: SEBASTIÁN PINEDA BERRÍO⁴

KEYWORDS: MAINTENANCE, PIPING, NCCER, INTERNATIONAL MANUFACTURING STANDARD, PIPE LATERALS, DUMMY LEGS.

DESCRIPTION:

The main objective of this project is to develop the mathematical models that describe pipe geometries in manufacturing cases such as risers, known as laterals, and dummy legs, also known as 'pipe supports', the most challenging manufacturing scenarios for pipe technicians, when there are no previously calculated ordinate tables available. To achieve this purpose, the instructions available in an important international industrial manufacturing standard, such as NCCER's ES08402-07, are used as inputs, which presents the algorithm to derive the ordinates that define the desired geometries but refraining from revealing math functions for generic cases. In this project, mathematical models are developed to calculate up to n ordinates of concentric lateral's geometries at any elevation angle θ , as well as 90° exclusively eccentric cases. Mathematical models for concentric, eccentric, and tangential dummy legs are also developed. The results obtained in this project reveal a mean absolute percentage error (MAPE) of 1% for the most critical of the cases, confirming the precision of the mathematical formulae to replicate the results recorded in the manufacturing standard.

Upon the validity and usefulness of the mathematical expressions have been confirmed, an Android application is developed using the Ionic[®] software development tool (SDK), with the purpose of digitally exporting the found solution, bringing it closer to the target audience through an interface simple and practical.

³ Bachelor Thesis

⁴ Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Javid Eduardo Quiroga Méndez

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El último reporte integrado de gestión sostenible de Ecopetrol reveló que para 2018 la utilidad operacional de la compañía se posicionó en 30.8 billones, la más alta en los últimos 5 años⁵. De acuerdo con la petrolera, la generación de valor económico y rentabilidad han sido el foco estratégico de dentro de su plan de negocio 2017 -2020.

En junio de 2019 la petrolera puso en marcha la segunda fase de su Programa de Eficiencias que busca generar ahorros por 8 billones entre 2019 y 2023. Ecopetrol, que se ha posicionado como un actor clave en la financiación de la cartera pública nacional, reveló que uno de los ejes centrales de esta estrategia y que promete mejorar los indicadores de Gestión, es la consolidación de una transformación digital y tecnológica.

Para el caso particular de la Refinería de Barrancabermeja este programa se interpreta, entre muchos frentes de oportunidades, en estrategias que implementen soluciones tecnológicas que trasciendan en una transformación digital enfocada a una operación más eficiente tanto en Operaciones como en Mantenimiento.

Dentro de la amplia diversidad de especialidades de mantenimiento en el complejo industrial, uno de los trabajos más frecuentes es el de reparar, mantener e instalar tubería a lo largo y ancho de las 254 hectáreas de zona industrial⁶. Una de esa franja de operaciones y mantenimiento en tubería es la denominada fabricación avanzada de tubería, nombre entregado por el

⁵ ECOPETROL. “Reporte Integrado de Gestión sostenible 2018. De todos para todos”. Ecopetrol en cifras. [en línea]. Colombia. 2019. p. 12. [Consultado: 19 de enero de 2020]. Disponible en: <https://www.ecopetrol.com.co/wps/wcm/connect/bd3d084e-4670-415b-869a-7e279847e939/1reporte-integrado-gestion-sostenible-2018.pdf?MOD=AJPERES&attachment=true&id=1588773837500>

⁶ ECOPETROL. “Quiénes Somos” [sitio web]. Colombia. [Consultado: 02 de febrero de 2020]. Disponible en: <https://nuevoportal.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/innovacion-tecnologia/quienes-somos>

organismo de normalización NCCER (*). En concreto, dicho bloque comprende tareas como la determinación de desviaciones de tubería, fabricación de giros de inglete, injertos en tubería, trazado de laterales y fabricación de dummy legs. NCCER se constituye como el organismo acreditador más grande en Reino Unido en programas estandarizados de capacitación, evaluación de manufactura y construcción. En Colombia, instituciones como la Universidad Ecopetrol y el SENA, ofertan algunas de las capacitaciones y credenciales de ese organismo para formar en estándares internacionales de manufactura a sus trabajadores, siendo el objeto del entrenamiento una inversión por consolidar talento humano con capacidades técnicas de clase mundial⁷.

Pese a que la preparación e instrucción en el módulo de fabricación avanzada comprende una formación rigurosa, las particularidades y el nivel de especialización de dichas operaciones, demandan la necesidad de afianzar en herramientas tecnológicas que complementen y asistan el trazado y cálculos, en especial para los módulos de tubería, que comprenden un mayor número de subdivisiones en las tareas de ejecución.

Las dificultades se sustentan, entre otras, en:

- El tiempo que toma realizar trazados sobre las tuberías. De acuerdo con la experiencia, puede tardar casi un 100% más que cuando no se emplean herramientas de asistencia⁸.
- El uso de operaciones matemáticas y trigonométricas que pueden requerir de calculadora y eventualmente torpedear la cadencia del trabajo cuando se trate de trazados no convencionales.

(*) NCCER, de acuerdo con su traducción al español, se refiere al Consejo Nacional en Educación e Investigación para la Construcción. Fue desarrollado en 1996 con el apoyo de más de 125 directivos de construcción, así como varias asociaciones y líderes académicos que se unieron para revolucionar la capacitación para la industria de la construcción.

⁷ EL FRENTE. "132 trabajadores culminaron programa de formación en norma internacional NCCER". Nota periodística. [consultado el 02 de febrero 2020]. Disponible en: <http://www.elfrente.com.co/web/index.php?ecsmodule=frmstasection&ida=58&idb=107&idc=31802>,

⁸ MALDONADO PEREA, Mauricio. "Planeación y Programación para Mantenimiento". Refinería de Barrancabermeja, 2019.

- El factor humano dado que la sucesión de tareas para alistar un solo tramo de tubería, exigen esfuerzo físico, usar plantillas en papel, así como emplear pulidora para realizar las operaciones en tubería. Es un hecho notorio que esa secuencia de pasos tan diversos es demandante para el operario e intensifica eventualmente la probabilidad de cometer equivocaciones.
- La conjugación de las condiciones anteriores aumenta circunstancialmente la probabilidad de cometer errores en la fabricación.

Los errores a los que se hace alusión pueden significar:

- Requerir más tubería para generar nuevos trazados y cálculos,
- Aumentar el tiempo empleado para finalizar la tarea.
- Penalizar la productividad y los indicadores de resultados.
- Encarecer, eventualmente, la hora-hombre en Gestión de Mantenimiento

A nivel global existen soluciones en forma aplicaciones y firmas consultoras especializadas que cobran por asistir las tareas comprendidas dentro del módulo de fabricación avanzada de tubería, cuyo objeto es el de disminuir el margen de error y mejorar calidad del trabajo. No obstante, las fuentes consultadas revelan que las herramientas existentes en el mercado actúan como una caja negra donde se desconocen completamente las operaciones que derivan en los resultados, lo que es razonable puesto que el comercializador no revela la metodología que entrega los resultados. Aunque no se descalifican las soluciones generadas, esas soluciones y compañías no están explícitamente normados bajo el estándar NCCER, siendo este último el que cobija la calidad y el proceder de las operaciones y tareas de la mano de obra de Ecopetrol.

Bajo la luz de estos estándares industriales, y viendo en las circunstancias una oportunidad de mejora pertinente, se pretende desarrollar una solución de base tecnológica en forma de aplicativo digital, que libere de las tareas complejas de cálculo al operador y ejecutor, a través del desarrollo de los modelos matemáticos discretizados y alimentados por parámetros, que le otorguen

conveniente y oportunamente los datos precisos para ejecutar el trabajo al tubero. Con esta alternativa, se satisface la necesidad de realizar una operación más eficiente para los mencionados procesos, aminorando el margen de error, optimizando así tiempos, costos asociados y contribuyendo a la transformación digital.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar los modelos matemáticos discretos, basados en parámetros, para el trazado de geometrías de laterales y dummy legs de acuerdo con el estándar “fabricación avanzada de tubería (ES08402-07)” de NCCER.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar un modelo matemático discreto y parametrizado para el trazado de la geometría y definición de las ordenadas de laterales en tubería con ángulos de ramal de $0 < \theta \leq 90^\circ$, para 8, 16 y 32 divisiones circunferenciales de tubería, que se ajuste al estándar ES08402-07 de NCCER.
- Desarrollar un modelo matemático discreto y parametrizado para el trazado de la geometría y definición de las ordenadas de soportes dummy legs tipo I, II y III, para 16 y 32 divisiones circunferenciales de tubería, que se ajuste al estándar ES08402-07 de NCCER.
- Validar los modelos matemáticos desarrollados para laterales y dummy legs mediante un análisis comparativo con los resultados numéricos tabulados por el estándar ES08402-07 de NCCER.
- Desarrollar un aplicativo básico en Android que permita evaluar los modelos matemáticos desarrollados para laterales y dummy legs, que facilite la definición de las ordenadas sobre la tubería para mejorar la productividad en tales tareas de manufactura, al reducir el trabajo manual en el trazado y cálculo de las ordenadas.

3. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

En lo que concierne a la manufactura en tubería, es el sector del Petróleo y Gas quien lidera la demanda en términos de insumos y entrenamiento en tareas de fabricación avanzada de tubería, que incluyen, entre las tareas más complejas, la elaboración de laterales y dummy legs. Este tipo de trabajos son empleados principalmente en los entramados de tubería en refinerías y líneas de procesamiento de hidrocarburos. Tales operaciones de manufactura, al realizarse manualmente por tuberos, tienen inherentemente asociadas probabilidades de falla en su fabricación, como lo es el factor humano y la considerable cantidad de pasos para llegar al producto final, esto es, el prefabricado terminado. En estas circunstancias, es común observar que el proceso para los casos no convencionales de manufactura sea dispendioso y acarree una cantidad significativa de tiempo para el trazado de tuberías, sobre todo la determinación de las geometrías de ajuste, dificultad que se exagera aún más si es que no se cuentan con tablas de referencia, un caso frecuente para estas labores.

Con el desarrollo de un método discreto, parametrizado y ajustado a normas de manufactura internacional, que simplifique los pasos para determinar la geometría de ajuste al entregar las dimensiones precisas sobre la tubería, se disminuye entonces la probabilidad de falla humana y consecuentemente el material desperdiciado, expresándose en un beneficio tangible para el medio ambiente en términos de reducción de contaminación, así como en términos económicos, porque se incrementa la productividad operacional de la compañía, se mejora la disponibilidad de las cuadrillas de tuberos y se disminuyen tiempos de ejecución para las tareas en cuestión.

Desde el punto de vista de la excelencia operativa de la compañía, con el desarrollo de esta propuesta se cultiva una cultura de aseguramiento de la calidad en los trabajadores que los ayuda en el cumplimiento de sus metas de desarrollo laboral, les permite ser más eficientes y mejor calificados.

El aporte perceptible en el campo de la ingeniería mecánica se observa en la solución que permite dimensionar los modelos físicos correctamente. Al desarrollar un modelo matemático que dimensione las ordenadas de laterales en tubería y dummy legs, se facilita el trabajo en la manufactura, disminuyendo márgenes de errores. Una vez conocidas con precisión sus dimensiones pueden ser transferidas, por ejemplo, a software especializado y pueden desembocar en un análisis de control de calidad o en un análisis mecánico estructural, a través de una simulación computarizada. Las ventajas se registran al trabajar sobre modelos físicos precisos y detallados. El aporte, en su lugar, a la ingeniería de mantenimiento es constatable en el mejoramiento de los indicadores en gestión del Mantenimiento en las empresas que implementen esta solución, en especial al mejoramiento de indicadores como productividad de las cuadrillas de tuberos y, eventualmente, la disminución en el costo de la hora-hombre al contar con ejecutores que, tras emplear esta herramienta complementaria, pueden reducir su tiempo de elaboración de prefabricados drásticamente.

Con el desarrollo e implementación de esta propuesta, se satisface uno de los principios de la bioética ambiental enunciado por PEREZ de NUCCI (1993), como lo es el principio de sociabilidad del bien común en el que "...la ciencia y la tecnología deben utilizarse para resolver los problemas ambientales dentro del marco que establezca la ética y sin vulnerar nunca los derechos de los individuos a su autonomía y realización física y cultural..."⁹, puesto que la propuesta propende por una solución que disminuirá circunstancialmente el desperdicio generado en materiales.

La propuesta también repercute en pro de una mejor calidad de vida del operador, puesto que le permite al tubero disminuir su carga laboral, al facilitarle los procesos de cálculo y manufactura.

⁹ PEREZ de NUCCI, Armando. "Ética y medio ambiente: el desafío de fines del siglo XX". 1993. Recuperado de <http://www.desarrollodetucuman.org/blog/etica-y-medio-ambiente-el-desafio-del-siglo-xxi/>

4. MARCO TEÓRICO

En esta sección se presentan el estado del arte y referentes teóricos del proyecto. En el estado del arte se presentan antecedentes y estudios previos que son afines al objetivo del proyecto. De acuerdo con la revisión sistemática realizada, los resultados que se presentan corresponden principalmente al ámbito internacional y comprenden el período del 2015-2020, contando con pocos o casi nulos antecedentes a nivel nacional o regional. Posteriormente se presentan los referentes teóricos que sustentan los conceptos para entender las definiciones necesarias relacionadas al tema.

4.1 ESTADO DEL ARTE

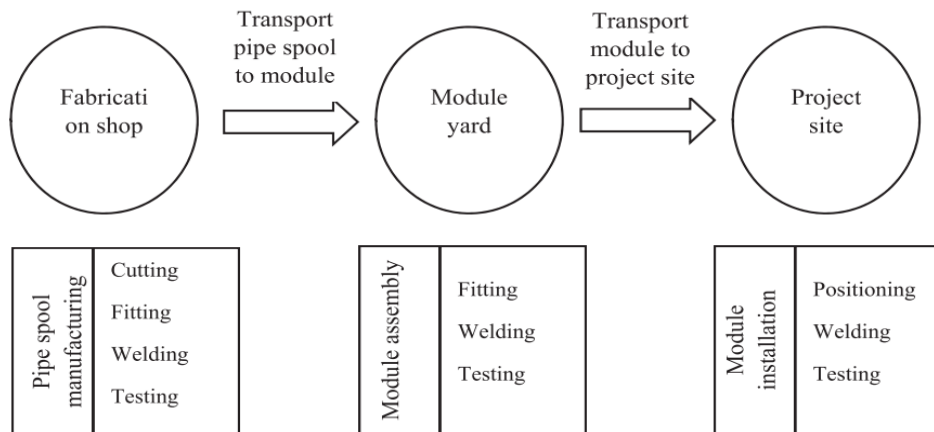
4.1.1 Antecedentes internacionales. Como el objetivo general del proyecto es desarrollar una herramienta digital que permita facilitar el trazado y cálculos para la manufactura de laterales y dummy legs, el efecto principal de la propuesta incide en los indicadores de productividad de los procesos de manufactura que involucran tubería, en especial las tareas de manufactura de laterales y dummy legs del estándar ES08402-07 de NCCER. La medición de la productividad se ha vuelto un tema crítico en las empresas para enfocar puntos de mejora y optimización de costos, así como disminución de riesgos (ambientales, de seguridad y humanos, entre otros). Se presentan a continuación brevemente las posturas de investigadores que, entre otras cuestiones, avalan la utilización de medios y estrategias de apoyo para los procesos de manufactura en tubería que permitan robustecer la productividad para estas tareas.

4.1.1.1 Artículos de investigación sobre manufactura y productividad en proyectos que involucran tubería. Respecto de la medición de la productividad para estas tareas, Mubarak, Yasser y Ahmed, explican que el principal desafío está relacionado con la disponibilidad de *mecanismos* en el mundo real de los que se puedan recopilar datos utilizables. Inclusive, más allá del hecho de que

recopilar, documentar y gestionar datos experimentales es de por sí una tarea costosa, los autores explican que generalmente los datos son confidenciales¹⁰.

Mubarak, Yasser y Ahmed considerando las limitaciones de adquisición de datos, propusieron un generador de datos para estudiar los procesos productivos de manufactura de líneas de tubería y así analizar el comportamiento global de la cadena de suministro en función del desempeño de cada uno de los módulos que componen la línea (figura 1).

Figura 1. Módulo de procesos de producción en la construcción de un proyecto industrial.



Fuente: Mubarak, Yasser y Ahmed.

La propuesta de modularización que usaron los autores para el análisis no es nueva, y es la que emplean los estándares NCCER. Según Jae-Jun e Ibbs, la técnica es empleada principalmente en proyectos industriales tales como plantas petroquímicas, refinerías de petróleo y en facilidades de producción, donde los sistemas de tubería “son los componentes más grandes y complejos que afectan el tiempo y el presupuesto de este tipo de proyectos”¹¹. De acuerdo con Song et al. la modularización es el resultado de “la búsqueda de una mayor seguridad,

¹⁰MUBARAK AL-Alawia, YASSER Mohamedb, AHMED Bouferguene. “Application of industrial pipelines data generator in the experimental analysis: Pipe spooling optimization problem definition, formulation, and testing” *Advanced Engineering Informatics*, enero, 2020, Volumen 43, Serie 101007, p.1.

¹¹JAE-JUN Kim, IBBS William. “Work-Package-process Model for piping construction”. American Society of Civil Engineers (ASCE). *Engineering Management*. 1995, p. 381-387.

calidad, productividad y rendimiento en el trabajo que llevó a los propietarios a adoptar técnicas de tiempo y rentabilidad como un elemento importante para su paradigma de entrega de proyectos”¹². El modelo se ha consolidado, de acuerdo con Mc Graw-Hill¹³, como una estrategia de productividad mejorada, y una planeación de proyectos y reducción de costos optimizada.

Lo anterior es afín con la propuesta del proyecto, que hace hincapié en una estrategia de manufactura que se sustenta intrínsecamente en *modularización*. Por lo que se verifica una aprobación generalizada apuntando al desarrollo de soluciones de este tipo.

Mubarak, Yasser y Ahmed encontraron que la etapa de fabricación en taller, como es previsible, es el módulo *que más puede variar significativamente en términos de costos y tiempo*. Señalando que la variación está sustentada en el hecho de que cada prefabricado es una composición única de tuberías tanto en forma, tamaño y materiales, con tiempos muy diferentes de horas-hombre asociados para cada caso¹⁴. Justo allí es donde aparece la oportunidad de mejora que se pretende con este proyecto al hacer más efectiva la realización particular de prefabricados de laterales y dummy legs.

Bien es cierto que para los procesos de construcción de un circuito completo de tubería en la industria el proceso inicia, de acuerdo con Wang y AbouRizk, típicamente con la entrega de planos, esquemas y materiales por parte del operador del proyecto hacia el contratista¹⁵. Esos planos contienen los detalles de los tramos de tubería, las propiedades dimensionales, piezas de transición, soportes y demás que deben contener el circuito que se fabricará. No obstante, para la ejecución de la manufactura es una práctica común que el contratista o el ejecutor, de acuerdo con Tommelein, divida los tramos en secciones más

¹² SONG Jongschul, et al. Considering Prework on Industrial Projects. En: American Society of Civil Engineers (ASCE): *Engineering Management*. 2005, p. 723-733.

¹³ HILL, MacGraw. “Prefabrication and Modularization: Increasing Productivity in Construction Industry”. En: McGraw-Hill, Bedford, Massachussets, 2011.

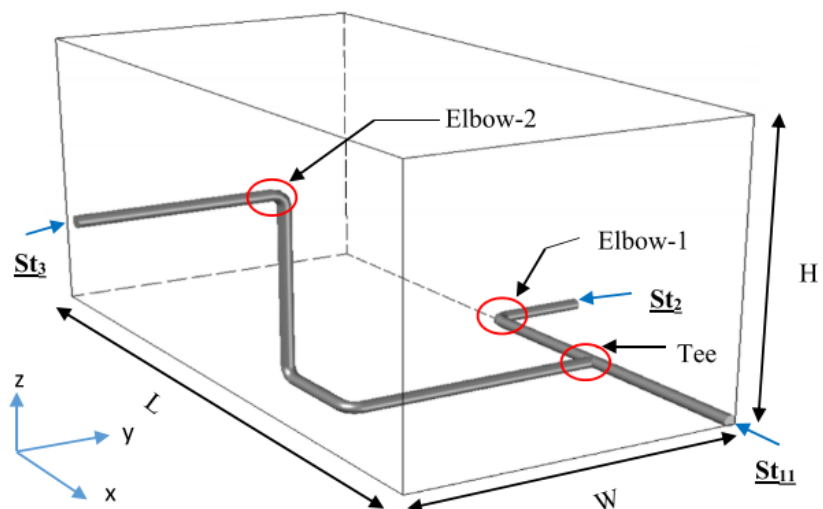
¹⁴ MUBARAK AL-Alawia, Op. Cit. p. 3.

¹⁵ WANG P, Abourizk S. “Large Scale simulation modeling system for industrial construction”. Canadian Journal Civil Engineering. 2009. Edición 36. P 1517-1529.

pequeñas para distribuir el trabajo a la mano de obra, práctica que recibe el nombre de “hojas sueltas”¹⁶.

Considerando que los planos ISO son entregados por el cliente, el contratista tiene poco o casi ningún control en la determinación de las hojas sueltas, por lo que recae en el ejecutor la tarea de optimizar la manufactura para cumplir con los requerimientos del cliente. Aunque las divisiones del circuito de tubería se realizan siguiendo diferentes reglas y métodos heurísticos, normalmente se dividen las hojas teniendo en cuenta (1) el máximo tamaño de prefabricado transportable desde el taller hasta el sitio para economizar costos de transporte, (2) en función de la ergonomía y accesibilidad para el ejecutor (factor humano) y (3) minimizar la cantidad de soldadura y pruebas hidrostáticas de estanqueidad sobre el circuito.

Figura 2. Representación ISO de línea de tubería empleada en un proyecto de manufactura



Fuente: Mubarak, Yasser y Ahmed.

Para el caso de Mubarak et. Al., los autores propusieron crear y evaluar un algoritmo para determinar la mejor distribución de subdivisiones en tubería que beneficiara el trabajo en el taller y representara una óptima distribución del

¹⁶ TOMMELEIN, I.D. “Process benefits from use of standard products – Simulation experiments using the pipe spool model”. Conferencia Internacional Grupo de Lean Construction. Santiago de Chile. 2006.

prefabricado en su transporte hasta el sitio en campo. El esquema evaluado fue el reseñado en la figura 2. Los resultados de su algoritmo entregan conjuntos de combinaciones de subdivisiones en tubería que se ponen a disposición de un experto para que determine su viabilidad según las necesidades del proyecto. Cabe resaltar que el algoritmo no produce una respuesta única, sino un conjunto de datos que señalan (1) el número de subdivisiones y (2) su equivalente en números de prefabricados.

Los resultados del ejercicio formulado anteriormente se encuentran en el informe de los autores y no se muestran en el presente por considerarse no esencial. Sin embargo, el aporte de peso para el proyecto se interpreta en que el conjunto de datos calculado por el algoritmo eventualmente arrojará en su respuesta las necesidades individuales de manufactura de laterales y dummy legs para casos no convencionales. En estas circunstancias se erige el escenario propicio para lo que se pretende desarrollar con esta propuesta ya que permite afrontar esos casos complejos de hojas sueltas, simplificando el trabajo para las mencionadas operaciones.

El desafío de las hojas sueltas trae consigo la adopción de criterios técnicos al momento de la instalación que permitan crear un ajuste en las líneas de tubería de forma segura con relación a la integridad de la estructura. Las tuberías se pueden agrietar con el tiempo particularmente en áreas donde se producen los ajustes de tubería (tales como los laterales y dummy legs) and esas juntas pueden estar sujetas a puntos de alta presión y temperaturas poco estables, representando tiempo y trabajo atender esas circunstancias, tal como lo reseñan Cital et. Al en su estudio de 2017, donde proponen una nueva estrategia para reducir el tiempo de reactivación del sistema de tuberías que fallaron en las uniones de ajuste de tubería, empleando parches con material laminado como uniones adhesivas, estudiando la influencia de factores como el tamaño de la

lámina, su espesor, y el ángulo de solapamiento (o de recubrimiento) sobre la unión de tubería afectada¹⁷.

La situación expuesta hasta ahora revela que uno de los factores clave para solventar el problema de la calidad de instalaciones de líneas de tubería está sustentada en una preparación y entrenamiento a la fuerza de laboral en las distintas especialidades relacionadas con la manufactura y montaje de los sistemas de transporte de fluidos.

En 2015, Andrews P, et.al. en su artículo Construyendo el Talento Humano en Arabia Saudita, hace una reflexión crítica sobre la situación de la fuerza laboral para la industria de Petróleo y Gas en su país, iniciando su nota con la importancia de ese sector para la economía nacional, exponiendo que alrededor del 75% de los ingresos estatales provienen de sus recursos naturales principalmente los derivados de sus hidrocarburos, y donde, además, el 90% de las exportaciones de ese país provienen de la industria energética. El autor cuestiona con una crítica constructiva el hecho de que la mano de obra que ha liderado la transformación laboral en su país son ciudadanos extranjeros, elevándose a una cifra de alrededor de ocho millones de personas que representa casi el 50% de las personas vinculadas laboralmente a la industria nacional de Arabia, repercutiendo en una tasa de desempleo local de alrededor del 11.5% donde para la población joven entre 20-24 años es del orden de 40%, de acuerdo con la OCDE, citada por Andrews. Lo anterior ha sido motivo de crítica para el autor, quien considera que la verdadera transformación de su país apunta hacia la “Saudización” a lo que él denomina el proceso de *educar* y *entrenar* a sus nacionales para asumir posiciones en la mano de obra técnicamente prepara para participar de su sector de construcción, manufactura y mantenimiento en la industria de Hidrocarburos¹⁸. La motivación que ha

¹⁷ CITIL, S; AYAZ, Y; TEMIZ, S; AYDIN, M. “Mechanical behaviour of adhesively repaired pipes subject to internal pressure”. International Journal of Adhesion and Ashesives. Volumen: 75. junio 2017. P.88-95.

¹⁸ ANDREWS, P. “Case Study 2: Building Human Capacity in Saudi Arabia: The impact of Government Initiatives on the Oil and Gas Workforce”. Education and Training for the Oil and Gas Industry. Volumen: 2. 2015. P. 17-32.

desplegado el ministerio del trabajo de Arabia Saudi fue tal que desde 2012 se creó el sistema TVET, por sus siglas en inglés, el sistema de Educación y Entrenamiento Técnico y Vocacional, enfocados principalmente en entrenar a la mano de obra joven y local de su país en las principales tareas de productividad de la industria de Petróleo y Gas, brindándole a sus nacionales la posibilidad de conseguir acreditaciones internacionales, similares al propósito que ha desplegado NCCER. Posteriormente se uniría a la estrategia estatal el Instituto Nacional de Entrenamiento para la Industria (NITI, por sus siglas en inglés), una escuela de formación dirigida directamente por Aramco, la petrolera oficial de Arabia Saudita, lo que consolidó las voluntades de la estrategia estatal, y afianza el robusto impulso de formación y fortalecimiento en educación laboral que pretenden instaurar tanto el estado como el sector hidrocarburos en su fuerza laboral, y una vez más, es consonante con las demás estrategias que se han mencionado hasta el momento.

Figura 3. Centro de educación y entrenamiento de Aramco, NITI.



Fuente: niti.edu.sa, en línea, 2020.

Más adelante, en 2017 Playfoot J et. al. rescata el trabajo realizado por Andrews en 2015 y expone que una fuerza laboral bien entrenada en las tareas y operaciones técnicas en el sector de hidrocarburos desemboca en un legado de habilidades y talentos que diversificarán potencialmente el desarrollo de otras actividades económicas y productivas, dentro de las denominadas tareas de transferencia de conocimiento a un campo distinto al que fue originalmente pensado. El autor asegura que el entrenamiento en prácticas y estándares

potencializará el desarrollo nuevos escenarios productivos que no necesariamente estarán vinculados al Petróleo y Gas, pero que estarán impulsados por el talento y experiencia cultivadas en tales escenarios¹⁹.

Un panorama similar es aquel que se presenta bajo el contexto de esta propuesta puesto que los modelos matemáticos que se pretenden desarrollar son aplicables a otro tipo de industrias bien sea alimenticias o de servicios como agua o sustancias químicas, al tener en común sistemas de tuberías como medio de transporte en los que requieren hacer operaciones como laterales inclinados a cualquier ángulo o dummy legs, de donde se rescata el valor y utilidad de tales proyectos.

4.1.1.2 Patentes recientes que asisten el proceso de manufactura en tubería. De forma complementaria a los artículos de investigación presentados en la sección anterior, se exponen a continuación dos (2) patentes recientes, que son afines a las necesidades que se pretenden abordar con la propuesta del proyecto.

En la búsqueda del cierre de la brecha de productividad se exponen resultados notables, por ilustrar algunos, como el de MARTIN 2017, quien quien propuso con su invención una plantilla para el marcado de tubería, tubings y barras previo a la operación del doblado, utilizando un elemento cóncavo que delimita la tubería en valores circunferenciales angulares discretos²⁰ (ver figura 3). Poco después aparecería MATSUDA 2017 quien patentó un dispositivo para marcar a lo largo de la dirección longitudinal en un extremo de conexión de una tubería cuando se conectan dos tuberías usando una junta de tubería²¹.

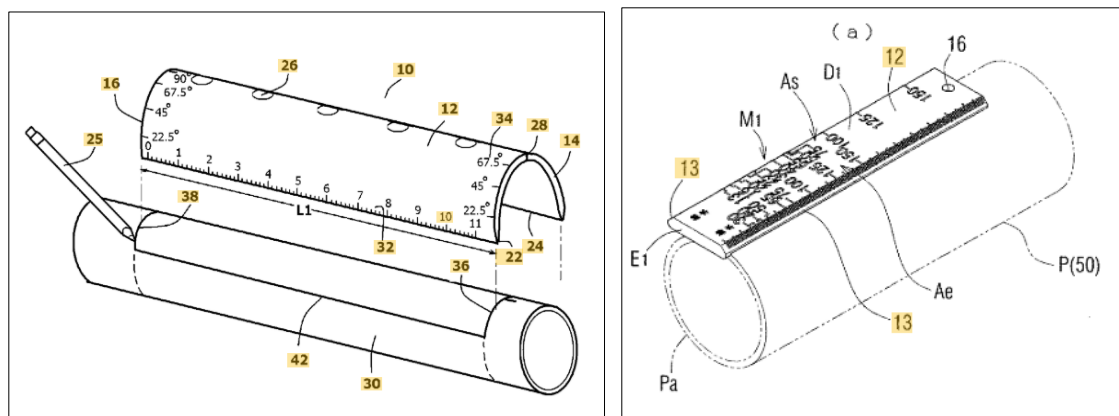
¹⁹ PLAYFOOT, J., et. Al. "The Legacy of Education and Training". Education and Training for the Oil and Gas Industry. Volumen: 3. 2017. P. 93-109.

²⁰ USPTO. "Marking template for marking pipe, tubing and bars prior to vending" [medio electrónico]. Inventor: MARTIN Thomas. Patente ID: US9937617B2. Estados Unidos. 2017.

²¹ ESPACENET. Marking material [medio electrónico]. Inventor: MATSUDA Shohei. Patente ID: JP6227746B2. Japón. 2017.

Ambos elementos amenizan el marcado sobre la tubería, lo que *facilita* la tarea de ubicación circunferencial demostrando que dichas patentes responden a la necesidad generalizada de optimizar los mencionados procesos productivos.

Figura 4. Plantilla de corte de MARTIN (izquierda). Elemento de marcado MATSUDA (derecha).



Fuente: Google Patents (en línea).

4.1.2 Antecedentes nacionales. En relación con los antecedentes nacionales como hecho relevante se destaca el inicio de formación en estándares NCCER en Colombia desde 2013. Tal como lo reportó ECOPEPETROL: “por lo menos una vez, entre 2013 y 2015, el 71% de los trabajadores que han cursado procesos de formación y certificación internacional NCCER han tenido vinculación laboral en la Refinería de Barrancabermeja. En cifras eso significa que, de los 3.616 trabajadores formados bajo esta metodología, 2.583 han sido beneficiados laboralmente”²². La compañía petrolera adiciona que el programa de Certificación en Normas Internacionales se desarrolló en alianza entre Ecopetrol y el SENA, y que cuenta desde hace un año con la vinculación de las empresas encargadas de las paradas de planta de la refinería tales como los consorcios Turnarounds Alliance y OBTC²³. Siendo el propósito el de preparar integralmente

²² ECOPEPETROL. Sala de Prensa [sitio web]. Colombia. [Consultado: 04 de marzo de 2020]. Disponible en: ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/sala-de-prensa/noticias/Noticias%202016/Noticias%202016/Certificacion-internacional-aporta-movilidad-laboral-trabajadores-barranquenos

²³ ECOPEPETROL, Ibid.

fuerza laboral competentes y certificadas en las diversas especialidades bajo estándares internacionales para la industria petrolera.

Figura 5. Trabajadores realizando operaciones en tubería, Refinería de Barrancabermeja.



Fuente: Vanguardia Liberal (en línea), 2016.

Para septiembre de 2015, un total de 501 trabajadores con certificaciones diversas en NCCER participaron en la parada de planta de la Unidad U-200. ECOPETROL reportó que, para dicho proyecto de mantenimiento, era la primera vez, desde el inicio del programa del Desarrollo del Talento Humano del Gran Acuerdo Social, que un número tan grande de trabajadores con certificación NCCER se desempeña en una parada de planta del complejo petrolero porteño²⁴.

²⁴ VANGUARDIA. “Paradas de planta de la refinería, con mano de obra certificada”. Nota periodística. Septiembre de 2015. Consultado el 02 de julio de 2020. Disponible en: <https://www.vanguardia.com/santander/barrancabermeja/paradas-de-planta-de-la-refineria-con-mano-de-obra-certificada-JCVL328881>

Figura 6. Trabajo en tubería parada de planta U-200.



Fuente: Vanguardia Liberal (en línea), 2015.

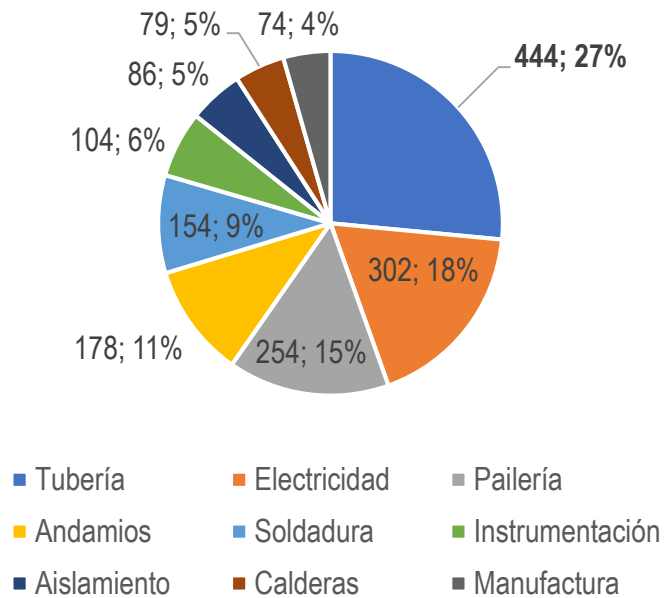
Los reportes de Gestión para el proyecto revelan que los resultados de los programas de entrenamiento se ven reflejados en las buenas prácticas de Seguridad Industrial que reducen el índice accidentes ocupacionales, así como el cumplimiento de los tiempos de ejecución y programación de las labores.

Una de las ventajas subyacentes al desarrollo del programa de entrenamiento es el hecho de que el porcentaje de trabajadores certificados vinculados con contratistas en los trabajos en refinería se incrementa en las paradas de planta. Esta tendencia es positiva en el sentido de la incorporación de una cuota cada vez más elevada de personal entrenado, que tiene asociada la ventaja de un trabajo seguro y eficaz. Esta estrategia deriva en beneficios secundarios como el incremento de la motivación en el personal por realizar su trabajo de acuerdo con recomendaciones industriales, así como el afianzamiento de sus metas de desarrollo laboral.

Los reportes de las paradas de planta para los periodos reseñados entre 2015-2016 revelan que las especialidades con mayor volumen de trabajadores son en su orden tubería (444) trabajadores, electricidad (302), pailería (254), andamios

(178), soldadura (154), instrumentación (104), aislamiento (86), calderas (79) y manufactura (74).

Figura 7. Distribución de los trabajadores certificados según especialidad



Fuente: Elaboración propia con insumos de Vanguardia Liberal (en línea), 2016.

La distribución de especialidades indica que son los tuberos quienes mayor demanda laboral y vinculación presentan para las paradas de planta en especial para aquellas unidades en las que haya que intervenir líneas de transporte de fluidos.

Una de las particularidades que se observa en la cartilla de detalle sobre el programa de Certificación de NCCER, Ecopetrol y el SENA, que se ha hecho pública, es que el módulo de fabricación de tubería avanzada nivel 4, y último nivel del entrenamiento, es que el mencionado módulo tiene una duración de 182.5 horas de formación, donde solamente se dedican 50 horas para la revisión de los casos de manufactura como laterales y dummy legs²⁵. Lo que brinda una

²⁵ SENA. Cartilla Informativa para el desarrollo de programas de certificación internacional NCCER. [Consultado el 02 de julio de 2020]. Disponible en: https://issuu.com/salomepagana/docs/cartilla_nccer

idea relacionada con la dificultad asociada al módulo y el nivel de especialización de las tareas. Si bien es cierto que el entrenamiento incluye un documento compendio con tablas de datos calculados previamente que facilitan las operaciones de tubería, la gran mayoría son casos limitados y simples, escapando de los casos más complejos y reales que se puedan presentar.

Figura 8. Firma contratista certificada en NCCER para parada de planta de refinación de crudos de 2016



Fuente: El tiempo (en línea), 2016.

Para abril de 2017, Ecopetrol afirmó que el acumulado de personal capacitado ascendía a más de 5000 trabajadores²⁶. Para finales de 2019, Carlos García Londoño, Gerente General actual de la refinería de Barrancabermeja afirmó que tan solo en el último año 1441 trabajadores recibieron formación en los distintos campos de entrenamiento de NCCER²⁷.

4.2 REFERENTES TEÓRICOS

4.2.1 Historia y evolución de los proyectos de Ingeniería que emplean tubería. Plumbing Manufacturers International en su compilación de historia

²⁶ DÍAZ, O. "Ecopetrol entregó Centro de Entrenamiento". Gerente General de refinería Barrancabermeja. Conferencia instalaciones SENA. Barrancabermeja, 27 abril de 2017.

²⁷ GARCÍA, C. "Informe de aportes de Ecopetrol a Barrancabermeja". Conferencia Casa de Huéspedes, Barrancabermeja, 11 de septiembre de 2019.

sobre tubería y plomería, registra que para 1700 a.C., en Creta (la isla más grande de Grecia) construyó y puso en funcionamiento un sistema de disposición y drenaje de aguas residuales a través de un sistema de canales abiertos²⁸.

Más de 3000 años después para 1652, en Boston, EE.UU., se construye el primer sistema de abastecimiento de agua de la ciudad, para ser utilizado por bomberos, dejando para la memoria histórica que la mayoría de las tuberías en este momento se construyeron a partir de árboles ahuecados. En 1864, Filadelfia se convierte en la primera ciudad en cambiar por completo a tuberías de hierro fundido para crear su sistema de suministro de agua, lo que los convierte en un líder mundial en tubería para su época.

Con los primeros sistemas sofisticados de distribución y disposición de tubería en marcha, para el siglo XIX se observó la necesidad de regular y estandarizar las operaciones en tubería. A nivel industrial, no fue sino hasta 1973 que surgió una fundamentación técnica y ampliamente aceptada sobre instalación de tubería donde W.V. Graves, instructor de tuberías en Lee College en Baytown, Texas publicó el "*Pipe Fitter's Blue Book*" (el libro azul del instalador de tubería)²⁹.

4.2.2 Normalización de las operaciones de manufactura en tubería. Con el posicionamiento de los estándares internacionales de construcción de NCCER, se publican artículos que señalan de manera ordenada el correcto desarrollo de los surtidos procesos en manufactura y construcción que emplean tubería. Para el caso que compete, el ES08402-07, módulo de fabricación avanzada de tuberías, señala entre otros, los procedimientos para realizar prefabricados de elevadores en tubería y soportes de tubería (dummy legs), entregando datos normalizados para los casos convencionales, así como la metodología para los

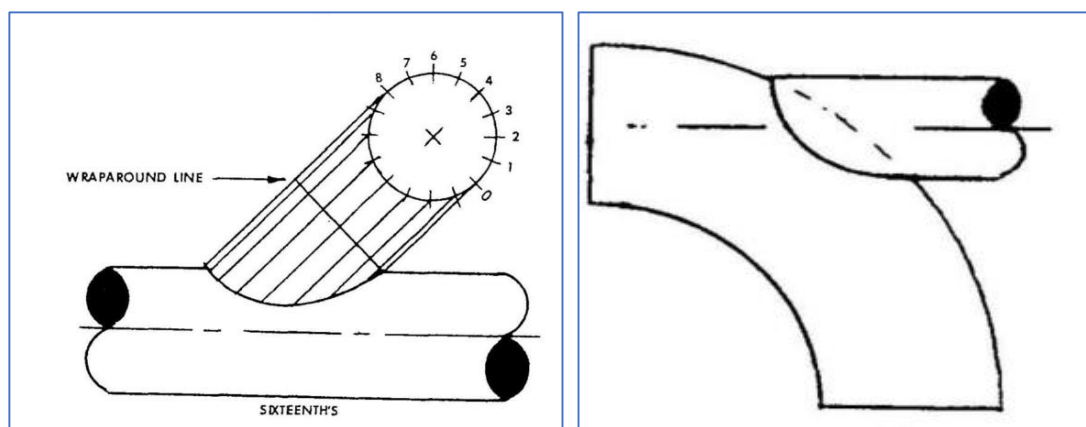
²⁸PLUMBING MANUFACTURERS INTERNATIONAL (PMI). "*History of Plumbing Timeline*". Historia de la fontanería...hasta ahora [en línea]. EE.UU., 2019. Disponible en: <https://www.safeplumbing.org/about-pmi/timeline>

²⁹ PIPEFITTER. "Pipe fitter's blue book" [sitio web] Pipefitter.com. EE.UU., [Consultado: 16 de febrero de 2020]. Disponible en: <https://pipefitter.com/store/pipe-fitters-blue-book.html?xid=Nibpw9Oih8EolAhiWkYGVZPmruuhCRd#product-details-tab-specification>

casos en los que no se cuente con referencias (no convencionales). Para los casos no convencionales, el método estandarizado demanda de forma natural una cantidad significativa de tiempo para los trazados, por lo que se avizora una oportunidad de mejora para estos procesos productivos³⁰.

4.2.3 El libro azul del tubero (The Pipe Fitters Blue Book). En 1973 este libro fue publicado por W.V. GRAVES, quien también fue el autor del libro “The pipe Fabricators Blue Book”. El libro azul del tubero reseña fugazmente cómo realizar diversas operaciones en tubería. No obstante, su valor agregado reside en las tablas³¹ (soluciones numéricas) de los casos más *comunes* (limitado) para manufacturar cortes con ángulos en tubería, laterales excéntricos y concéntricos, giros de inglete, corte en inglete tipo “Y”, reductores excéntricos y concéntricos, diseño de serpentines, dummy legs, entre otros. Ver figura 9.

Figura 9. Esquemático de lateral en tubería (izquierda). Esquemático de dummy leg concéntrico (derecha)



Fuente: The Pipe Fitters Blue Book (1973).

La publicación de GRAVES, instructor universitario en Texas para entonces, aún se mantiene vigente puesto que sus análisis de diseño para casos convencionales son frecuentes dentro de las operaciones en tubería en la

³⁰ NCCER. “Instalación de tuberías: nivel cuatro”. Tercera edición. Alachua, Florida, EEUU. Pearson, Editorial 2014.

³¹ GRAVES, W.V. “The Pipe Fitters Blue Book”, [soporte físico]. Baytown, Texas. GRAVES PUBLISHING COMPANY. 1973, p.28. 90° Saddle ON, Standard Weight Pipe. Pipe Marked in Eighths.

industria, a tal punto que sus desarrollos se han tornado comunes dada la facilidad de cálculo para esos casos en la forma como en su libro está exhibido.

4.2.4 Estándares Internacionales de NCCER. El Centro Nacional de Investigación y Enseñanza de la Construcción, por sus siglas en español, es la compañía americana que brinda un programa de formación y acreditación estandarizado para la industria a nivel internacional y propende por un trabajo seguro, productivo y sostenible de las profesiones de la industria. De acuerdo con ECOPETROL 2016, NCCER se ha expandido para convertirse en la fuente de capacitación, evaluaciones y certificación de la industria³².

NCCER cuenta con importantes organizaciones asociadas que gravitan aprobación y respaldo internacional sobre los estándares. Por mencionar algunas, se encuentran: la American Council for Construction Education (ACCE), la Associated General Contractors of America (AGC), el Construction Industry Institute (CII) en EE.UU, el Manufacturing Institute (MI), la Universidad de Florida (UF) en EE.UU, y la editorial educativa Pearson³³.

4.2.5 Método discreto para resolver numéricamente las dimensiones de laterales y dummy legs según NCCER. La publicación de GRAVES carece de formular de clara y ordenada cómo derivar el método analítico que sustenta las soluciones numéricas de sus tablas, lo que representa un desafío para extrapolar los casos no convencionales. El estándar ES08402-07 de NCCER, recopila, adopta y publica una metodología para estos procedimientos. Sus instrucciones se ajustan a las recomendaciones de común acuerdo entre los organismos asociados arriba listados, de acuerdo con la experiencia en la industria.

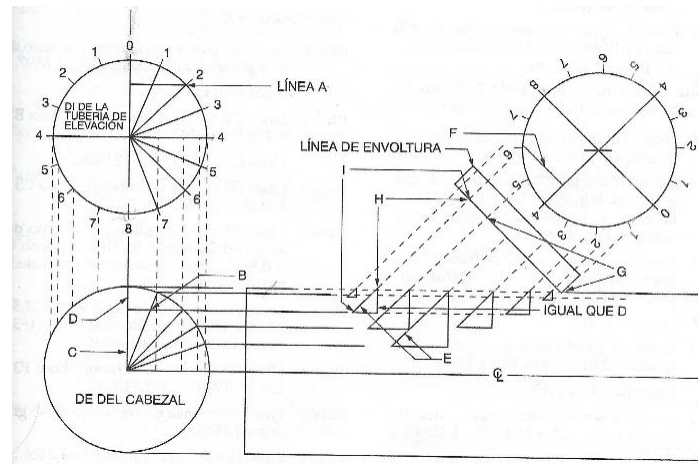
4.2.5.1 Cálculo de laterales no convencionales según NCCER. En su sección 4.1.0 del ES08402-07 de NCCER se reseña metódicamente, y de forma textual, cómo derivar un caso de un lateral de NPS 4" en un cabezal de NPS 6", con ángulo de elevación de 45°, lo que significa un caso no convencional. El método

³² ECOPETROL, Op. Cit.

³³ NCCER. "Partners". [sitio web]. EE.UU., [Consultado: 04 de marzo de 2020]. Disponible en: <https://www.nccer.org/about-us/partners>.

discretiza en dieciséis (16) ordenadas circunferenciales sobre la tubería y describe en sesenta y seis (66) pasos los cálculos para llegar hasta el lateral finalizado³⁴. Ver Figura 10.

Figura 10. Esquemático para el cálculo de las ordenadas en lateral de 45°, caso no convencional



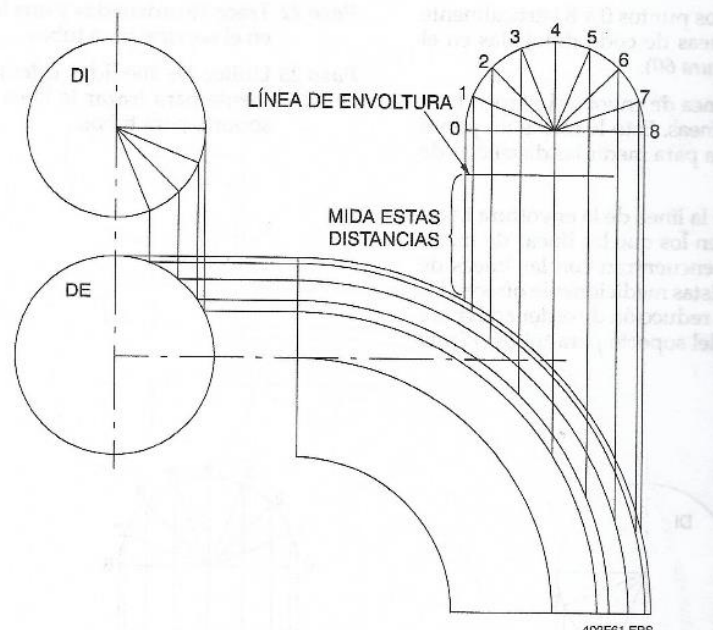
Fuente: NCCER, estándar ES08402-07 (soporte en físico).

4.2.5.2 Cálculo de dummy legs no convencionales según NCCER. En su sección 6.2.0 del ES08402-07 de NCCER se reseña metódicamente, y de forma textual, cómo derivar un caso de un dummy leg de NPS 3" en un codo radio largo de NPS 6" (ASME B 16.9-2001), lo que significa un caso no convencional. El método discretiza en ocho (8) ordenadas circunferenciales sobre la tubería y describe en cuarenta y un (41) pasos los cálculos para llegar hasta el soporte finalizado³⁵. Ver Figura 11.

³⁴ NCCER, Op. Cit. Instalación de tuberías: nivel cuatro. p. 2.27.

³⁵ NCCER, Op. Cit. p. 2.39

Figura 11. Esquemático para el cálculo de dummy legs concéntricos, caso no convencional.



Fuente: NCCER, estándar ES08402-07 (soporte en físico).

4.2.6 Herramientas de rápida implementación para el cálculo de operaciones en tubería disponibles en medios digitales. La necesidad de desarrollar soluciones de rápida implementación para agilizar el cálculo de casos no convencionales en laterales y dummy legs ha desembocado en herramientas y soluciones en línea que ofrecen soluciones a este tipo de operaciones. No obstante, en su gran mayoría, los resultados y procedimientos que soportan sus métodos son confidenciales, por lo que se desconoce si provienen de algún estándar de manufactura confiable.

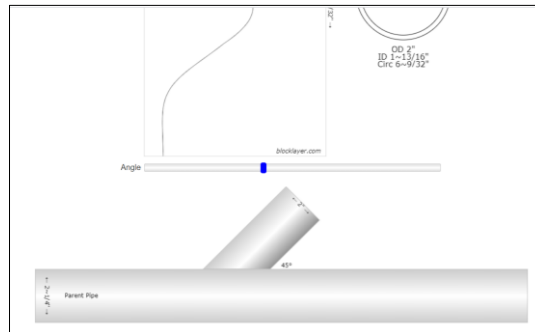
4.2.6.1 Herramientas de cálculo para laterales. Se presentan a continuación dos (2) herramientas y servicios disponibles en línea que dicen solucionar el cálculo de laterales.

- **Blocklayer**

En junio de 2019 se cargó un aplicativo .ASPX que soluciona de forma generalizada el cálculo de elevadores para cualesquiera dos diámetros de

tubería y cualquier ángulo de elevación. El aplicativo no especifica ningún estándar de cálculo o de construcción³⁶. Figura 12.

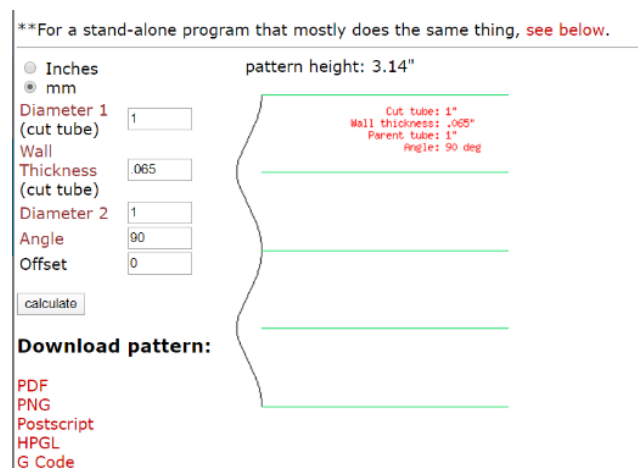
Figura 12. Esquema ejemplo del aplicativo de Blocklayer.



- **Metalgeek**

Metalgeek es un aplicativo digital en formato web que desarrolla superficialmente los modelos para elevadores con ángulos entre 10° y 90° para un rango limitado de pares de diámetros³⁷. Se desconoce bajo qué estándar de cálculo se realiza el desarrollo. Figura 13.

Figura 13. Esquema del aplicativo de MetalgGeek.



4.2.6.2 Herramientas de cálculo para dummy legs. Se presenta la única solución respaldada por la firma de una empresa que dice solucionar el cálculo de dummy legs concéntricos.

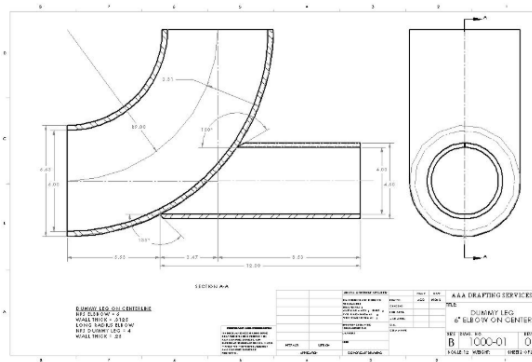
³⁶ BLOCKLAYER. "Pipe notching calculator". [sitio web]. EE.UU. [Consultado: 08 de marzo de 2020]. Disponible en: <https://www.blocklayer.com/pipe-notching.aspx>

³⁷ METALGEEK. "Tube Coping Calculator". [sitio web]. EE.UU. [Consultado: 08 de marzo de 2020]. Disponible en: <http://metalgeek.com/static/cope.pcgi>

- **AAA Drafting**

AAA Drafting Services es una empresa de dibujo mecánico que ofrece diseño CAD a arquitectos, ingenieros profesionales y fabricantes. La compañía ofrece soluciones por demanda para cada caso en concreto y se desconoce el precio por cada servicio³⁸. Se estima que los cálculos se realizan bajo el estándar de aproximación gráfica en software de dibujo. No se especifica el estándar de cálculo o de manufactura por cuenta del proveedor. Ver Figura 14 para ilustrar un plano ejemplo del cálculo que dicen realizar.

Figura 14. Esquema de previsualización del servicio de AAA Drafting.



³⁸ AAA DRAFTING. "Dummy leg drafting and development". [sitio web]. EE.UU. [Consultado: 08 de marzo de 2020]. Disponible en: <https://www.aadrafting.com/pneumatics/dummy-leg.html>

5. DESARROLLO METODOLÓGICO

5.1 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DEL ESTÁNDAR ES08402-07 DE NCCER

Las secciones 4, 4.1, 5.0, 6.1 y 6.2 del estándar ES08402-07 de NCCER exponen cómo realizar el trazado y manufactura de las configuraciones de geométricas que se han relatado, tales son:

5.1.1 Laterales a 90° (sección 4.0). Se explica cómo ajustar un tubo injerto a uno base, a 90°, de forma concéntrica. El ajuste se suele conocer como boca de pescado, e incluso como “Tee”, aunque última expresión es más bien reservada para los accesorios prefabricados, no para la manufactura. La sección desarrolla de forma inductiva la solución para hallar las ordenadas con 8 y 16 divisiones circunferenciales, así como explica el procedimiento a seguir una vez se obtuvieron las medidas para llegar hasta el prefabricado.

5.1.2 Laterales a 45° de inclinación (sección 4.1). Caso similar al de posicionar un tubo injerto a uno base con la variante de la inclinación, visto desde el lateral, en 45°. La sección explica cómo obtener las ordenadas de forma inductiva con un ejemplo práctico, pero carece de una explicación paso a paso y de forma generalizada la obtención de las ordenadas si el ángulo de inclinación fuese distinto a 45°. La sección cierra detallando los procedimientos para ajustar el par de tuberías. Los cálculos son presentados hasta 16 divisiones circunferenciales.

5.1.3 Dummy legs concéntricos con tubería (sección 5.0). Se explica cómo realizar el cálculo de las ordenadas de una tubería injerto que se utilizará como soporte vertical de un codo tipo radio largo. Nuevamente la metodología es inductiva y con un caso práctico, ajustar una tubería con un codo. El tipo de dummy leg examinado es exclusivamente concéntrico. Luego se detallan los procedimientos para ajustar en sitio la instalación del prefabricado.

5.1.4 Laterales sin referencias o no convencionales (sección 6.1). La sección detalla de forma metódica el desarrollo para obtener las ordenadas de un lateral a 45° para cualquier par de diámetros (esto es, generalizado), hasta 16 ordenadas. Una interpretación más profunda de esta sección resultará en un modelo que permita calcular las ordenadas de laterales para cualquier ángulo θ . Los resultados de los modelos generalizados deben ser validados con los tabulados previamente en la norma buscando confirmar la validez del modelo que se ha obtenido.

5.1.5 Trazado de soportes sin referencias o no convencionales (sección 6.2). Se explica de forma metódica el desarrollo para obtener las ordenadas de un soporte dummy leg concéntrico (tipo I), para cualquier par de diámetros tanto del codo como del tubo injerto (esto es, generalizado), hasta 16 ordenadas. Esto significa que, de esta sección, y con un análisis a mayor profundidad se puede derivar el modelo matemático que calcula las ordenadas del tubo injerto para cualquier número de ordenadas. Si bien la sección no detalla cómo realizar los casos tangenciales y excéntricos, con la orientación de un tutor capacitado NCCER será suficiente para advertir las modificaciones en la metodología que permitan de esa forma encontrar los casos II y III de los soportes en tubería. Es evidente que tales modelos que se calculen deberán ser validados con los resultados previamente tabulados en tablas que la norma disponga, con el fin de constatar su validez.

Como es propio de NCCER, esta norma tiene un estilo de redacción primordialmente técnico en sus textos, lo que sustenta el hecho de que la mayoría de sus secciones se presenten de forma inductiva (con ejemplos numéricos inmediatamente) y no de forma deductiva (la metodología generalizada, sin incluir números, y válido para todo caso o pares de tuberías). Tal situación representa un reto para el lector y tubero porque se desconocen las variaciones que en el taller y en la manufactura se puedan presentar. Es por esta razón que de la norma se rescatan las secciones 6.1 y 6.2 que pretenden desarrollar de forma generalizada el cálculo de las ordenadas para pares

cualesquiera de tuberías para laterales y de dummy legs. De una revisión exhaustiva de la metodología y acompañado de un guía entrenado de NCCER se pueden derivar los modelos matemáticos que calculan las dimensiones tanto de laterales (bien sean concéntricos a cualquier ángulo, o excéntrico a 90°), así como también los cálculos para dummy legs tanto concéntricos como excéntricos y tangenciales, para cualesquiera pares de diámetros en consideración.

La interpretación del alcance de cada una de estas secciones se logra más eficazmente si se realiza de forma visual a través de la siguiente tabla:

Tabla 1. Síntesis de las secciones del ES08402-07 de NCCER que contienen instrucciones de derivación de ordenadas versus propuesta de valor del proyecto.


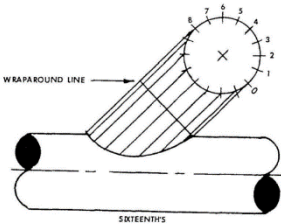
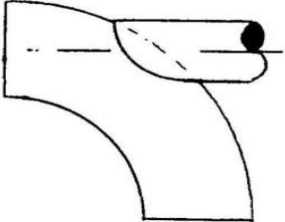
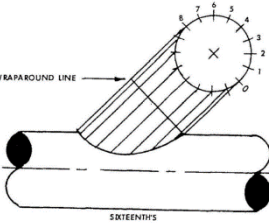
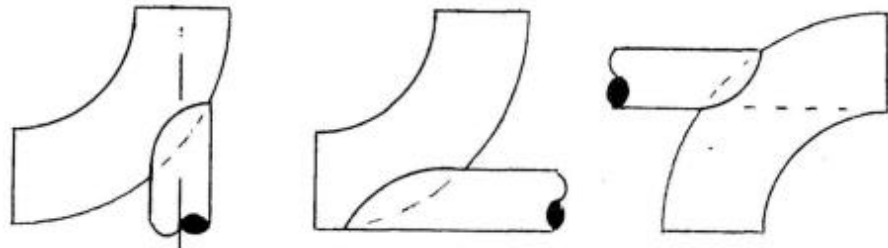
Sección del ES08402-07	Contenido	Esquemático del prefabricado realizable	Propuesta de valor del Proyecto
4.0.0	Lateral a 90°, concéntrico		<p>Derivar la ecuación que calcula hasta n ordenadas laterales concéntricas a 90°.</p> <p>Desarrollar el caso con excentricidad a 90°.</p> <p>En el aplicativo, que permita calcular Laterales a 90° concéntricos y excéntricos hasta 64 ordenadas.</p>
4.1.0	Lateral a 45°, concéntrico		<p>Derivar el modelo que calcula hasta n ordenadas para laterales a 45° concéntricos.</p> <p>En el aplicativo, que permita calcular hasta 64 ordenadas.</p>

Tabla 1. Síntesis de las secciones del ES08402-07 de NCCER que contienen instrucciones de derivación de ordenadas versus propuesta de valor del proyecto. (continuación)

5.0.0	Dummy leg concéntrico		<p>Derivar el modelo que calcula hasta n ordenadas dummy legs concéntricos (tipo I)</p> <p>En el aplicativo, que permita calcular hasta 64 ordenadas.</p>
6.1.0	Lateral concéntricos no convencional (a cualquier ángulo)		<p>Derivar el modelo de cálculo para laterales concéntricos con ángulos $0^\circ < \theta < 90^\circ$, es decir, generalizado, con n divisiones circunferenciales.</p> <p>En el aplicativo, hasta 64 ordenadas</p>
6.2.0	Soportes de tubería concéntrico no convencional		<p>Derivar los modelos de cálculo generalizados para soportes concéntricos, excéntricos y tangenciales, con n divisiones circunferenciales.</p> <p>En el aplicativo, hasta 64 ordenadas.</p>

5.2 DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO PARA LATERALES INCLINADOS

5.2.1 El método para laterales en ES08402-07. Tal como se observó en el literal anterior, las secciones 6.1.0 y 6.2.0 de NCCER son el foco de esta propuesta puesto que de ellas se pretende prosperar los modelos matemáticos para laterales y dummy legs de forma generalizada. Se presenta a continuación de forma sumariada la metodología para calcular las ordenadas de laterales a 45° sin referencias, de forma fidedigna a la norma. Tal procedimiento será el punto de partida para obtener la generalización hacia otros ángulos, realizando las correcciones pertinentes.

Tabla 2. Metodología para calcular ordenadas de laterales en ES08402-07

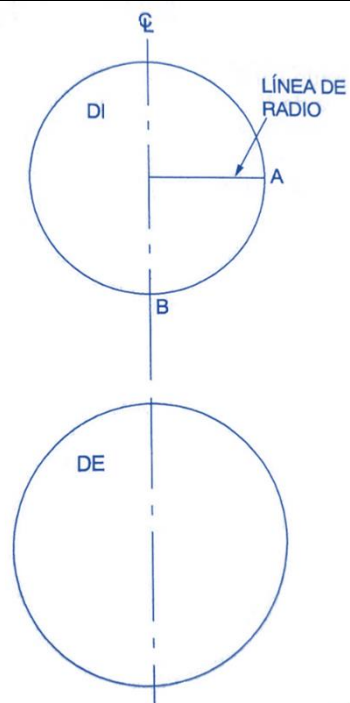
Paso #	Descripción	Figura
1	Mida el diámetro interno y externo exactos del tubo que utiliza.	
2	Trace una línea vertical recta que sea al menos 2 ½ veces el diámetro externo del tubo en una hoja de papel de dibujo. Esta línea se convertirá en la línea central vertical de dos círculos que representan la rama de diámetro interno y el cabezal de diámetro externo del tubo.	

Tabla 2. Metodología para calcular ordenadas de laterales en ES08402-07
(continuación)

3 Utilice un compás para dibujar un círculo del tamaño exacto del DI del tubo, con un punto en la línea recta como centro.

4 Utilice un compás para dibujar un círculo que sea del tamaño exacto del DE del tubo, con un punto en la línea recta debajo del círculo del DI como el centro.

5 Use el triángulo rectángulo o la escuadra en T para dibujar una línea de 90 grados desde el centro del círculo del DI hasta el borde externo del círculo.



6 Con un par de compases de dividir, averigüe el centro entre los puntos A y B en la circunferencia del círculo y dibuje una línea desde el centro del círculo hasta este

Tabla 2. Metodología para calcular ordenadas de laterales en ES08402-07
(continuación)

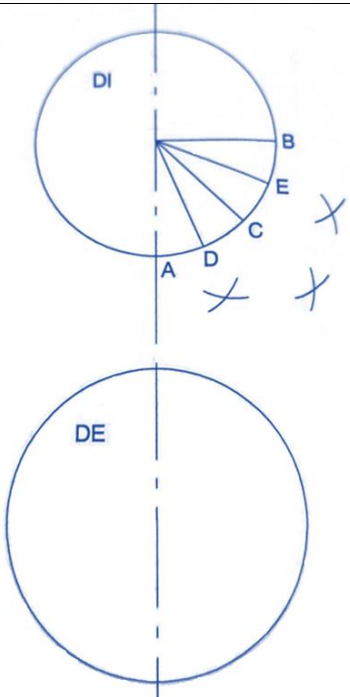
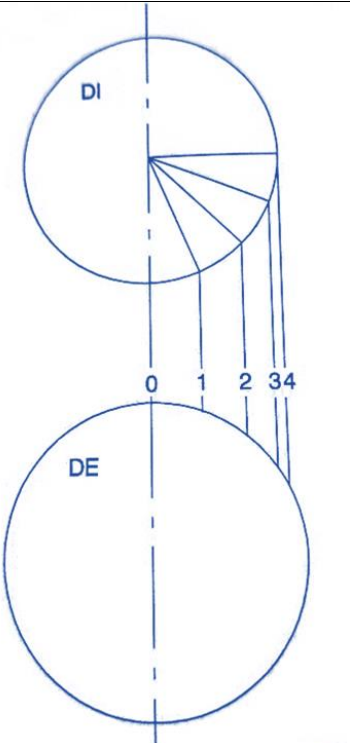
<p>punto en el borde del círculo</p>	 <p style="text-align: right; font-size: small;">402F43.EPS</p>
<p>7</p> <p>A continuación, encuentre el centro entre los puntos A y C, B y C, luego trace una línea desde el centro del círculo hasta estos puntos en el borde del círculo.</p>	
<p>8</p> <p>Transfiera los puntos A, B, C, D y E a la circunferencia del círculo del DE del tubo. Asegúrese de que estas líneas sean paralelas a la línea recta dibujada en el paso 2.</p>	 <p style="text-align: right; font-size: small;">402F44.EPS</p>
<p>9</p> <p>Etiquete los puntos en los que se intersecan estas líneas con la circunferencia del círculo de DE, comenzando por la línea central vertical, 0, y numerando 1, 2, 3 y 4 alrededor del círculo.</p>	

Tabla 2. Metodología para calcular ordenadas de laterales en ES08402-07
(continuación)

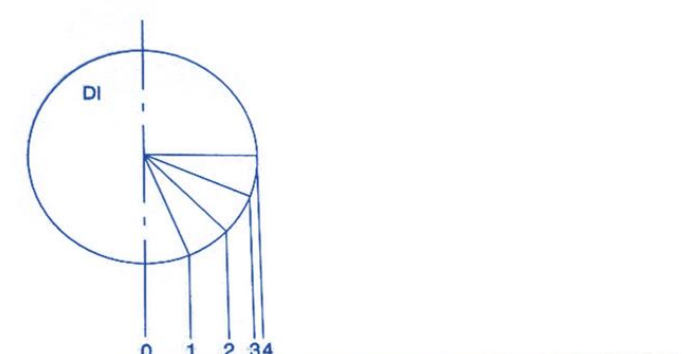
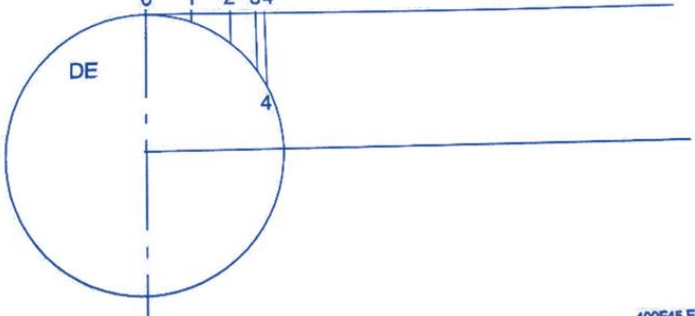
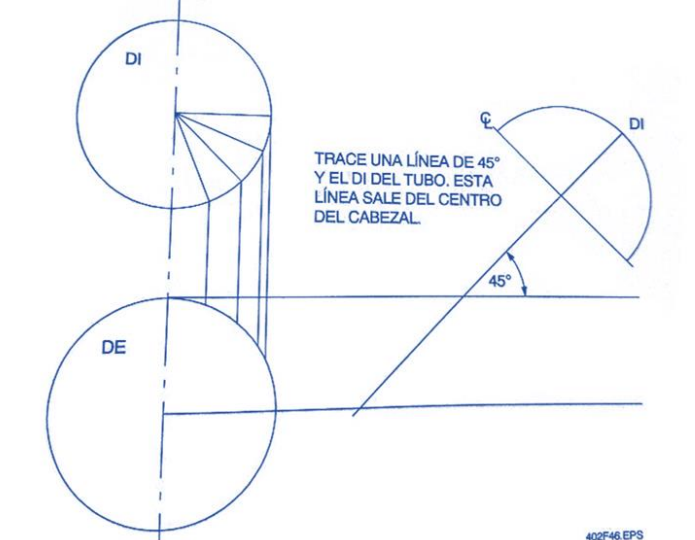
10	Dibuje líneas perpendiculares a la línea vertical en el punto 0 Y en el punto central del círculo del DE del tubo.	
11	Trace una línea a 45 grados de las dos líneas horizontales	
12	Dibuje otro círculo de DI por la mitad hacia el extremo de la línea de 45 grados y marque la línea central de esta mitad del círculo con una línea perpendicular a la línea de 45 grados.	 <p data-bbox="1114 1093 1305 1167">TRACE UNA LÍNEA DE 45° Y EL DI DEL TUBO, ESTA LÍNEA SALE DEL CENTRO DEL CABEZAL.</p>
13	Mediante el uso de compases divisores divida este medio círculo en cuatro partes iguales	
14	Con los compases dividido divisores divida cada parte por la mitad para que el medio	

Tabla 2. Metodología para calcular ordenadas de laterales en ES08402-07
(continuación)

	<p>círculo se divide en 8 partes iguales</p>	
15	<p>Etiquete estas secciones con números de ordenadas de 0 a 8</p>	<p>402F45.EPS</p>
16	<p>De los puntos del círculo de diámetro exterior 1,2,3 y 4 trace líneas perpendiculares a la línea vertical</p>	
17	<p>Transfiera los puntos desde las secciones de la mitad del círculo de diámetro interior hasta las líneas horizontales que salen de los puntos de los círculos de diámetro exterior 0,1,2,3 y 4 .</p>	<p>402F48.EPS</p>
18	<p>Trace una línea de envoltura perpendicular a estas líneas esto le ofrece .de referencia para medir las distancias de reducción</p>	

Tabla 2. Metodología para calcular ordenadas de laterales en ES08402-07
(continuación)

19	<p>Mida desde la línea de la envoltura hacia los puntos en los que las líneas de transferencia se encuentran con las líneas de ordenada. Estas mediciones le ofrecen las medidas de reducción de ordenadas para trazar su lateral.</p>	<p>TRACE LÍNEAS HACIA ABAJO EN 45° Y HAGA COINCIDIR ESTAS LÍNEAS CON 0-1-2-3-4</p> <p>402F49.EPS</p>
20	<p>Trace 16 ordenadas etiquetadas de cero a 8 y una línea de trabajo en el tubo lateral.</p>	<p>LÍNEA DE ENVOLTURA</p> <p>MIDA ESTAS DISTANCIAS</p> <p>LÍNEA CENTRAL DEL CABEZAL</p> <p>402F50.EPS</p>
21	<p>Utilice las medidas calculadas anteriormente para trazar la línea de corte en el tubo lateral</p>	

5.2.2 Derivación del modelo para laterales a cualquier ángulo

Tras revisar con detalle los procedimientos reseñados en la sección anterior se formula el modelo para cualquier ángulo siguiendo, mientras corresponda, las indicaciones generales que sustentó el estándar. Recuerde que posteriormente el modelo será validado numéricamente para casos no convencionales y será comparado con los resultados tabulados en la norma.

Tabla 3. Metodología para el desarrollo del modelo matemático de laterales concéntricos a cualquier ángulo de inclinación

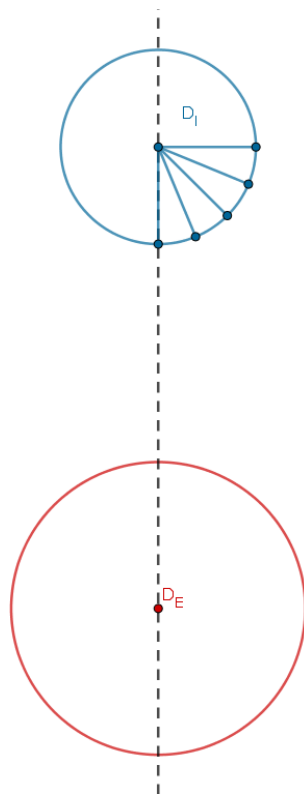
Paso #	Descripción	Figura	Interpretación simbólica o significancia matemática	Observación u objeto por manipular
1	Mida el diámetro interno y externo exactos del tubo que utiliza.		Crear y definir D_E, D_I	Recuerde que la norma utiliza el DE del tubo base y el DI del tubo injerto.
2,3,4.	Trace una línea vertical recta que sea al menos $2 \frac{1}{2}$ veces el diámetro externo del tubo en una hoja de papel de dibujo. Esta línea se convertirá en la línea central vertical de dos		<p>Crear y definir $VSpace$. $VSpace$ es la distancia vertical de separación entre los círculos.</p> $VSpace = D_I(y) - D_E(y)$ <p>Crear los círculos con diámetro D_E y D_I, que estarán ubicados, partiendo desde el (0,0) en:</p> $C_{DE} : \left(\frac{D_E}{2}, \frac{D_E}{2} \right); \text{diámetro } D_E$ $C_{DI} : \left(\frac{D_E}{2}, VSpace \right); \text{diámetro } D_I$	El factor $2 \frac{1}{2}$ veces es una sugerencia de la norma para evitar que en el trazado a mano se solapen los círculos DI y DE. En un ambiente de virtualización, se propone crear un parámetro variable y ajustable a conveniencia, que se denomina $VSpace$. Un desarrollo bien logrado es independiente de esta

Tabla 3. Metodología para el desarrollo del modelo matemático de laterales concéntricos a cualquier ángulo de inclinación
(continuación)

círculos que representan la rama de diámetro interno y el cabezal de diámetro externo del tubo.	variable para todo valor de entrada del modelo.
---	--

Tabla 3. Metodología para el desarrollo del modelo matemático de laterales concéntricos a cualquier ángulo de inclinación (continuación)

5,6, Se discretiza el
7 círculo del diámetro interior del tubo injerto (color azul) en tantas divisiones como se desee, con el fin de luego proyectarlo hacia el círculo base (color rojo).



La ubicación del i -ésimo punto (el conteo se lleva desde los 0° hasta los 90°) sobre la circunferencia D_I , en relación con el marco de referencia global (0,0) será:

$$(x_i, y_i) = \left\{ \frac{D_E}{2} + \frac{D_I}{2} \cos\left(i \frac{2\pi}{n}\right), \frac{D_I}{2} \sin\left(i \frac{2\pi}{n}\right) \right\}$$

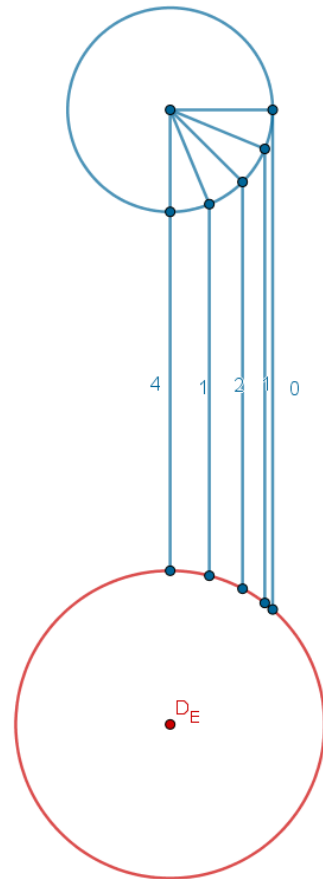
Donde el contador iniciará en $i = 0$ y terminará en $i = n/4$. Donde n corresponde al número total de ordenadas o divisiones que requiere el tubo para el trabajo. Por tratarse de un cuarto de circunferencia simétrica solo será suficiente contabilizar hasta un cuarto de las ordenadas, puesto que de hacer la discretización completa se obtendrán los mismos resultados que para solo un cuarto de D_I .

El hecho de discretizar el círculo creará un cierto número de divisiones de la misma longitud de arco, todas con un radio de longitud $\frac{D_I}{2}$.

Observe que n siempre será la designación que se realiza para el número de divisiones que se desea para el trabajo. Respetando tal nomenclatura, ocurrirá que el conteo de las divisiones en el cuarto de circunferencia que se ha trazado será entonces proporcional, por lo que entonces el conteo irá hasta $i = n/4$, proporcionalmente.

Tabla 3. Metodología para el desarrollo del modelo matemático de laterales concéntricos a cualquier ángulo de inclinación (continuación)

8,9 Transferir los puntos del injerto hacia el tubo base. Hallar las intercepciones en el tubo base.



La ubicación de los nuevos puntos sobre la circunferencia exterior, y llevando el conteo desde el extremo derecho hacia el izquierdo, y desde el marco de referencia (0,0) será:

$$(x_i, y_i) = \left\{ \frac{D_E}{2} + \frac{D_I}{2} \cos\left(i \frac{2\pi}{n}\right), \frac{D_E}{2} + \sqrt{\left(\frac{D_E}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_I}{2} \cos\left(i \frac{2\pi}{n}\right)\right)^2} \right\}$$

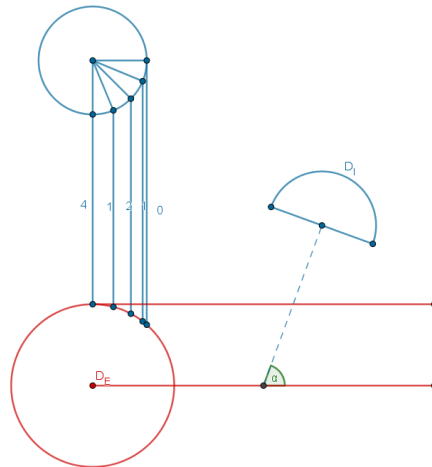
El conteo de tales ordenadas se realiza de forma tal como se ve en la figura.

Estos puntos que se han marcado sobre la circunferencia base exterior definirán las líneas de proyección que servirán para ubicar en la vista lateral del tubo base las ordenadas del injerto de una forma geoméricamente correctas, y ajustadas a la norma.

Tabla 3. Metodología para el desarrollo del modelo matemático de laterales concéntricos a cualquier ángulo de inclinación (continuación)

10,1 Realizar las
1,12 proyecciones
horizontales de
los puntos
horizontales
más opuestos.
Luego, trazar
una línea a un
ángulo genérico
de θ grados y
sobre esa línea
crear $\frac{1}{2}$ círculo
de tamaño del
diámetro interior
del injerto.

El ángulo θ que
se seleccione
será el ángulo
del lateral.



Crear y definir $HSpace$. $HSpace$ es una variable genérica que permitirá definir convenientemente la longitud de las líneas de proyección. Trazar las líneas horizontales del centro del círculo y del punto diametral más alto. Luego, ubicar un punto medio (M) en la línea horizontal inferior para ubicar el ángulo donde estará la línea injerto. El punto estará ubicado en:

$$M = \left(HSpace, \frac{D_E}{2} \right)$$

Luego trace un segmento de longitud arbitraria (L) como línea de proyección para trazar en el extremo del segmento inclinado media circunferencia con el tamaño del diámetro interior del injerto. El centro (P) de tal semi circunferencia estará ubicado en:

$$P = \left(HSpace + L \cos(\theta), \frac{D_E}{2} + L \sin(\theta) \right)$$

$HSpace$ permite seleccionar el valor justo con el propósito de evitar solapamientos, y además, tal circunstancia permitirá definir la ubicación de la línea de θ grados de inclinación como un porcentaje respecto del tamaño de la línea, por ejemplo, que siempre se ubique, o bien, “aparezca” el rayo inclinado al 50% de la distancia desde el centro del círculo del tubo base. Tales condiciones no afectan los resultados del cálculo y son meramente criterios de visualización.

Tabla 3. Metodología para el desarrollo del modelo matemático de laterales concéntricos a cualquier ángulo de inclinación (continuación)

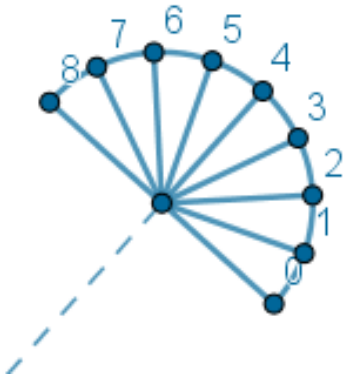
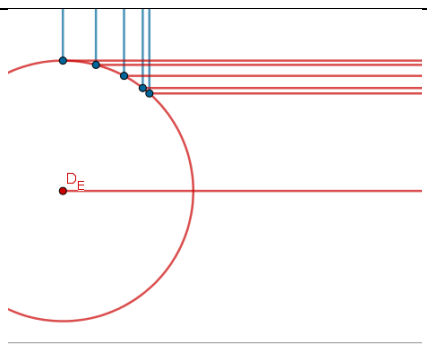
<p>13, Discretizar la 14, media 15 circunferencia del diámetro interior del injerto</p>		<p>Como se trata de media circunferencia se ha discretizado una cantidad $\frac{n}{2}$ de ordenadas.</p> <p>La ubicación del punto k-ésimo sobre esa media circunferencia será:</p> $(x_k, y_k) = \left\{ HSpace + L \cos(\theta) + \frac{D_I}{2} \cos\left(\theta - \frac{\pi}{2} + k \frac{2\pi}{n}\right), \frac{D_E}{2} + L \sin(\theta) + \frac{D_I}{2} \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2} + k \frac{2\pi}{n}\right) \right\}$ <p>El contador va desde $k = 0$ hasta $k = \frac{n}{2}$, y se realiza como lo muestra la figura.</p>	<p>La fórmula que calcula las coordenadas de estos puntos básicamente parte del centro de la media circunferencia y desarrolla la semi circunferencia tomando en cuenta que el trazado tiene una línea que es dinámica y con inclinación θ. Tal inclinación se tiene en cuenta dentro de las funciones sinusoidales.</p>
<p>16 Trazar las proyecciones horizontales de los puntos restantes en el diámetro</p>		<p>Las proyecciones horizontales restantes están definidas por la expresión:</p> $y_i = \frac{D_E}{2} + \sqrt{\left(\frac{D_E}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_I}{2} \cos\left(i \frac{2\pi}{n}\right)\right)^2}$	<p>En el gráfico se aprecian solo $\frac{n}{4}$ proyecciones que corresponden a los puntos que venían de los pasos 8 y 9.</p>

Tabla 3. Metodología para el desarrollo del modelo matemático de laterales concéntricos a cualquier ángulo de inclinación (continuación)

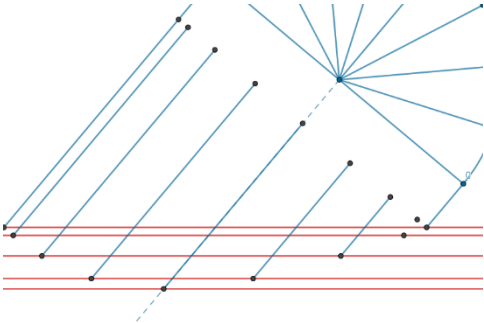
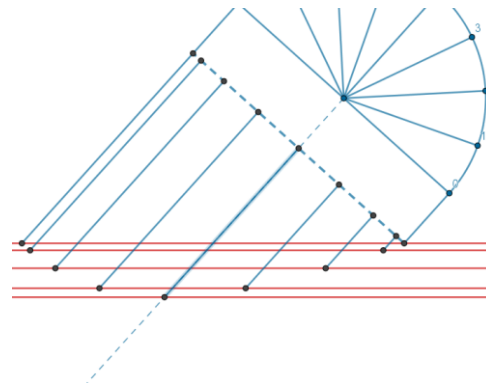
<p>exterior del tubo base</p>	<p>17 Interceptar las proyecciones horizontales del tubo base con las proyecciones inclinadas provenientes del tubo injerto</p>	 <p>The diagram illustrates the geometric setup for finding the intersection of projections. It shows a set of horizontal red lines representing the base tube's projections and a set of blue lines representing the inclined projections from an inserted tube. The intersection points are marked with dots, and a dashed line indicates the locus of these intersections.</p>	<p>Para conocer las coordenadas x e y de la intersección de las proyecciones horizontales y las inclinadas primero se deberán hallar las expresiones analíticas para las inclinadas. Estas se calculan tomando su pendiente $m = \tan \theta$ y un punto conocido, este es, el conjunto de ordenadas k calculadas en el paso 13,14,15. La recta será de la forma:</p>
			$y = m(x - x_k) + y_k$
			<p>Al desarrollar este cálculo se obtiene que el conjunto de líneas paralelas será</p>
			$y = \left\{ x - HSpace - L \cos \theta - \frac{D_I}{2} \sin \theta \cos \left(k \frac{2\pi}{n} \right) - \frac{D_I}{2} \cos \theta \sin \left(k \frac{2\pi}{n} \right) \right\} \tan \theta + \frac{D_E}{2} + L \sin \theta + \frac{D_I}{2} \sin \theta \sin \left(k \frac{2\pi}{n} \right) - \frac{D_I}{2} \cos \theta \cos \left(k \frac{2\pi}{n} \right)$
			<p>Al intersecar con los y_i del paso 16, se obtiene que el <i>locus</i> de la intersección es:</p>

Tabla 3. Metodología para el desarrollo del modelo matemático de laterales concéntricos a cualquier ángulo de inclinación (continuación)

$$(x_I, y_I) = \left\{ \frac{\sqrt{\left(\frac{D_E}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_I}{2} \cos\left(k \frac{2\pi}{n}\right)\right)^2}}{\tan \theta} + HSpace + \frac{D_I}{2} \sin \theta \sin\left(k \frac{2\pi}{n}\right) + \frac{D_I}{2} \cos \theta \sin\left(k \frac{2\pi}{n}\right), \frac{D_E}{2} + \sqrt{\left(\frac{D_E}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_I}{2} \cos\left(i \frac{2\pi}{n}\right)\right)^2} \right\}$$

18 Trace la línea de envoltura



La línea base es la recta punteada perpendicular a las líneas paralelas, y parte desde la ordenada cero que intercepta el diámetro exterior del tubo base. Se conocen por lo tanto su pendiente y un punto. Estos son:

$$m_B = -\frac{1}{\tan \theta}$$

$$(x_0, y_0) = \left\{ \frac{\frac{D_E}{2} - L \sin \theta + \frac{D_I}{2} \cos \theta}{\tan \theta} + HSpace + L \cos \theta + \frac{D_I}{2} \sin \theta, D_E \right\}$$

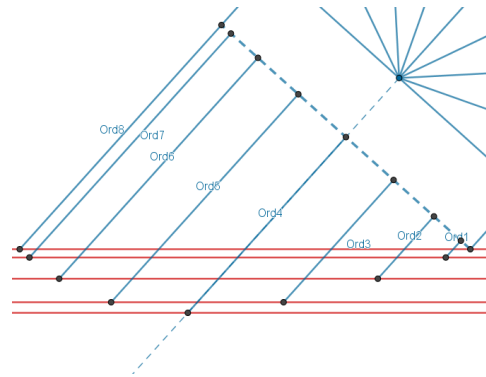
Por lo tanto, la línea base tiene por ecuación:

$$y_B = \left(\frac{-1}{\tan \theta}\right)x + \frac{\frac{D_E}{2} - L \sin \theta + \frac{D_I}{2} \cos \theta}{\tan^2 \theta} + \frac{HSpace}{\tan \theta} + \frac{L \cos \theta}{\tan \theta} + \frac{D_I}{2} \cos \theta + D_E$$

La línea base es fundamental para remover las variables intermedias que se definieron tales como VSpace y HSpace. Dado que la línea base toca el exterior del tubo base entonces las ordenadas estarán bien definidas por construcción y no dependen de parámetros diferentes a D_E, D_I, θ, n .

Tabla 3. Metodología para el desarrollo del modelo matemático de laterales concéntricos a cualquier ángulo de inclinación (continuación)

19,2 Distancia desde
0 la línea base
hasta los puntos
de intersección
hallados en el
paso 17



La distancia entre la línea base y cada uno de los puntos intersección hallados en el paso 17 es lo que define finalmente el tamaño de las ordenadas del lateral inclinado. Al hallar tales distancias se habrán encontrado las ordenadas. Se utiliza la fórmula para hallar la distancia de un punto a una recta. Si $y = a \cdot x + b$ y las coordenadas del punto C son (x_A, y_A) . Entonces la distancia es:

$$d = \frac{|a \cdot x_A - y_A + b|}{\sqrt{a^2 + 1}}$$

Por lo tanto el *locus* o distancias de los puntos de intersección a la línea base serán (se han simplificado previamente los valores que así lo permitieron, en este caso las variables asociadas tales como HSpace y VSpace):

$$\left| \frac{-\sqrt{\left(\frac{D_E}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_I}{2} \cos\left(k \frac{2\pi}{n}\right)\right)^2} - \frac{D_I}{2} \cos \theta \cos\left(k \frac{2\pi}{n}\right) + \frac{D_I}{2} \sin \theta \cos\left(k \frac{2\pi}{n}\right) + \frac{D_E}{2}}{\tan^2 \theta} - \frac{D_I \cos \theta \cos\left(k \frac{2\pi}{n}\right) + \frac{D_E}{2}}{\tan^2 \theta} \right|$$

$$\frac{\left| \frac{-\sqrt{\left(\frac{D_E}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_I}{2} \cos\left(k \frac{2\pi}{n}\right)\right)^2} + \frac{D_E}{2 \tan^2 \theta} + \frac{\frac{D_I}{2} \cos \theta}{\tan^2 \theta} + \frac{D_I \cos \theta}{2}}{\tan^2 \theta} \right|}{\sqrt{\tan^2 \theta + 1}}$$

Como se observa, ninguna de las variables auxiliares aparece en esta expresión tras desarrollarla. Lo que es apenas razonable.

Tabla 3. Metodología para el desarrollo del modelo matemático de laterales concéntricos a cualquier ángulo de inclinación (continuación)

Por lo tanto para hallar las ordenadas de un lateral concéntrico inclinado a cualquier ángulo entre la horizontal o la vertical $0 < \theta < 90^\circ$, utilice:

$$Ord(k) = \frac{\frac{D_I}{2} \cdot \left(1 - \cos\left(k \cdot \frac{2\pi}{n}\right)\right)}{\tan(\theta)} + \frac{\frac{D_E}{2} - \sqrt{\left(\frac{D_E}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_I}{2} \cdot \sin\left(k \cdot \frac{2\pi}{n}\right)\right)^2}}{\sin(\theta)}$$

Donde k es un contador que va desde $k = 0$ hasta $k = n$. Con eso hallará las n ordenadas que desea buscar.

Observe que si el ángulo del injerto θ se aproxima a valores cada vez más cercanos hacia 90° , por izquierda, se obtendrá la fórmula para laterales concéntricos rectos, así:

$$\begin{aligned} \lim_{\theta \rightarrow 90^\circ^-} \frac{\frac{D_I}{2} \cdot \left(1 - \cos\left(k \cdot \frac{2\pi}{n}\right)\right)}{\tan(\theta)} + \frac{\frac{D_E}{2} - \sqrt{\left(\frac{D_E}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_I}{2} \cdot \sin\left(k \cdot \frac{2\pi}{n}\right)\right)^2}}{\sin(\theta)} &= \frac{\frac{D_I}{2} \cdot \left(1 - \cos\left(k \cdot \frac{2\pi}{n}\right)\right)}{\infty} + \frac{\frac{D_E}{2} - \sqrt{\left(\frac{D_E}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_I}{2} \cdot \sin\left(k \cdot \frac{2\pi}{n}\right)\right)^2}}{1} \\ &= 0 + \frac{D_E}{2} - \sqrt{\left(\frac{D_E}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_I}{2} \cdot \sin\left(k \cdot \frac{2\pi}{n}\right)\right)^2} \end{aligned}$$

Por lo que si $\theta = 90^\circ$, entonces calcule las ordenadas como:

$$Ord(k) = \frac{D_E}{2} - \sqrt{\left(\frac{D_E}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_I}{2} \cdot \sin\left(k \cdot \frac{2\pi}{n}\right)\right)^2}$$

Nuevamente, k es un contador que va desde $k = 0$ hasta $k = n$. Con eso hallará las n ordenadas que desea buscar.

5.3 DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO PARA DUMMY LEGS

5.3.1 El método para soporte dummy legs concéntricos bajo NCCER. Se presenta a continuación de forma sumariada la metodología para calcular las ordenadas de dummy legs concéntricos sin referencias, de forma fidedigna a la norma. Tal procedimiento será el punto de partida para obtener la generalización hacia otras variantes tales como los casos con excentricidad, realizando las correcciones pertinentes.

Tabla 4. Metodología para calcular dummy legs concéntricos en ES08402-07

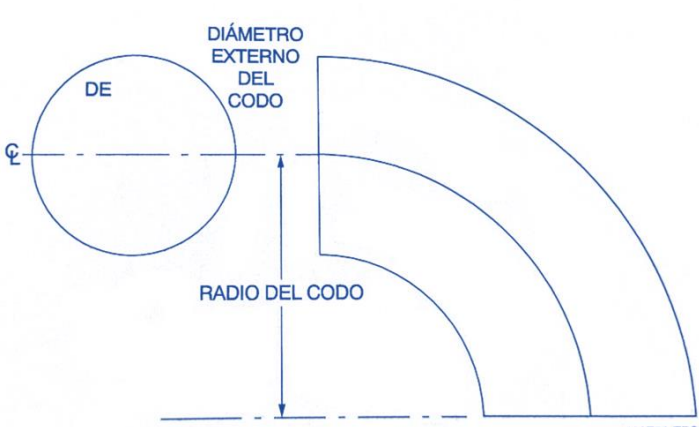
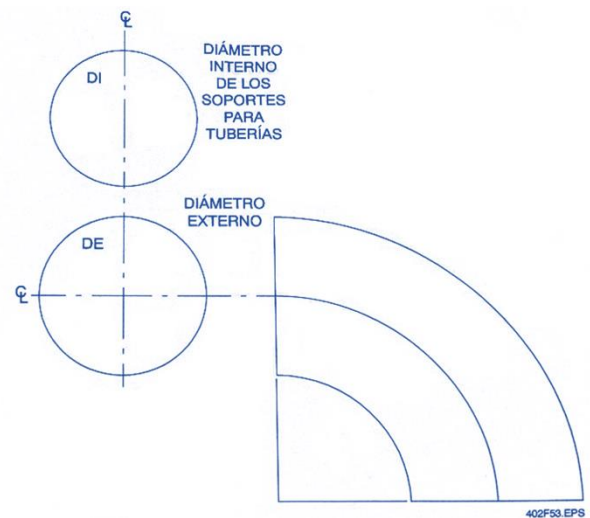
Paso #	Descripción	Figura
1	Mida el diámetro interno y externo del codo y del tubo que utiliza.	
2	Dibuje una vista lateral del codo con las dimensiones exactas.	
3	Extienda la línea central horizontal del codo hasta el borde izquierdo del papel.	
4	Mediante el uso de la línea de centro del codo como referencia central, trace un círculo que represente el cabezal	

Tabla 4. Metodología para calcular dummy legs concéntricos en ES08402-07
(continuación)

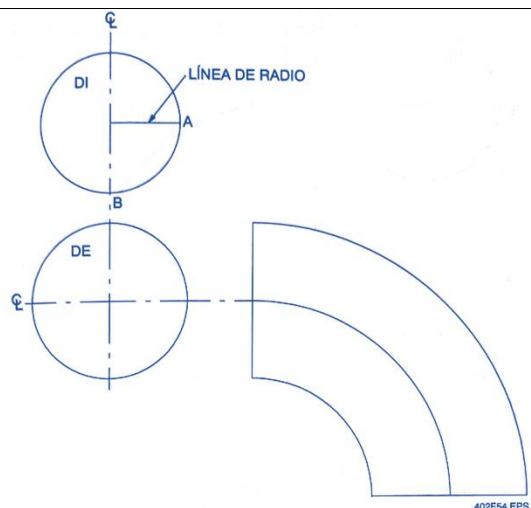
de diámetro externo del codo.

5 Dibuje una línea central vertical a través del punto medio de este círculo hasta el borde superior del papel.



6 Mediante el uso de la línea central del círculo de DE como referencia central, trace un círculo que represente el cabezal de diámetro interno del soporte

7 Use el triángulo rectángulo o la escuadra en T para dibujar una línea de 90 grados desde el centro del círculo del DI hasta el borde externo del círculo.

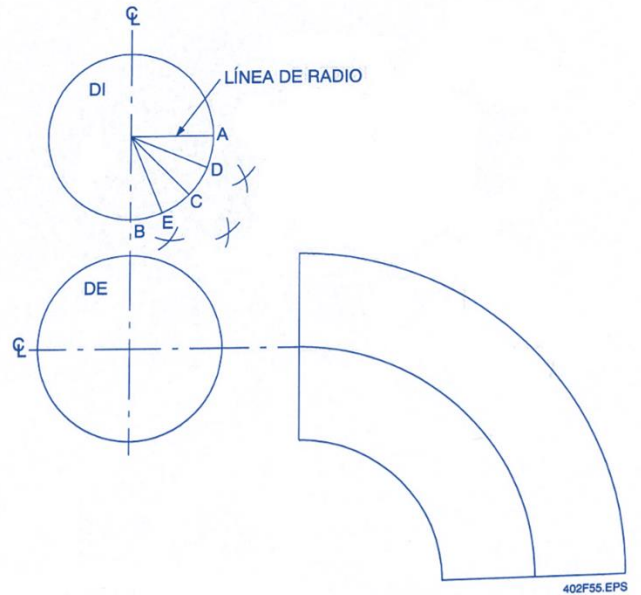


8 Con un par de compases de dividir, averigüe el centro

Tabla 4. Metodología para calcular dummy legs concéntricos en ES08402-07
(continuación)

entre los puntos A y B en la circunferencia del círculo y dibuje una línea desde el centro del círculo hasta este punto en el borde del círculo.

- 9 Con un par de compases de dividir, encuentre el centro entre los puntos A y C y B y C y trace una línea desde el centro del círculo hasta estos puntos en el borde del círculo.



- 10 Transfiera los puntos A, B, C, D y E a la circunferencia del círculo del cabezal de diámetro externo del tubo.

- 11 Etiquete los puntos en los que se intersecan estas líneas con la circunferencia del cabezal del círculo de DE, comenzando por la línea central

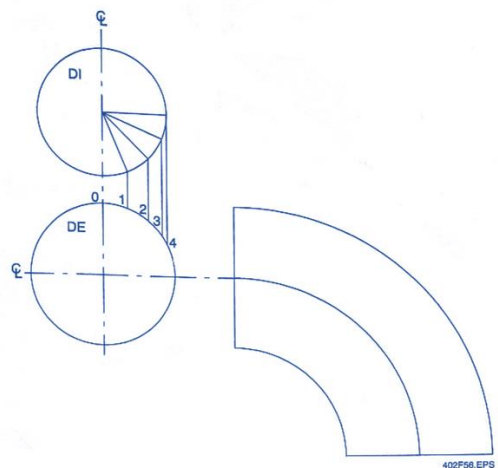


Tabla 4. Metodología para calcular dummy legs concéntricos en ES08402-07
(continuación)

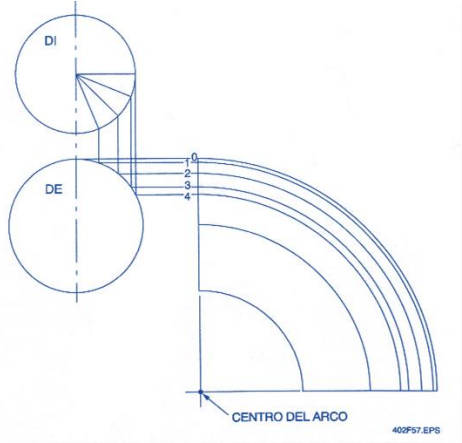
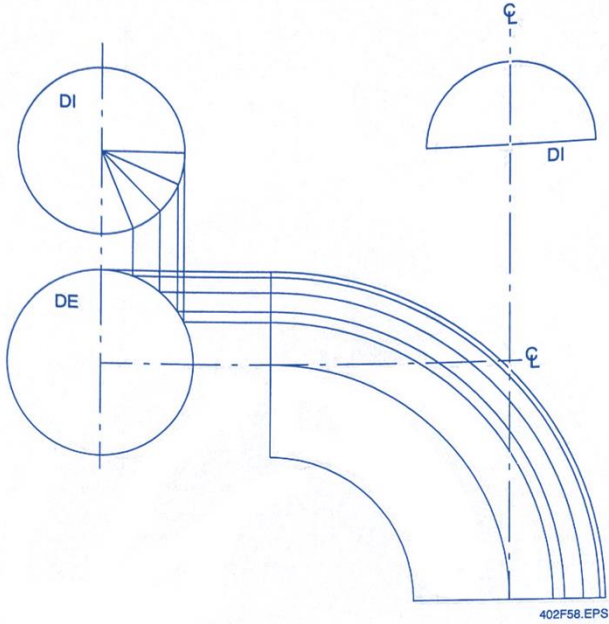
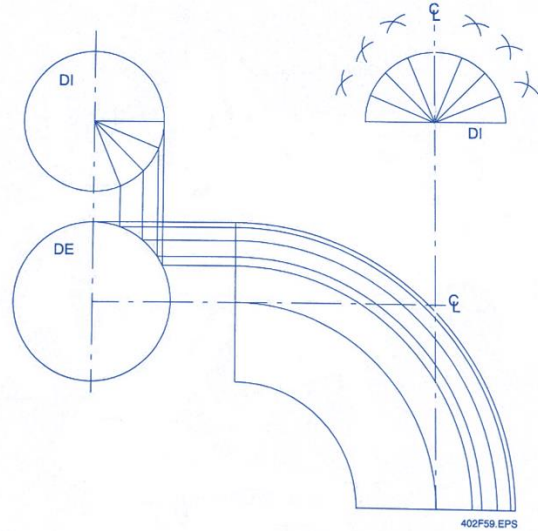
	<p>vertical, 0, y numerando 1,2,3 y 4 alrededor del círculo.</p>	
<p>12</p>	<p>Transfiera los puntos 0,1,2,3 y hasta el frente del codo.</p>	
<p>13</p>	<p>Con un compás, transfiera desde el punto central del radio del codo de las líneas 0,1,2,3 y 4 de la longitud del codo.</p>	
<p>14</p>	<p>Extienda la línea central vertical del codo por su centro hasta el borde superior del papel.</p>	
<p>15</p>	<p>Dibuje otra media circunferencia de DI hacia el extremo de la línea central del codo vertical y marque la línea central de este medio círculo con una línea perpendicular a la vertical.</p>	
<p>16</p>	<p>Mediante el uso de compases divisores, divida este medio</p>	

Tabla 4. Metodología para calcular dummy legs concéntricos en ES08402-07
(continuación)

círculo en cuatro partes iguales.

- 17 Con los compases divisores, divide cada parte por la mitad para que el medio círculo se divida en ocho partes iguales.



- 18 Etiquete cada punto en la media circunferencia de círculo con las ordenadas 0 a 8.

- 19 Transfiera los puntos 0 a 8 verticalmente hacia las líneas de codo dibujadas en el paso 12.

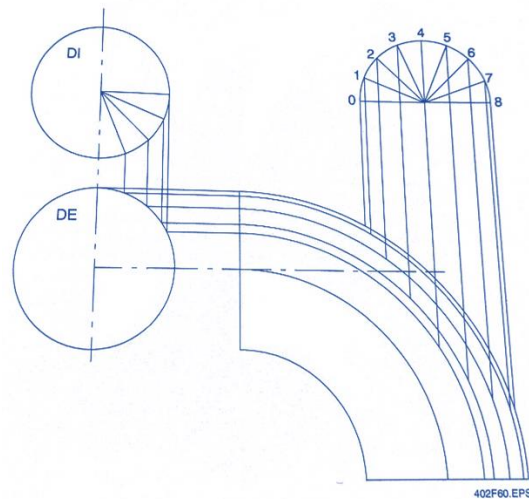
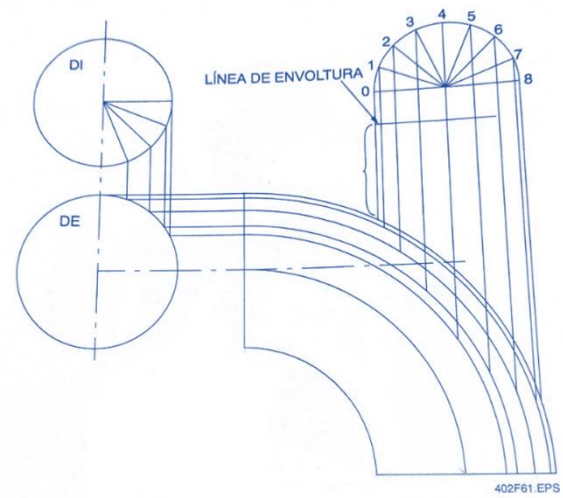
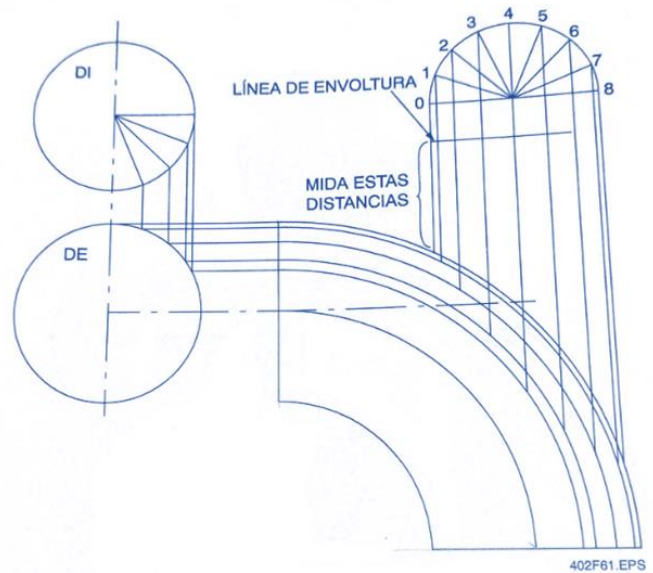


Tabla 4. Metodología para calcular dummy legs concéntricos en ES08402-07
(continuación)

20 Trace una línea de envoltura perpendicular a estas líneas. Esto le ofrece un punto de referencia para medir las distancias de reducción.



21 Mida desde la línea de la envoltura hacia los puntos en los que las líneas de transferencia se encuentran con las líneas de ordenada. Estas mediciones le ofrecen las medidas de reducción de ordenadas para el trazado del soporte para tubos.



22 Trace 16 ordenadas y una línea de trabajo en el soporte para tubos.

23 Utilice las medidas calculadas anteriormente para trazar la línea de

Tabla N. 4. Metodología para calcular dummy legs concéntricos en ES08402-07
(continuación)

corte en el soporte
para tubos.

5.3.2 Derivación del modelo para soportes dummy leg generalizados

Tras revisar con detalle los procedimientos reseñados en la sección anterior se formula el modelo para dummy legs con excentricidad genérica para el tubo injerto. Se atienden las recomendaciones que presentó el estándar. Recuerde que posteriormente el modelo será validado numéricamente comparando con los resultados tabulados en la norma.

Tabla 5. Metodología para el desarrollo del modelo matemático de dummy legs concéntricos

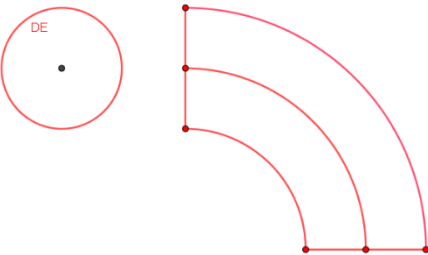
Paso #	Descripción	Figura	Interpretación simbólica o significancia matemática	Observación u objeto por manipular
1	Mida los diámetros interno y externo que utiliza.		Crear y definir D_E, D_I, A	Recuerde utilizar el DE del codo, el DI del injerto.
2,3,4	Trace una vista lateral del codo con sus dimensiones exteriores exactas. Trace línea central del codo. Projete el diámetro		<p>Crear y definir $HSpace$. $HSpace$ es la distancia horizontal de separación entre la proyección del DE el codo y su vista lateral, el objetivo es controlar la separación a conveniencia gráfica.</p> <p>Crear el círculo con diámetro D_E y crear los arcos que representan el codo que estarán ubicados. El origen de los arcos será $(0,0)$, de tal forma que el arco central tenga un radio exactamente del avance del codo. Los arcos se definen como $Arc(O, P_1, P_2)$, por lo que álgebra será:</p> $C_{DE}: (-HSpace, A); \text{diámetro } D_E$	En un ambiente de virtualización, se propone crear un parámetro variable y ajustable a conveniencia, que se denomina $HSpace$. Un desarrollo bien logrado es independiente de

Tabla 5. Metodología para el desarrollo del modelo matemático de dummy legs concéntricos (*continuación*)

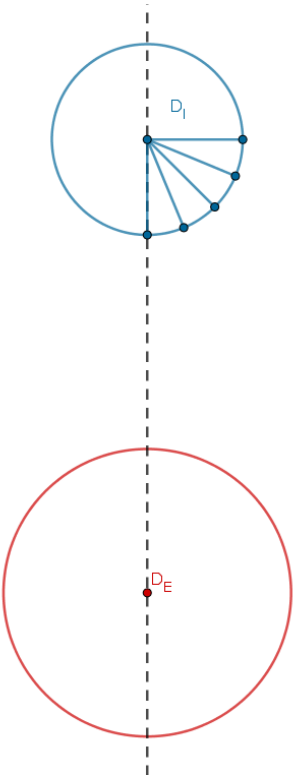
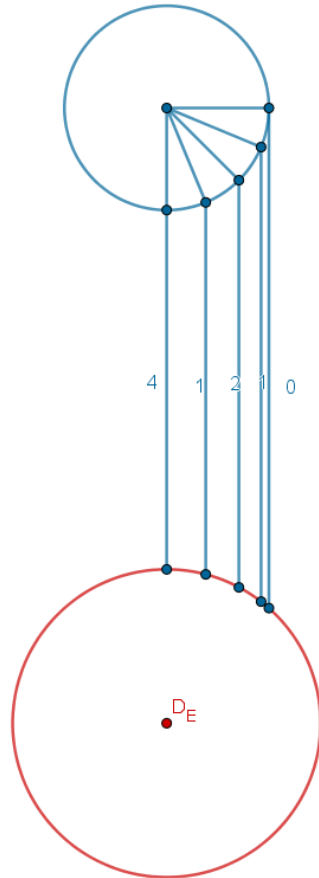
externo del codo.	$Arc_1 = \left\{ (0,0), \left(A - \frac{D_E}{2}, 0 \right), \left(0, A - \frac{D_E}{2} \right) \right\}$ $Arc_2 = \{ (0,0), (A, 0), (0, A) \}$ $Arc_3 = \left\{ (0,0), \left(A + \frac{D_E}{2}, 0 \right), \left(0, A + \frac{D_E}{2} \right) \right\}$	esta variable para todo valor de entrada del modelo.
5,6,7,8,9 Trace la circunferencia del injerto, alineada con la vertical del centro de la circunferencia del codo. Discretice la circunferencia injerto.		<p>Crear y definir $VSpace$. $VSpace$ es la distancia vertical de separación entre los círculos. Crear y definir $VSpace$, permitirá definir convenientemente la longitud de las líneas de proyección.</p> <p>La ubicación del DI estará en:</p> $C_{DI}: (-HSpace, VSpace); \text{diámetro } D_I$ <p>La ubicación del i-ésimo punto (el conteo se lleva desde los 0° hasta los -90°) sobre la circunferencia D_I, en relación con el marco de referencia global $(0,0)$ será:</p> $(x_i, y_i) = \left\{ -HSpace + \frac{D_I}{2} \cos\left(i \frac{2\pi}{n}\right), VSpace - \frac{D_I}{2} \sin\left(i \frac{2\pi}{n}\right) \right\}$ <p>Observe que n siempre será la designación que se realiza para el número de divisiones que se desea para el trabajo. Respetando tal nomenclatura, ocurrirá que el conteo de las divisiones en el cuarto de circunferencia que</p>

Tabla 5. Metodología para el desarrollo del modelo matemático de dummy legs concéntricos (*continuación*)

<p>Donde i siempre iniciará en $i = 0$ y terminará en $i = n/4$. Donde n corresponde al número total de ordenadas o divisiones que requiere el tubero para el trabajo. Leer nota explicativa siguiente columna</p>	<p>se ha trazado será entonces proporcional, por lo que entonces el conteo irá hasta $i = n/4$, proporcionalmente.</p>
--	---

Tabla 5. Metodología para el desarrollo del modelo matemático de dummy legs concéntricos (*continuación*)

12,13,14 Transferir los puntos del injerto hacia el cabezal del codo. Hallar las intercepciones.



La ubicación de los nuevos puntos sobre la circunferencia exterior, y llevando el conteo desde el extremo derecho hacia el izquierdo, y desde el marco de referencia (0,0) será:

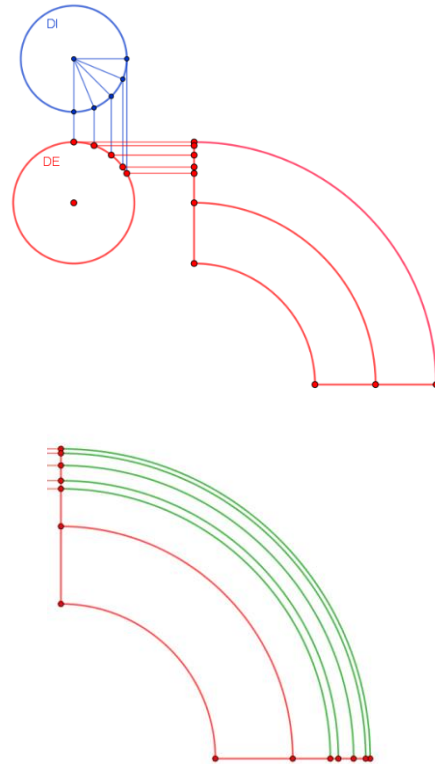
$$(x_i, y_i) = \left\{ -HSpace + \frac{D_I}{2} \cos\left(i \frac{2\pi}{n}\right), A + \sqrt{\left(\frac{D_E}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_I}{2} \cos\left(i \frac{2\pi}{n}\right)\right)^2} \right\}$$

El conteo de tales ordenadas se realiza de forma tal como se ve en la figura, y solo se han graficado $\frac{n}{4}$ de las ordenadas totales. El análisis se puede llevar, aunque no se muestre hasta $i = \frac{n}{2}$ aunque simplemente se trataría del reflejo respecto el eje y de los puntos que se muestran la figura.

Estos puntos que se han marcado sobre la circunferencia base exterior definirán las líneas de proyección que servirán para ubicar en la vista lateral del codo las ordenadas del injerto de una forma geoméricamente correctas, y ajustadas a la norma.

Tabla 5. Metodología para el desarrollo del modelo matemático de dummy legs concéntricos (*continuación*)

10,11,12,13 Transfiera las intercepciones hacia la cara lateral del codo. Defina las ecuaciones de los arcos.



Una vez se proyectan las intersecciones en la cara del codo definir las ecuaciones de los arcos que estos representan.

Entiéndase que los arcos solamente serán válidos en el dominio de x acotado por:

$$Dom(Arc) = \left\{ x \in \mathcal{R} \mid 0 \leq x \leq A + \frac{D_E}{2} \right\}$$

Los arcos serán:

$$y = \sqrt{\left(A + \sqrt{\left(\frac{D_E}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_I}{2} \sin\left(i \frac{2\pi}{n} \right) \right)^2} \right)^2 - x^2}$$

Donde nuevamente i empieza en $i = 0$ (el arco más exterior) y termina en $i = \frac{n}{4}$ (el arco más interior, o más cercano a la línea central del codo). Observe que si el contador se lleva desde $i = \frac{n}{4}$ hasta $i = \frac{n}{2}$ se trataría de los arcos contados de forma inversa.

Pese a que las figuras solo representan $\frac{n}{4}$ ordenadas, conviene llevar el conteo hasta la ordenada $\frac{n}{2}$ para empalmar con el contador que se presenta en el siguiente paso. Al tener bien definidos los arcos que se desarrollan en el codo permitirá facilitar la posterior intersección con las líneas verticales

Tabla 5. Metodología para el desarrollo del modelo matemático de dummy legs concéntricos (*continuación*)

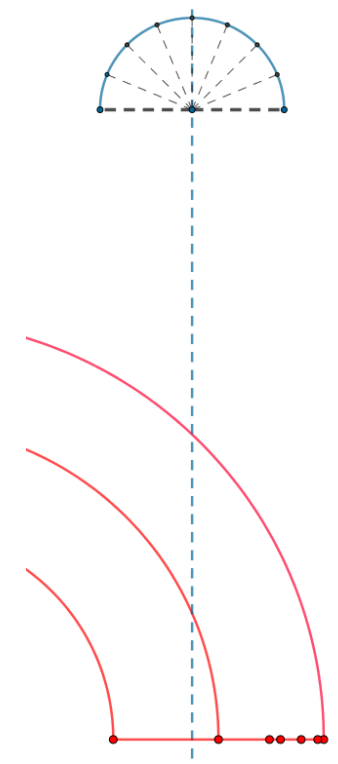
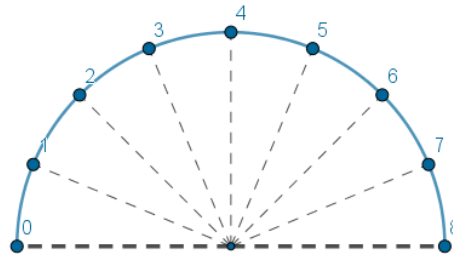
14,15,16, 17,18	Cree media circunferencia del tubo injerto en una línea de proyección proveniente de la cara inferior del codo.		<p>Crear una la línea de proyección desde la cara inferior del codo. Para garantizar la generalidad del análisis la línea se define con una excentricidad genérica, e, medida desde el punto central de la cara del codo, buscando dar alcance a los casos de dummy legs tangenciales y excéntricos. Si se tratase de un dummy leg concéntrico la excentricidad, e, será, para ese caso, nula. De esta forma el centro del círculo estará en:</p> $C_{DI} = (A + e, A)$ <p>Para el caso representado en la figura evidentemente e se ha definido negativo, aunque se reconoce que su valor puede variar en el dominio definido por:</p>	<p>del injerto de una forma analítica. El estándar es específico al señalar que la línea de envoltura o línea base del injerto en la vista lateral estará ubicada a una distancia equivalente a dos veces el avance (o radio) del codo. De esta forma, el centro de la media circunferencia de diámetro DI estará en una elevación equivalente a $2A$.</p>
--------------------	--	---	--	---

Tabla 5. Metodología para el desarrollo del modelo matemático de dummy legs concéntricos (*continuación*)



El locus de los puntos en esta semi circunferencia será:

$$(x_i, y_i) = \left\{ A + e - \frac{D_I}{2} \cos \left(k \cdot \frac{2\pi}{n} \right), 2A + \frac{D_I}{2} \cos \left(k \cdot \frac{2\pi}{n} \right) \right\}$$

Esta vez se ha creado un nuevo contador k considerando que la nueva semi circunferencia va desde $k = 0$ hasta $k = \frac{n}{2}$.

Como ambos contadores i e k son idénticos se puede sustituir una por otra de forma indistinta.

Tabla 5. Metodología para el desarrollo del modelo matemático de dummy legs concéntricos (*continuación*)

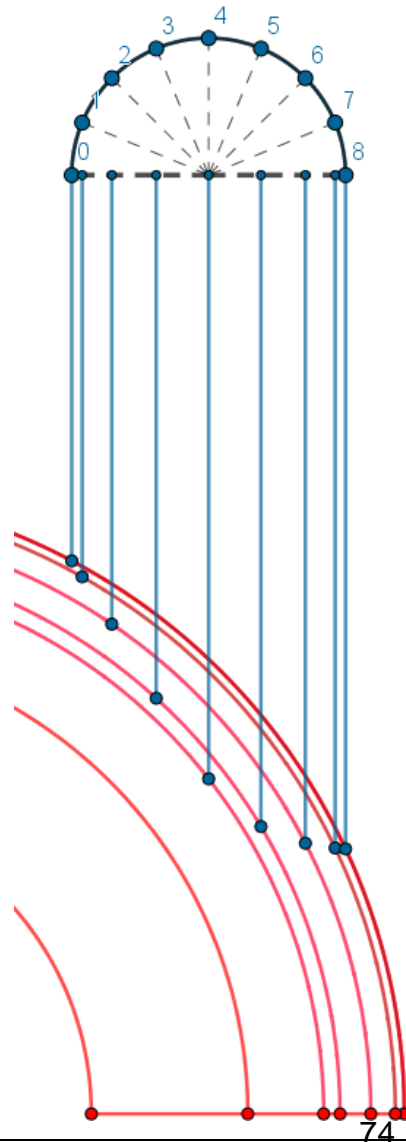
18-23

Trace

proyecciones

verticales para cada punto de la semicircunferencia e intercepte con su respectivo arco.

Defina cada punto de corte.



Las proyecciones verticales se definen simplemente por la abscisa de cada uno de los puntos de la semi circunferencia por lo que las rectas serán de la forma:

$$x = A + e - \frac{D_I}{2} \cos\left(k \cdot \frac{2\pi}{n}\right)$$

Teniendo presente que las curvas respectivas tienen por ecuación:

$$y = \sqrt{\left(A + \sqrt{\left(\frac{D_E}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_I}{2} \sin\left(i \frac{2\pi}{n}\right)\right)^2}\right)^2 - x^2}$$

De esta forma las ordenadas estarán ubicadas en:

$$(x_i, y_i) = \left\{ A + e - \frac{D_I}{2} \cos\left(k \cdot \frac{2\pi}{n}\right), \right.$$

$$\left. \sqrt{\left(A + \sqrt{\left(\frac{D_E}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_I}{2} \sin\left(i \frac{2\pi}{n}\right)\right)^2}\right)^2 - \dots} \right.$$

$$\left. \left(A + e - \frac{D_I}{2} \cos\left(k \cdot \frac{2\pi}{n}\right)\right)^2 \right\}$$

Como se reseñó en el paso anterior, tanto el contador k e i se tratan del mismo contador se sustituirá k por i directamente. Luego, calcule la medida de reducción será la distancia entre la base de la

Tabla 5. Metodología para el desarrollo del modelo matemático de dummy legs concéntricos (*continuación*)

semicircunferencia DI superior (ubicado a $2A$) y la ordenada de cada punto, esto es:

$$Ord(i) = 2A - y_i$$

$$Ord(i) = 2A - \sqrt{\left(A + \sqrt{\left(\frac{D_E}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_I}{2} \sin\left(i \frac{2\pi}{n} \right) \right)^2} \right)^2 - \left(A + e - \frac{D_I}{2} \cos\left(i \cdot \frac{2\pi}{n} \right) \right)^2}$$

Para definir el valor de excentricidad según sea el caso deberá tener en cuenta que:

- Si se trata de un dummy leg concéntrico $e = 0$
- Si se trata de un dummy leg excéntrico $e = \frac{D_E}{2} - \frac{D_I}{2} - t_{DI}$
- Si se trata de un dummy leg tangencial $e = \frac{D_I}{2} - \frac{D_E}{2} + t_{DI}$
- También puede usar una excentricidad arbitraria, pero deberá estar contenida en el dominio $\left\{ x \in \mathcal{R} \mid \frac{D_I}{2} - \frac{D_E}{2} + t_{DI} \leq x \leq \frac{D_E}{2} - \frac{D_I}{2} - t_{DI} \right\}$

5.4 DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO PARA LATERALES EXCÉNTRICOS 90°

Tras revisar con detalle los procedimientos reseñados en la sección 5.2 se observa que los laterales a 90° se definen exclusivamente de forma concéntrica, y no se presenta una metodología para los casos excéntricos, no obstante, sí se cuenta con tablas numéricas para tal caso. Esta circunstancia permite deducir que la operación con excentricidad sí es posible, solo que no ha sido explicada en la norma.

Se presenta a continuación la metodología que se afianzó para derivar el modelo matemático obtenido.

Tabla 6. Metodología para el desarrollo del modelo matemático de injertos excéntricos a 90°

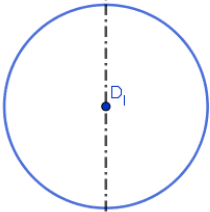
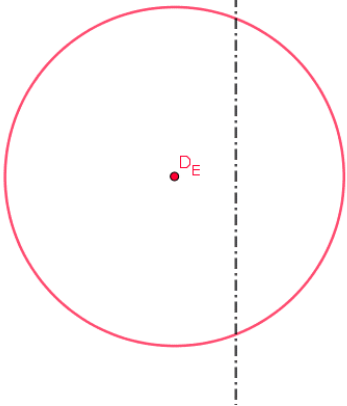
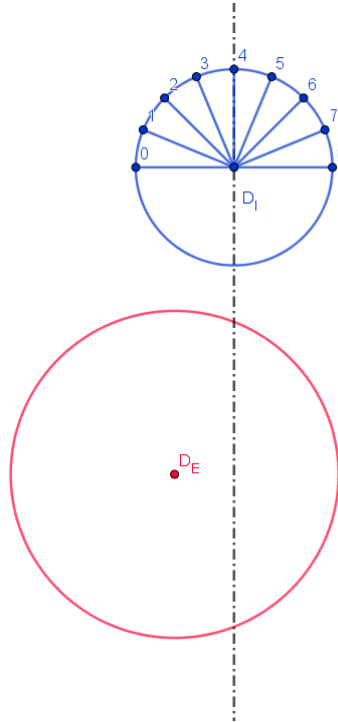
Paso #	Descripción	Figura	Interpretación simbólica o significancia matemática	Observación u objeto por manipular
1	Mida el diámetro interno y externo exactos del tubo que utiliza.		Crear y definir D_E, D_I	Recuerde la norma emplea en sus cálculos el DE del tubo base, y el DI del tubo injerto.
2	Trace una línea vertical recta excéntrica. Esta línea se convertirá en la línea vertical de dos círculos que		<p>Crear y definir $VSpace$. $VSpace$ es la distancia vertical de separación entre los círculos.</p> $VSpace = D_I(y) - D_E(y)$ <p>Crear los círculos con diámetro D_E y D_I, que estarán ubicados, partiendo desde el (0,0) en:</p> $C_{DE}: \left(\frac{D_E}{2}, \frac{D_E}{2}\right); \text{diámetro } D_E$ $C_{DI}: \left(e + \frac{D_E}{2}, \frac{D_E}{2} + VSpace\right); \text{diámetro } D_I$	En un ambiente de virtualización, se propone crear un parámetro variable y ajustable a conveniencia, que se denomina $VSpace$. Un desarrollo bien logrado es independiente de esta

Tabla 6. Metodología para el desarrollo del modelo matemático de injertos excéntricos a 90° (*continuación*)

<p>representan la rama de diámetro interno y el cabezal de diámetro externo del tubo.</p>	<p>Tenga presente que e se define como la variable para todo excentricidad correspondiente para llevar el injerto valor de entrada del hasta su posición de tangencia con el diámetro modelo. base. Tal valor es:</p>
	$e = \frac{D_E}{2} - \frac{D_I}{2} - t_{DE}$

Tabla 6. Metodología para el desarrollo del modelo matemático de injertos excéntricos a 90° (continuación)

3 Se discretiza la circunferencia del DI del tubo injerto (color azul) en tantas divisiones como se desee, con el fin de luego proyectarlo hacia el círculo base (color rojo).



La ubicación del i -ésimo punto (el conteo se lleva desde los -180° hasta los 0°) sobre la circunferencia D_I , en relación con el marco de referencia global $(0,0)$ será:

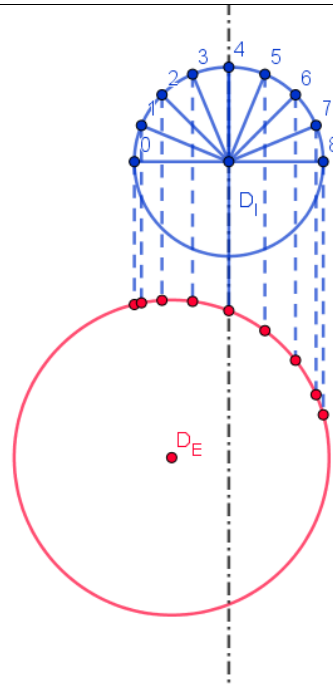
$$(x_i, y_i) = \left\{ e + \frac{D_E}{2} - \frac{D_I}{2} \cos\left(i \frac{2\pi}{n}\right), \frac{D_E}{2} + VSpace + \frac{D_I}{2} \sin\left(i \frac{2\pi}{n}\right) \right\}$$

Donde el contador iniciará en $i = 0$ y terminará en $i = n/2$. Donde n corresponde al número total de ordenadas o divisiones que requiere el tubero para el trabajo. Observe que n siempre será la designación que se realiza para el número de divisiones que se desea para el trabajo. Respetando tal nomenclatura, ocurrirá que el conteo de las divisiones en la media circunferencia que se ha trazado será entonces proporcional, por lo que entonces el conteo irá hasta $i = n/2$, proporcionalmente.

El hecho de discretizar el círculo creará un cierto número de divisiones de la misma longitud de arco, todas con un rayo de longitud $\frac{D_I}{2}$.

Tabla 6. Metodología para el desarrollo del modelo matemático de injertos excéntricos a 90° (continuación)

4 Proyecte hacia la circunferencia del DE los puntos que se acaban de discretizar en el DI



La ubicación de los nuevos puntos sobre la circunferencia exterior, y llevando el conteo desde el extremo izquierdo hacia el derecho, y desde el marco de referencia (0,0) será:

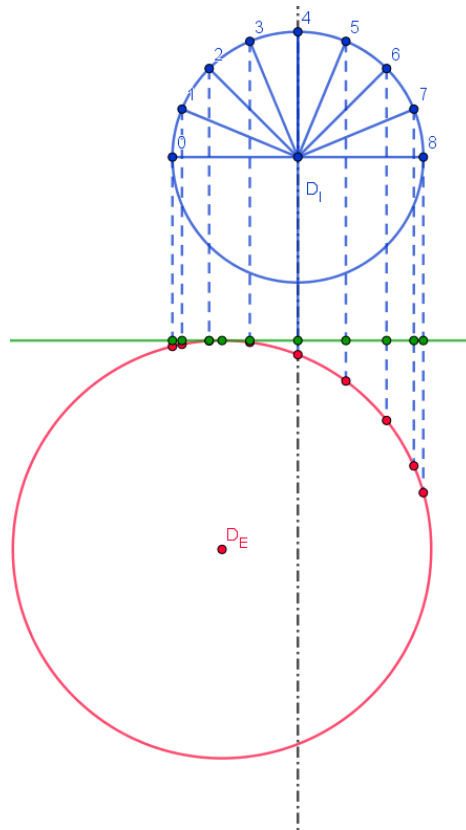
$$(x_i, y_i) = \left\{ e + \frac{D_E}{2} - \frac{D_I}{2} \cos\left(i \frac{2\pi}{n}\right), \frac{D_E}{2} + \sqrt{\left(\frac{D_E}{2}\right)^2 - \left(e - \frac{D_I}{2} \cos\left(i \frac{2\pi}{n}\right)\right)^2} \right\}$$

Estos puntos que se han marcado sobre la circunferencia base exterior definirán las líneas de proyección que servirán para calcular las ordenadas.

El conteo de tales ordenadas se realiza de forma tal como se ve en la figura, y solo se han graficado $\frac{n}{2}$ de las ordenadas totales.

Tabla 6. Metodología para el desarrollo del modelo matemático de injertos excéntricos a 90° (continuación)

5 Trace la línea tangente al círculo en su zona superior y defina los puntos de proyección.



Trazar una línea tangente a la circunferencia del DE que pase por el punto más alto de esa circunferencia. A continuación se proyectan sobre la recta los puntos que se encontraron sobre tal circunferencia.

La recta indudablemente estará ubicada, de acuerdo con nuestro sistema de referencia, en:

$$y = \frac{D_E}{2}$$

Finalmente, la distancia entre el locus de puntos sobre la circunferencia y la recta entregará las ordenadas de reducción requeridas. Si $y = a \cdot x + b$ y las coordenadas del punto C son (x_A, y_A) . Entonces la distancia es:

$$d = \frac{|a \cdot x_A - y_A + b|}{\sqrt{a^2 + 1}}$$

Observe que $a = 0$, $b = \frac{D_E}{2}$, por lo que

$$d = \left(\frac{D_E}{2} + \sqrt{\left(\frac{D_E}{2}\right)^2 - \left(e - \frac{D_I}{2} \cos\left(i \frac{2\pi}{n}\right)\right)^2} \right) - \left(\frac{D_E}{2}\right)$$

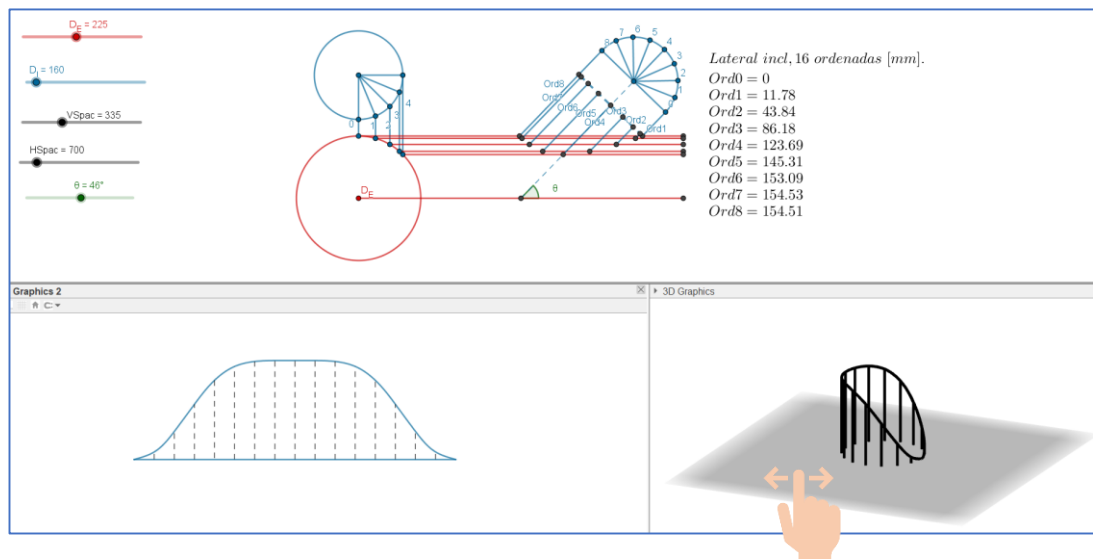
Por lo que, calcule las n ordenadas de un injerto a 90° excéntrico con la fórmula:

$$Ord(i) = \sqrt{\left(\frac{D_E}{2}\right)^2 - \left(e - \frac{D_I}{2} \cos\left(i \frac{2\pi}{n}\right)\right)^2}$$

6. HERRAMIENTA AUXILIAR AL DESARROLLO DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS

Con el propósito de facilitar el entendimiento de los procedimientos que se explicaron en la sección 5, se desarrollaron tres (3) aplicativos digitales para computador empleando el software y graficador de asistencia en matemáticas, GeoGebra, tal como se reseñó en el marco teórico. Cada aplicativo explica cada uno de los respectivos procedimientos detallados en la sección anterior, estos son, los de las secciones 5.2.2, 5.3.2 y 5.4. El aspecto general de estos aplicativos es como se muestra en la siguiente figura.

Figura 15. Aspecto general del aplicativo en GeoGebra para laterales inclinados en tubería (sección 5.2.2)



Sobre estos aplicativos existe una ventaja de visualización superior porque consisten en esquemas dinámicos que pueden ser fácilmente alimentados con datos y que se actualizan simultáneamente en sus distintas interfaces gráficas. La figura anterior muestra un esquema generalizado que permite visualizar:

- Desarrollo en 2D del procedimiento (o protocolo de construcción) de cada caso, en la zona superior. Se actualiza de forma dinámica si existiesen

variaciones para cualesquiera de las combinaciones de tubería base, tubería injerto o ángulo de inclinación.

- Desarrollo en 2D de la plantilla del tubo injerto en función de las ordenadas que se calculan a través del protocolo de construcción. Se actualiza de forma dinámica según los datos.
- Desarrollo en 3D de la plantilla del tubo injerto, se puede girar, hacer zoom y manipular.

Adicionalmente a las interfaces visuales a las que se hace alusión, el aplicativo permite recrear en forma de animación el protocolo de construcción desde el origen hasta el desarrollo terminado. Este proceso es, virtualmente, todo lo que se explicó en la sección 1 del libro, los procedimientos para dar con el trabajo final que se ajusta a lo reglado en el ES08402-07 de NCCER.

Para visualizar protocolo de construcción de forma animada, en el programa, presione la combinación de teclas Ctrl+Shift+L, o diríjase a la pestaña “Ver” ubicada en la zona superior izquierda, y seleccione “Protocolo de Construcción”. Se desplegará una nueva vista que contiene, paso a paso, las tareas que se realizaron para dar con el resultado que visualiza en pantalla. Como lo muestra la siguiente figura.

Figura 16. Procedimiento para recrear el protocolo de construcción en GeoGebra

No.	Name	Toolbar Icon	Description	Caption
1	Number D_E			
2	Number D_1			
3	Point A		$(D_E / 2, D_E / 2)$	D_E
4	Circle c		Circle with center A and radius $D_E / 2$	
5	Number VSpac			
6	Point B		$(D_E / 2, VSpac)$	
7	Circle d		Circle with center B and radius $D_1 / 2$	
8	Point C		$(D_E / 2 + D_1 \cos(22.5^\circ) / 2, VSpac - D_1 \sin(22.5^\circ) / 2)$	
9	Point D		$(D_E / 2 + D_1 \cos(2 \cdot 22.5^\circ) / 2, VSpac - D_1 \sin(2 \cdot 22.5^\circ) / 2)$	
10	Point E		$(D_E / 2 + D_1 \cos(3 \cdot 22.5^\circ) / 2, VSpac - D_1 \sin(3 \cdot 22.5^\circ) / 2)$	
11	Point F		$(D_E / 2 + D_1 \cos(4 \cdot 22.5^\circ) / 2, VSpac - D_1 \sin(4 \cdot 22.5^\circ) / 2)$	
12	Point G		$(D_E / 2 + D_1 \cos(0 \cdot 22.5^\circ) / 2, VSpac - D_1 \sin(0 \cdot 22.5^\circ) / 2)$	
13	Segment f		Segment G, B	
14	Segment g		Segment C, B	
15	Segment h		Segment D, B	
16	Segment i		Segment E, B	
17	Segment j		Segment F, B	
18	Point H		$(D_E / 2 + D_1 \cdot 1 / 2 \cos(4 \cdot 22.5^\circ), D_1 / 2 + \sqrt{((D_1 / 2)^2 -$	

Una vez ubicado en la ventana de protocolo de construcción, en la zona inferior derecha puede definir la duración de cada paso de la animación (por defecto 2 segundos) y luego presionar “Play” para ver cómo el software recrea cada uno de los pasos hasta llegar a los desarrollos terminados.

En este caso, el protocolo de construcción de laterales concéntricos se realizó en 212 pasos. El programa mostrará esos pasos de forma dinámica para ilustrar el procedimiento.

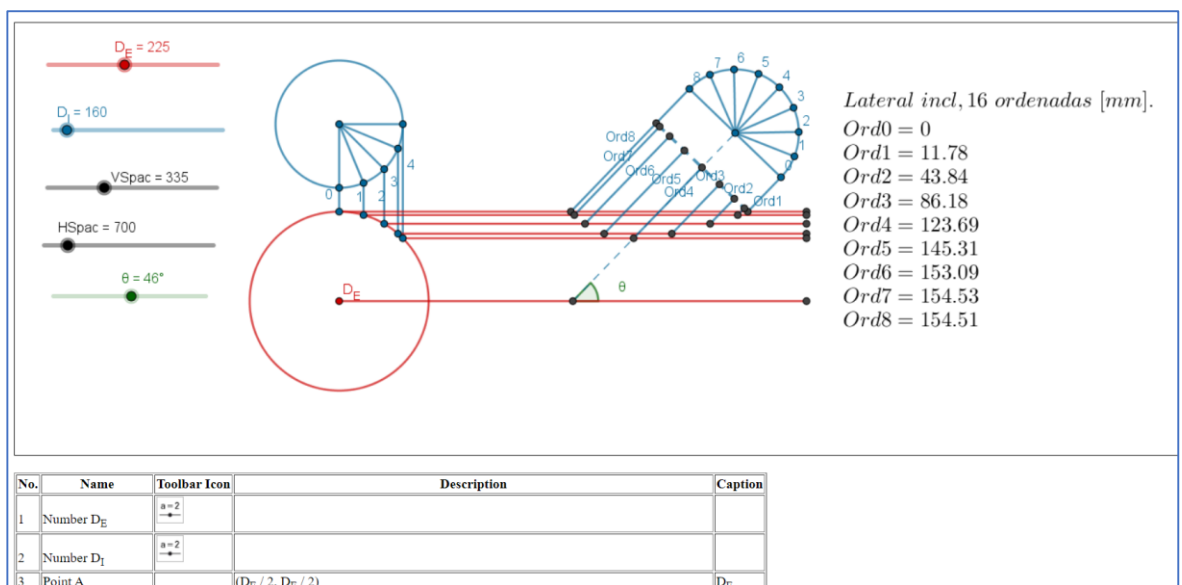
El propósito de esta función de animación es el de librar de la complejidad expuesta en las tablas de la sección 1 y que el usuario observe de una forma intuitiva y dinámica cómo se realizan los procedimientos que desembocan en los modelos matemáticos que aquí se presentan.

Los aplicativos que se desarrollaron fueron:

- Laterales concéntricos a cualquier ángulo de inclinación (incluye 90°), explicado en la sección 5.2.2. En anexos, lo encontrará como: “1. Laterales concéntricos.ggb”. Adicionalmente su protocolo de construcción se ha dispuesto en formato html, de tal forma que su navegador web le permitirá consultarlo, su nombre es: “1. Laterales_concéntricos.html”
- Dummy legs con cualquier tipo de excentricidad (incluye los tangenciales y los excéntricos), explicados en la sección 5.3.2. En anexos, lo encontrará como: “2. Dummy legs.ggb”. También puede consultar su protocolo de construcción en el archivo que lleva por nombre: “1. 2. Dummy_legs.html”
- Laterales excéntricos rectos (90° solamente), explicado en la sección 5.4. En anexos, lo encontrará como: “3. Lateral excéntrico recto.ggb”. También puede consultar su protocolo de construcción en el archivo que lleva por nombre: “3.Lateral_excéntrico_recto.html”.

Se ilustra, en la siguiente imagen, una parte del protocolo de construcción del primer caso, cuando se abre desde el archivo html, es decir el protocolo que está en formato web.

Figura 17. Vista parcial del protocolo de construcción en formato web



El aspecto general de dummy legs (sección 5.3.2) y el de injertos excéntricos rectos (sección 5.4) se muestran en las siguientes dos figuras, respectivamente.

Figura 18. Aspecto general del aplicativo en GeoGebra para dummy legs (sección 5.3.2)

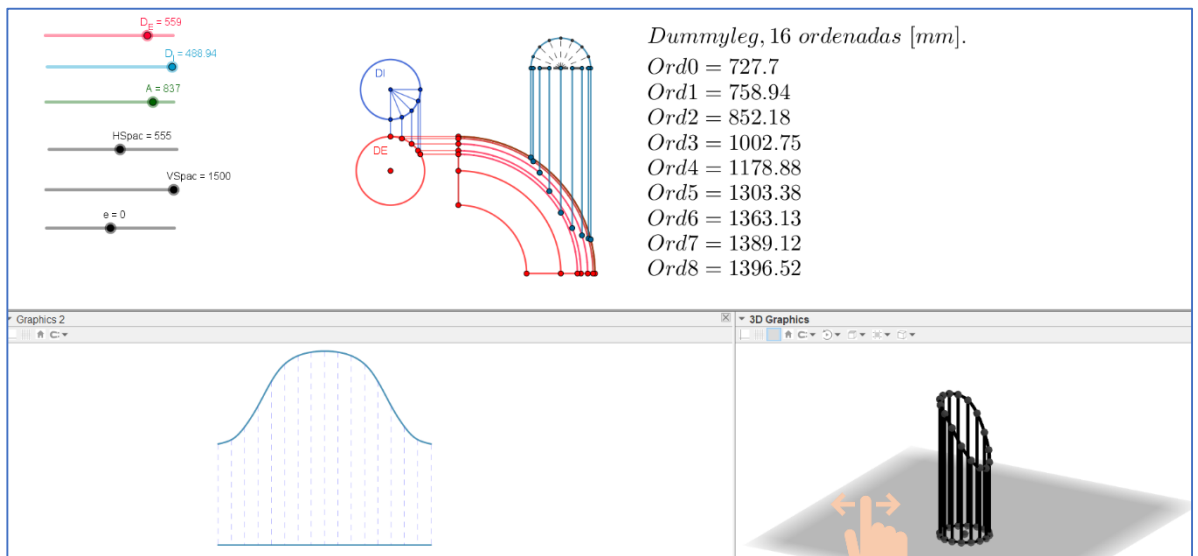
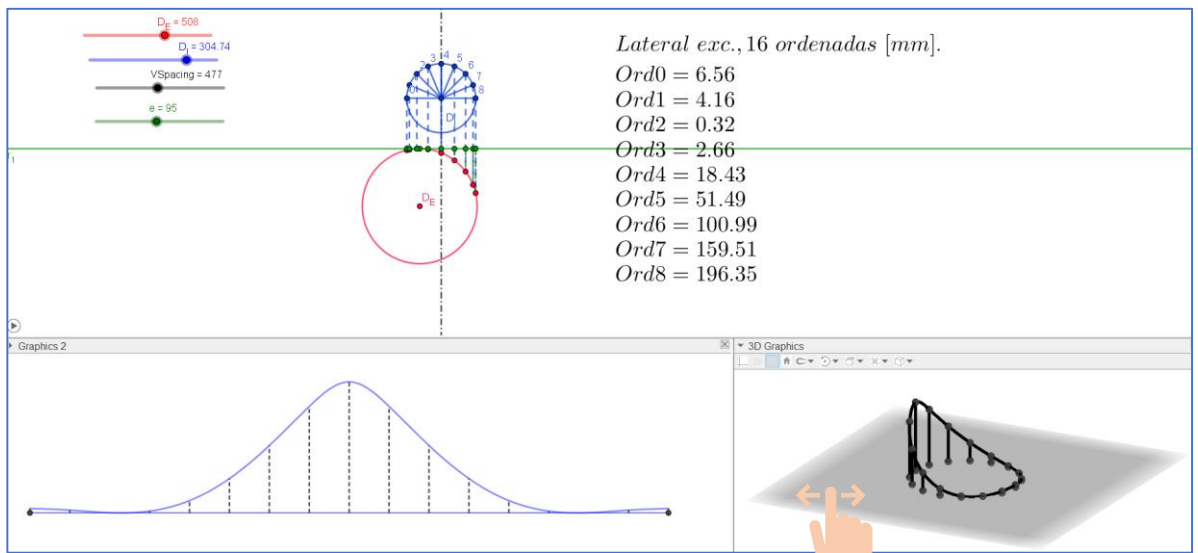


Figura 19. Aspecto general del aplicativo en GeoGebra para lateral excéntrico recto (sección 5.4)



7. SÍNTESIS DE LAS RELACIONES MATEMÁTICAS

La siguiente tabla presenta un resumen de las fórmulas halladas junto con su representación esquemática, cuyo propósito es el de facilitar el entendimiento para el lector. Tenga presente que para cada vector altura y_i que esta tabla presenta, le corresponde un único vector x_i de posición circunferencial. Para todos los casos calcule el respectivo $x_i = \frac{\pi \cdot i \cdot (D_I + t_{D_I})}{n}$, siempre en el tubo injerto. De esa forma tendrá completamente definida la matriz de ordenadas $[x_i, y_i]$.

Tabla 7. Resumen de las relaciones matemáticas halladas

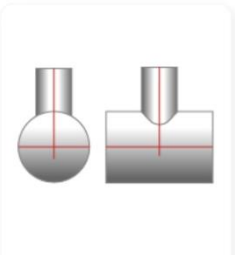
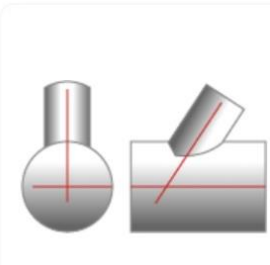
Caso	Parámetros asociados	Alturas del desarrollo como $Ord(i) = y_i$
<p>1. Lateral a 90° o boca de pescado</p> 	<p>D_E Diám. Ext. Tub. Base</p> <hr/> <p>D_I Diám. Int. Injerto</p> <hr/> <p>n Núm. ordenadas</p>	$\frac{D_E}{2} - \sqrt{\left(\frac{D_E}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_I}{2} \cdot \sin\left(i \cdot \frac{2\pi}{n}\right)\right)^2}$
<p>2. Lateral inclinado a θ grados</p> 	<p>D_E Diám. Ext. Tub. Base</p> <hr/> <p>D_I Diám. Int. Injerto</p> <hr/> <p>θ Ángulo del lateral $0^\circ < \theta < 90^\circ$</p> <hr/> <p>$n$ Núm. ordenadas</p>	$\frac{\frac{D_I}{2} \cdot \left(1 - \cos\left(i \cdot \frac{2\pi}{n}\right)\right)}{\tan(\theta)}$ $+ \frac{\frac{D_E}{2} - \sqrt{\left(\frac{D_E}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_I}{2} \cdot \sin\left(i \cdot \frac{2\pi}{n}\right)\right)^2}}{\sin(\theta)}$
<p>3. Lateral a 90° excéntrico</p>	<p>D_E Diám. Ext. Tub. Base</p>	

Tabla 7. Resumen de las relaciones matemáticas halladas (*continuación*)

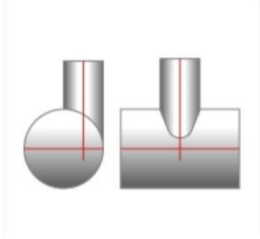
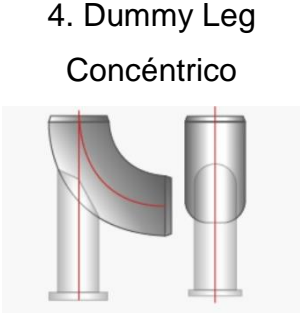
	D_I Diám. Int.. Injerto <hr/> t_{DE} Espesor Tub. Base	$\frac{D_E}{2} - \sqrt{\left(\frac{D_E}{2}\right)^2 - \left(e - \frac{D_I}{2} \cdot \cos\left(i \cdot \frac{2\pi}{n}\right)\right)^2}$
	n Núm. ordenadas	<p>Donde:</p> $e = \frac{D_E}{2} - \frac{D_I}{2} - 1 \cdot t_{DE}; \alpha = \sin^{-1}\left(\frac{\frac{D_E}{2} - \frac{D_I}{2} - 1 \cdot t_{DE}}{\frac{D_E}{2}}\right)$
<p>4. Dummy Leg Concéntrico</p> 	D_E Diám. Ext. Codo <hr/> D_I Diám. Int. Injerto <hr/> A Avance del codo <hr/> n Núm. ordenadas	$2 \cdot A - \sqrt{\left(\sqrt{\left(\frac{D_E}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_I}{2} \sin\left(i \cdot \frac{2\pi}{n}\right)\right)^2} + A\right)^2 - \left(A - \frac{D_I}{2} \cos\left(i \cdot \frac{2\pi}{n}\right)\right)^2}$
<p>5. Dummy Leg Excéntrico</p>	D_E Diám. Ext. Codo <hr/> D_I Diám. Int. Tub. Injerto	$2 \cdot A - \sqrt{\left(\sqrt{\left(\frac{D_E}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_I}{2} \sin\left(i \cdot \frac{2\pi}{n}\right)\right)^2} + A\right)^2 - \left(A + e - \frac{D_I}{2} \cos\left(i \cdot \frac{2\pi}{n}\right)\right)^2}$

Tabla 7. Resumen de las relaciones matemáticas halladas (continuación)

	<p>A Avance del codo</p> <hr/> <p>t_{DI} Espesor Tub. Injerto</p> <hr/> <p>n Núm. ordenadas</p>	<p>Donde:</p> $e = \frac{D_E}{2} - \frac{D_I}{2} - 1 \cdot t_{DI}; \alpha = \sin^{-1} \left(\frac{\frac{D_E}{2} - \frac{D_I}{2} - 1 \cdot t_{DI}}{\frac{D_E}{2}} \right)$
<p>6. Dummy Leg Tangencial</p>	<p>D_E Diám. Ext. Codo</p> <hr/> <p>D_I Diám. Int. Injerto</p> <hr/> <p>A Avance del codo</p> <hr/> <p>t_{DI} Espesor Tub. Injerto</p> <hr/> <p>n Núm. ordenadas</p>	$2 \cdot A - \sqrt{\left(\sqrt{\left(\frac{D_E}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_I}{2} \sin \left(i \cdot \frac{2\pi}{n} \right) \right)^2} + A \right)^2 - \left(A + e - \frac{D_I}{2} \cos \left(i \cdot \frac{2\pi}{n} \right) \right)^2}$ <p>Donde:</p> $e = \frac{D_I}{2} - \frac{D_E}{2} + 1 \cdot t_{DI}; \alpha = \sin^{-1} \left(\frac{\frac{D_E}{2} - \frac{D_I}{2} - 1 \cdot t_{DI}}{\frac{D_E}{2}} \right)$

Fuente: Elaboración propia.

8. VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Una vez se ha presentado la metodología que permitió derivar los modelos matemáticos, se procede a validar los resultados que tales relaciones producen al ser tabuladas en los casos previamente calculados por el manual del tubero de W.V. GRAVES, el único compendio de tabulaciones numéricas referenciado por el ES08402-07. Las combinaciones que están disponibles se presentan en la siguiente tabla. Como observará, se trata de 10 tablas disponibles en total, por lo que la validación será con base en ellas.

Tabla 8. Tabulaciones disponibles en el manual del tubero, Pipe Fitters Blue Book que sirven como datos teóricos.

Validación numérica de W.V. GRAVES								
Caso	Tubería SCH STD				Tubería SCH XS			
	8 ordenadas		16 ordenadas		8 ordenadas		16 ordenadas	
	¿Tabulación disponible?	Rango de tamaños (NPS) Injerto/Base	¿Tabulación disponible?	Rango de tamaños (NPS) Injerto/Base	¿Tabulación disponible?	Rango de tamaños (NPS) Injerto/Base	¿Tabulación disponible?	Rango de tamaños (NPS) Injerto/Base
Injerto 90° concéntrico	Sí	3"-10"	Sí	12"-24"	Sí	3"-10"	Sí	12"-24"
		3"-24"		12"-24"		3"-24"		12"-24"
Injerto a 90° excéntrico	No	No disponible	Sí	3"-22"	No	No disponible	No	No disponible
				4"-24"				No disponible

Tabla N. 8. Tabulaciones disponibles en el manual del tubero, Pipe Fitters Blue Book que sirven como datos teóricos (*continuación*)

Lateral a 45° concéntrico	Sí	3"-8"	Sí	10"-24"				
		3"-24"		10"-24"				
Dummy Leg concéntrico	No	No disponible	Sí	2"-22"				
				2"-24"				
Sí			2"-22"					
			3"-24"					
Dummy Leg tangencial	No	No disponible	Sí	2"-22"				
				3"-24"				
Sí			2"-22"					
			3"-24"					

Fuente: Elaboración propia.

8.1 METODOLOGÍA DE CÁLCULO DEL ERROR

El proceso de la validación consistirá en extraer las soluciones numéricas para los casos expuestos en el libro de W.V GRAVES, y compararlos, uno a uno, con los que reproduzcan los modelos matemáticos derivados en este proyecto. Se consideran los resultados de la norma como los datos nominales, actuales o teóricos y los que produzcan las ecuaciones derivadas como las observaciones o pronósticos. El cálculo del error se efectuará así:

8.1.1 Error absoluto: Representa la norma de la diferencia entre el resultado tabulado en la respuesta numérica de NCCER y el valor calculador por el modelo matemático. Se calcula como:

$$ErrAbs = |A - F|$$

A representa el valor actual, F representa la predicción (del inglés, forecast).

8.1.2 Desviación media absoluta (MAD): Entrega una medición del error promedio del modelo cuando se le compara con los datos actuales o teóricos. Expresa exactitud en las mismas unidades que los datos y permite conceptualizar la *cantidad* de error³⁹. Se calcula como:

$$MAD = \frac{\sum_i^n |A - F|}{n}$$

8.1.3 Error cuadrático medio (MSE): Mide el promedio de los errores al cuadrado, siendo un indicador que pondera mayormente a los grandes errores (valores atípicos). También es posible interpretársele como la varianza del error pronóstico al ser un cálculo homólogo con la fórmula de varianza. Se calcula como:

$$MSE = \frac{\sum_i^n (A - F)^2}{n}$$

8.1.4 Raíz del error cuadrático medio (RMSE): Consiste en tomar la raíz cuadrada del MSE, su utilidad se precisa en que el resultado está en las mismas unidades que los datos.

$$RMSE = \sqrt{MSE}$$

8.1.5 Error porcentual absoluto medio (MAPE): Señala la exactitud como un porcentaje de error. Al ser un porcentaje, cuenta con una mayor facilidad de entendimiento que otros indicadores estadísticos. Se calcula como:

³⁹ MINITAB. “Interpretar todos los estadísticos”. Soporte de Minitab. [en línea]. México [consultado el 15 de enero de 2021]. Disponible en: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/time-series/how-to/moving-average/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/#mape>

$$MAPE = \frac{\sum_i^n \frac{|A - F|}{A}}{n} \times 100$$

Cabe resaltar que cuando el error relativo se calcule para un valor actual cercano a cero (o inclusive), el MAPE pierde sentido puesto que entregará un valor muy elevado, o se indeterminará con una tendencia al infinito. Una solución común para aquellas situaciones de cálculo puntuales es subsanar la indeterminación recalculando el error como:

$$MAPE = \frac{\sum_i^n \frac{|A - F|}{(A + 1)}}{n} \times 100$$

Tal situación se presenta en algunas ocasiones para los conjuntos de datos aquí examinados por lo que se hace oportuna la forma alterna del cálculo de error.

8.2 RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN

Se presenta el primero de los casos de cálculo para que el lector observe la aplicación de la metodología de cálculo de error y su respectiva interpretación. El caso de ejemplo que se presenta es el de injerto a 90° concéntrico con 8 y 16 ordenadas.

Adicionalmente, se presentará el resultado del análisis para las 10 tablas de datos expuestas, aunque debido a la extensión los datos, las tablas extensas estarán incluidas en anexos, después de la bibliografía, por lo que el propósito de esta sección es resumir los resultados de la validación.

8.2.1 Validación para laterales concéntricos a 90°. Los laterales concéntricos son el primer caso que trata la norma y, además, uno de los más frecuentes. Para este caso de manufactura, se cuentan con las dimensiones del lateral para 8 y 16 ordenadas, reservando las 16 ordenadas para tuberías con un tamaño nominal (NPS) superior a 12, dado que la precisión en el ajuste y en los acabados

del prefabricado así lo exige. Los resultados que entrega el estándar, para 8 ordenadas, son:

Tabla 9. Ordenadas para lateral a 90°, 8 divisiones, Pipe Fitters Blue Book
Boca de pescado (lateral a 90°), 8 divisiones, Tubería SCH STD, ASME B36-10M.

X	Cabezal													
	N P S	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	O r d
Inj ert o	3	0,3 75	0, 25	0,1 87 5	0,1 25	0,1 25	0,0 62 5	0,0 62 5	0,0 62 5	0,0 62 5	0,0 62 5	0,0 62 5	0,0 62 5	1
		0,9 37 5	0, 62 5	0,3 75 5	0,3 12 5	0,2 5	0,1 87 5	0,1 87 5	0,1 25	0,1 25	0,1 25	0,1 25	0,1 25	2
	4		0, 5	0,3 12 5	0,2 5	0,1 87 5	0,1 87 5	0,1 25	0,1 25	0,1 25	0,1 25	0,1 25	0,0 62 5	1
			1, 25	0,6 87 5	0,5	0,3 75 5	0,3 12 5	0,3 12 5	0,2 5	0,2 5	0,1 87 5	0,1 87 5	0,1 87 5	2
	6			0,8 12 5	0,5 62 5	0,4 37 5	0,3 75	0,3 12 5	0,3 12 5	0,2 5	0,2 5	0,1 87 5	0,1 87 5	1
				2	1,2 5	0,9 37 5	0,7 5	0,6 87 5	0,6 25	0,5	0,5	0,4 37 5	0,3 75	2

Tabla 9. Ordenadas para lateral a 90°, 8 divisiones, Pipe Fitters Blue Book. Boca de pescado (lateral a 90°), 8 divisiones, Tubería SCH STD, ASME B36-10M. (continuación)

	8				1,0 62 5	0,8 12 5	0,6 87 5	0,6 25	0,5	0,4 37 5	0,4 37 5	0,3 75 5	0,3 12 5	1
					2,6 87 5	1,7 5	1,3 75	1,2 5	1,0 62 5	0,9 37 5	0,8 12 5	0,7 5	0,6 87 5	2
	1 0					1,3 12 5	1,0 62 5	0,9 37 5	0,8 12 5	0,7 5	0,6 25	0,5 62 5	0,5 62 5	1
						3,4 37 5	2,4 37 5	2,1 25	1,7 5	1,5	1,3 75	1,1 87 5	1,1 25	2

Fuente: Adaptado de W.V. GRAVES – Pipe Fitters Blue Book

Observe que la norma solo presenta las ordenadas 1 y 2 para esta configuración geométrica, puesto que la plantilla de desarrollo fue elaborada en un marco de referencia que limita, favorablemente, la cantidad de ordenadas necesarias en razón a su simetría. Este propósito aligera la cantidad de memoria necesaria para imprimir los datos en pantalla, o bien, en memoria y, en términos de recursos, es una ventaja.

Como observará en todas las tablas que encontrará en anexos al final del libro, en todos los casos esta circunstancia de la simetría simplifica el número de ordenadas que se imprimen en tablas, para este caso en particular, 8 ordenadas se convierten únicamente en 2 ordenadas representativas. Mientras que 16 ordenadas suelen convertirse en 9 ordenadas representativas, suficientes para describir por completo el desarrollo sobre el tubo injerto A continuación, se presentan los resultados que produce la fórmula que se derivó, y se presenta en el mismo formato que el estándar.

Tabla 10. Ordenadas para lateral a 90°, 8 divisiones, fórmula.

Formula, Boca de pescado (lateral a 90°), 8 divisiones, Tubería SCH STD,
ASME B36-10M.

X		Cabezal												
N P S	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	O rd	
	Inje rto	3	0,3 77	0,2 79	0,1 83	0,1 39	0,1 11	0,0 93	0,0 85	0,0 74	0,0 66	0,0 59		0,0 54
0,9 08			0,6 04	0,3 77	0,2 82	0,2 24	0,1 87	0,1 70	0,1 48	0,1 32	0,1 18	0,1 07	0,0 98	2
4			0,5 07	0,3 21	0,2 42	0,1 92	0,1 61	0,1 46	0,1 28	0,1 13	0,1 02	0,0 92	0,0 85	1
			1,2 45	0,6 82	0,4 99	0,3 91	0,3 26	0,2 96	0,2 57	0,2 28	0,2 05	0,1 86	0,1 70	2
6				0,7 88	0,5 71	0,4 46	0,3 71	0,3 37	0,2 93	0,2 59	0,2 33	0,2 11	0,1 93	1
				1,9 80	1,2 46	0,9 37	0,7 67	0,6 91	0,5 97	0,5 26	0,4 71	0,4 26	0,3 89	2
8					1,0 51	0,8 00	0,6 58	0,5 94	0,5 14	0,4 54	0,4 06	0,3 68	0,3 36	1
					2,6 77	1,7 74	1,4 03	1,2 49	1,0 66	0,9 33	0,8 31	0,7 49	0,6 83	2
10						1,3 33	1,0 75	0,9 63	0,8 27	0,7 27	0,6 49	0,5 86	0,5 35	1
						3,4 28	2,4 33	2,1 11	1,7 63	1,5 23	1,3 46	1,2 07	1,0 96	2

Fuente: Elaboración propia, evaluación numérica del desarrollo para injerto a 90°.

Como nota explicativa, se declara que la forma de evaluar la función en el software Microsoft Excel precisa de tener los diámetros interiores y exteriores de las tuberías de trabajo. Para cumplir tal propósito, se dispuso de una hoja en el libro de cálculos (disponible en anexos) con los datos de la norma ASME B36-10M, y se relacionó con un VLOOKUP la función de llamar las dimensiones precisas según el tipo de combinaciones de diámetros que requiriese la fórmula. Se han ocultado, para este caso, los resultados del VLOOKUP con la intención de no sobrecargar la tabla, pero se declara que tales datos son indispensables para alimentar el modelo matemático, es decir, no basta con tener solamente los NPS de las tuberías que se trabajen, sino conocer sus diámetros internos y externos.

Las tablas que se presentan en los anexos contienen todos los detalles intermedios de cálculo que conducen a los resultados que aquí se presentan. A continuación, se relacionan las tablas de error absoluto, error cuadrado medio y error relativo absoluto. Se ha dispuesto de una escala de colores para identificar visualmente los valores extremos, siendo el color rojo reservado para los valores muy cercanos a cero, y los de color verde los más lejanos de cero. El color amarillo se posiciona como un valor intermedio.

Tabla 11. Cálculos de error para injertos a 90° concéntricos con 8 divisiones circunferenciales en tubería.

Residual Absoluto, Boca de pescado, 8 divisiones, Tubería SCH STD														
X	Cabezal													
COUNT	100	SUM	1,542	MAD	0,0154	[in]	Max	Err	0,033	[in]				
	NPS	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	Ord
Injerto	3	0,002	0,029	0,005	0,014	0,014	0,030	0,022	0,011	0,003	0,003	0,009	0,013	1
		0,030	0,021	0,002	0,030	0,026	0,000	0,017	0,023	0,007	0,007	0,018	0,027	2
	4		0,007	0,009	0,008	0,004	0,027	0,021	0,003	0,012	0,023	0,033	0,022	1
			0,005	0,006	0,001	0,016	0,014	0,017	0,007	0,022	0,017	0,002	0,017	2
	6			0,025	0,008	0,009	0,004	0,024	0,020	0,009	0,017	0,024	0,006	1
				0,020	0,004	0,000	0,017	0,003	0,028	0,026	0,029	0,011	0,014	2
	8				0,011	0,012	0,029	0,031	0,014	0,016	0,031	0,007	0,024	1
					0,010	0,024	0,028	0,001	0,004	0,004	0,018	0,001	0,005	2
	10					0,020	0,012	0,025	0,015	0,023	0,024	0,024	0,028	1
						0,009	0,005	0,014	0,013	0,023	0,029	0,020	0,029	2

Tabla 11. Cálculos de error para injertos a 90° concéntricos con 8 divisiones circunferenciales en tubería (continuación)

Residual Cuadrado, Boca de pescado, 8 divisiones, Tubería SCH STD															
X	Cabezal														
COUNT	100	SUM	0,033	MSE	0,0003	[in^2]	RMSE	0,018	[in]						
Injerto	NPS	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	Ord	
	3	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1
		0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	2
	4		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	1
			0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2
	6			0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	1
				0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	2
	8				0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,001	1
					0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2
	10					0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	1
					0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	2	

Escala de colores	
Tipo	Degradado
Valor mínimo	
Valor medio (percentil 50)	
Valor máximo	

Tabla 11. Cálculos de error para injertos a 90° concéntricos con 8 divisiones circunferenciales en tubería (*continuación*)

Relativo, Boca de pescado, 8 divisiones, Tubería SCH STD														
X	Cabezal													
Min Err	0%	Max Err	3%	Err Prom	1%	MAPE	1%							
	NPS	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	Ord
Injerto	3	0%	2%	0%	1%	1%	3%	2%	1%	0%	0%	1%	1%	1
		2%	1%	0%	2%	2%	0%	1%	2%	1%	1%	2%	2%	2
	4		0%	1%	1%	0%	2%	2%	0%	1%	2%	3%	2%	1
			0%	0%	0%	1%	1%	1%	1%	2%	1%	0%	1%	2
	6			1%	1%	1%	0%	2%	2%	1%	1%	2%	0%	1
				1%	0%	0%	1%	0%	2%	2%	2%	1%	1%	2
	8				1%	1%	2%	2%	1%	1%	2%	1%	2%	1
					0%	1%	2%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	2
	10						2%	1%	1%	1%	1%	2%	2%	1
							0%	0%	1%	1%	2%	2%	3%	2

Escala de colores	
Tipo	<i>Degradado</i>
Valor mínimo	
Valor medio (percentil 50)	
Valor máximo	

El análisis de error revela que para injertos a 90° de forma concéntrica y con 8 divisiones circunferenciales, la desviación absoluta máxima que se produjo fue de $Max\{Err\} = 0.033 [in] \sim \frac{1}{32} [in]$, siendo la desviación media absoluta de $MAD = 0.015 [in] \sim \frac{1}{64} [in]$, error inclusive inferior a la resolución numérica del estándar, que aproxima siempre al siguiente $\frac{1}{16}$ ", esta circunstancia indica que fueron más las ocasiones en las que el modelo matemático reprodujo el valor exacto que presentó la norma y fueron menos las iteraciones en las que no. Se obtuvo, además, un error cuadrático medio próximo a cero $MSE = 0.0003 [in] \sim 3 \times 10^{-4}$, lo que indica un ajuste preciso en términos globales y confirmando la ausencia de valores atípicos en el pronóstico.

Adicionalmente, el error porcentual relativo absoluto que se observó fue de $MAPE = 1\%$, reforzando la observación de que se trata de un conjunto de datos que se aproxima de forma precisa al resultado presentado por la norma.

A continuación, se presentan los resultados de la validación para el mismo caso de injertos a 90° concéntricos pero utilizando, en esta ocasión, 16 divisiones circunferenciales, es decir, con una mayor cantidad de elementos discretos, cuyo propósito principal es el de mejorar la presentación de los trabajos de manufactura al contar con injertos con un paso más fino.

Tabla 12. Cálculos de error para injertos a 90° de forma concéntrica con 16 divisiones circunferenciales en tubería

Residual Absoluto, Boca de pescado, 16 divisiones, Tubería SCH STD									
X	Cabezal								
COUNT	112	SUM	1,977	MAD	0,0178	Max	Err	0,031	
	NPS	12	14	16	18	20	22	24	Ord
Injerto	12	0,010	0,012	0,024	0,015	0,017	0,008	0,028	1
		0,008	0,005	0,030	0,000	0,007	0,024	0,025	2
		0,023	0,025	0,018	0,028	0,010	0,001	0,018	3
		0,029	0,019	0,021	0,021	0,000	0,030	0,017	4
	14		0,025	0,025	0,011	0,014	0,016	0,021	1
			0,014	0,015	0,003	0,022	0,015	0,015	2
			0,022	0,026	0,027	0,029	0,015	0,009	3
			0,010	0,016	0,029	0,009	0,031	0,005	4
	16			0,011	0,014	0,002	0,019	0,015	1
				0,027	0,019	0,016	0,025	0,029	2
				0,021	0,024	0,028	0,011	0,027	3
				0,017	0,031	0,030	0,009	0,016	4
	18				0,002	0,002	0,007	0,025	1
					0,006	0,013	0,029	0,022	2
					0,004	0,021	0,021	0,028	3
					0,008	0,002	0,015	0,031	4
	20					0,016	0,010	0,017	1
						0,014	0,017	0,008	2
						0,012	0,025	0,005	3
						0,025	0,013	0,021	4
	22						0,029	0,022	1
							0,028	0,018	2
							0,027	0,027	3
							0,027	0,015	4
	24							0,020	1
								0,008	2
								0,022	3
								0,024	4

Residual Cuadrado, Boca de pescado, 16 divisiones, Tubería SCH									
STD									
X	Cabezal								
COUNT	112	SUM	0,043	MSE	0,0004	RMSE	0,020		
Injerto	NPS	12	14	16	18	20	22	24	Ord
	12	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	1
		0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	2
		0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	3
		0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	4
	14		0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	1
			0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2
			0,000	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	3
			0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	4
	16			0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1
				0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	2
				0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	3
				0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	4
	18				0,000	0,000	0,000	0,001	1
					0,000	0,000	0,001	0,000	2
					0,000	0,000	0,000	0,001	3
					0,000	0,000	0,000	0,001	4
	20					0,000	0,000	0,000	1
						0,000	0,000	0,000	2
						0,000	0,001	0,000	3
						0,001	0,000	0,000	4
	22						0,001	0,000	1
							0,001	0,000	2
							0,001	0,001	3
							0,001	0,000	4
	24						0,000	1	

Tabla 12. Cálculos de error para injertos a 90° de forma concéntrica con 16 divisiones circunferenciales en tubería (*continuación*)

								0,000	2
								0,001	3
								0,001	4

Relativo, Boca de pescado, 16 divisiones, Tubería SCH STD									
X	Cabezal								
Min Err	0%	Max Err	3%	Err Prom	0%	MAPE	1%		
Injerto	NPS	12	14	16	18	20	22	24	Ord
	12	1%	1%	2%	1%	1%	1%	2%	1
		1%	0%	3%	0%	0%	1%	1%	2
		1%	1%	1%	1%	1%	0%	1%	3
		1%	1%	1%	1%	0%	2%	1%	4
	14		2%	2%	1%	1%	1%	2%	1
			1%	1%	0%	2%	1%	1%	2
			1%	1%	1%	1%	1%	1%	3
			0%	0%	1%	0%	1%	0%	4
	16			1%	1%	0%	1%	1%	1
				1%	1%	1%	2%	2%	2
				1%	1%	1%	0%	1%	3
				0%	1%	1%	0%	1%	4
	18				0%	0%	0%	2%	1
					0%	1%	2%	1%	2
					0%	1%	1%	1%	3
					0%	0%	0%	1%	4
	20					1%	1%	1%	1
						1%	1%	0%	2
						0%	1%	0%	3
						0%	0%	0%	4
	22						2%	1%	1
							1%	1%	2
							0%	1%	3
							0%	0%	4
	24							1%	1

Tabla 12. Cálculos de error para injertos a 90° de forma concéntrica con 16 divisiones circunferenciales en tubería (*continuación*)

								0%	2
								0%	3
								0,001	4

El análisis de error revela que para injertos a 90° de forma concéntrica y con 16 divisiones circunferenciales, la desviación absoluta máxima que se produjo fue de $Max\{Err\} = 0.031 \text{ [in]} \sim \frac{1}{32} \text{ [in]}$, siendo la desviación media absoluta de $MAD = 0.018 \text{ [in]} \sim \frac{1}{64} \text{ [in]}$, error nuevamente inferior a la resolución numérica del estándar, que se conocer por aproximar al siguiente $\frac{1}{16}$ ".

Se obtuvo, además, un error cuadrático medio próximo a cero $MSE = 0.0004 \text{ [in]} \sim 4 \times 10^{-4}$, lo que indica un ajuste preciso en términos globales y confirmando la ausencia de valores atípicos en el pronóstico.

Adicionalmente, el error porcentual relativo absoluto también se ubicó en $MAPE = 1\%$. Este resultado confirma nuevamente la validez y precisión de la ecuación para replicar los resultados del estándar.

8.2.2 Resultados de la validación para todos los demás casos (sumariado).

La siguiente tabla resume los resultados del cálculo de errores para las 10 tablas con validaciones numéricas que se realizaron. Se presentan indicadores tales como el error máximo, MAD, MSE, MAPE, los suficientes para declarar si el modelo matemático resultó preciso o no.

Tabla 13. Cálculos de error para todos los demás casos (sumariado)

Caso	Err. Máx. $\times 10^{-3} \text{ [in]}$	MAD $\times 10^{-3} \text{ [in]}$	MSE $\times 10^{-4} \text{ [in]}$	MAPE [%]	Encuentre el	
					extenso en el libro de cálculos, hoja #:	
Injerto 90° concéntrico	STD y 8 ord.	33	15	3	1	5
	STD y 16 ord.	31	18	4	1	5

Tabla 13. Cálculos de error para todos los demás casos sumariado (*continuación*)

	XS y 8 ord.	31	16	3	1	5
	XS y 16 ord.	31	16	3	1	5
Lateral a 90° excéntrico	STD y 16 ord.	31	15	3	1	7
Lateral a 45° concéntrico	STD y 8 ord	31	15	3	1	9
	STD y 16 ord	31	15	3	0,3	9
Dummy Leg concéntrico	STD y 16 ord	59	20	6	0,1	11
Dummy Leg excéntrico	STD y 16 ord	56	21	7	0,1	13
Dummy Leg tangencial	STD y 16 ord	86	24	8	0,1	15

8.2.3 Interpretación de resultados. En términos absolutos, para todos los casos estudiados se observa que la validación numérica demostró producir errores del orden de milésimas de pulgadas, con un error máximo cercano al $\frac{1}{16}$ " para los dummy leg tangenciales. Este valor de 1/16 no es aleatorio, y es apenas previsible, puesto que el estándar entrega sus resultados en términos del dieciseisavo más cercano. Esto indica que, de existir errores en las mediciones tabuladas por el estándar son atribuibles al error asociado a la resolución de sus instrumentos puesto que no se observó una diferencia superior a tal cantidad.

En términos relativos, ningún modelo matemático produjo un error superior al 1%, en relación con los valores teóricos del estándar. Este resultado indica que los desarrollos matemáticos son válidos para las tabulaciones expuestas y que tales modelos recrean con precisión los resultados esperados, con la ventaja que ningún modelo sufre de pérdida de generalidad puesto que es alimentado por variables enteramente geométricas y dependientes de la configuración de manufactura deseada.

Adicionalmente, el error cuadrático medio (MSE) resultó en un valor muy próximo a cero para todos los casos, esta circunstancia revela que los desarrollos no generan valores atípicos al momento de reproducir los resultados de la norma, y confirma su precisión en replicar los resultados normados.

Con base en lo evidenciado, se declara que los desarrollos matemáticos son lo suficientemente capaces como para recrear de forma precisa resultados ajustados a la norma.

8.2.4 Libro de cálculos. En la sección de anexos, después de la bibliografía, encontrará las tablas extensas con los resultados que aquí se expusieron (sección 8.2.3)

Si desea tener acceso al Excel que contiene todos los cálculos para verificar su contenido y la aplicación de las fórmulas, se dispondrá del libro de cálculos en los anexos del trabajo.

Para facilitar la interpretación de lo consignado en el libro de cálculos, tenga en cuenta la siguiente información:

En el libro de Excel encontrará un total de quince (15) hojas de cálculo distribuidas así:

Tabla 14. Distribución de la información en el libro de cálculos

Hoja #	Título	Descripción/Contenido de la hoja
1	“ASME B36.10M Pipe Size STD”	Contiene los datos de las dimensiones de tuberías ASME normadas que se utilizan como input en los modelos matemáticos desarrollados, cuando se trata de cédulas de tamaño estándar.
2	“ASME B36.10M Pipe Size XS”	Contiene los datos de las dimensiones de tuberías ASME, pero cuando se tratan de cédulas extrafuertes (XS). Son usadas en un caso de validación y es en el de injertos a 90° grados concéntricos con tuberías gruesas.
3	“ASME B16.9”	Contiene las dimensiones de codos ASME tipos radio largo que son los que emplea W.V. GRAVES para la validación de dummy legs, sirve para alimentar todos los desarrollos matemáticos que utilicen codos.
4,5	PP Injerto a 90° conc. F Injerto a 90° conc.	El prefijo “PP” indica que la hoja contiene los resultados de Pipe Fitters, incluye todos los casos de injertos concéntricos a 90° con 8 y 16 ordenadas, tanto para tuberías STD como XS. “F” indica que contiene los resultados que entregan las fórmulas, y en esta misma hoja encontrará las tablas con los cálculos de error.
6,7	PP Injerto a 90° exc. F Injerto a 90° exc.	Contenido análogo al del caso anterior (hojas 4 y 5), pero para el caso de injertos con 90° excéntricos. Para este caso Pipe

Tabla 14. Distribución de la información en el libro de cálculos (*continuación*)

		Fitters no incluye tabulaciones con tuberías XS.
8,9	PP Lateral 45° conc. F Lateral 45° conc.	La hoja con el prefijo “PP” contiene las tabulaciones de Pipe Fitters con tuberías STD, la hoja con prefijo “F” presenta los resultados de los desarrollos matemáticos y, además, incluye el análisis de error.
10,11,12,13,14,15	PP DL TYP1 F DL TYP1 PP DL TYP 2 F DL TYP2 PP DL TYP3 F DL TYP3	Contiene, respectivamente, los resultados de Pipe Fitters y las validaciones de los desarrollos matemáticos para dummy legs concéntricos, excéntricos y tangenciales.

9. DESARROLLO DE LA APP EN ANDROID

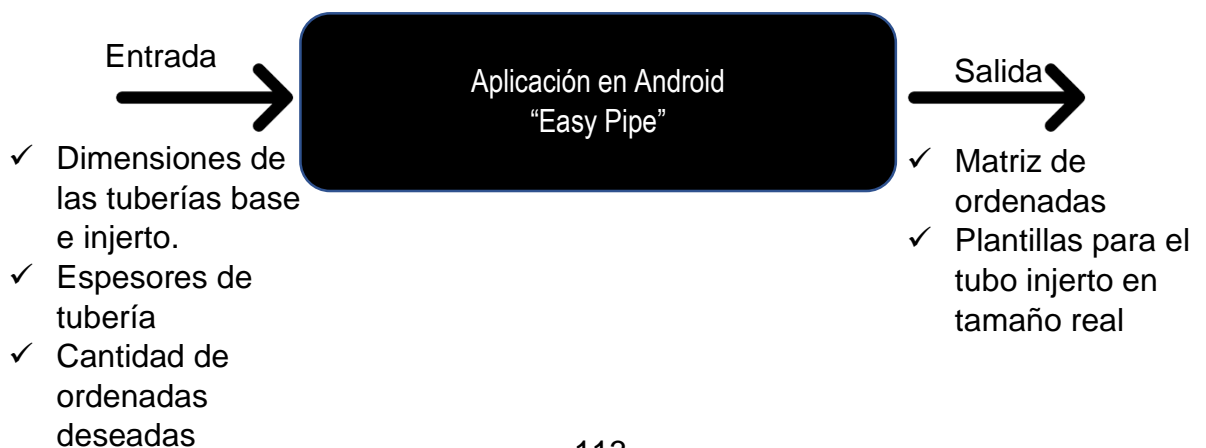
Como se mencionó en la etapa del diseño metodológico, el desarrollo de la aplicación tiene como propósito servir como un medio para la distribución de la solución que se comprobó y que, además, reproduce resultados fidedignos al estándar de manufactura.

Figura 20. Ícono de la App en Android Easy Pipe



Desde la teoría general de sistemas, el funcionamiento de la aplicación se puede explicar con sencillez a través del concepto de una caja negra, esto es, el aplicativo recibe unos datos del usuario (entrada) y devuelve las ordenadas que el operador necesita para las geometrías de los injertos y así manufacturar (salida). Este ha sido el propósito primario del proyecto, y tal como el lector lo podrá apreciar cuando utilice la aplicación, la solución digital que se creó es lo suficientemente *conveniente* como *sencilla*, puesto que se ciñe a esta idea simple.

Figura 21. Esquema de sistema de la aplicación desarrollada



Considerando el entorno y el público en el que la aplicación será utilizada, la sencillez del aplicativo es precisamente un requisito indispensable. De tal manera que permita sobrepasar las dificultades inherentes que tienen los tuberos comúnmente al realizar sus trabajos de manufactura de prefabricados, por lo que el concepto de la caja negra es precisamente la solución que la fuerza laboral amerita. Observe la figura de arriba.

9.1 CARACTERÍSTICAS DEL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN

Para la programación del aplicativo se utilizó el kit de desarrollo de software (SDK) Ionic, que permite desarrollar aplicaciones híbridas para Android, aunque con el añadido de una sensación de aplicación nativa porque se debe instalar como cualquier otra aplicación desde la tienda de aplicaciones, y además, aprovecha de mejor forma los recursos y permisos del dispositivo Android, más allá que una simple aplicación web⁴⁰.

Al tratarse de una aplicación híbrida significa que emplea primordialmente tecnologías tales como JavaScript, HTML y CSS. Este tri-conjugado de tecnologías ha tenido un auge vigoroso por su capacidad para producir soluciones digitales sencillas y de rápido desarrollo. Una forma simple de entender cada una de estas tecnologías se visualiza en la siguiente figura.

⁴⁰ IONIC FRAMEWORK. “Descripción general de la documentación de Ionic, visión general”. [En línea]. [consultado el 21/01/2021] Disponible en: <https://ionicframework.com/docs/v1/overview/#download>

Figura 22. Explicación didáctica de las tecnologías HTML, CSS y JavaScript



Fuente: Adaptado de Tomek Rudzki, ONELY (2020).

Se habla de una combinación ganadora por el producto final que es capaz de conseguirse dado que es multi funcional, aunque, siendo cada una de tecnología capaz de entregar una unidad funcional por sí misma, así:

- HTML se posiciona como el lenguaje de marcas de hipertexto, en él se define la información o el *contenido* del documento⁴¹. Esto incluye párrafos, texto, encabezados, imágenes, tablas (muy usadas en este proyecto), listas y hasta capas.
- JavaScript es el lenguaje que permite la interactividad, o bien, el comportamiento dinámico de la aplicación, tales como los efectos, la validación o la automatización de respuestas.
- CSS, u hojas de estilo cascada, es la joya de la corona en lo que respecta al diseño y el aspecto visual del aplicativo. Esto incluye la tipografía, la alineación, colores, fondos y estilo en general.

Considerando la naturaleza de la aplicación híbrida, quizá su único punto de mejora se ubique en el aspecto visual, puesto que al ser desarrollada con la misma tecnología que la de un formato web, un usuario avanzado notará que la apariencia será, visualmente, similar a la de estar navegando en un sitio web y

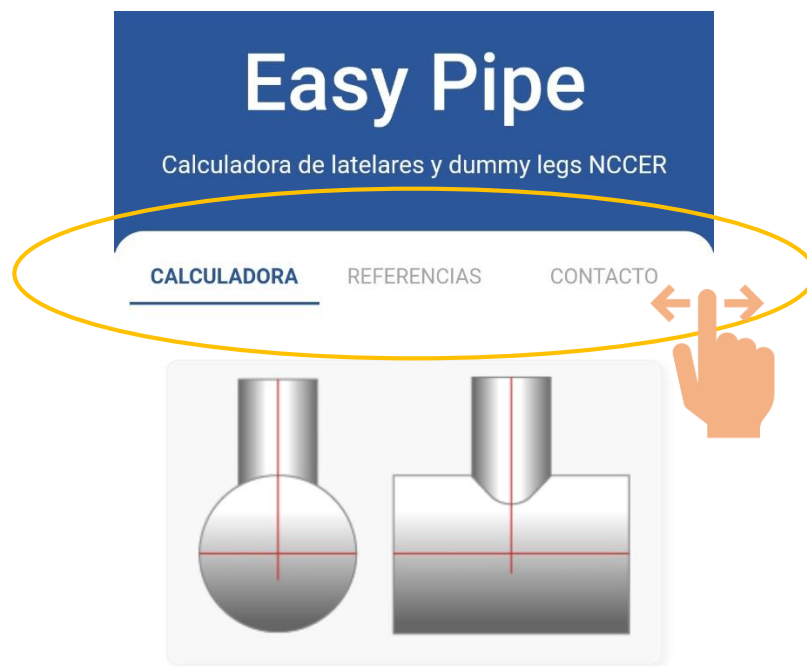
⁴¹ PLATZI. “Programación básica, ¿Qué es HTML, CSS, JS?”. [En línea]. Colombia. [Consultado el 22/01/2021]. Disponible en: <https://platzi.com/clases/1050-programacion-basica/5104-que-es-htmlcssjs/>

no en una aplicación desarrollada específicamente para su dispositivo Android como teléfono o tableta.

9.2 CARACTERÍSTICAS DE LA INTERFAZ

La interfaz pretende ser sencilla e interactiva. Cuenta solamente con tres (3) pestañas en el lobby de la app. Esas pestañas son: Calculadora, Referencia, Ayuda. El usuario puede deslizar entre pestañas para ubicar el contenido y las funcionalidades de cada una de ellas. Vea la siguiente figura.

Figura 23. Vista principal del home de Easy Pipe



Las funciones de cada una de las pestañas se describen la siguiente tabla:

Tabla 15. Funcionalidades de las pestañas principales de la App

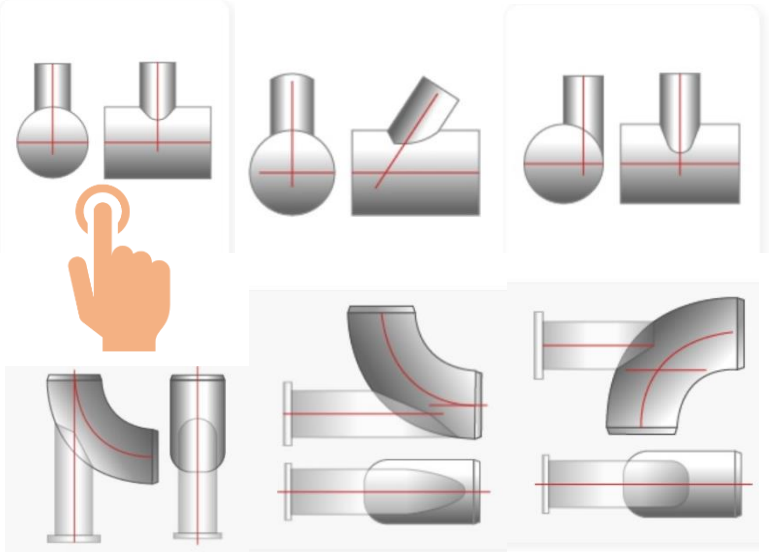
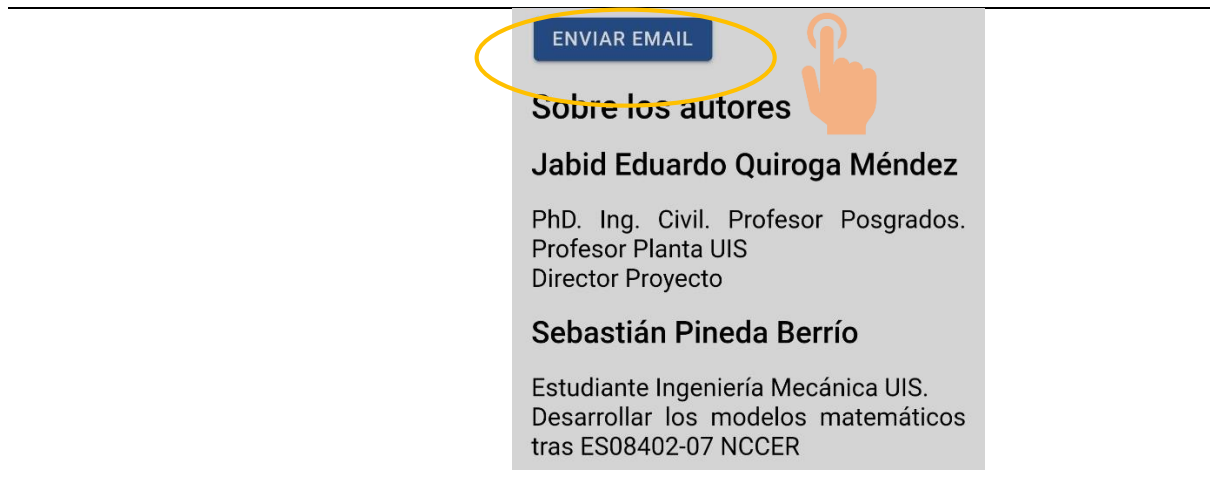
Sección o pestaña de la App	Intención/funcionalidad
Calculadora	<p data-bbox="475 580 1394 674">Contiene los seis (6) casos de ajuste en tubería. Cada imagen es un (1) caso de cálculo que le permite al usuario <i>calcular</i>.</p>  <p data-bbox="475 1267 1394 1576">Al ingresar a cada uno de los casos, la app muestra el nombre técnico del caso y muestra con detalle el tipo de ajuste que se calcula. El propósito de esta pestaña es la de contener todo el carácter operativo de la aplicación, que la de calcular ordenadas, imprimir resultados en pantalla o en PDF, así como el de imprimir PDF's con las plantillas en tamaño real.</p>

Tabla 15. Funcionalidades de las pestañas principales de la App (*continuación*)

Referencia	<div data-bbox="780 315 1182 801" data-label="Image"> </div> <p>Contiene breves referencias al estándar ASME B16.9-2001 y ASME B36-10M que constituye, básicamente, las dimensiones y datos esenciales que puede necesitar el tubero para su referencia. También se puede consultar el procedimiento completo para la manufactura de los laterales y dummy legs por si el tubero ya tiene impreso una plantilla o un PDF con las ordenadas para el injerto que desea construir. El propósito de esta pestaña es el de servir como una fuente rápida que le guíe al usuario para manufacturar los casos que está calculando o ya calculó. La información está adaptada directamente de NCCER.</p>
Contacto	<p>Contiene referencias sobre los autores: el desarrollador y el profesor director. Tiene activo un comando para solicitar ayuda por medio de la aplicación de correo electrónico que tenga por defecto el dispositivo Android. El usuario solo debe escribir su solicitud y presionar enviar para notificar al desarrollador sobre alguna novedad, inquietud o inconveniente.</p>

Tabla 15. Funcionalidades de las pestañas principales de la App (*continuación*)

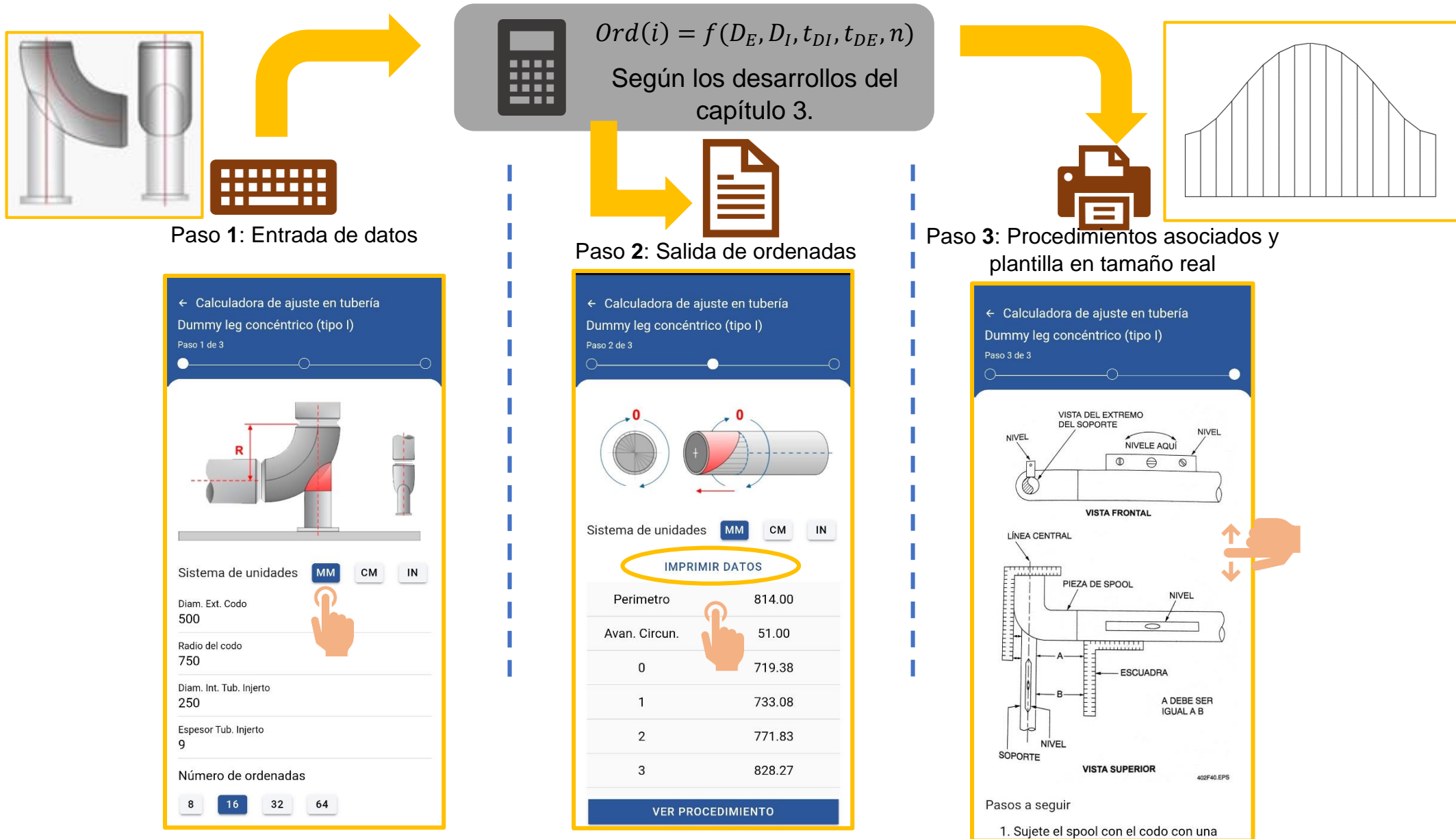


Una vez el usuario seleccione cualquiera de los casos de cálculo encontrará una interfaz que comparte similitud con los demás en su funcionamiento, dado que cuenta con tres (3) sencillos paso. Esos pasos son:

1. Paso 1: Entrada de datos
2. Paso 2: Salida de ordenadas
3. Paso 3: Procedimientos asociados e impresión plantilla en tamaño real

Una interpretación visual y rápida se muestra en la siguiente figura

Figura 24. Esquema de tres pasos para los casos de cálculo en la App.



La siguiente tabla resume las capacidades y funcionalidades de cada uno de los pasos mostrados en la figura anterior.

Tabla 16. Funcionamiento de los pasos para los casos de cálculo.

Paso #	Descripción
1	En este paso se recogen los datos de entrada de las tuberías asociadas. La entrada de datos es “case-sensitive” según la manufactura, es decir que cada uno de los casos pedirá datos precisos para calcular. La mayoría de todos los datos de ingresos se pueden obtener midiendo directamente las tuberías, o bien, consultando las dimensiones en los estándares ASME. El paso 1 incluye una funcionalidad que permite seleccionar el sistema de unidades de preferencia del usuario, así como el número de ordenadas que el tubero desea calcular.
2	En este paso se calculan e imprimen las “n” ordenadas que haya definido el usuario. De igual manera, el output puede alternarse en su sistema de unidades, brindando mayor versatilidad al operador para tener el resultado en un sistema de unidades distinto al de su ingreso. Incluye una funcionalidad para imprimir en PDF las ordenadas que se están mostrando en pantalla.
3	Muestra el procedimiento asociado para el caso de manufactura en cuestión, de tal forma que le permite al usuario asegurar la correcta utilización de las ordenadas que produce la App. Adicionalmente, permite imprimir en tamaño real la plantilla del tubo injerto.

9.3 DESCRIPCIÓN DE LOS BLOQUES DE PROGRAMACIÓN

Para lograr el agregado de funciones que la aplicación puede ofrecer, en su programación cuenta con bloques de funciones que fueron escritos de forma independiente, donde cada una desempeña una característica específica. Estos bloques son los que encontrará en el estudio de desarrollo de la App SDK de Ionic, si desea inspeccionar la fuente. Refiérase a la siguiente tabla.

Tabla 17. Descripción de bloques de programación de la App

NOMBRE BLOQUE	FUNCIÓN	NOMBRE BLOQUE	FUNCIÓN
<i>Calculator-menu</i>	Es el menú principal con la función activa de seleccionar casos de cálculo. Permite asociar imágenes de los casos de cálculo a la respuesta de cargar el módulo de cálculo seleccionado.	<i>Units-selector</i>	Este componente se encarga de refrescar los vectores tanto de ingreso como de salía en caso de presentarse una variación en la pestaña del sistema de unidades. Corrige y convierte automáticamente los datos.
<i>Model-input</i>	Comprende las cajas para recibir la información del usuario, y su respectiva leyenda para identificar el dato que se quiere recoger. Guarda los resultados en un vector de entrada.	<i>Table-results</i>	Se encarga de presentar en una tabla de tamaño nx2 los resultados de las ordenadas. El tamaño de esta tabla no es estático por lo que esta función distribuye el espacio según el número de ordenadas seleccionadas.
<i>Case1-steps</i> ... <i>Case6-steps</i>	Contiene el algoritmo de cálculo para cada uno de los seis (6) casos.	<i>Tabs</i>	Contiene la función de desplazarse en las pestañas principales por medio de deslizamiento con un dedo. Es un comando con un resultado gráfico.

Tabla 17. Descripción de bloques de programación de la App (*continuación*)

<i>Progress-step</i>	Es la función que permite crear el esquema de 3 pasos de la sección 5.2 del libro, guarda la memoria de resultados tanto en el input como el output.	<i>Ordenadas-selector</i>	Característica en desarrollo. Permite seleccionar dimensiones estandarizadas. A priori, dificultades con el mecanismo de conversión de unidades y la gestión de los datos en memoria.
<i>Draw-input</i>	Contiene las funciones y la programación para graficar en un plano 2D las ordenadas que se calculan.	<i>References</i>	Incluye bibliografía contextualizada útil para el usuario.
<i>Test-pdf</i>	Contiene todo lo relacionado en imprimir en PDF los resultados tanto en ordenadas como la plantilla.	<i>Contact</i>	Comprende toda la pestaña de contacto, la información sobre los autores y la funcionalidad de enviar un email.

9.4 VALIDACIÓN DE RESULTADOS DE LA APP Y SU VALOR AGREGADO

El aplicativo para Android que se entrega al lector fue comprobado numéricamente para numerosas combinaciones y demuestra replicar los resultados que se presentan las secciones 8.2.2 y 8.2.4 de los cálculos. Este hecho indica que la formulación matemática se valida correctamente en la App y reproduce con exactitud los resultados esperados de dichos desarrollos matemáticos.

Más allá de los resultados tabulados por Pipe Fitters, los desarrollos matemáticos que la App incluye se pueden alimentar con valores de entrada diversos, eliminando virtualmente la barrera de combinaciones de pares de tuberías limitados, y liberando el pensamiento del tubero de una caja cerrada al tratarse de casos restringidos a los que previamente, siendo este el valor agregado de la solución digital. Esta circunstancia permite añadir cálculos de laterales y dummy legs para tuberías con cédulas distintas a las STD y XS, expandiendo el campo de aplicación de la herramienta por ejemplo a industrias como la alimentaria que utilizan cédulas de menor tamaño.

Si bien la herramienta libera la imaginación en términos de combinaciones, evidentemente algunas combinaciones no resultarán técnicamente viables, pese a que se puedan calcular. Esto es así puesto que las necesidades de campo posiblemente no requieran de combinaciones excéntricas o tan complejas de pares de tuberías. No obstante, se recalca que se deja libre esta puerta con esta aplicación con la advertencia, desde la programación, que los casos que produzcan resultados inválidos no serán calculados (como por ejemplo, pretender introducir un injerto más grande que el tubo base, caso que no es posible por sentido común).

Para encontrar un entrenamiento básico en el manejo de la aplicación, consulte el manual de usuario disponible en Anexos.

10. CONCLUSIONES

Las condiciones operativas de empresas tales como Ecopetrol S.A., dentro del marco de confidencialidad y productividad al interior de la compañía, demuestran que indudablemente existen labores de mantenimiento que son susceptibles de mejoras en cuanto al aprovechamiento de recursos y la optimización del tiempo se refiere, en especial, para tareas de fabricación y montaje de laterales y dummy leg.

Tras la revisión bibliográfica realizada, se encontró que la medición de la productividad suele tratarse de una tarea compleja tanto por la disponibilidad de la información, así como por la forma de medirla, que cambian según las condiciones particulares de la producción, puesto que no siempre se realiza la misma tarea operativa, y se pueden presentar variaciones circunstanciales que afectan los resultados de las mediciones.

Identificada la oportunidad de mejora para los procesos de trazado y definición de geometrías de laterales y dummy legs, en especial los laterales concéntricos inclinados a cualquier ángulo, y los dummy legs de los tipos I, II y III, se revisaron los procedimientos que sirven como insumo para las tareas de manufacturas correspondientes, comprendidas en su totalidad en el estándar ES08402-07 de NCCER. Una vez analizado, se derivaron los modelos matemáticos que definen las geometrías de injertos de una forma genérica, en función de las dimensiones de las tuberías de trabajado, así como el tipo de trabajo deseado.

Los desarrollos matemáticos logrados se validaron correctamente (no presentan discontinuidades ni valores atípicos) y se le compararon con los resultados tabulados en el mismo estándar, encontrando un error medio absoluto (MAPE) máximo del 1%, para la más crítica de todas las tabulaciones. Este hecho confirma la precisión de los modelos en replicar los resultados del estándar.

Así mismo, se encontraron que indicadores como la desviación absoluta media (MAD) y el error cuadrático medio (MSE), señala que los errores que se presentan son atribuibles a desviaciones por cuenta de la aproximación a la resolución de la escala del estándar (pulgadas, y pasos de 1/16”), puesto que no se observaron valores atípicos $MSE \approx 0$.

Una vez confirmadas la utilidad y veracidad de los modelos matemáticos, se desarrolló un aplicativo en Android diseñado en la SDK de Ionic, con el propósito de reproducir digitalmente la solución encontrada, acercándola al público objetivo a través de una interfaz práctica y sencilla.

BIBLIOGRAFÍA

AAA DRAFTING. “Dummy leg drafting and development”. [sitio web]. EE.UU. [Consultado: 08 de marzo de 2020]. Disponible en: <https://www.aadrafting.com/pneumatics/dummy-leg.html>

ANDREWS, P. “Case Study 2: Building Human Capacity in Saudi Arabia: The impact of Government Initiatives on the Oil and Gas Workforce”. Education and Training for the Oil and Gas Industry. Volumen: 2. 2015. P. 17-32.

BLOCKLAYER. “Pipe notching calculator”. [sitio web]. EE.UU. [Consultado: 08 de marzo de 2020]. Disponible en: <https://www.blocklayer.com/pipe-notching.aspx>

CITIL, S; AYAZ, Y; TEMIZ, S; AYDIN, M. “Mechanical behaviour of adhesively repaired pipes subject to internal pressure”. International Journal of Adhesion and Adhesives. Volumen: 75. junio 2017. P.88-95.

DÍAZ, O. “Ecopetrol entregó Centro de Entrenamiento”. Gerente General de refinería Barrancabermeja. Conferencia instalaciones SENA. Barrancabermeja, 27 abril de 2017.

ECOPETROL. “Quiénes Somos” [sitio web]. 2020. Colombia. [Consultado: 02 de febrero de 2020]. Disponible en: <https://nuevoportal.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/innovacion-tecnologia/quienes-somos>

ECOPETROL. “Reporte Integrado de Gestión sostenible 2018. De todos para todos”. Ecopetrol en cifras. [en línea]. Colombia. 2019. p. 12. [Consultado: 19 de enero de 2020]. Disponible en:

<https://www.ecopetrol.com.co/wps/wcm/connect/bd3d084e-4670-415b-869a-7e279847e939/1reporte-integrado-gestion-sostenible->

ECOPETROL. Sala de Prensa [sitio web]. Colombia. [Consultado: 04 de marzo de 2020]. Disponible en: ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/sala-de-prensa/noticias/Noticias%202016/Noticias%202016/Certificacion-internacional-aporta-movilidad-laboral-trabajadores-barranquenos

EL FRENTE. “132 trabajadores culminaron programa de formación en norma internacional NCCER”. Nota periodística. [consultado el 02 de febrero 2020]. Disponible en: <http://www.elfrente.com.co/web/index.php?ecsmodule=frmstasection&ida=58&idb=107&idc=31802>

ESPAENET. “Marking material” [medio electrónico]. Inventor: MATSUDA Shohei. Patente ID: JP6227746B2. Japón. 2017.

GARCÍA, C. Informe de aportes de Ecopetrol a Barrancabermeja. En: Conferencia Casa de Huéspedes, Barrancabermeja, 11 de septiembre de 2019.

GRAVES, W.V. “The Pipe Fitters Blue Book”, [soporte físico]. Baytown, Texas. GRAVES PUBLISHING COMPANY. 1973, p.28. 90° Saddle ON, Standard Weight Pipe. Pipe Marked in Eighths.

HILL, MacGraw. “Prefabrication and Modularization: Increasing Productivity in Construction Industry”. En: McGraw-Hill, Bedford, Massachussets, 2011.

IONIC FRAMEWORK. “Descripción general de la documentación de Ionic, visión general”. [En línea]. [consultado el 21/01/2021] Disponible en: <https://ionicframework.com/docs/v1/overview/#download>

JAE-JUN Kim, IBBS William. "Work-Package-process Model for piping construction". American Society of Civil Engineers (ASCE). Engineering Management. 1995, p. 381-387.

MALDONADO PEREA, Mauricio. "Planeación y Programación para Mantenimiento". Refinería de Barrancabermeja, 2019.

METALGEEK. "Tube Coping Calculator". [sitio web]. EE.UU. [Consultado: 08 de marzo de 2020]. Disponible en: <http://metalgeek.com/static/cope.cgi>

MINITAB. "Interpretar todos los estadísticos". Soporte de Minitab. [en línea]. México [consultado el 15 de enero de 2021]. Disponible en: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/time-series/how-to/moving-average/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/#mape>

MUBARAK AL-Alawia, YASSER Mohamedb, AHMED Bouferguene. "Application of industrial pipelines data generator in the experimental analysis: Pipe spooling optimization problem definition, formulation, and testing" Advanced Engineering Informatics, enero, 2020, Volumen 43, Serie 101007, p.1.

NCCER. "Instalación de tuberías: nivel cuatro". Tercera edición. Alachua, Florida, EEUU. Pearson, Editorial 2014.

NCCER. "Partners". [sitio web]. EE.UU., [Consultado: 04 de marzo de 2020]. Disponible en: <https://www.nccer.org/about-us/partners>.

PEREZ de NUCCI, Armando. "Ética y medio ambiente: el desafío de fines del siglo XX". 1993. Recuperado de <http://www.desarrollodetucuman.org/blog/etica-y-medio-ambiente-el-desafio-del-siglo-xxi/>

PIPEFITTER. “Pipe fitter’s blue book” [sitio web] Pipefitter.com. EE.UU., [Consultado: 16 de febrero de 2020]. Disponible en: <https://pipefitter.com/store/pipe-fitters-blue-book.html?xid=Nibjpw9Oih8EolAhiWkYGVZPmruuhCRd#product-details-tab-specification>

PLATZI. “Programación básica, ¿Qué es HTML, CSS, JS?”. [En línea]. Colombia. [Consultado el 22/01/2021]. Disponible en: <https://platzi.com/clases/1050-programacion-basica/5104-que-es-htmlcssjs/>

PLAYFOOT, J; AUGUSTS, S; ANDREWS, P. “The Legacy of Education and Training”. Education and Training for the Oil and Gas Industry. Volumen: 3. 2017. P. 93-109.

SENA. Cartilla Informativa para el desarrollo de programas de certificación internacional NCCER. [Consultado el 02 de julio de 2020]. Disponible en: issuu.com/salomepagana/docs/cartilla_nccer

TOMMELEIN, I.D. “Process benefits from use of standard products – Simulation experiments using the pipe spool model”. Conferencia Internacional Grupo de Lean Construction. Santiago de Chile. 2006.

USPTO. “Marking template for marking pipe, tubing and bars prior to vending” [medio electrónico]. Inventor: MARTIN Thomas. Patente ID: US9937617B2. Estados Unidos. 2017.

VANGUARDIA. “Paradas de planta de la refinería, con mano de obra certificada”. Nota periodística. Septiembre de 2015. Consultado el 02 de julio de 2020. Disponible en:

<https://www.vanguardia.com/santander/barrancabermeja/paradas-de-planta-de-la-refineria-con-mano-de-obra-certificada-JCVL328881>

WANG P, Abourizk S. "Large Scale simulation modeling system for industrial construction". Canadian Journal Civil Engineering. 2009. Edición 36. P 1517-1529.

Tablas de Validación de Resultados

Anexo A. Injerto a 90° STD, concéntrico, 8 ordenadas

Pipe Fitters (libro), Boca de pescado, 8 divisiones, Tubería SCH STD															
X	Cabezal														
	NPS	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	Ord	
Injerto	3	0,375	0,25	0,1875	0,125	0,125	0,0625	0,0625	0,0625	0,0625	0,0625	0,0625	0,0625	0,0625	1
		0,9375	0,625	0,375	0,3125	0,25	0,1875	0,1875	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	2
	4	0,5	0,3125	0,25	0,1875	0,1875	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,0625	1	
		1,25	0,6875	0,5	0,375	0,3125	0,3125	0,25	0,25	0,1875	0,1875	0,1875	0,1875	2	
	6	0,8125	0,5625	0,4375	0,375	0,3125	0,3125	0,25	0,25	0,1875	0,1875	0,1875	1		
		2	1,25	0,9375	0,75	0,6875	0,625	0,5	0,5	0,4375	0,375	0,375	2		
	8	1,0625	0,8125	0,6875	0,625	0,5	0,4375	0,4375	0,375	0,3125	1				
		2,6875	1,75	1,375	1,25	1,0625	0,9375	0,8125	0,75	0,6875	2				
	10	1,3125	1,0625	0,9375	0,8125	0,75	0,625	0,5625	0,5625	1					
		3,4375	2,4375	2,125	1,75	1,5	1,375	1,1875	1,125	2					

Fórmula (modelo matemático), Boca de pescado, 8 divisiones, Tubería SCH STD														
X	Cabezal													
	NPS	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	Ord
Injerto	3	0,377	0,279	0,183	0,139	0,111	0,093	0,085	0,074	0,066	0,059	0,054	0,049	1
		0,908	0,604	0,377	0,282	0,224	0,187	0,170	0,148	0,132	0,118	0,107	0,098	2
	4	0,507	0,321	0,242	0,192	0,161	0,146	0,128	0,113	0,102	0,092	0,085	1	
		1,245	0,682	0,499	0,391	0,326	0,296	0,257	0,228	0,205	0,186	0,170	2	
	6	0,788	0,571	0,446	0,371	0,337	0,293	0,259	0,233	0,211	0,193	1		
		1,980	1,246	0,937	0,767	0,691	0,597	0,526	0,471	0,426	0,389	2		
	8	1,051	0,800	0,658	0,594	0,514	0,454	0,406	0,368	0,336	1			
		2,677	1,774	1,403	1,249	1,066	0,933	0,831	0,749	0,683	2			
	10	1,333	1,075	0,963	0,827	0,727	0,649	0,586	0,535	1				
		3,428	2,433	2,111	1,763	1,523	1,346	1,207	1,096	2				

Residual Absoluto, Boca de pescado, 8 divisiones, Tubería SCH STD														
X	Cabezal													
COUNT	100	SUM	1,542	MAD	0,015									
	NPS	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	Ord
Injerto	3	0,002	0,029	0,005	0,014	0,014	0,030	0,022	0,011	0,003	0,003	0,009	0,013	1
		0,030	0,021	0,002	0,030	0,026	0,000	0,017	0,023	0,007	0,007	0,018	0,027	2
	4	0,007	0,009	0,008	0,004	0,027	0,021	0,003	0,012	0,023	0,033	0,022	1	
		0,005	0,006	0,001	0,016	0,014	0,017	0,007	0,022	0,017	0,002	0,017	2	
	6	0,025	0,008	0,009	0,004	0,024	0,020	0,009	0,017	0,024	0,006	1		
		0,020	0,004	0,000	0,017	0,003	0,028	0,026	0,029	0,011	0,014	2		
	8	0,011	0,012	0,029	0,031	0,014	0,016	0,031	0,007	0,024	1			
		0,010	0,024	0,028	0,001	0,004	0,004	0,018	0,001	0,005	2			
	10	0,020	0,012	0,025	0,015	0,023	0,024	0,024	0,028	1				
		0,009	0,005	0,014	0,013	0,023	0,029	0,020	0,029	2				

Residual Cuadrado, Boca de pescado, 8 divisiones, Tubería SCH STD														
X	Cabezal													
COUNT	100	SUM	0,033	MSE	0,0003	RMSE	0,018							
	NPS	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	Ord
Injerto	3	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1
		0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	2
	4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	1
		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2
	6	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	1
		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	2
	8	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	1
		0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2
	10	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	1
		0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	2

Error Relativo, Boca de pescado, 8 divisiones, Tubería SCH STD														
X	Cabezal													
Min Err	0%	Max Err	3%	Err Prom	1%	MAPE	1%							
	NPS	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	Ord
Injerto	3	0%	2%	0%	1%	1%	3%	2%	1%	0%	0%	1%	1%	1
		2%	1%	0%	2%	2%	0%	1%	2%	1%	1%	2%	2%	2
	4	0%	1%	1%	0%	2%	2%	0%	1%	2%	3%	2%	1	
		0%	0%	0%	1%	1%	1%	1%	2%	1%	0%	1%	2	
	6	1%	1%	1%	0%	2%	2%	1%	1%	2%	0%	1		
		1%	0%	0%	1%	0%	2%	2%	2%	1%	1%	2		
	8	1%	1%	2%	2%	1%	1%	2%	1%	2%	1			
		0%	1%	2%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	2			
	10	2%	1%	1%	1%	1%	1%	2%	2%	1				

						0%	0%	1%	1%	2%	2%	2%	3%	2
--	--	--	--	--	--	----	----	----	----	----	----	----	----	---

TABLAS DE VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Anexo C. Injerto a 90° XS, concéntrico, 8 ordenadas

Boca de pescado, 8 divisiones, Tubería SCH XS															
X	Cabezal														
	NPS	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	Ord	
Injerto	3	0,3125	0,25	0,1875	0,125	0,125	0,0625	0,0625	0,0625	0,0625	0,0625	0,0625	0,0625	0,0625	1
		0,75	0,5	0,3125	0,25	0,1875	0,1875	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,0625	2
	4	0,4375	0,3125	0,1875	0,1875	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,0625	0,0625	0,0625	0,0625	1
		1,0625	0,625	0,4375	0,375	0,3125	0,25	0,25	0,1875	0,1875	0,1875	0,1875	0,125	0,125	2
	6	0,6875	0,5	0,375	0,3125	0,3125	0,25	0,25	0,1875	0,1875	0,1875	0,1875	0,1875	0,1875	1
		1,6875	1,125	0,8125	0,6875	0,625	0,5625	0,5	0,4375	0,375	0,375	0,375	0,375	0,375	2
	8	0,9375	0,75	0,625	0,5625	0,4375	0,4375	0,375	0,3125	0,3125	0,3125	0,3125	0,3125	0,3125	1
		2,3125	1,5625	1,25	1,125	0,9375	0,875	0,75	0,6875	0,625	0,625	0,625	0,625	0,625	2
	10	1,25	1	0,9375	0,75	0,6875	0,625	0,5625	0,5	0,5625	0,5	0,5625	0,5	0,5	1
		3,125	2,25	2	1,6875	1,4375	1,25	1,125	1,0625	1,0625	1,0625	1,0625	1,0625	1,0625	2

Boca de pescado, 8 divisiones, Tubería SCH XS															
X	Cabezal														
	NPS	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	Ord	
Injerto	3	0,332	0,247	0,163	0,124	0,099	0,083	0,075	0,066	0,059	0,053	0,048	0,044	0,044	1
		0,770	0,530	0,334	0,251	0,199	0,167	0,152	0,133	0,118	0,106	0,096	0,088	0,088	2
	4	0,452	0,289	0,218	0,173	0,145	0,132	0,115	0,102	0,092	0,083	0,076	0,076	0,076	1
		1,066	0,608	0,448	0,352	0,294	0,266	0,232	0,206	0,185	0,168	0,153	0,153	0,153	2
	6	0,700	0,511	0,401	0,334	0,303	0,264	0,234	0,210	0,190	0,174	0,174	0,174	0,174	1
		1,677	1,103	0,837	0,688	0,620	0,537	0,473	0,424	0,384	0,351	0,351	0,351	0,351	2
	8	0,946	0,725	0,598	0,540	0,468	0,413	0,370	0,335	0,307	0,307	0,307	0,307	0,307	1
		2,297	1,586	1,266	1,129	0,967	0,847	0,755	0,682	0,622	0,622	0,622	0,622	0,622	2
	10	1,251	1,012	0,908	0,781	0,686	0,613	0,554	0,506	0,506	0,506	0,506	0,506	0,506	1
		3,111	2,267	1,977	1,657	1,435	1,269	1,139	1,035	1,035	1,035	1,035	1,035	1,035	2

Residual absoluto, Boca de pescado, 8 divisiones, Tubería SCH XS															
X	Cabezal														
COUNT	100	SUM	1,624	MAD	0,0162										
Injerto	3	0,019	0,003	0,025	0,001	0,026	0,020	0,013	0,003	0,004	0,010	0,015	0,019	0,019	1
		0,020	0,030	0,022	0,001	0,012	0,020	0,027	0,008	0,007	0,019	0,029	0,025	0,025	2
	4	0,015	0,024	0,030	0,015	0,020	0,007	0,010	0,023	0,029	0,021	0,014	0,014	0,014	1
		0,003	0,017	0,010	0,023	0,019	0,016	0,018	0,018	0,003	0,020	0,028	0,028	0,028	2
	6	0,013	0,011	0,026	0,022	0,010	0,014	0,016	0,022	0,003	0,013	0,013	0,013	0,013	1
		0,011	0,022	0,025	0,000	0,005	0,026	0,027	0,014	0,009	0,024	0,024	0,024	0,024	2
	8	0,009	0,025	0,027	0,023	0,030	0,024	0,005	0,023	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	1
		0,016	0,024	0,016	0,004	0,029	0,028	0,005	0,006	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	2
	10	0,001	0,012	0,030	0,031	0,001	0,012	0,008	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	1
		0,014	0,017	0,023	0,031	0,003	0,019	0,014	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	2

Residual Cuadrado, Boca de pescado, 8 divisiones, Tubería SCH XS															
X	Cabezal														
COUNT	100	SUM	0,034	MSE	0,0003427	RMSE	0,019								
Injerto	3	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1
		0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	2
	4	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	1
		0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	2
	6	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1
		0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	2
	8	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	1
		0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2
	10	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1
		0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	2

Relativo, Boca de pescado, 8 divisiones, Tubería SCH XS															
X	Cabezal														
Min Err	0%	Max Err	3%	Err Prom	1%	MAPE	1%								
	NPS	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	Ord	
Injerto	3	1%	0%	2%	0%	2%	2%	1%	0%	0%	1%	1%	2%	1	
		1%	2%	2%	0%	1%	2%	2%	1%	1%	2%	3%	2%	2	
	4		1%	2%	3%	1%	2%	1%	1%	2%	3%	2%	1%	1	
			0%	1%	1%	2%	1%	1%	1%	2%	0%	2%	3%	2	
	6			1%	1%	2%	2%	1%	1%	1%	2%	0%	1%	1	
				1%	2%	1%	0%	0%	2%	2%	1%	1%	2%	2	
	8				0%	1%	2%	1%	2%	2%	0%	2%	0%	1	
					1%	2%	1%	0%	2%	1%	0%	0%	0%	2	
	10					0%	1%	2%	2%	0%	1%	1%	0%	1	
						0%	1%	1%	2%	0%	2%	1%	3%	2	

TABLAS DE VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Anexo D. Injerto a 90° XS, concéntrico, 16 ordenadas

Boca de pescado, 16 divisiones, Tubería SCH XS										Formula, Boca de pescado, 16 divisiones, Tubería SCH XS										Residual Absoluto, Boca de pescado, 16 divisiones, Tubería SCH XS										Residual Cuadrado, Boca de pescado, 16 divisiones, Tubería SCH XS										Error relativo, Boca de pescado, 16 divisiones, Tubería SCH XS																			
X	Cabezal									X	Cabezal									X	Cabezal									X	Cabezal									X	Cabezal																		
	NPS	12	14	16	18	20	22	24	Ord		NPS	12	14	16	18	20	22	24	Ord		COUNT	112	SUM	1,747	MAD	0,016								COUNT	112	SUM	0,036	MSE	0,0003		RMSE	0,018							0%	Max Err	2%	Err prom	0%	MAPE	1%				
Injerto	12	0,4375	0,375	0,3125	0,3125	0,25	0,25	0,1875	1	12	0,410	0,371	0,322	0,285	0,256	0,232	0,212	1	COUNT	112	0,028	0,004	0,010	0,027	0,006	0,018	0,025	1	COUNT	112	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	1	NPS	12	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	2	0%	Max Err	2%	0%	1%	2%	0%	1%	2%	1	Ord
		1,5625	1,375	1,1875	1	0,875	0,8125	0,75	2		1,539	1,366	1,163	1,016	0,904	0,815	0,742	2			0,023	0,009	0,024	0,016	0,029	0,002	0,008	2			0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	3			1%	1%	2%	2%	2%	0%	0%	2											
		3,0625	2,5625	2,125	1,8125	1,625	1,4375	1,3125	3		3,031	2,580	2,123	1,821	1,601	1,432	1,298	3			0,031	0,017	0,002	0,008	0,024	0,005	0,015	3			0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	4			1%	1%	0%	0%	1%	0%	1%	3											
		3,875	3,1875	2,5625	2,1875	1,9375	1,6875	1,5625	4		3,900	3,194	2,570	2,182	1,908	1,700	1,537	4			0,025	0,007	0,008	0,005	0,030	0,013	0,026	4			0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	1			1%	0%	0%	0%	2%	1%	2%	4											
	14	0,4375	0,375	0,375	0,3125	0,3125	0,25	1	14	0,457	0,397	0,351	0,314	0,285	0,261	1	COUNT	112	0,019	0,022	0,024	0,002	0,028	0,011	1	COUNT	112	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	1	NPS	12	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	2	0%	Max Err	1%	1%	2%	2%	0%	1%	2%	3	Ord			
		1,75	1,4375	1,25	1,125	1	0,9375	2		1,720	1,452	1,262	1,119	1,006	0,915	2			0,030	0,015	0,012	0,006	0,006	0,022	2			0,001	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	3			1%	0%	0%	0%	2%	1%	2%	4														
		3,375	2,6875	2,3125	2	1,8125	1,625	3		3,403	2,714	2,296	2,004	1,784	1,611	3			0,028	0,027	0,016	0,004	0,029	0,014	3			0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,001	4			1%	1%	1%	1%	0%	2%	1%	3														
		4,375	3,3125	2,75	2,375	2,125	1,9375	4		4,402	3,336	2,775	2,401	2,126	1,913	4			0,030	0,015	0,012	0,006	0,006	0,022	2			0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,001	1			1%	1%	1%	1%	0%	2%	1%	4														
	16	0,5625	0,5	0,4375	0,375	0,375	1	16	0,533	0,470	0,421	0,381	0,348	1	COUNT	112	0,010	0,022	0,022	0,012	0,015	0,015	2	COUNT	112	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2	NPS	12	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3	0%	Max Err	2%	2%	1%	1%	0%	2%	1%	2	Ord					
		2	1,75	1,5	1,375	1,25	2		2,010	1,728	1,522	1,363	1,235	2			0,027	0,024	0,025	0,026	0,001	0,025	4			0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	3			1%	1%	1%	1%	0%	1%	4																	
		4	3,25	2,8125	2,4375	2,1875	3		4,002	3,257	2,790	2,457	2,203	3			0,029	0,025	0,011	0,016	0,008	0,012	1			0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	4			1%	1%	1%	1%	0%	2%	1%	3																
		5,1875	4	3,375	2,9375	2,625	4		5,216	4,025	3,386	2,953	2,633	4			0,010	0,022	0,022	0,012	0,015	0,015	2			0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	1			1%	1%	1%	1%	0%	2%	1%	4																
	18	0,625	0,5625	0,5	0,4375	1	18	0,608	0,544	0,492	0,449	1	COUNT	112	0,002	0,007	0,023	0,019	0,015	0,015	3	COUNT	112	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1	NPS	12	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2	0%	Max Err	0%	0%	1%	1%	1%	1%	3	Ord								
		2,3125	2	1,8125	1,625	2		2,301	2,008	1,787	1,614	2			0,029	0,025	0,011	0,016	0,008	0,012	1			0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	3			1%	1%	1%	1%	0%	1%	1%	2																		
		4,625	3,8125	3,3125	2,9375	3		4,603	3,809	3,297	2,926	3			0,017	0,019	0,008	0,012	0,012	0,012	1			0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	4			1%	1%	0%	0%	1%	0%	0%	4																		
		6,0625	4,75	4	3,5	4		6,042	4,732	4,018	3,529	4			0,011	0,008	0,025	0,011	0,011	0,011	2			0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1			1%	1%	1%	1%	0%	1%	1%	1																		
	20	0,6875	0,625	0,5625	1	20	0,684	0,618	0,564	1	COUNT	112	0,022	0,004	0,015	0,011	0,011	0,011	3	COUNT	112	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	1	NPS	12	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2	0%	Max Err	0%	0%	0%	0%	0%	0%	4	Ord										
		2,5625	2,3125	2,0625	2		2,592	2,289	2,056	2			0,021	0,018	0,018	0,029	0,029	0,029	4			0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3			0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	3																				
		5,1875	4,375	3,8125	3		5,208	4,369	3,817	3			0,003	0,007	0,001	0,001	0,001	0,001	1			0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	4			0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	4																				
		6,875	5,4375	4,6875	4		6,878	5,455	4,669	4			0,030	0,023	0,006	0,006	0,006	0,006	2			0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1			1%	1%	1%	1%	0%	0%	0%	2																				
	22	0,75	0,6875	1	22	0,760	0,693	1	COUNT	112	0,020	0,006	0,004	0,004	0,004	0,004	3	COUNT	112	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2	NPS	12	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3	0%	Max Err	0%	0%	0%	0%	0%	0%	4	Ord												
		2,875	2,5625	2		2,884	2,573	2			0,003	0,017	0,019	0,019	0,019	0,019	4			0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1			0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	3																						
		5,8125	4,9375	3		5,814	4,936	3			0,010	0,005	0,010	0,010	0,010	0,010	1			0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2			0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	4																						
		7,75	6,1875	4		7,721	6,191	4			0,009	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	2			0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3			1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1																						
	24	0,8125	1	24	0,836	1	COUNT	112	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	3	COUNT	112	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	4	NPS	12	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1	0%	Max Err	0%	0%	0%	0%	0%	0%	4	Ord														
		3,1875	2		3,175	2			0,029	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003			4	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000			2	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%											2													
		6,4375	3		6,422	3			0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024			0,024	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000			0,000	3	0%	0%	0%	0%	0%	0%											0%	3												
		8,5625	4		8,572	4			0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012			0,012	2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000			0,000	4	0%	0%	0%	0%	0%	0%											0%	4												

TABLAS DE VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Fórmula, Boca de pescado excéntrico, 16 divisiones, Tubería SCH STD													
X	Cabezal												
	NPS	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	Ord
Injerto	3	0,263	0,000	0,100	0,363	0,714	0,971	1,425	1,920	2,450	3,007	3,587	0
		0,205	0,001	0,127	0,410	0,776	1,042	1,507	2,014	2,553	3,119	3,707	1
		0,083	0,026	0,224	0,561	0,971	1,260	1,760	2,297	2,865	3,457	4,070	2
		0,003	0,128	0,426	0,842	1,316	1,641	2,194	2,779	3,390	4,023	4,674	3
		0,052	0,358	0,768	1,275	1,826	2,196	2,814	3,458	4,123	4,807	5,506	4
		0,269	0,739	1,257	1,856	2,488	2,906	3,595	4,304	5,031	5,772	6,525	5
		0,632	1,239	1,851	2,531	3,240	3,704	4,463	5,237	6,024	6,822	7,629	6
		1,039	1,741	2,417	3,151	3,920	4,423	5,238	6,066	6,903	7,748	8,600	7
	1,245	1,980	2,677	3,428	4,221	4,740	5,579	6,429	7,287	8,152	9,024	8	
	4	0,152	0,000	0,091	0,313	0,500	0,855	1,264	1,714	2,199	2,713	0	
		0,108	0,002	0,122	0,365	0,564	0,935	1,357	1,820	2,316	2,840	1	
		0,025	0,036	0,236	0,538	0,768	1,184	1,646	2,145	2,674	3,228	2	
		0,009	0,172	0,483	0,871	1,148	1,631	2,153	2,707	3,286	3,887	3	
		0,161	0,480	0,913	1,401	1,734	2,299	2,894	3,515	4,157	4,816	4	
		0,525	0,989	1,541	2,131	2,524	3,177	3,852	4,547	5,258	5,983	5	
		1,075	1,661	2,317	3,003	3,454	4,192	4,946	5,715	6,495	7,286	6	
		1,675	2,345	3,072	3,834	4,332	5,141	5,962	6,793	7,632	8,479	7	
	1,980	2,677	3,428	4,221	4,740	5,579	6,429	7,287	8,152	9,024	8		
	6	0,532	0,105	0,000	0,022	0,154	0,372	0,655	0,990	1,366	0		
		0,414	0,064	0,002	0,045	0,203	0,444	0,746	1,098	1,490	1		
		0,166	0,003	0,053	0,151	0,384	0,687	1,044	1,444	1,880	2		
		0,005	0,062	0,261	0,436	0,774	1,167	1,604	2,076	2,578	3		
		0,108	0,377	0,733	0,992	1,450	1,948	2,481	3,040	3,623	4		
		0,556	1,011	1,517	1,861	2,441	3,050	3,684	4,338	5,009	5		
		1,317	1,925	2,566	2,989	3,685	4,402	5,135	5,882	6,641	6		
		2,200	2,915	3,663	4,151	4,946	5,754	6,572	7,400	8,235	7		
	2,677	3,428	4,221	4,740	5,579	6,429	7,287	8,152	9,024	8			
	8	0,896	0,316	0,133	0,008	0,023	0,136	0,322	0,567	0			
		0,708	0,225	0,080	0,000	0,050	0,192	0,402	0,668	1			
		0,311	0,052	0,003	0,041	0,184	0,404	0,682	1,007	2			
		0,024	0,018	0,088	0,283	0,553	0,882	1,258	1,670	3			
		0,098	0,325	0,515	0,873	1,285	1,738	2,226	2,742	4			
		0,642	1,071	1,371	1,888	2,440	3,021	3,625	4,250	5			
		1,615	2,216	2,615	3,276	3,960	4,662	5,380	6,112	6			
		2,778	3,513	3,993	4,775	5,571	6,379	7,196	8,021	7			
	3,428	4,221	4,740	5,579	6,429	7,287	8,152	9,024	8				
	10	1,427	0,878	0,367	0,109	0,008	0,017	0,108	0				
		1,140	0,682	0,258	0,057	0,000	0,044	0,166	1				
		0,533	0,271	0,054	0,000	0,058	0,197	0,400	2				
		0,068	0,007	0,030	0,162	0,371	0,640	0,958	3				
		0,077	0,189	0,439	0,758	1,129	1,541	1,988	4				
		0,702	0,957	1,408	1,901	2,428	2,983	3,562	5				
		1,892	2,267	2,893	3,544	4,216	4,906	5,611	6				
		3,363	3,835	4,604	5,389	6,185	6,992	7,807	7				
	4,221	4,740	5,579	6,429	7,287	8,152	9,024	8					
	12	2,516	1,302	0,657	0,286	0,086	0,006	0					
		2,019	1,025	0,486	0,186	0,038	0,000	1					
		1,007	0,440	0,147	0,019	0,007	0,080	2					
		0,202	0,028	0,006	0,089	0,249	0,471	3					
		0,028	0,167	0,391	0,680	1,020	1,400	4					
		0,639	1,027	1,465	1,941	2,450	2,986	5					
		1,969	2,562	3,183	3,827	4,491	5,171	6					
		3,691	4,448	5,221	6,007	6,804	7,610	7					
	4,740	5,579	6,429	7,287	8,152	9,024	8						
	14	2,311	1,279	0,680	0,318	0,111	0						
		1,854	0,999	0,499	0,206	0,052	1						
		0,899	0,410	0,143	0,021	0,004	2						
		0,149	0,016	0,011	0,098	0,256	3						
		0,063	0,225	0,461	0,753	1,091	4						
		0,824	1,226	1,672	2,152	2,661	5						
		2,371	2,974	3,601	4,249	4,914	6						
		4,354	5,120	5,900	6,691	7,491	7						
	5,579	6,429	7,287	8,152	9,024	8							
	16	2,908	1,732	1,020	0,561	0							
		2,332	1,366	0,771	0,393	1							
		1,144	0,593	0,263	0,081	2							
		0,207	0,042	0,000	0,049	3							
		0,056	0,202	0,417	0,686	4							
		0,898	1,293	1,728	2,195	5							
		2,664	3,265	3,888	4,530	6							
		4,965	5,734	6,516	7,308	7							
	6,429	7,287	8,152	9,024	8								
	18	3,530	2,219	1,400	0								
		2,828	1,760	1,077	1								
		1,398	0,792	0,407	2								
		0,268	0,077	0,004	3								
		0,050	0,183	0,381	4								
		0,972	1,361	1,787	5								
		2,957	3,556	4,176	6								
		5,577	6,349	7,132	7								
	7,287	8,152	9,024	8									
	20	4,173	2,734	0									
		3,338	2,177	1									
		1,657	1,004	2									
		0,332	0,119	3									
		0,046	0,168	4									
		1,047	1,431	5									
		3,250	3,848	6									
		6,189	6,964	7									
	8,152	9,024	8										
	22	4,833	0										
		3,859	1										
		1,921	2										
		0,398	3										
		0,042	4										
		1,122	5										

TABLAS DE VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Relativo, Boca de pescado excéntrico, 16 divisiones, Tubería SCH STD													
X	Header												
Min Err	0%	Max Err	3%	Err Prom	0%	MAPE	1%						
	NPS	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	Ord
Riser	3	1.0%	0.0%	2.2%	0.9%	1.6%	2.9%	0.9%	0.9%	0.5%	0.2%	0.7%	0
		1.5%	0.1%	0.2%	1.9%	1.5%	2.0%	0.5%	0.7%	0.4%	0.2%	0.5%	1
		1.9%	2.6%	2.1%	0.1%	2.9%	0.8%	0.6%	0.7%	0.4%	0.6%	0.2%	2
		0.3%	0.3%	0.8%	1.6%	0.3%	1.0%	0.3%	1.1%	0.4%	0.6%	0.3%	3
		1.0%	1.2%	1.0%	2.0%	0.7%	0.4%	0.0%	0.6%	0.0%	0.1%	0.1%	4
		1.5%	0.6%	0.6%	1.0%	0.5%	1.1%	0.8%	0.2%	0.6%	0.4%	0.4%	5
		0.4%	0.9%	1.3%	1.2%	0.3%	0.5%	0.6%	0.2%	0.4%	0.1%	0.1%	6
		2.2%	0.5%	0.8%	0.8%	0.5%	0.3%	0.2%	0.1%	0.4%	0.0%	0.3%	7
	0.4%	1.0%	0.4%	0.3%	0.7%	0.2%	0.3%	0.1%	0.3%	0.3%	0.3%	8	
	2.4%	0.0%	2.7%	0.1%	0.0%	1.1%	1.1%	1.6%	0.5%	0.9%			0
	1.5%	0.2%	0.3%	0.7%	0.1%	0.2%	1.3%	0.4%	0.2%	1.0%			1
	2.5%	2.5%	1.2%	1.6%	1.1%	0.3%	1.3%	0.9%	0.5%	0.7%			2
	0.9%	1.3%	1.1%	0.2%	2.1%	0.4%	1.3%	0.7%	0.8%	0.3%			3
	2.2%	1.3%	1.3%	1.9%	0.9%	0.6%	0.7%	0.4%	0.7%	0.1%			4
	1.7%	1.1%	1.4%	0.3%	1.0%	0.3%	0.6%	0.3%	0.2%	0.3%			5
	1.2%	1.6%	0.2%	0.1%	0.5%	0.1%	0.2%	0.5%	0.1%	0.4%			6
	0.8%	1.3%	0.3%	0.6%	0.5%	0.3%	0.4%	0.3%	0.1%	0.2%			7
	1.0%	0.4%	0.3%	0.7%	0.2%	0.3%	0.1%	0.3%	0.3%	0.3%			8
	2.0%	1.8%	2.2%	2.5%	0.2%	1.9%	1.0%	0.7%					0
	1.6%	0.1%	0.2%	1.7%	1.3%	0.4%	0.2%	2.4%	0.7%				1
	1.8%	0.3%	0.9%	2.4%	0.6%	0.0%	1.8%	0.5%	0.2%				2
	0.5%	0.0%	0.9%	0.1%	1.3%	1.7%	1.3%	0.7%	0.6%				3
	1.5%	0.1%	1.0%	0.8%	0.8%	0.6%	0.8%	0.7%	0.0%				4
	0.4%	1.1%	1.1%	0.7%	0.1%	0.4%	0.1%	0.6%	0.2%				5
	0.3%	0.6%	0.1%	0.4%	0.1%	0.6%	0.2%	0.1%	0.2%				6
	0.6%	0.8%	0.7%	0.6%	0.2%	0.1%	0.1%	0.3%	0.2%				7
	0.4%	0.3%	0.7%	0.2%	0.3%	0.1%	0.3%	0.3%	0.3%				8
	1.1%	0.2%	0.7%	0.8%	2.3%	1.0%	0.8%	0.3%					0
	1.2%	1.6%	1.6%	0.0%	1.2%	0.3%	2.0%	1.2%					1
	0.1%	1.0%	0.3%	2.0%	0.3%	2.1%	0.3%	2.1%	0.3%				2
	2.4%	1.8%	2.4%	2.3%	0.6%	0.4%	0.6%	1.0%					3
	2.4%	1.0%	1.0%	0.1%	2.1%	0.7%	1.1%	0.3%					4
	1.0%	0.8%	0.3%	0.7%	0.1%	0.7%	0.0%	0.0%					5
	0.6%	1.3%	0.4%	0.8%	0.6%	0.5%	0.1%	0.2%					6
	1.0%	0.4%	0.2%	0.5%	0.2%	0.1%	0.1%	0.3%					7
	0.7%	0.2%	0.3%	0.1%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%					8
	0.7%	0.2%	0.6%	1.4%	0.8%	1.7%	1.5%						0
	1.4%	0.3%	0.6%	0.5%	0.0%	1.7%	1.8%						1
	1.9%	1.7%	0.8%	0.0%	0.5%	0.8%	1.8%						2
	0.5%	0.7%	3.0%	2.2%	0.3%	0.9%	1.0%						3
	1.4%	0.1%	0.1%	0.5%	0.3%	1.4%	0.6%						4
	0.8%	1.0%	2.1%	1.4%	0.4%	0.6%	0.0%						5
	0.9%	0.8%	0.6%	0.5%	0.7%	0.6%	0.3%						6
	0.4%	0.6%	0.4%	0.3%	0.0%	0.1%	0.1%						7
	0.7%	0.2%	0.3%	0.1%	0.3%	0.3%	0.3%						8
	0.6%	0.8%	1.8%	2.0%	2.2%	0.6%							0
	0.9%	2.5%	0.9%	0.2%	2.3%	0.0%							1
	0.7%	0.2%	1.9%	1.9%	0.7%	1.6%							2
	1.3%	2.8%	0.6%	2.5%	0.1%	1.9%							3
	2.8%	1.7%	1.2%	0.4%	2.0%	1.8%							4
	0.8%	2.7%	1.9%	0.2%	0.5%	0.5%							5
	1.5%	0.0%	0.1%	0.4%	0.2%	0.3%							6
	0.1%	0.2%	0.5%	0.1%	0.1%	0.2%							7
	0.2%	0.3%	0.1%	0.3%	0.3%	0.3%							8
	0.0%	2.3%	0.4%	0.4%	1.3%								0
	1.1%	0.1%	0.0%	1.6%	0.9%								1
	1.3%	1.9%	1.6%	2.1%	0.4%								2
	2.1%	1.6%	1.1%	2.4%	0.5%								3
	0.0%	2.0%	1.6%	0.2%	2.7%								4
	0.6%	1.9%	0.9%	1.3%	1.0%								5
	0.2%	0.9%	0.7%	0.0%	0.5%								6
	0.5%	0.1%	0.4%	0.0%	0.1%								7
	0.3%	0.1%	0.3%	0.3%	0.3%								8
	1.0%	1.0%	2.0%	0.1%									0
	0.8%	0.7%	1.2%	1.3%									1
	1.7%	1.9%	1.1%	1.7%									2
	1.6%	1.9%	0.0%	1.3%									3
	0.6%	1.2%	1.4%	0.1%									4
	1.2%	1.5%	1.3%	0.3%									5
	0.9%	0.5%	0.3%	0.7%									6
	0.5%	0.3%	0.2%	0.1%									7
	0.1%	0.3%	0.3%	0.3%									8
	0.9%	1.4%	1.8%										0
	0.5%	0.6%	1.4%										1
	1.6%	1.1%	2.1%										2
	1.5%	1.4%	0.4%										3
	1.2%	0.3%	0.4%										4
	2.8%	1.0%	1.4%										5
	0.7%	0.2%	0.3%										6
	0.3%	0.4%	0.1%										7
	0.3%	0.3%	0.3%										8
	0.3%	0.6%											0
	0.8%	0.5%											1
	1.8%	0.4%											2
	1.5%	0.6%											3
	1.6%	1.7%											4
	1.5%	0.4%											5
	0.0%	0.7%											6
	0.0%	0.4%											7
	0.3%	0.3%											8
	0.4%												0
	0.4%												1
	0.8%												2
	1.7%												3

TABLAS DE VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Anexo F. Lateral a 45° STD, concéntrico, 8 ordenadas

Injerto concéntrico a 45°, 8 divisiones, Tubería SCH STD														
X	Cabezal													
	NPS	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	Ord
Injerto	3	1	0,8125	0,6875	0,625	0,625	0,5625	0,5625	0,5625	0,5625	0,5625	0,5	0,5	1
		2,8125	2,375	2,0625	1,9375	1,875	1,8125	1,75	1,75	1,75	1,6875	1,6875	1,6875	2
		3,125	3	2,875	2,8125	2,75	2,75	2,75	2,75	2,6875	2,6875	2,6875	2,6875	3
		3,0625	3,0625	3,0625	3,0625	3,0625	3,0625	3,0625	3,0625	3,0625	3,0625	3,0625	3,0625	4
	4	1,3125	1,0625	0,9375	0,875	0,8125	0,8125	0,75	0,75	0,75	0,75	0,6875	1	
		3,75	3	2,6875	2,5625	2,5	2,4375	2,375	2,3125	2,3125	2,25	2,25	2	
		4,125	3,875	3,75	3,6875	3,6875	3,625	3,625	3,625	3,5625	3,5625	3,5625	3	
		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
	6	2	1,6875	1,5	1,4375	1,375	1,3125	1,25	1,1875	1,1875	1,1875	1,1875	1	
		5,8125	4,8125	4,375	4,125	4	3,875	3,75	3,6875	3,625	3,5625	2		
		6,3125	6	5,8125	5,6875	5,625	5,5625	5,5625	5,5	5,5	5,4375	3		
		6,0625	6,0625	6,0625	6,0625	6,0625	6,0625	6,0625	6,0625	6,0625	6,0625	6,0625	4	
8	2,625	2,3125	2,125	2	1,875	1,8125	1,75	1,6875	1,625	1				
	7,75	6,5	6	5,75	5,5	5,3125	5,1875	5,0625	4,9375	2				
	8,3125	7,9375	7,75	7,625	7,5625	7,4375	7,375	7,3125	7,3125	3				
	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	4			

Fórmula, Injerto concéntrico a 45°, 8 divisiones, Tubería SCH STD														
X	Cabezal													
	NPS	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	Ord
Injerto	3	0,982	0,843	0,708	0,645	0,606	0,581	0,569	0,554	0,542	0,533	0,525	0,519	1
		2,818	2,388	2,067	1,933	1,850	1,799	1,775	1,744	1,720	1,701	1,686	1,673	2
		3,151	3,013	2,877	2,815	2,775	2,750	2,738	2,723	2,711	2,702	2,695	2,688	3
		3,068	3,068	3,068	3,068	3,068	3,068	3,068	3,068	3,068	3,068	3,068	3,068	4
	4	1,307	1,044	0,931	0,861	0,817	0,796	0,770	0,750	0,734	0,720	0,709	1	
		3,773	2,977	2,718	2,566	2,474	2,431	2,377	2,335	2,302	2,276	2,253	2	
		4,154	3,891	3,778	3,708	3,664	3,643	3,617	3,597	3,580	3,567	3,556	3	
		4,026	4,026	4,026	4,026	4,026	4,026	4,026	4,026	4,026	4,026	4,026	4	
	6	2,002	1,696	1,519	1,414	1,364	1,302	1,255	1,217	1,187	1,161	1		
		5,832	4,795	4,358	4,118	4,010	3,877	3,777	3,698	3,635	3,583	2		
		6,291	5,984	5,808	5,702	5,653	5,591	5,543	5,506	5,475	5,450	3		
		6,065	6,065	6,065	6,065	6,065	6,065	6,065	6,065	6,065	6,065	6,065	4	
8	2,656	2,300	2,100	2,009	1,896	1,811	1,743	1,689	1,645	1				
	7,777	6,499	5,975	5,757	5,499	5,310	5,165	5,050	4,956	2				
	8,299	7,944	7,743	7,652	7,539	7,454	7,387	7,333	7,288	3				
	7,981	7,981	7,981	7,981	7,981	7,981	7,981	7,981	7,981	7,981	4			

Residual Absoluto, Injerto concéntrico a 45°, 8 divisiones, Tubería SCH STD														
X	Cabezal													
COUNT	168	SUM	2,470	MAD	0,0147									
	NPS	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	Ord
Injerto	3	0,018	0,031	0,020	0,020	0,019	0,018	0,006	0,009	0,020	0,030	0,025	0,019	1
		0,005	0,013	0,004	0,005	0,025	0,014	0,025	0,006	0,030	0,014	0,001	0,014	2
		0,026	0,013	0,002	0,002	0,025	0,000	0,012	0,027	0,024	0,015	0,007	0,001	3
		0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	4
	4	0,005	0,018	0,006	0,014	0,005	0,016	0,020	0,000	0,016	0,030	0,022	1	
		0,023	0,023	0,031	0,004	0,026	0,006	0,002	0,023	0,010	0,026	0,003	2	
		0,029	0,016	0,028	0,020	0,023	0,018	0,008	0,028	0,018	0,005	0,006	3	
		0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	4	
	6	0,002	0,008	0,019	0,024	0,011	0,010	0,005	0,030	0,001	0,026	1		
		0,020	0,017	0,017	0,007	0,010	0,002	0,027	0,011	0,010	0,021	2		
		0,022	0,016	0,005	0,015	0,028	0,028	0,019	0,006	0,025	0,012	3		
		0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	4		
8	0,031	0,012	0,025	0,009	0,021	0,002	0,007	0,002	0,020	1				
	0,027	0,001	0,025	0,007	0,001	0,002	0,022	0,012	0,019	2				
	0,014	0,006	0,007	0,027	0,023	0,016	0,012	0,020	0,024	3				
	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	4				

Residual Cuadrado, Injerto concéntrico a 45°, 8 divisiones, Tubería SCH STD														
X	Cabezal													
COUNT	168	SUM	0,051	MSE	0,0003	RMSE	0,017							
	NPS	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	Ord
Injerto	3	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	1
		0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	2
		0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	3
		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	4
	4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	1	
		0,001	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	2	
		0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	3	
		0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	4	
	6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	1	
		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	2	
		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	3	
		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	4	
8	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1		
	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2		
	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	3		
	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	4		

Relativo, Injerto concéntrico a 45°, 8 divisiones, Tubería SCH STD															
X	Cabezal														
Min Err	0%	Max Err	2%	Err prom	0%	MAPE	1%								
	NPS	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	Ord	
Injerto	3	2%	2%	1%	1%	1%	1%	0%	1%	1%	2%	2%	1%	1	
		0%	1%	0%	0%	1%	1%	1%	0%	2%	1%	0%	1%	2	
		1%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	1%	1%	1%	0%	0%	3	
		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	4	
	4	0%	2%	0%	1%	0%	1%	1%	0%	1%	0%	1%	2%	1%	1
		1%	1%	1%	0%	1%	1%	1%	0%	1%	1%	0%	0%	2	
		1%	0%	1%	1%	1%	1%	1%	0%	1%	1%	0%	0%	3	
		1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	4	
	6	0%	0%	0%	1%	2%	1%	1%	0%	2%	0%	2%	1		
		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	1%	2	
		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	3	
		0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	4	
8	1%	1%	1%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	1			
	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2			
	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	3			
	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	4			

						0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	4
--	--	--	--	--	--	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---

TABLAS DE VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Anexo G. Lateral a 45° STD, concéntrico, 16 ordenadas

Injerto concéntrico a 45°, 16 divisiones, Tubería SCH STD										
X	Header									
NPS	10	12	14	16	18	20	22	24	Ord	
10	0,875	0,8125	0,75	0,6875	0,6875	0,625	0,625	0,625	1	
	3,375	3	2,8125	2,625	2,5	2,375	2,3125	2,25	2	
	6,8125	5,9375	5,5625	5,1875	4,875	4,6875	4,5625	4,375	3	
	9,875	8,4375	8	7,5	7,1875	6,9375	6,6875	6,5625	4	
	10,6875	9,75	9,375	9	8,75	8,5625	8,375	8,25	5	
	10,4375	10,0625	9,9375	9,75	9,5625	9,5	9,375	9,3125	6	
	10,125	10,0625	10	9,9375	9,9375	9,875	9,875	9,875	7	
	10	10	10	10	10	10	10	10	8	
12	1,0625	1	0,9375	0,875	0,8125	0,8125	0,75	1		
	4,0625	3,8125	3,5	3,25	3,0625	2,9375	2,875	2		
	8,25	7,5625	6,875	6,375	6,0625	5,8125	5,625	3		
	12	10,8125	9,8125	9,25	8,8125	8,5	8,25	4		
	12,875	12,125	11,4375	11	10,6875	10,4375	10,1875	5		
	12,5	12,25	11,9375	11,75	11,5625	11,4375	11,3125	6		
	12,125	12,0625	12	11,9375	11,9375	11,875	11,875	7		
	12	12	12	12	12	12	12	8		
14	1,1875	1,0625	1	0,9375	0,9375	0,875	1			
	4,5	4,0625	3,8125	3,5625	3,4375	3,3125	2			
	9,1875	8,125	7,5	7,0625	6,75	6,4375	3			
	13,3125	11,625	10,75	10,1875	9,75	9,4375	4			
	14,25	13,1875	12,5625	12,125	11,8125	11,5625	5			
	13,875	13,4375	13,1875	12,9375	12,8125	12,625	6			
	13,4375	13,3125	13,25	13,1875	13,1875	13,125	7			
	13,25	13,25	13,25	13,25	13,25	13,25	8			
16	1,375	1,25	1,1875	1,125	1,0625	1				
	5,1875	4,75	4,4375	4,25	4,0625	2				
	10,6875	9,5	8,8125	8,3125	7,9375	3				
	15,5	13,5625	12,625	12	11,5	4				
	16,5	15,375	14,625	14,125	13,75	5				
	16	15,5625	15,25	15	14,8125	6				
	15,4375	15,375	15,3125	15,25	15,1875	7				
	15,25	15,25	15,25	15,25	15,25	8				
18	1,5625	1,4375	1,375	1,3125	1					
	5,875	5,4375	5,125	4,875	2					
	12,125	10,9375	10,1875	9,625	3					
	17,6875	15,625	14,5	13,8125	4					
	18,75	17,5	16,75	16,1875	5					
	18,0625	17,6875	17,3125	17,0625	6					
	17,5	17,375	17,3125	17,25	7					
	17,25	17,25	17,25	17,25	8					
20	1,75	1,625	1,5625	1						
	6,625	6,125	5,8125	2						
	13,625	12,3125	11,5	3						
	19,9375	17,625	16,4375	4						
	21	19,6875	18,875	5						
	20,1875	19,75	19,4375	6						
	19,5	19,4375	19,3125	7						
	19,25	19,25	19,25	8						
22	1,9375	1,8125	1							
	7,3125	6,875	2							
	15,125	13,75	3							
	22,125	19,6875	4							
	23,25	21,875	5							
	22,3125	21,875	6							
	21,5625	21,4375	7							
	21,25	21,25	8							
24	2,125	1								
	8	2								
	16,5625	3								
	24,375	4								
	25,5	5								
	24,4375	6								
	23,5625	7								
	23,25	8								

Fórmula, Injerto concéntrico a 45°, 16 divisiones, Tubería SCH STD										
X	Header									
NPS	10	12	14	16	18	20	22	24	Ord	
10	0,875	0,8125	0,75	0,6875	0,6875	0,625	0,625	0,625	1	
	3,375	3	2,8125	2,625	2,5	2,375	2,3125	2,25	2	
	6,8125	5,9375	5,5625	5,1875	4,875	4,6875	4,5625	4,375	3	
	9,875	8,4375	8	7,5	7,1875	6,9375	6,6875	6,5625	4	
	10,6875	9,75	9,375	9	8,75	8,5625	8,375	8,25	5	
	10,4375	10,0625	9,9375	9,75	9,5625	9,5	9,375	9,3125	6	
	10,125	10,0625	10	9,9375	9,9375	9,875	9,875	9,875	7	
	10	10	10	10	10	10	10	10	8	
12	1,0625	1	0,9375	0,875	0,8125	0,8125	0,75	1		
	4,0625	3,8125	3,5	3,25	3,0625	2,9375	2,875	2		
	8,25	7,5625	6,875	6,375	6,0625	5,8125	5,625	3		
	12	10,8125	9,8125	9,25	8,8125	8,5	8,25	4		
	12,875	12,125	11,4375	11	10,6875	10,4375	10,1875	5		
	12,5	12,25	11,9375	11,75	11,5625	11,4375	11,3125	6		
	12,125	12,0625	12	11,9375	11,9375	11,875	11,875	7		
	12	12	12	12	12	12	12	8		
14	1,1875	1,0625	1	0,9375	0,9375	0,875	1			
	4,5	4,0625	3,8125	3,5625	3,4375	3,3125	2			
	9,1875	8,125	7,5	7,0625	6,75	6,4375	3			
	13,3125	11,625	10,75	10,1875	9,75	9,4375	4			
	14,25	13,1875	12,5625	12,125	11,8125	11,5625	5			
	13,875	13,4375	13,1875	12,9375	12,8125	12,625	6			
	13,4375	13,3125	13,25	13,1875	13,1875	13,125	7			
	13,25	13,25	13,25	13,25	13,25	13,25	8			
16	1,375	1,25	1,1875	1,125	1,0625	1				
	5,1875	4,75	4,4375	4,25	4,0625	2				
	10,6875	9,5	8,8125	8,3125	7,9375	3				
	15,5	13,5625	12,625	12	11,5	4				
	16,5	15,375	14,625	14,125	13,75	5				
	16	15,5625	15,25	15	14,8125	6				
	15,4375	15,375	15,3125	15,25	15,1875	7				
	15,25	15,25	15,25	15,25	15,25	8				
18	1,5625	1,4375	1,375	1,3125	1					
	5,875	5,4375	5,125	4,875	2					
	12,125	10,9375	10,1875	9,625	3					
	17,6875	15,625	14,5	13,8125	4					
	18,75	17,5	16,75	16,1875	5					
	18,0625	17,6875	17,3125	17,0625	6					
	17,5	17,375	17,3125	17,25	7					
	17,25	17,25	17,25	17,25	8					
20	1,75	1,625	1,5625	1						
	6,625	6,125	5,8125	2						
	13,625	12,3125	11,5	3						
	19,9375	17,625	16,4375	4						
	21	19,6875	18,875	5						
	20,1875	19,75	19,4375	6						
	19,5	19,4375	19,3125	7						
	19,25	19,25	19,25	8						
22	1,9375	1,8125	1							
	7,3125	6,875	2							
	15,125	13,75	3							
	22,125	19,6875	4							
	23,25	21,875	5							
	22,3125	21,875	6							
	21,5625	21,4375	7							
	21,25	21,25	8							
24	2,125	1								
	8	2								
	16,5625	3								
	24,375	4								
	25,5	5								
	24,4375	6								
	23,5625	7								
	23,25	8								

Residual absoluto, Injerto concéntrico a 45°, 16 divisiones, Tubería SCH STD										
X	Header									
COUNT	288	SUM	4,333	MAD	0,0150					
	10	12	14	16	18	20	22	24	Ord	
10	0,006	0,014	0,010	0,024	0,014	0,019	0,006	0,026	1	
	0,023	0,012	0,016	0,012	0,005	0,010	0,016	0,026	2	
	0,017	0,029	0,003	0,009	0,030	0,011	0,025	0,031	3	
	0,017	0,013	0,004	0,003	0,023	0,025	0,030	0,003	4	
	0,023	0,007	0,025	0,013	0,010	0,029	0,004	0,010	5	
	0,000	0,010	0,024	0,028	0,018	0,030	0,006	0,004	6	
	0,014	0,006	0,017	0,031	0,007	0,026	0,002	0,018	7	
	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	8	
12	0,001	0,004	0,005	0,003	0,022	0,013	0,020	1		
	0,019	0,030	0,021	0,010	0,031	0,024	0,022	2		
	0,017	0,004	0,015	0,030	0,013	0,011	0,002	3		
	0,031	0,012	0,018	0,009	0,016	0,018	0,024	4		
	0,016	0,025	0,015	0,003	0,020	0,022	0,028	5		
	0,029	0,018	0,027	0,004	0,016	0,009	0,026	6		
	0,023	0,028	0,019	0,027	0,016	0,011	0,018	7		
	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	8		
14	0,011	0,025	0,020	0,029	0,014	0,012	1			
	0,016	0,021	0,012	0,026	0,016	0,026	2			
	0,002	0,007	0,014	0,014	0,030	0,026	3			
	0,015	0,028								

TABLAS DE VALIDACIÓN DE RESULTADOS

LATERAL A 45° STD, CONCÉNTRICO, 16 ORDENADAS (CONTINUACIÓN)

Residual cuadrado, Injerto concéntrico a 45°, 16 divisiones, Tubería SCH STD										
X	Header									
COUNT	288	SUM	0,091	MSE	0,0003	RMSE	0,018			
	10	12	14	16	18	20	22	24	Ord	
Riser	4E-05	2E-04	1E-04	6E-04	2E-04	4E-04	3E-05	7E-04	1	
	5E-04	2E-04	3E-04	1E-04	3E-05	9E-05	3E-04	7E-04	2	
	3E-04	8E-04	1E-05	8E-05	9E-04	1E-04	7E-04	1E-03	3	
	3E-04	2E-04	2E-05	1E-05	5E-04	6E-04	9E-04	7E-06	4	
	5E-04	4E-05	6E-04	2E-04	1E-04	8E-04	1E-05	9E-05	5	
	6E-08	1E-04	6E-04	8E-04	3E-04	9E-04	4E-05	1E-05	6	
	2E-04	4E-05	3E-04	1E-03	5E-05	7E-04	3E-06	3E-04	7	
	4E-04	4E-04	4E-04	4E-04	4E-04	4E-04	4E-04	4E-04	8	
		5E-07	2E-05	2E-05	8E-06	5E-04	2E-04	4E-04	1	
		3E-04	9E-04	4E-04	1E-04	9E-04	6E-04	5E-04	2	
		3E-04	2E-05	2E-04	9E-04	2E-04	1E-04	4E-06	3	
		1E-03	1E-04	3E-04	8E-05	3E-04	3E-04	6E-04	4	
		3E-04	6E-04	2E-04	1E-05	4E-04	5E-04	8E-04	5	
		8E-04	3E-04	7E-04	2E-05	3E-04	8E-05	7E-04	6	
		5E-04	8E-04	4E-04	7E-04	3E-04	1E-04	3E-04	7	
		0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	8	
			1E-04	6E-04	4E-04	8E-04	2E-04	2E-04	1	
			3E-04	4E-04	1E-04	7E-04	3E-04	7E-04	2	
			3E-06	5E-05	2E-04	2E-04	9E-04	7E-04	3	
			2E-04	8E-04	1E-04	2E-04	2E-04	7E-05	4	
			4E-05	2E-06	3E-05	4E-05	5E-04	8E-04	5	
			5E-04	2E-04	3E-04	4E-04	5E-04	1E-03	6	
			4E-04	3E-04	1E-04	4E-04	5E-04	1E-05	7	
			0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	8	
			2E-04	3E-04	7E-05	2E-04	7E-04	1		
			2E-06	4E-04	8E-04	4E-04	4E-04	2		
			8E-04	2E-04	4E-07	1E-05	2E-06	3		
			2E-04	8E-04	6E-05	1E-03	7E-05	4		
			3E-05	6E-04	5E-04	7E-04	6E-04	5		
			8E-04	8E-05	3E-06	2E-04	2E-04	6		
			1E-04	3E-04	8E-04	5E-04	7E-05	7		
			0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	8		
				4E-04	1E-04	3E-06	2E-06	1		
				4E-04	5E-04	1E-04	4E-05	2		
				1E-04	2E-04	1E-03	4E-04	3		
				9E-04	2E-04	7E-04	3E-04	4		
				2E-04	5E-04	6E-05	4E-04	5		
				9E-04	8E-04	5E-04	3E-04	6		
				4E-04	1E-04	5E-06	4E-06	7		
				0E+00	0E+00	0E+00	0E+00	8		
					5E-04	3E-05	1E-04	1		
					6E-04	9E-04	3E-09	2		
					1E-04	8E-04	3E-04	3		
					5E-05	6E-04	5E-04	4		
					4E-04	4E-04	7E-05	5		
					6E-04	3E-04	2E-04	6		
					1E-04	5E-04	6E-04	7		
					0E+00	0E+00	0E+00	8		
						7E-04	2E-08	1		
						5E-05	6E-04	2		
						9E-04	3E-04	3		
						8E-04	4E-04	4		
						5E-04	6E-04	5		
						4E-04	5E-07	6		
						4E-04	6E-05	7		
						0E+00	0E+00	8		
							1E-03	1		
							1E-04	2		
							2E-04	3		
							1E-04	4		
							6E-04	5		
							2E-04	6		
							1E-04	7		
							0E+00	8		

Relativo, Injerto concéntrico a 45°, 16 divisiones, Tubería SCH STD										
X	Header									
Min Err	0%	Max Err	3%	Err prom	0%	MAPE	0,3%			
	10	12	14	16	18	20	22	24	Ord	
Riser		0,3%	0,8%	0,6%	1,4%	0,8%	1,2%	0,3%	1,6%	1
		0,7%	0,4%	0,6%	0,5%	0,2%	0,4%	0,7%	1,2%	2
		0,3%	0,5%	0,1%	0,2%	0,6%	0,2%	0,6%	0,7%	3
		0,2%	0,2%	0,1%	0,0%	0,3%	0,4%	0,4%	0,0%	4
		0,2%	0,1%	0,3%	0,1%	0,1%	0,3%	0,0%	0,1%	5
		0,0%	0,1%	0,2%	0,3%	0,2%	0,3%	0,1%	0,0%	6
		0,1%	0,1%	0,2%	0,3%	0,1%	0,3%	0,0%	0,2%	7
		0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	8
			0,1%	0,4%	0,2%	0,2%	1,2%	0,7%	1,2%	1
			0,5%	0,8%	0,6%	0,3%	1,0%	0,8%	0,8%	2
			0,2%	0,1%	0,2%	0,5%	0,2%	0,2%	0,0%	3
			0,3%	0,1%	0,2%	0,1%	0,2%	0,2%	0,3%	4
			0,1%	0,2%	0,1%	0,0%	0,2%	0,2%	0,3%	5
			0,2%	0,1%	0,2%	0,0%	0,1%	0,1%	0,2%	6
			0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,1%	0,1%	0,2%	7
			0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	8
				0,9%	2,3%	2,0%	1,5%	0,7%	0,7%	1
				0,4%	0,5%	0,3%	0,7%	0,5%	0,8%	2
				0,0%	0,1%	0,2%	0,2%	0,4%	0,4%	3
				0,1%	0,2%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	4
				0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,2%	0,2%	5
				0,2%	0,1%	0,1%	0,2%	0,2%	0,2%	6
				0,1%	0,1%	0,1%	0,2%	0,2%	0,0%	7
				0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	8
				1,1%	1,4%	0,7%	1,1%	2,6%	1	
				0,0%	0,4%	0,6%	0,5%	0,5%	2	
				0,3%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	3	
				0,1%	0,2%	0,1%	0,3%	0,1%	4	
				0,0%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	5	
				0,2%	0,1%	0,0%	0,1%	0,1%	6	
				0,1%	0,1%	0,2%	0,2%	0,1%	7	
				0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	8	
					1,2%	0,8%	0,1%	0,1%	1	
					0,3%	0,4%	0,2%	0,1%	2	
					0,1%	0,1%	0,3%	0,2%	3	
					0,2%	0,1%	0,2%	0,1%	4	
					0,1%	0,1%	0,0%	0,1%	5	
					0,2%	0,2%	0,1%	0,1%	6	
					0,1%	0,1%	0,0%	0,0%	7	
					0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	8	
						1,3%	0,4%	0,7%	1	
						0,4%	0,5%	0,0%	2	
						0,1%	0,2%	0,1%	3	
						0,0%	0,1%	0,1%	4	
						0,1%	0,1%	0,0%	5	
						0,1%	0,1%	0,1%	6	
						0,1%	0,1%	0,1%	7	
						0,0%	0,0%	0,0%	8	
							1,4%	0,0%	1	
							0,1%	0,4%	2	
							0,2%	0,1%	3	
							0,1%	0,1%	4	
							0,1%	0,1%	5	
							0,1%	0,0%	6	
							0,1%	0,0%	7	
							0,0%	0,0%	8	
								1,5%	1	
								0,1%	2	
								0,1%	3	
								0,0%	4	
								0,1%	5	
								0,1%	6	
								0,1%	7	
								0,0%	8	

TABLAS DE VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Anexo H. Dummy Leg, concéntrico tipo I, 16 ordenadas

Dummy Leg Concéntrico Tipo I, 16 ordenadas, tubería y codo STD															
X	Header														
	NPS	2	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	
Riser	2	2,3125	3,8125	5,4375	8,625	11,9375	15,1875	18,5							0
		2,4375	3,9375	5,5	8,6875	12	15,25	18,5625							1
		2,8125	4,1875	5,8125	9	12,3125	15,5	18,875							2
		3,375	4,6875	6,25	9,375	12,6875	15,9375	19,25							3
		4,0625	5,1875	6,6875	9,8125	13,125	16,375	19,6875							4
		4,5	5,5625	7,125	10,25	13,5625	16,8125	20,125							5
		4,75	5,875	7,4375	10,5625	13,875	17,125	20,4375							6
		4,875	6,0625	7,625	10,8125	14,125	17,375	20,6875							7
	4,875	6,125	7,6875	10,875	14,1875	17,4375	20,75							8	
		3,5	5,0625	8,1875	11,5	14,6875	18							0	
		3,6875	5,25	8,375	11,625	14,875	18,1875							1	
		4,25	5,75	8,8125	12,0625	15,25	18,5625							2	
		5,125	6,4375	9,4375	12,6875	15,875	19,1875							3	
		6,125	7,25	10,1875	13,375	16,5625	19,8125							4	
		6,8125	7,9375	10,8125	14	17,1875	20,5							5	
		7,1875	8,375	11,25	14,5	17,6875	21							6	
		7,3125	8,5625	11,5625	14,8125	18	21,3125							7	
		7,375	8,625	11,625	14,875	18,0625	21,4375							8	
		4,75	7,875	11,125	14,3125	17,625								0	
		5	8,0625	11,3125	14,5	17,8125								1	
		5,75	8,6875	11,875	15,0625	18,375								2	
		6,9375	9,625	12,75	15,875	19,125								3	
		8,375	10,625	13,6875	16,8125	20,0625								4	
		9,375	11,5	14,5625	17,625	20,875								5	
	9,8125	12,0625	15,1875	18,25	21,5625								6		
	10	12,375	15,5	18,6875	21,9375								7		
	10,0625	12,5	15,625	18,8125	22,0625								8		
		7,25	10,375	13,5	16,75								0		
		7,625	10,75	13,8125	17,0625								1		
		8,75	11,75	14,75	18								2		
		10,625	13,25	16,125	19,3125								3		
		12,9375	14,875	17,625	20,75								4		
		14,4375	16,25	18,9375	22								5		
		15,0625	17,0625	19,8125	22,9375								6		
		15,3125	17,5625	20,375	23,5								7		
		15,375	17,6875	20,5	23,6875								8		
		9,8125	12,875	16,0625	19,75	23	26,3125	29,625					0		
		10,3125	13,3125	16,5	20,1875	23,4375	26,75	30					1		
		11,8125	14,6875	17,75	21,5	24,6875	27,9375	31,1875					2		
		14,375	16,75	19,6875	23,375	26,5	29,6875	32,9375					3		
		17,5	19	21,75	25,4375	28,5	31,625	34,8125					4		
		19,5625	20,8125	23,5	27,1875	30,25	33,375	36,5625					5		
		20,375	21,875	24,625	28,4375	31,5	34,625	37,875					6		
		20,6875	22,4375	25,3125	29,125	32,25	35,4375	38,625					7		
		20,75	22,625	25,5	29,375	32,5	35,6875	38,9375					8		
		12,25	15,375	19	22,25	25,5	28,75						0		
		12,875	16	19,625	22,8125	26,0625	29,3125						1		
		14,8125	17,75	21,375	24,5	27,6875	30,875						2		
		18	20,4375	24	26,9375	30	33,125						3		
		22,125	23,4375	26,875	29,625	32,5625	35,625						4		
		24,6875	25,8125	29,1875	31,875	34,8125	37,8125						5		
		25,6875	27,125	30,6875	33,375	36,375	39,4375						6		
		26,0625	27,75	31,375	34,25	37,25	40,375						7		
		26,1875	27,9375	31,625	34,5	37,5	40,625						8		
		14,8125	18,375	21,5625	24,75	28							0		
		15,5625	19,125	22,25	25,4375	28,6875							1		
		17,875	21,375	24,375	27,5	30,625							2		
		21,8125	25	27,625	30,5	33,5							3		
		26,9375	29,1875	31,1875	33,8125	36,6875							4		
		30,0625	32,1875	34,0625	36,5625	39,375							5		
		31,1875	33,6875	35,75	38,375	41,1875							6		
		31,625	34,375	36,625	39,3125	42,25							7		
		31,75	34,5625	36,875	39,625	42,5625							8		
		18	21,125	24,3125	27,5625								0		
		18,8125	21,9375	25,125	28,3125								1		
		21,5	24,4375	27,4375	30,5625								2		
		26,0625	28,25	31	33,875								3		
		32	32,6875	34,875	37,5								4		
		35,5625	35,9375	38	40,5625								5		
		36,8125	37,6875	39,875	42,5625								6		
		37,3125	38,5	40,875	43,5625								7		
		37,4375	38,75	41,125	43,9375								8		
		20,5	23,6875	26,8125	30,0625	33,3125							0		
		21,5	24,625	27,75	30,9375	34,1875							1		
		24,5625	27,5	30,5	33,5625	36,6875							2		
		29,875	32	34,625	37,5	40,4375							3		
		36,9375	37,25	39,25	41,8125	44,5625							4		
		41,0625	41,0625	42,875	45,3125	48							5		
		42,4375	43	45,0625	47,5625	50,3125							6		
		43	43,875	46,125	48,75	51,5625							7		
		43,125	44,125	46,4375	49,125	52							8		
		23,0625	26,1875	29,375	32,5625								0		
		24,1875	27,3125	30,4375	33,625								1		
		27,6875	30,5625	33,5625	36,625								2		
		33,75	35,8125	38,3125	41,125								3		
		41,9375	41,875	43,6875	46,125								4		
		46,625	46,1875	47,875	50,125								5		
		48,125	48,375	50,25	52,625								6		
		48,6875	49,3125	51,375	53,9375								7		
		48,8125	49,625	51,75	54,3125								8		
		25,5625	28,75	31,875									0		
		26,875	29,9375	33,0625									1		
		30,75	33,625	36,625									2		
		37,5625	39,5625	42,0625									3		
		46,9375	46,5	48,1875									4		
		52,1875	51,4375	52,875									5		
		53,8125	53,75	55,5									6		
		54,375	54,8125	56,75									7		
		54,5625	55,0625	57,0625									8		
			28,125	31,25									0		
			29,5	32,625									1		
			33,8125	36,6875									2		
			41,4375	43,375									3		
			52	51,1875									4		
			57,8125	56,6875									5		
			59,5	59,1875									6		
			60,125	60,3125									7		
			60,25	60,5625									8		

Formula, Dummy Leg Concéntrico Tipo I, 16 ordenadas, tubería y codo STD														
X	Header													
	NPS	2	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
Injerto	2	2,292	3,782	5,389	8,636	11,936	15,165	18,487						0
		2,413	3,890	5,493	8,735	12,033	15,260	18,581						1
		2,772	4,199	5,787	9,013	12,305	15,526	18,845						2
		3,351	4,651	6,214	9,416	12,701	15,916	19,233						3
		4,024	5,146	6,685	9,867	13,149	16,359	19,677						4
		4,501	5,569	7,106	10,288	13,574	16,785	20,105						5
		4,731	5,861	7,417	10,616	13,914	17,129	20,455						6
		4,832	6,022	7,601	10,821	14,130	17,351	20,682						7
	4,860	6,074	7,661	10,890	14,204	17,428	20,760						8	
		3,482	5,040	8,233	11,500	14,709	18,015							0
		3,663	5,211	8,390	11,651	14,856	18,160							1
		4,204	5,701	8,833	12,077	15,269	18,567							2
		5,078	6,432	9,476	12,695	15,869	19,160							3
		6,101	7,235	10,186	13,384	16,543	19,830							

X		Header														
COUNT	522	SUM	10,851	MAD	0,021											
	NPS	2	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24		
Riser	2	0,02	0,03	0,05	0,01	0,00	0,02	0,01								0
		0,02	0,05	0,01	0,05	0,03	0,01	0,02								1
		0,04	0,01	0,03	0,01	0,01	0,03	0,03								2
		0,02	0,04	0,04	0,04	0,01	0,02	0,02								3
		0,04	0,04	0,00	0,05	0,02	0,02	0,01								4
		0,00	0,01	0,02	0,04	0,01	0,03	0,02								5
		0,02	0,01	0,02	0,05	0,04	0,00	0,02								6
		0,04	0,04	0,02	0,01	0,00	0,02	0,01								7
	0,01	0,05	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01								8	
	0,02	0,02	0,05	0,00	0,02	0,02									0	
	0,02	0,04	0,02	0,03	0,02	0,03									1	
	0,05	0,05	0,02	0,01	0,02	0,00									2	
	0,05	0,01	0,04	0,01	0,01	0,03									3	
	0,02	0,02	0,00	0,01	0,02	0,02									4	
	0,01	0,04	0,01	0,02	0,01	0,03									5	
	0,03	0,06	0,04	0,01	0,01	0,03									6	
	0,01	0,02	0,00	0,01	0,01	0,02									7	
	0,03	0,01	0,03	0,03	0,03	0,03									8	
	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04									0	
	0,00	0,04	0,01	0,00	0,03										1	
	0,02	0,04	0,04	0,00	0,04										2	
	0,01	0,03	0,02	0,01	0,01										3	
	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02										4	
	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00										5	
0,04	0,04	0,01	0,02	0,03										6		
0,04	0,05	0,04	0,03	0,00										7		
0,06	0,02	0,04	0,02	0,01										8		
0,00	0,01	0,01	0,01	0,00										0		
0,00	0,02	0,03	0,01											1		
0,01	0,01	0,02	0,03											2		
0,02	0,00	0,01	0,04											3		
0,01	0,03	0,01	0,04											4		
0,03	0,00	0,01	0,01											5		
0,03	0,04	0,03	0,00											6		
0,04	0,02	0,02	0,01											7		
0,04	0,01	0,01	0,02											8		
0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,05	0,01	0,01							0		
0,01	0,01	0,01	0,00	0,05	0,00	0,03								1		
0,01	0,01	0,01	0,03	0,04	0,02	0,02								2		
0,01	0,02	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02								3		
0,04	0,00	0,04	0,04	0,01	0,01	0,00								4		
0,01	0,00	0,04	0,01	0,01	0,00	0,02								5		
0,00	0,03	0,01	0,02	0,04	0,04	0,02								6		
0,01	0,01	0,04	0,00	0,03	0,00	0,02								7		
0,04	0,01	0,03	0,03	0,02	0,01	0,02								8		
0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02							0		
0,00	0,04	0,03	0,03	0,01	0,00									1		
0,02	0,03	0,05	0,00	0,02	0,00									2		
0,03	0,02	0,05	0,01	0,01	0,01									3		
0,01	0,00	0,04	0,01	0,01	0,00									4		
0,00	0,04	0,02	0,03	0,01	0,01									5		
0,02	0,02	0,06	0,05	0,01	0,01									6		
0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02									7		
0,03	0,01	0,02	0,02	0,04	0,03									8		
0,04	0,04	0,00	0,02	0,00										0		
0,03	0,03	0,05	0,04	0,00										1		
0,02	0,02	0,04	0,00	0,02										2		
0,01	0,02	0,03	0,02	0,02										3		
0,02	0,04	0,05	0,02	0,01										4		
0,02	0,02	0,01	0,02	0,01										5		
0,02	0,00	0,03	0,00	0,03										6		
0,02	0,01	0,01	0,02	0,01										7		
0,02	0,01	0,02	0,00	0,00										8		
0,05	0,03	0,02	0,02											0		
0,01	0,05	0,01	0,01											1		
0,03	0,00	0,02	0,01											2		
0,03	0,05	0,02	0,00											3		
0,03	0,00	0,01	0,02											4		
0,02	0,02	0,00	0,02											5		
0,02	0,02	0,03	0,03											6		
0,04	0,01	0,01	0,03											7		
0,03	0,00	0,03	0,02											8		
0,03	0,02	0,03	0,02	0,05										0		
0,04	0,01	0,03	0,01	0,04										1		
0,04	0,00	0,01	0,00	0,01										2		
0,04	0,04	0,02	0,03	0,01										3		
0,04	0,00	0,01	0,04	0,03										4		
0,05	0,00	0,02	0,01	0,01										5		
0,05	0,02	0,02	0,01	0,01										6		
0,00	0,03	0,02	0,02	0,00										7		
0,02	0,04	0,02	0,04	0,05										8		
0,01	0,00	0,02	0,01	0,01										0		
0,01	0,02	0,02	0,04											1		
0,01	0,01	0,03	0,04											2		
0,00	0,02	0,02	0,03											3		
0,02	0,02	0,00	0,04											4		
0,02	0,03	0,03	0,02											5		
0,00	0,00	0,02	0,01											6		
0,01	0,02	0,01	0,04											7		
0,02	0,02	0,02	0,02											8		
0,02	0,04	0,00												0		
0,02	0,00	0,01												1		
0,00	0,01	0,05												2		
0,01	0,01	0,03												3		
0,02	0,00	0,03												4		
0,01	0,03	0,04												5		
0,03	0,01	0,05												6		
0,00	0,03	0,06												7		
0,03	0,01	0,00												8		
0,02	0,02													0		
0,01	0,03													1		
0,02	0,01													2		
0,03	0,05													3		
0,02	0,02													4		
0,04	0,06													5		
0,04	0,02													6		
0,04	0,06													7		
0,00	0,00													8		

TABLAS DE VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Anexo I. Dummy Leg excéntrico, tipo II, 16 ordenadas

Dummy Leg Excéntrico Tipo II, 16 ordenadas, tubería y codo STD														
X	NPS	Header												
		3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	
Riser	2	4,25	6,375	10,9375	15,8125	20,75	25,8125							0
		4,375	6,5	11,125	15,9375	20,9375	26,0625							1
		4,75	6,875	11,5625	16,4375	21,5	26,625							2
		5,3125	7,5	12,25	17,25	22,375	27,5625							3
		5,9375	8,25	13,125	18,25	23,4375	28,75							4
		6,5625	9	14,0625	19,3125	24,6875	30,125							5
		7,125	9,6875	15	20,4375	25,9375	31,5							6
		7,5	10,1875	15,75	21,375	27	32,75							7
	7,625	10,4375	16,0625	21,75	27,5	33,25							8	
		5,4375	9,625	14,1875	18,9375	23,75							0	
		5,625	9,8125	14,4375	19,125	24,0625							1	
		6,125	10,4375	15,0625	19,875	24,8125							2	
		7	11,3125	16,0625	20,9375	25,9375							3	
		8	12,4375	17,3125	22,3125	27,4375							4	
		8,875	13,5625	18,625	23,8125	29,125							5	
		9,5625	14,625	19,9375	25,3125	30,75							6	
		10	15,375	20,9375	26,5	32,125							7	
		10,125	15,6875	21,375	27,0625	32,75							8	
			8,6875	13	17,5	22,25							0	
			8,9375	13,25	17,8125	22,5625							1	
			9,6875	14,0625	18,6875	23,4375							2	
			10,8125	15,3125	20	24,8125							3	
			12,1875	16,75	21,5625	26,5625							4	
			13,5	18,3125	23,3125	28,5							5	
		14,5625	19,6875	25	30,375							6		
		15,3125	20,8125	26,3125	31,9375							7		
		15,625	21,25	26,875	32,625							8		
			11,0625	15,25	19,625							0		
			11,5	15,625	20							1		
			12,625	16,8125	21,25							2		
			14,3125	18,5625	23,0625							3		
			16,375	20,6875	25,3125							4		
			18,25	22,8125	27,6875							5		
			19,6875	24,6875	29,875							6		
			20,625	26,0625	31,5625							7		
			21	26,625	32,3125							8		
			13,5625	17,6875	22,125	26,5	31	35,625				0		
			14,125	18,1875	22,625	27,0625	31,5625	36,1875				1		
			15,5625	19,6875	24,25	28,6875	33,25	37,9375				2		
			17,875	22,0625	26,6875	31,1875	35,8125	40,5625				3		
			20,625	24,8125	29,5625	34,1875	39	43,875				4		
			23,0625	27,5	32,5	37,3125	42,3125	47,375				5		
			24,875	29,75	35,0625	40,25	45,5	50,8125				6		
			26	31,4375	37	42,5	48,0625	53,625				7		
			26,375	32,0625	37,75	43,5	49,1875	54,9375				8		
				16,0625	20,25	24,375	28,6875	33,125				0		
				16,6875	20,875	25,0625	29,375	33,8125				1		
				18,5625	22,875	27,0625	31,375	35,875				2		
				21,5625	25,875	30,0625	34,5	39				3		
				25	29,4375	33,6875	38,1875	42,8125				4		
				28,0625	32,6875	37,1875	41,875	46,75				5		
				30,125	35,1875	40,125	45,25	50,4375				6		
				31,375	36,875	42,3125	47,8125	53,3125				7		
				31,8125	37,5	43,1875	48,875	54,625				8		
					18,75	22,75	26,8125	31,0625				0		
					19,5625	23,5	27,625	31,875				1		
					21,9375	25,875	30	34,25				2		
					25,6875	29,5	33,625	37,9375				3		
					30,25	33,8125	37,9375	42,3125				4		
					33,8125	37,6875	42,0625	46,625				5		
					35,9375	40,5625	45,4375	50,4375				6		
					37,0625	42,4375	47,875	53,3125				7		
					37,4375	43,125	48,8125	54,5625				8		
						21,8125	25,8125	29,9375				0		
						22,6875	26,6875	30,8125				1		
						25,25	29,25	33,4375				2		
						29,4375	33,3125	37,4375				3		
						34,375	38,0625	42,1875				4		
						38,4375	42,4375	46,8125				5		
						41,0625	45,75	50,625				6		
						42,5625	47,9375	53,375				7		
						43,125	48,8125	54,5625				8		
						24,3125	28,3125	32,375	36,5625			0		
						25,3125	29,3125	33,375	37,5625			1		
						28,3125	32,3125	36,375	40,625			2		
						33,1875	36,9375	41	45,25			3		
						38,9375	42,5	46,5	50,8125			4		
						43,6875	47,5	51,75	56,25			5		
						46,5625	51,1875	56	60,9375			6		
						48,25	53,625	59	64,5			7		
						48,8125	54,5625	60,25	66,8			8		
							26,8125	30,8125	34,8125			0		
							28	31,9375	36			1		
							31,375	35,3125	39,375			2		
							36,9375	40,6875	44,625			3		
							43,625	47	50,875			4		
							48,9375	52,5625	56,6875			5		
							52,125	56,625	61,375			6		
							53,9375	59,25	64,6875			7		
							54,5625	60,25	66			8		
								29,375	33,25			0		
								30,625	34,5625			1		
								34,4375	38,375			2		
								40,6875	44,375			3		
								48,3125	51,5			4		
								54,25	57,6875			5		
								57,6875	62,125			6		
								59,625	64,9375			7		
								60,25	66			8		
									31,875			0		
									33,3125			1		
									37,53125			2		
									44,5			3		
									53			4		
									59,5625			5		
									63,25			6		
									65,3125			7		
									66			8		

Fórmula, Dummy Leg Excéntrico Tipo II, 16 ordenadas, tubería y codo STD														
X	NPS	Header												
		3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	
Injerto	2	4,204	6,343	10,972	15,796	20,750	25,821							0
		4,331	6,481	11,129	15,969	20,938	26,024							1
		4,700	6,878	11,581	16,472	21,488	26,616							2
		5,263	7,484	12,280	17,257	22,350	27,550							3
		5,926	8,218	13,151	18,248	23,450	28,748							4
		6,568	8,975	14,100	19,353	24,693	30,113							5
		7,100	9,662	15,024	20,457	25,954	31,512							6
		7,464	10,179	15,773	21,380	27,028	32,715							7
	7,599	10,383	16,089	21,779	27,500	33,249							8	
		5,388	9,654	14,197	18,908	23,767							0	
		5,577	9,860	14,422	19,150	24,026							1	
		6,126	10,456	15,072	19,852	24,778							2	
		6,968	11,367	16,075	20,942	25,950							3	
		7,947	12,469	17,312	22,307	27,433							4	
		8,842	13,607	18,645	23,810	29,087							5	
		9,519	14,641	19,921	25,291	30,744							6	
		9,946	15,423	20,943	26,516	32,139							7	
		10,095	15,734	21,369	27,041	32,747							8	
				8,707	13,017	17,529	22,216						0	
				8,964	13,292	17,821	22,526						1	
				9,709	14,087	18,668	23,426						2	
				10,849	15,305	19,974	24,821						3	
				12,194	16,780	21,584	26,561						4	
				13,500	18,313	23,315	28,469						5	
			14,585	19,718	24,979	30,347						6		
			15,341	20,802	26,327	31,911						7		
			15,626	21,244	26,901	32,594						8		
				11,099	15,225									

TABLAS DE VALIDACIÓN DE RESULTADOS

DUMMY LEG EXCÉNTRICO, TIPO II, 16 ORDENADAS (CONTINUACIÓN)

Residual Absoluto Dummy Leg Excéntrico Tipo II, 16 ordenadas, tubería y codo STD													
X	Header												
COUNT	414	SUM	8,811	MAD	0,0213								
	NPS	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
2	0.05	0.03	0.03	0.02	0.00	0.01							0
	0.04	0.02	0.00	0.03	0.00	0.04							1
	0.05	0.00	0.02	0.03	0.01	0.01							2
	0.05	0.02	0.03	0.01	0.02	0.01							3
	0.01	0.03	0.03	0.00	0.01	0.00							4
	0.01	0.02	0.04	0.04	0.01	0.01							5
	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01							6
	0.04	0.01	0.02	0.00	0.03	0.03							7
0.03	0.05	0.03	0.03	0.00	0.00							8	
3	0.05	0.03	0.01	0.03	0.02								0
	0.05	0.05	0.02	0.03	0.04								1
	0.00	0.02	0.01	0.02	0.03								2
	0.03	0.05	0.01	0.00	0.01								3
	0.05	0.03	0.00	0.01	0.00								4
	0.03	0.04	0.02	0.00	0.04								5
	0.04	0.02	0.02	0.02	0.01								6
	0.05	0.05	0.01	0.02	0.01								7
0.03	0.05	0.01	0.02	0.00								8	
4		0.02	0.02	0.03	0.03								0
		0.03	0.04	0.01	0.04								1
		0.02	0.02	0.02	0.01								2
		0.04	0.01	0.03	0.01								3
		0.01	0.03	0.02	0.00								4
		0.00	0.00	0.00	0.03								5
		0.02	0.03	0.02	0.03								6
		0.03	0.01	0.01	0.03								7
	0.00	0.01	0.03	0.03								8	
6			0.04	0.02	0.04								0
			0.02	0.00	0.00								1
			0.01	0.03	0.04								2
			0.04	0.00	0.01								3
			0.02	0.00	0.01								4
			0.03	0.01	0.01								5
			0.03	0.00	0.02								6
			0.04	0.01	0.01								7
		0.01	0.01	0.01								8	
8			0.02	0.02	0.05	0.02	0.02	0.02					0
			0.03	0.00	0.00	0.02	0.03	0.01					1
			0.02	0.01	0.04	0.02	0.02	0.02					2
			0.03	0.03	0.05	0.02	0.03	0.02					3
			0.00	0.01	0.02	0.05	0.00	0.02					4
			0.01	0.01	0.04	0.05	0.02	0.01					5
			0.03	0.01	0.05	0.00	0.01	0.02					6
			0.02	0.05	0.05	0.03	0.01	0.03					7
		0.02	0.03	0.01	0.00	0.02	0.00					8	
10			0.03	0.04	0.05	0.03	0.01						0
			0.02	0.00	0.04	0.04	0.01						1
			0.01	0.05	0.01	0.04	0.01						2
			0.04	0.04	0.04	0.01	0.01						3
			0.01	0.05	0.01	0.01	0.00						4
			0.04	0.03	0.02	0.04	0.02						5
			0.03	0.02	0.05	0.00	0.02						6
			0.03	0.04	0.03	0.01	0.03						7
		0.03	0.04	0.02	0.03	0.02						8	
12				0.01	0.00	0.04	0.01						0
				0.03	0.04	0.03	0.02						1
				0.05	0.01	0.01	0.02						2
				0.00	0.04	0.01	0.01						3
				0.02	0.03	0.00	0.01						4
				0.00	0.02	0.01	0.02						5
				0.03	0.02	0.00	0.00						6
				0.03	0.01	0.01	0.01						7
			0.03	0.02	0.02	0.03						8	
14				0.01	0.00	0.01							0
				0.01	0.01	0.01							1
				0.05	0.03	0.02							2
				0.01	0.00	0.00							3
				0.00	0.02	0.02							4
				0.02	0.01	0.01							5
				0.03	0.00	0.01							6
				0.06	0.04	0.03							7
			0.02	0.02	0.03							8	
16				0.02	0.03	0.02	0.03						0
				0.03	0.01	0.01	0.01						1
				0.03	0.03	0.00	0.04						2
				0.00	0.03	0.01	0.02						3
				0.05	0.01	0.01	0.04						4
				0.01	0.03	0.03	0.03						5
				0.04	0.03	0.04	0.04						6
				0.01	0.02	0.01	0.04						7
			0.02	0.03	0.00	0.02						8	
18				0.03	0.05	0.01	0.01						0
				0.02	0.02	0.04							1
				0.02	0.02	0.03							2
				0.00	0.05	0.01							3
				0.00	0.03	0.01							4
				0.00	0.00	0.00							5
				0.00	0.02	0.04							6
				0.02	0.00	0.05							7
			0.03	0.00	0.02							8	
20				0.02	0.01								0
				0.00	0.03								1
				0.01	0.05								2
				0.01	0.04								3
				0.02	0.02								4
				0.03	0.00								5
				0.01	0.05								6
				0.03	0.03								7
			0.00	0.02								8	
22													0
													1
													2
													3
													4
													5
													6
													7
												8	

Residual Cuadrado, Dummy Leg Excéntrico Tipo II, 16 ordenadas, tubería y codo STD													
X	Header												
COUNT	414	SUM	0,272	MSE	0,007								
	NPS	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
2	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000							0
	0.002	0.000	0.000	0.001	0.000	0.002							1
	0.002	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000							2
	0.002	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000							3
	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000							4
	0.000	0.001	0.001	0.002	0.000	0.000							5
	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000							6
	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001							7
0.001	0.003	0.001	0.001	0.000	0.000							8	
3	0.002	0.001	0.000	0.001	0.000								0
	0.002	0.002	0.000	0.001	0.001								1
	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001								2
	0.001	0.003	0.000	0.000	0.000								3
	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000								4
	0.001	0.002	0.000	0.000	0.001								5
	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000								6
	0.003	0.002	0.000	0.000	0.000								7
0.001	0.002	0.000	0.000	0.000								8	
4	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001								0
	0.001	0.002	0.000	0.000	0.001								1
	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000								2
	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000								3
	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000								4
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001								5
	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001								6
	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001								7
0.000	0.000	0.000	0.001	0.001								8	
6	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002								0
	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000								1
	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001								2
	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000								3
	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000								4
	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000								5
	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001								6
	0												

TABLAS DE VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Anexo J. Dummy Leg tangencial, tipo III, 16 ordenadas

Dummy Leg Tangencial Tipo III, 16 ordenadas, tubería y codo STD															
X	NPS	Header													
		3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24		
Riser	2	3,438	4,750	7,188	9,688	12,125	14,688								0
		3,563	4,813	7,250	9,750	12,188	14,688								1
		3,813	5,063	7,438	9,938	12,375	14,875								2
		4,188	5,375	7,688	10,188	12,563	15,125								3
		4,563	5,688	8,000	10,438	12,875	15,375								4
		4,875	6,000	8,250	10,688	13,063	15,625								5
		5,063	6,188	8,438	10,875	13,250	15,813								6
		5,188	6,250	8,500	11,000	13,375	15,875								7
	5,188	6,313	8,563	11,063	13,438	15,938								8	
		4,750	7,188	9,750	12,188	14,688									0
		4,938	7,375	9,813	12,250	14,813									1
		5,375	7,688	10,125	12,563	15,063									2
		6,000	8,125	10,563	12,938	15,438									3
		6,688	8,688	11,063	13,375	15,875									4
		7,188	9,063	11,438	13,750	16,188									5
		7,500	9,375	11,688	14,000	16,500									6
		7,625	9,500	11,875	14,188	16,688									7
		7,688	9,563	11,938	14,250	16,688									8
		7,188	9,750	12,188	14,688										0
		7,375	9,938	12,313	14,875										1
		7,938	10,375	12,750	15,250										2
		8,688	11,000	13,313	15,750										3
		9,500	11,688	13,938	16,375										4
		10,125	12,250	14,438	16,875										5
		10,500	12,625	14,813	17,250										6
		10,688	12,813	15,000	17,438										7
		10,750	12,875	15,063	17,500										8
			9,750	12,188	14,750										0
			10,063	12,500	15,000										1
			11,000	13,250	15,688										2
			12,313	14,375	16,688										3
			13,688	15,500	17,750										4
			14,750	16,375	18,563										5
			15,313	17,000	19,125										6
			15,625	17,250	19,438										7
			15,688	17,375	19,563										8
			12,188	14,750	17,938	20,500	23,000	25,563							0
			12,625	15,125	18,313	20,813	23,375	25,875							1
			13,875	16,250	19,375	21,813	24,250	26,750							2
			15,750	17,813	20,938	23,188	25,563	28,000							3
			17,688	19,438	22,500	24,688	26,938	29,313							4
			19,125	20,750	23,750	25,875	28,063	30,375							5
			19,875	21,500	24,563	26,625	28,875	31,188							6
			20,250	21,875	24,938	27,063	29,313	31,625							7
			20,313	21,938	25,063	27,188	29,438	31,750							8
			14,750	17,938	20,500	23,063	25,563								0
			15,313	18,500	21,000	23,500	26,000								1
			17,000	20,063	22,438	24,813	27,250								2
			19,438	22,375	24,500	26,688	29,000								3
			22,125	24,813	26,625	28,688	30,813								4
			24,063	26,625	28,250	30,188	32,313								5
			25,000	27,625	29,250	31,188	33,313								6
			25,438	28,125	29,750	31,688	33,813								7
			25,500	28,250	29,875	31,875	34,000								8
			18,000	20,500	23,063	25,563									0
			18,688	21,188	23,688	26,188									1
			20,875	23,125	25,438	27,813									2
			24,313	26,000	28,000	30,188									3
			28,188	29,125	30,688	32,625									4
			30,813	31,313	32,750	34,563									5
			32,000	32,563	33,938	35,750									6
			32,500	33,125	34,500	36,313									7
			32,625	33,188	34,688	36,500									8
			20,500	23,063	25,563										0
			21,313	23,750	26,250										1
			23,625	25,875	28,188										2
			27,250	29,000	31,063										3
			31,188	32,313	34,000										4
			33,938	34,750	36,250										5
			35,250	36,063	37,563										6
			35,750	36,625	38,188										7
			35,875	36,813	38,313										8
			23,063	25,563	28,125	30,625									0
			23,938	26,438	28,938	31,438									1
			26,688	28,938	31,250	33,625									2
			31,000	32,688	34,625	36,750									3
			35,750	36,625	38,188	40,000									4
			38,938	39,500	40,813	42,500									5
			40,438	41,000	42,313	44,000									6
			41,000	41,625	43,000	44,688									7
			41,125	41,813	43,188	44,938									8
			25,563	28,125	30,625										0
			26,625	29,125	31,563										1
			29,750	32,000	34,250										2
			34,750	36,313	38,250										3
			40,278	41,000	42,375										4
			44,000	44,313	45,438										5
			45,625	46,000	47,125										6
			46,250	46,688	47,875										7
			46,438	46,875	48,063										8
			28,125	30,625											0
			29,278	31,750											1
			32,875	35,063											2
			38,500	40,056											3
			44,938	45,375											4
			49,125	49,188											5
			50,875	51,000											6
			51,563	51,750											7
			51,750	52,000											8
				30,625											0
				32,000											1
				35,938											2
				42,250											3
				49,563											4
				54,250											5
				56,188											6
				56,875											7
				57,056											8

Formula, Dummy Leg Tangencial Tipo III, 16 ordenadas, tubería y codo STD															
X	NPS	Header													
		3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24		
Injerto	2	3,449	4,710	7,183	9,706	12,127	14,651								0
		3,543	4,793	7,253	9,770	12,187	14,708								1
		3,805	5,023	7,446	9,948	12,353	14,869								2
		4,181	5,346	7,718	10,200	12,591	15,099								3
		4,571	5,683	8,008	10,474	12,851	15,354								4
		4,879	5,962	8,261	10,719	13,089	15,590								5
		5,070	6,150	8,444	10,904	13,273	15,775								6
		5,164	6,251	8,552	11,015	13,386	15,890								7
	5,192	6,282	8,586	11,052	13,424	15,930								8	
		4,744	7,216	9,740	12,161	14,685									0
		4,899	7,341	9,852	12,263	14,781									1
		5,340	7,689	10,160	12,544	15,049									2
		5,985	8,177	10,594	12,942	15,427									3
		6,663	8,687	11,053	13,368	15,837									4
		7,181	9,109	11,447	13,744	16,205									5
		7,481	9,392	11,728	14,021	16,483									6
		7,622	9,544	11,888	14,185	16,651									7
		7,662	9,591	11,940	14,238										

TABLAS DE VALIDACIÓN DE REULTADOS

DUMMY LEG TANGENCIAL, TIPO III, 16 ORDENADAS (CONTINUACIÓN)

Residual, Dummy Leg Tangencial Tipo III, 16 ordenadas, tubería y codo STD													
X	Header												
COUNT	414	SUM	9,77	MAD	0,024								
	NPS	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
2		0,012	0,040	0,005	0,019	0,002	0,037						0
		0,020	0,020	0,003	0,020	0,001	0,021						1
		0,007	0,040	0,008	0,011	0,022	0,006						2
		0,007	0,029	0,030	0,013	0,028	0,026						3
		0,009	0,004	0,008	0,036	0,024	0,021						4
		0,004	0,038	0,011	0,031	0,026	0,035						5
		0,007	0,038	0,007	0,029	0,023	0,038						6
		0,023	0,001	0,052	0,015	0,011	0,015						7
	0,005	0,031	0,024	0,010	0,013	0,008						8	
3		0,006	0,029	0,010	0,027	0,003							0
		0,039	0,034	0,039	0,013	0,031							1
		0,035	0,001	0,035	0,018	0,014							2
		0,015	0,052	0,031	0,004	0,011							3
		0,024	0,000	0,010	0,007	0,038							4
		0,007	0,047	0,010	0,006	0,018							5
		0,019	0,017	0,040	0,021	0,017							6
		0,003	0,044	0,013	0,003	0,037							7
4		0,026	0,029	0,002	0,012	0,019							8
			0,040	0,002	0,015	0,009							0
			0,043	0,019	0,009	0,039							1
			0,017	0,005	0,014	0,027							2
			0,035	0,031	0,004	0,017							3
			0,022	0,022	0,008	0,027							4
			0,023	0,020	0,014	0,021							5
			0,031	0,020	0,007	0,029							6
6		0,031	0,034	0,028	0,002								7
		0,023	0,033	0,031	0,005								8
			0,026	0,009	0,029								0
			0,030	0,027	0,026								1
			0,004	0,001	0,007								2
			0,010	0,024	0,014								3
			0,028	0,004	0,041								4
			0,012	0,030	0,002								5
8		0,037	0,024	0,001									6
		0,007	0,014	0,009									7
		0,006	0,025	0,041									8
		0,032	0,006	0,020	0,002	0,029	0,016						0
			0,025	0,008	0,014	0,040	0,011	0,010					1
			0,015	0,019	0,006	0,030	0,043	0,004					2
			0,017	0,005	0,046	0,051	0,037	0,015					3
			0,002	0,009	0,025	0,007	0,031	0,023					4
10		0,006	0,033	0,016	0,009	0,047	0,020						5
		0,014	0,021	0,037	0,042	0,012	0,021						6
		0,021	0,028	0,011	0,019	0,001	0,027						7
		0,010	0,016	0,017	0,021	0,006	0,016						8
			0,018	0,006	0,024	0,008	0,010						0
			0,019	0,010	0,028	0,027	0,018						1
			0,030	0,003	0,017	0,037	0,010						2
			0,014	0,004	0,004	0,040	0,013						3
12		0,007	0,009	0,013	0,008	0,028							4
		0,037	0,006	0,046	0,052	0,019							5
		0,005	0,002	0,045	0,041	0,002							6
		0,032	0,041	0,030	0,044	0,015							7
		0,017	0,039	0,045	0,007	0,014							8
			0,051	0,030	0,002	0,016							0
			0,002	0,016	0,001	0,021							1
			0,008	0,023	0,029	0,009							2
14		0,000	0,048	0,048	0,001								3
		0,009	0,003	0,054	0,019								4
		0,013	0,056	0,044	0,009								5
		0,019	0,003	0,048	0,004								6
		0,053	0,035	0,045	0,025								7
		0,054	0,046	0,017	0,008								8
			0,030	0,002	0,016								0
			0,011	0,045	0,015								1
16		0,029	0,033	0,029									2
		0,014	0,039	0,019									3
		0,035	0,033	0,011									4
		0,027	0,026	0,013									5
		0,015	0,026	0,018									6
		0,041	0,044	0,028									7
		0,055	0,016	0,023									8
			0,002	0,016	0,029	0,012							0
18			0,049	0,003	0,031	0,055							1
			0,032	0,004	0,029	0,068							2
			0,002	0,021	0,024	0,064							3
			0,005	0,007	0,054	0,063							4
			0,045	0,001	0,026	0,055							5
			0,010	0,006	0,029	0,063							6
			0,025	0,011	0,031	0,035							7
			0,051	0,002	0,027	0,079							8
20			0,016	0,029	0,012								0
			0,011	0,038	0,013								1
			0,020	0,034	0,016								2
			0,020	0,003	0,066								3
			0,018	0,032	0,046								4
			0,010	0,033	0,040								5
			0,009	0,048	0,045								6
			0,009	0,035	0,043								7
22		0,015	0,034	0,022									8
			0,029	0,012									0
			0,008	0,016									1
			0,052	0,060									2
			0,030	0,072									3
			0,063	0,029									4
			0,044	0,077									5
			0,017	0,044									6
24		0,035	0,037										7
		0,048	0,086										8
			0,012										0
			0,064										1
			0,059										2
			0,030										3
			0,076										4
			0,061										5
		0,075										6	
		0,049										7	
		0,046										8	

Residual Cuadrado, Dummy Leg Tangencial Tipo III, 16 ordenadas, tubería y codo STD													
X	Header												
COUNT	414	SUM	0,348	MSE	0,0008								
	NPS	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
2		0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,001						0
		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000						1
		0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000						2
		0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001						3
		0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000						4
		0,000	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001						5
		0,000	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001						6
		0,001	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000						7
3		0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000						8
			0,000	0,001	0,000	0,001	0,000						0
			0,002	0,001	0,002	0,000	0,001						1
			0,001	0,000	0,001	0,000	0,000						2
			0,000	0,003	0,001	0,000	0,000						3
			0,001	0,000	0,000	0,000	0,001						4
			0,000	0,002	0,000	0,000	0,000						5
			0,000	0,000	0,002	0,000	0,000						6
4		0,000	0,002	0,000	0,000	0,000							7
			0,001	0,001	0,000	0,000	0,001						8
			0,001	0,001	0,000	0,000	0,000						0
			0,000	0,000	0,000	0,000	0,001						1
			0,000	0,000	0,000	0,000	0,000						2
			0,001	0,000	0,000	0,000	0,000						3
			0,001	0,000	0,000	0,000	0,001						4
			0,000	0,002	0,000	0,000	0,000						5
6		0,000	0,000	0,002	0,000	0,000							6
			0,001	0,000	0,000	0,000	0,000						7
			0,001	0,001	0,001	0,001	0,000						8
			0,001	0,001	0,001	0,001	0,000						0
			0,001	0,001	0,001	0,001	0,001						