

UNIVERSIDAD RICARDO PALMA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



**TÉCNICA DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES
PARA LA INTEGRACIÓN DE CARTAS GRÁFICAS
UTILIZADAS EN LOS REGISTRADORES DE FLUJO**

TESIS
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO ELECTRÓNICO

PRESENTADA POR:

Bach. LAZO HUERTA, JORGE ANDREÉ

Bach. ARIZABAL VERA, JOSUE ABNER

Asesor: Dr. Ing. HUAMANÍ NAVARRETE, PEDRO FREDDY

LIMA-PERÚ

2020

DEDICATORIA

A mi padre por nutrirme de conocimientos y acompañarme siempre en mi aprendizaje.

A mi madre por enseñarme a tener la fortaleza y perseverancia para usar esos conocimientos y alcanzar mis metas.

A mis hermanos Francis y Bruno por todos los momentos compartidos y ser parte de mi formación.

Jorge André Lazo Huerta

AGRADECIMIENTO

Al ingeniero Humberto Chong por compartir sus conocimientos y experiencias sobre el mundo de la instrumentación.

Jorge André Lazo Huerta

DEDICATORIA

En especial a mi Mamá Farida Vera con mucho amor, por los valores y virtudes inculcados en mí, por ser mi principal fortaleza, inspiración, impulso y motivación con sus consejos alentadores, constante preocupación que hicieron de mí una mejor persona; a mi Papá Federico Arizábal, por sus palabras de aliento y enorme amor, del cual herede su locura que me llena de orgullo.

A mi Tío Armando Vera por el aporte consecuente a mi crecimiento humano y profesional; a mi hermana Yurlenia Arizábal, por ser mi guía, soporte y una de las principales forjadoras de mi crecimiento profesional, por su dedicación mostrada en mi vida universitaria, cariño, enseñanzas y compañía.

A mi hermano Jesús Frank por los cimientos puestos en mí lleno de experiencias y enseñanzas geniales en la etapa de colegio.

A mama grande Alejita Oquendo, con su consejo “el que no sufre no es nada en esta vida”.

Por ultimo a mi familia en general porque me han brindado su apoyo incondicional y por compartir conmigo buenos y malos momentos.

Josue Abner Arizabal Vera

AGRADECIMIENTO

El presente trabajo agradezco a Dios por ser mi guía y acompañarme en el transcurso de mi vida, brindándome paciencia y sabiduría para culminar con éxito mis metas propuestas.

Agradecer a mi alma mater, la universidad Ricardo Palma por todo el conocimiento adquirido.

A nuestro asesor de tesis Dr. Ing. Pedro Huamaní, por su orientación brindada en el proceso de investigación.

Finalmente quiero dedicar esta tesis a todos mis amigos, por apoyarme cuando más los necesite, por extender su mano en momentos difíciles y por el amor brindado cada día, siempre los llevare en mi corazón.

Josue Abner Arizabal Vera

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	6
ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE TABLAS	9
ÍNDICE DE ECUACIONES	10
RESUMEN	11
ABSTRACT.....	12
INTRODUCCIÓN	13
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO Y DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA... 14	
1.1. Formulación y Delimitación del Problema	14
1.2. Objetivos	15
1.2.1. Objetivo General	15
1.2.2. Objetivos Específicos.....	15
1.3. Limitaciones del Estudio.....	15
1.3.1. Teórica.....	15
1.3.2. Acceso	16
1.4. Importancia y Justificación del estudio.....	16
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	17
2.1. Marco Histórico	17
2.2. Investigaciones Relacionadas con el tema	17
2.3. Estructura Teórica y Científica que sustenta el Estudio.....	19
2.4. Definición de términos básicos	20
2.5. Metodología del Estudio	22
2.5.1. Tipo y método de Investigación	22
2.5.2. Población de Estudio.....	22
2.5.3. Diseño Muestral	23
2.5.4. Relación entre variables	23
2.6. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos:	23
2.6.1. Procedimientos para la recolección de datos	23
2.6.2. Técnicas de procesamiento y análisis de datos	24
2.7. Costo final del proyecto	25
CAPÍTULO III: DISEÑO DEL ALGORITMO EN MATLAB	26
3.1. Adquisición y Digitalización de imagen	26
3.2. Recorte y delimitación de espacios	27

3.3.	Filtrado de Color Rojo - Variable de Presión Diferencial.....	30
3.4.	Filtrado de Color Azul - Variable de Presión Estática.....	32
3.5.	Obtención de datos trazados.....	33
3.6.	Recolección y registro de valores	40
3.7.	Operacionalización de variable	44
3.8.	Resultado del flujo instantáneo y totalizado	46
CAPÍTULO IV: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS		49
4.1.	Resultados y análisis (error relativo).....	49
4.2.	Medición de porcentaje de error	51
CONCLUSIONES		63
RECOMENDACIONES.....		64
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		65
ANEXOS		66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Carta gráfica Graphic Controls, modelo: M-100-H	21
Figura 2. Registrador de flujo Barton 202E.....	21
Figura 3. Integrador de cartas gráficas.....	22
Figura 4. Diagrama de bloques de las principales etapas utilizadas en el Procesamiento de Imágenes.....	24
Figura 5. Representación de dos Cartas Gráficas digitalizadas	26
Figura 6. Carta Gráfica escaneada asignada a F1 con valor de Radio aproximado...	27
Figura 7. Imagen F1 y circunferencia obtenida con el comando VISCIRCLES.....	28
Figura 8. Imagen F3 luego de recortar y contener en 999x999 pixeles.....	29
Figura 9. Imagen FR4 luego de filtrar el trazo rojo	31
Figura 10. Imagen FR5 luego de dilatar y rellenar puntos perdidos.....	31
Figura 11. Imagen FB4 luego de filtrar el trazo azul.....	32
Figura 12. Imagen FR5 luego de dilatar y rellenar puntos perdidos.....	33
Figura 13. Imagen A1 de guía en tiempo 00:00 horas.....	34
Figura 14. Matriz lógica A6 con línea de guía en instante de tiempo 00:00 horas....	34
Figura 15. Matriz “c” obtenida de la multiplicación y rotación de A6 con FB5.....	36
Figura 16. Matriz “d” obtenida de las distancias de la matriz “c” al punto medio....	37
Figura 17. Medidas en píxeles de la carta gráfica.....	40
Figura 18. Gráfica de recta inH ₂ O vs Píxel.....	41
Figura 19. Error (%) Flujo totalizado	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Costo final del proyecto	25
Tabla 2. Características de medición de Carta Gráfica con trazado manual F1.	50
Tabla 3. Características de medición de Carta Gráfica con trazado manual G1.	51
Tabla 4 Características de medición de Carta Gráfica con trazado digital N°1.....	52
Tabla 5 Características de medición de Carta Gráfica con trazado digital N°2.....	53
Tabla 6 Características de medición de Carta Gráfica con trazado digital N°3.....	54
Tabla 7 Características de medición de Carta Gráfica con trazado digital N°4.....	55
Tabla 8 Características de medición de Carta Gráfica con trazado digital N°5.....	56
Tabla 9 Características de medición de Carta Gráfica con trazado digital N°6.....	57
Tabla 10 Características de medición de Carta Gráfica con trazado digital N°7.....	58
Tabla 11 Características de medición de Carta Gráfica con trazado digital N°8.....	59
Tabla 12 Características de medición de Carta Gráfica con trazado digital N°9.....	60
Tabla 13 Características de medición de Carta Gráfica con trazado digital N°10.....	61
Tabla 14 Recolección de errores de las 10 cartas simuladas	62

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Cálculo de pendiente:.....	41
Ecuación 2: Cálculo de la ecuación general de la recta en base a la pendiente:.....	41
Ecuación 3: Ecuación de conversión de píxeles a inH ₂ O para presión diferencial...	41
Ecuación 4: Ecuación de conversión de píxeles a psi para presión estática	41
Ecuación 5: Ecuación de flujo volumétrico por el principio de presión diferencial..	44
Ecuación 6: Coeficiente de descarga (Cd)	44
Ecuación 7: Velocidad de Approach (E _v):	45
Ecuación 8: El factor de expansión (Y)	45
Ecuación 9: Densidad en condiciones de proceso ($\rho_{t,p}$):.....	45
Ecuación 10: Densidad en condiciones base (ρ_b)	45
Ecuación 11: Porcentaje de error del Flujo Totalizado.....	61

RESUMEN

En este trabajo de tesis se presentó la técnica de integración y totalización de flujo de cartas gráficas aplicando algoritmos matemáticos de procesamiento digital de imágenes, en el entorno del software de computación Matlab. De esta manera, se logró la interpretación de las cartas gráficas utilizadas en los registradores mecánicos de flujo (manógrafo) que operan bajo el principio de presión diferencial. Para esto, como primera muestra, se utilizaron dos cartas gráficas y dos plumillas de la marca Graphic Controls modelo M-100-H que fueron trazadas manualmente en valores aleatorios, simulando el trazo de un registrador de flujo. Luego, se procedió con la digitalización de la carta a través de un escáner y se aplicaron recortes al área útil de la gráfica, seguidamente se filtraron los colores rojo y azul que corresponden a las variables de la presión diferencial y presión estática, respectivamente. Posteriormente, se registraron ambas presiones por cada unidad de tiempo en dos variables tipo matrices, las cuales se transformaron luego a las unidades de medida de la carta gráfica (inH₂O y psi). Una vez que estos valores fueron comprobados y verificados con los valores trazados, se operaron dando como resultado el flujo instantáneo en una tercera matriz, la cual fue integrada para obtener el flujo totalizado de toda la carta gráfica. Como etapa final para conseguir una mejor precisión del porcentaje de error de la técnica propuesta se escaneó una carta gráfica en blanco y con ayuda de un software de diseño gráfico (CorelDraw) se hizo el trazado digital, simulando el de las plumillas con el fin de que este trazo tenga valores más precisos y no estén sujetos a la interpretación subjetiva del operador. Para esto se utilizaron 10 cartas a escala real con valores constantes en todo el rango de la carta gráfica, seguidamente se volvió a aplicar el algoritmo propuesto y se registraron los valores obtenidos los cuales fueron comparados con los valores teóricos calculando los errores porcentuales de la presión diferencial (2.3513%), presión estática (2.3333%), flujo instantáneo (1.3115%) y flujo totalizado (0.7914%).

Palabras claves: Carta gráfica, Registrador, Flujo, Integrador, Matlab.

ABSTRACT

In this thesis work was presented the integration technique and graphic chart flow totalization applying mathematical algorithms of digital image processing in the Matlab computer software environment. In this way, the interpretation of the graphical charts used the mechanical flow recorders that operate under the principle of differential pressure was achieved. For this, first sample, two graphic charts and to Graphic Controls brand nibs model M-100-H used, which were drawn manually in random values, simulating the trace of a flow recorder. Then, the chart was digitized through a scanner and cutouts were applied to the graph area. After that the red and blue colors corresponding to the differential pressure and static pressure variables, respectively, were filtered. Later, both pressures were recorded for each unit of time in two matte-type variables, which were then transformed into the units of measurement of the graphic chart. (inH₂O and psi). Once these values were checked and verified with the plotted values, they were operated resulting in the instantaneous flow in a third matrix, which was integrated to obtain the totalized flow of the entire graphic chart. As a final stage to achieve a better accuracy of the percentage of error of the proposed technique, a blank graphic chart was scanned and with the help of a graphic design software (CorelDraw) the digital plot was made, simulating that of the pens in order to that this line has more precise values and is not subject to the subjective interpretation of the operator. For this, 10 real-scale charts were used with constant values throughout the range of the graphic chart, then the proposed algorithm was reapplied and the values obtained were recorded which were compared with the theoretical values calculating the percentage errors of the pressure differential (2.3513%), static pressure (2.3333%), instantaneous flow (1.3115%) and totalized flow (0.7914%)

Keywords: Graphic chart, Recorder, Flow, Integrator.

INTRODUCCIÓN

Para este trabajo de tesis, se planteó una solución moderna orientada al cambio de tecnología de la totalización e integración del flujo medido en los registradores; pues, estos no otorgan valores ni datos que puedan ser interpretados con facilidad, debido a que la información obtenida se limita a una gráfica que se obtiene a partir del movimiento mecánico de las plumillas del registrador (manógrafo), que posteriormente es enviada para interpretarse y totalizarse mediante un proceso llamado “Integración” que muestra la producción total de la carta gráfica. Para la realización de ello, se planteó el uso de técnicas matemáticas de procesamiento digital de imágenes, implementadas en el software Matlab, con la finalidad de reemplazar la integración tradicional por una completamente moderna y práctica para los usuarios.

De esta manera se ha dispuesto para el primer capítulo, el planteamiento del problema. Luego, para el segundo capítulo lo correspondiente al marco teórico donde se incluye lo referente a las cartas gráficas utilizadas y las técnicas matemáticas de procesamiento digital de imágenes empleadas. Posteriormente, en el capítulo 3, se considera el diseño del algoritmo computacional desarrollado mediante el software Matlab, para la adquisición, digitalización e interpretación de los resultados de las cartas gráficas; para ello, se procedió a realizar el corte y delimitación de zonas no utilizadas y así tomar una mayor concentración con una operación de filtrado espacial, para continuar con la obtención de los datos trazados de la presión diferencial y estática; de esta manera, a partir del modelo de la carta gráfica, se logró diseñar un trazo como una línea guía en el tiempo 00:00 horas que, en sentido horario, permitió tomar las muestras numéricas para cada punto de intersección con las presiones en un periodo de tiempo de 24 horas; por último, se hizo la recolección y obtención de valores para su operacionalización mediante el principio de presión diferencial, siguiendo como regla el acuerdo del AGA 3, para tomar valores estandarizados y obtener el flujo instantáneo. Y, en el capítulo 4, se analizó el error relativo y el correcto funcionamiento del algoritmo propuesto, además de la prueba con cartas trazadas digitalmente con valores constantes y de alta precisión a través de todo el rango de la carta, y comprobando su valor experimental con el valor teórico de las presiones diferenciales, las presiones estáticas y el flujo.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO Y DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

1.1. Formulación y Delimitación del Problema

La variable flujo es una de las más significativas y de mayor importancia en la industria, debido a que la medición correcta de esta variable influye directamente en la producción diaria de un proceso industrial. En la actualidad, existen equipos modernos que facilitan esta medición en tiempo real, sea a través de un display o de una señal eléctrica (con protocolo de comunicación HART). Sin embargo, existe un gran número de instrumentos que carecen de este último tipo de comunicación, tal es el caso del registrador de flujo que en la actualidad aún se continúa utilizando, instalando y solicitándolo en el campo de trabajo sea por comodidad del operador, estandarización de los equipos o temas financieros que limitan la migración hacia un equipo moderno. Asimismo, el problema de estos registradores es el tiempo que demora la interpretación de los datos una vez que hayan sido representados gráficamente, debido a que después de ser trazada la carta gráfica, ésta es llevada a una máquina integradora que la interpreta mediante el uso de sensores electromecánicos que actualmente ya no se fabrican y sus repuestos se encuentran discontinuados. Por lo cual, la solución que se propone en este trabajo de investigación es el desarrollo algorítmico y aplicación de una técnica de procesamiento digital de imágenes, utilizando el software Matlab, para la interpretación de la producción trazada en la carta gráfica.

1.1.1. Problema General

¿Cómo desarrollar algorítmicamente una técnica de procesamiento digital de imágenes, utilizando el software Matlab, para realizar la integración de cartas gráficas utilizadas en los registradores de flujo?

1.1.2. Problemas Específicos

- a) ¿Cómo implementar algorítmicamente, en el software Matlab, una técnica de procesamiento digital de imágenes para reconocer en una carta gráfica el trazo rojo y azul, efectuados por las presiones diferencial y estática, respectivamente?

- b) ¿De qué manera se desarrollará la interpretación de valores en el software Matlab de los trazos para realizar el registro y la operacionalización de las presiones estática y diferencial, con la finalidad de calcular el flujo instantáneo y el flujo totalizado?
- c) ¿Cómo realizar la comparación numérica entre el flujo obtenido y el flujo trazado digitalmente a través de la técnica de procesamiento digital de imágenes, con la finalidad de determinar el grado de precisión de la técnica propuesta?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Desarrollar algorítmicamente una técnica de procesamiento digital de imágenes, utilizando el software Matlab, para realizar la integración de cartas gráficas utilizadas en los registradores de flujo.

1.2.2. Objetivos Específicos

- a) Implementar algorítmicamente, en el software Matlab, una técnica de procesamiento digital de imágenes para reconocer en una carta gráfica los trazos azul y rojo, efectuados por las presiones estática y diferencial, respectivamente.
- b) Desarrollar la interpretación de valores en el software Matlab de los trazos donde sea posible realizar el registro y la operacionalización de las presiones estática y diferencial, con la finalidad de calcular el flujo en cada instante de tiempo y el flujo totalizado.
- c) Realizar la comparación numérica entre el flujo obtenido y el flujo teórico trazado digitalmente a través de la técnica de procesamiento digital de imágenes, con la finalidad de determinar el grado de precisión de la técnica propuesta.

1.3. Limitaciones del Estudio

1.3.1. Teórica

Se limitará a procesar digitalmente las cartas gráficas de un tipo de registrador en particular: Recorder Barton modelo 202E – Cameron Measurement Systems. (Ver anexo 13).

1.3.2. Acceso

Se limitará a la obtención de cartas gráficas trazadas manualmente, ya que las cartas trazadas en plantas industriales son privadas y de acceso restringido, lo que dificulta el alcance a éstas.

1.4. Importancia y Justificación del estudio

Actualmente en la industria del sector de gas y petróleo se necesitan soluciones eficientes y con competitividad acorde al mercado. Por lo que la idea de un cambio de tecnología en una batería o en un lote de producción resulta altamente costoso debido a la compra innecesaria de equipos nuevos y los gastos operativos que demandaría esto, como la capacitación al personal, gasto capital e incompatibilidad con los otros instrumentos existentes.

Uno de los principales problemas que existe en el método tradicional de integración es el tiempo que demora y la discontinuidad de los equipos lo que genera la necesidad de muchas empresas de tener que invertir dinero en el mantenimiento o tercerizar el servicio de integración hacia otras empresas que dispongan del integrador operativo, generando pérdidas de dinero y tiempo.

Es por ello que la técnica propuesta basada en el procesamiento digital de imágenes brinda una solución correspondiente a las necesidades demandadas actualmente en la industria del petróleo y gas, logrando tener un control y registro de toda la producción en un formato digital que facilita el análisis y la comunicación con otros periféricos sin demandar compra de equipos nuevos.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Marco Histórico

La medición de flujo líquido y gaseoso usando como elemento de sensor la placa de orificio y el principio del Teorema de Bernoulli, ha sido por varias décadas el de mayor aplicación en procesos industriales.

Particularmente en el Perú, la Dirección General de Hidrocarburos del Ministerio de Energía y Minas estandarizó al registrador mecánico de presión diferencial como el medidor oficial para la medición de hidrocarburos. (Chong, 2017).

Entonces, conforme se ha desarrollado la tecnología, estos sistemas de medición mecánicos no están a la par con los sistemas de medición avanzados como los computadores de flujo, los cuales operan bajo el mismo principio y cumplen la misma función, pero con una mayor precisión (0.05% en vez de 0.5%) y rapidez en la obtención del flujo ya que no dependen de un equipo externo para la interpretación de la variable flujo.

2.2. Investigaciones Relacionadas con el tema

- Según Huamaní P. (2017). Red neuronal ART2 embebida en hardware para el reconocimiento de patrones de voz en tiempo real; señala que en este trabajo de investigación se presenta la simulación y las diferentes técnicas matemáticas de procesamiento digital de señales utilizando el software MALAB para luego embeberlo en el hardware NI myRIO 1900; y finalmente obtener los coeficientes de predicción lineal (LPC) para entrenar la red neuronal artificial adaptativa ART. Se logró una efectividad del 88% en una base de datos de 600 grabaciones de voz digital.
- Según Chong, H. (2017). Optimización de la medición de flujo bajo el principio de la presión diferencial y su importancia en la Ingeniería de Control y Automatización industrial; el trabajo de investigación analiza y evalúa las técnicas de medición en base a la variable flujo bajo el principio de la presión diferencial, proponiendo mejoras tecnológicas en el sector industrial y en la formación de los alumnos de pregrado de las especialidades de ingeniería. Además, propone soluciones prácticas para actuar y optimizar la medición de flujo en los campos petroleros de la zona Noreste de Piura y Talara. Finalmente, los resultados de este

estudio centran su objetivo en la optimización y medición de la variable flujo; y su difusión a través de los cursos de las especialidades de ingeniería.

- Luego, según Navarro Lévano, J. C. (2006). Adquisición y reconocimiento de imágenes; indica que en el estudio de investigación descrito se detallan las técnicas utilizadas en el tratamiento digital de las imágenes, así como sus aplicaciones utilizando el software MATLAB. Asimismo, resalta la necesidad de mejorar la información pictórica para la interpretación humana y el procesamiento de datos para la percepción automática por una computadora. Como primer paso se hace el reconocimiento de imágenes para procesarlo por el modelo matemático empleado. Finalmente se muestran las aplicaciones del software para el proceso de imágenes de MATLAB.
- En Fundamentos de procesamiento de imágenes. Documentación Universidad Autónoma de Baja California, Unidad Tijuana, de Elizondo, J. E., & Maestre, L. P. (2002).; señala que se presenta el análisis de imágenes de rayos x relacionados a las personas que poseen complicaciones en forma inmediata o tardía en fracturas de fémur al año, por lo que propone hacer un análisis y evaluación de métodos de procesamiento de rayos x para la asistencia del diagnóstico de Osteoporosis dados en las siguientes etapas: pre procesamiento, segmentación extracción de características y clasificación para lograr detectar el patrón trabecular en imágenes de rayos x, para lo cual utiliza métodos de reprocesamiento como la métrica de evaluación Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) que permite medir la calidad de imagen, también utilizó un Gold-Standard de segmentación y de clasificación con la ayuda de un especialista en traumatología para evaluar y comparar los resultados obtenidos. Asimismo, los resultados muestran un coeficiente de DICE del 83% en segmentación y un 87% de precisión en la clasificación de osteoporosis de fémur proximal.
- Y, según Camacho, E. J. (2009) en el trabajo de investigación: Medición de distancias por medio de procesamiento de imágenes y triangulación, haciendo uso de cámaras de video, presenta dos alternativas de medición mediante cámaras de video. Su primer método consiste en medir la distancia entre la cámara y el objeto a tomar utilizando el procesamiento de imágenes, donde se obtiene la profundidad de la fotografía con la cual se puede calcular la distancia mencionada. Y, en el segundo método emplea dos o tres cámaras y el objeto a tomar, de esta manera

realiza cálculos trigonométricos para encontrar las distancias de cada cámara y el objeto formando una triangulación de medidas.

2.3. Estructura Teórica y Científica que sustenta el Estudio

2.3.1. Medición de Flujo

En la mayor parte de las operaciones realizadas en los procesos industriales, laboratorios y plantas piloto, es muy importante la medición de caudales de líquidos y gases. Existen dos tipos de principio de medición importantes, los volumétricos que determinan el caudal en volumen del fluido, y los de masa que determinan el caudal másico. Asimismo, se reservan los medidores volumétricos para la medida general de caudal, y se destinan los medidores de caudal másico a aquellas aplicaciones en las que la exactitud de la medida es importante; por ejemplo, determinaciones finales del caudal del producto para su facturación y/o transferencia de custodia.

2.3.2. Medidores Volumétricos

Los medidores volumétricos determinan el caudal en volumen de fluido sea directamente (desplazamiento), o indirectamente por deducción o inferencia (presión diferencial, área variable, velocidad, fuerza, tensión inducida, torbellino). Por lo cual, es necesario señalar que la medida de caudal volumétrico en la industria se lleva a cabo principalmente con elementos que dan lugar a una presión diferencial, al paso del fluido. Entre estos elementos se encuentran la placa orificio o diafragma, la tobera, el tubo Venturi, el tubo Pitot y el tubo Annubar. Además, la fórmula general de los elementos de presión diferencial se basa en la diferencia de presiones provocada por un estrechamiento en la tubería por donde circula el fluido (líquido, gas o vapor). Así como también, la presión diferencial provocada por el estrechamiento es captada por dos tomas de presión situadas inmediatamente aguas arriba y aguas abajo del mismo, o bien a una corta distancia. Su valor es mayor que la pérdida de carga real que debe compensar el sistema de bombeo del fluido. (Creus, 2011)

2.3.3. Normas Internacionales para la medición de fluidos

Seguidamente, se muestra una relación de normas internacionales para la medición de fluidos.

AGA 3 / API 14.4: Cálculo de flujo compensado usando placa de orificio.

AGA Report # 3 – Orifice Metering of Natural Gas.

Parte 1 (1990): proporciona las ecuaciones básicas para el cálculo del flujo mediante el uso de placas de orificio.

Parte 2 (2000): proporciona las especificaciones para la instalación de las placas de orificio, acondicionadores de flujo y todo equipo asociado al sistema de medición.

Parte 3 (1992): provee guías prácticas para la medición del gas natural. Los métodos para la medición del flujo másico y el flujo volumétrico son presentados en concordancia con la industria de los Estados Unidos de Norteamérica.

Parte 4 (1992): provee instrucciones para la implementación de sistemas de medición con placas de orificio, incluyendo subrutinas de documentación (Creus, 2011).

2.4. Definición de términos básicos

En las últimas décadas, la terminología utilizada en los sistemas de medición y control automático se ha unificado a nivel mundial, con el objetivo que todos los fabricantes de estos sistemas utilicen el mismo lenguaje. Las recomendaciones y sugerencias realizadas por la Sociedad Internacional de Automatización (ISA) revisten una significativa importancia en el campo de la instrumentación industrial, control automático y automatización de procesos industriales. Además, su difusión y comprensión a nivel de los cursos de pregrado en las carreras de ingeniería afines al sector industrial permiten a los egresados ser más competitivos y cubrir la actual carencia de profesionales en este campo. (Chong, H. 2017. Pag 12).

De esta manera, los principales términos se definen a continuación.

2.4.1. Carta gráfica para el registro de producción de petróleo y gas

Son secciones circulares de papel especial, las cuales van insertadas dentro de los registradores de flujo. De acuerdo con el mecanismo de rotación del registrador éstas van girando y siendo trazadas por las plumillas, las cuales trazan la variable de proceso en la cual están instaladas. Por lo cual, para este trabajo de tesis se optó por utilizar el modelo M-100-H de la marca Graphic Controls, cuyo tiempo de rotación corresponde a 24 horas, y las variables a trazar son la presión

diferencial (0 a 100 inH₂O) y presión estática (0 a 100 psi). A continuación, la figura 1 muestra la representación de una carta gráfica.

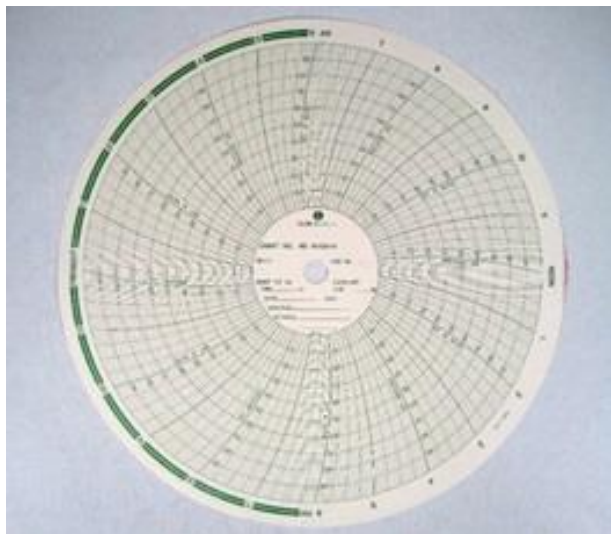


Figura 1. Carta gráfica Graphic Controls, modelo: M-100-H
Fuente: www.graphiccontrols.com

2.4.2. Registrador de flujo

Instrumento de medición de flujo que opera bajo el principio de presión diferencial, y realiza el registro de las variables medidas (presión diferencial, presión estática, flujo o temperatura), en una cartilla gráfica mediante el uso de plumillas acopladas a los sensores del registrador. A continuación, la figura 2 muestra un registrador de flujo modelo Barton 202E.



Figura 2. Registrador de flujo Barton 202E
Fuente: www.sensiaglobal.com

2.4.3. Integrador de Cartas Gráficas

Instrumento electromecánico que realiza el proceso de interpretación e integración de los trazos realizados en la cartilla gráfica, y muestra como resultado el flujo totalizado de la producción en función a la raíz cuadrada de la presión diferencial. A continuación, la figura 3 muestra la fotografía de un integrador de carta gráfica.

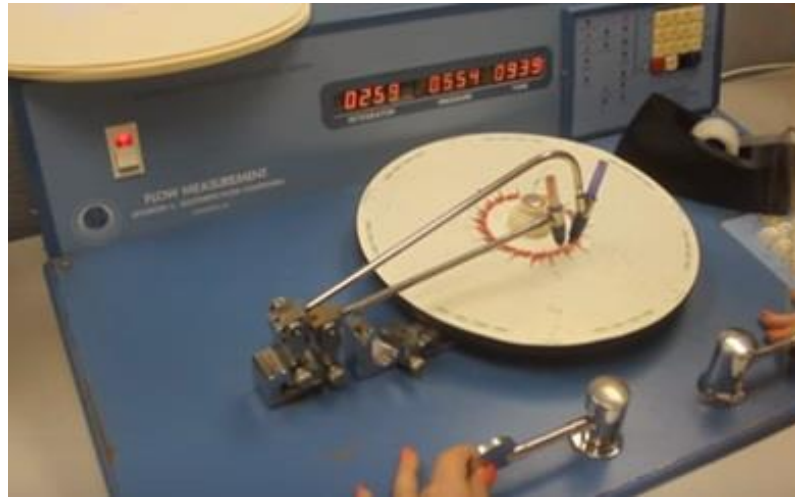


Figura 3. Integrador de cartas gráficas
Fuente: www.coastalflow.com

2.4.4. Presión Estática

Es la presión de ingreso que se encuentra aguas arriba del elemento de sensor.

2.4.5. Presión Diferencial

Es la resta entre la presión de ingreso y la presión de salida del elemento de sensor.

2.5. Metodología del Estudio

2.5.1. Tipo y método de Investigación

El tipo de investigación es aplicada y tecnológica. Y, el método de investigación es empírico y experimental, debido a que se trabajó con datos obtenidos a través de medios digitales (escáner), para luego aplicar las técnicas de procesamiento digital de imágenes.

2.5.2. Población de Estudio

Corresponde a todos los registradores de medición de flujo que trabajan bajo el principio de presión diferencial.

2.5.3. Diseño Muestral

Corresponde a 2 cartas gráficas de grabación analógica de la industria de petróleo y gas, modelo M-100-H, pertenecientes a un tipo de registrador de flujo modelo 202E Barton. Adicionalmente, a esta muestra, corresponden 10 cartas simuladas para el cálculo de la precisión de la técnica propuesta. Se eligió esa muestra debido a ser una de las más usadas en el registrador de flujo en mención y que actualmente, se encuentran instalados en los campos de petróleo y gas de Talara y Piura.

2.5.4. Relación entre variables

- **Variable dependiente:** Integración de la carta gráfica.
- **Variable independiente:** Técnica matemática de procesamiento digital de imágenes.

2.6. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos:

La técnica de recolección de datos utilizada fue a través de la captura y digitalización de las cartas gráficas, mientras que el instrumento empleado fue a través de un escáner de tamaño A3 a colores de resolución estándar.

2.6.1. Procedimientos para la recolección de datos

Una vez realizada la captura y digitalización de las cartas gráficas, estas fueron almacenadas en un formato de archivo de imagen JPG. Luego, fueron tratadas digitalmente a través de una técnica de procesamiento digital de imágenes e implementadas algorítmicamente en el software MATLAB, con el propósito de identificar las variables: Presión diferencial “Pd” (trazo de color rojo) y presión estática “Ps” (trazo de color azul).

Es así que, a manera de síntesis, se desarrollaron los siguientes pasos:

- I. Recolección de dos cartas gráficas, Graphic Controls modelo M-100-H.
- II. Ejecución de dos trazados manuales y diez trazados digitales de presión diferencial y presión estática en valores constantes y variables.
- III. Cálculo del flujo teórico en base a las presiones indicadas en el paso II.
- IV. Cálculo del valor flujo obtenido por el Matlab mediante la aplicación de la técnica propuesta del procesamiento digital de imágenes.

V. Comparación del flujo obtenido por el Matlab y el flujo teórico.

2.6.2. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Este tema de investigación es de tipo aplicativo y tecnológico, por lo cual en el análisis de los datos no se emplearon técnicas estadísticas sino más bien se desarrollaron técnicas matemáticas. De esta manera, la técnica de procesamiento de datos empleada en este trabajo de tesis estuvo orientada al tratamiento digital de las imágenes y su posterior verificación, con el fin de lograr el cumplimiento de los objetivos. De esta forma, en la figura 4, se representa un diagrama de bloques con las principales etapas que se desarrollaron en este proyecto de tesis.

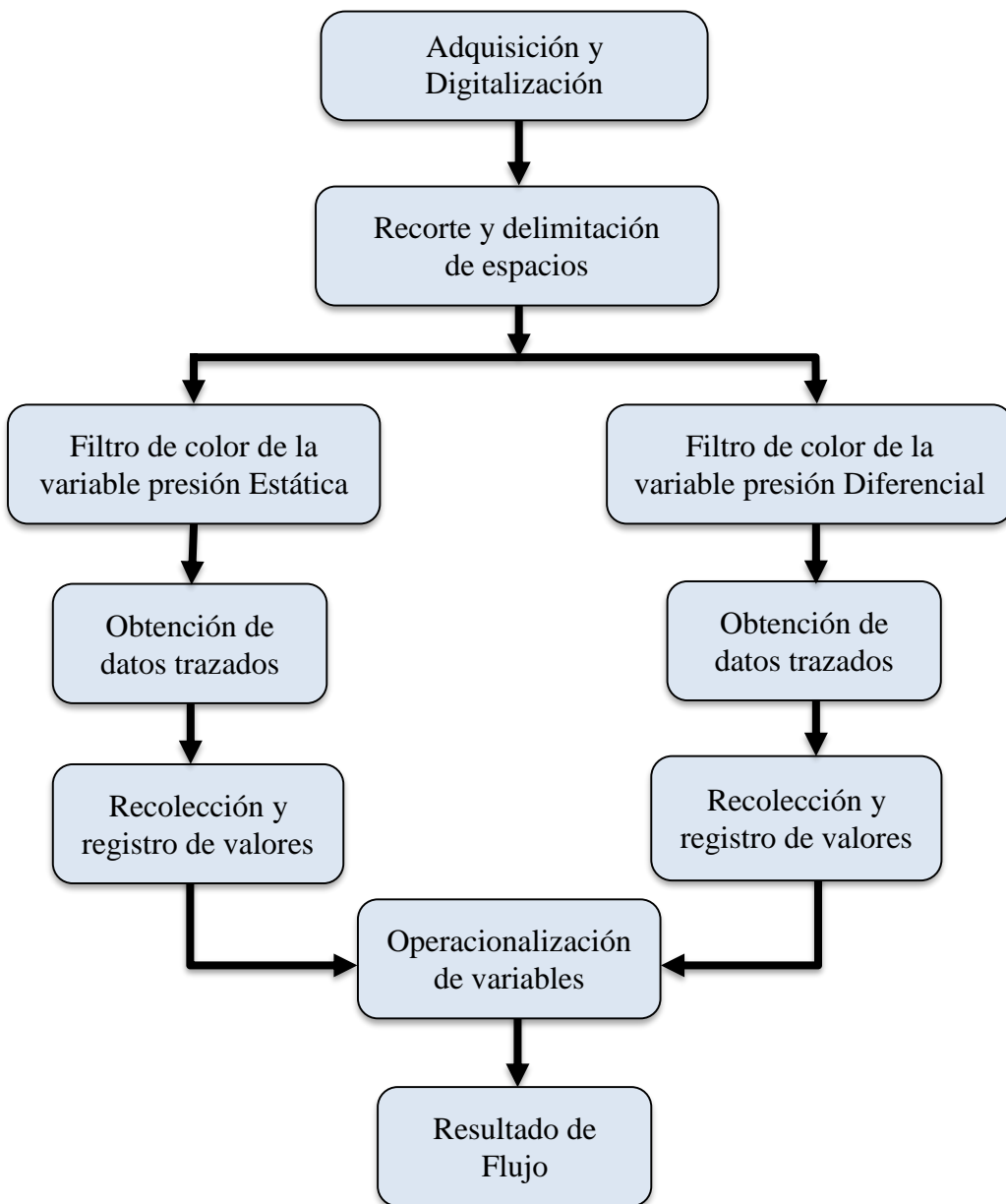


Figura 4. Diagrama de bloques de las principales etapas utilizadas en el Procesamiento de Imágenes (Fuente: Propia)

2.7. Costo final del proyecto

A continuación, se presentan los gastos involucrados en el desarrollo de este estudio de investigación los cuales no incluyen la mano de obra.

Tabla 1. Costo final del proyecto

Ítem	Cant	Descripción	Precio Unitario	Precio Total
1	1	Licencia software Matlab (versión estudiante)	Sin dato	Sin dato
2	1	Cartas gráficas (Caja de 100 unidades) Graphic Controls P/N: 00005959 Modelo: M-100-H	S/ 90.00	S/ 90.00
3	1	Plumilla azul (Caja de 6 unidades) Graphic Controls P/N: 10557354 Modelo: 82-39-0203-06	S/ 70.00	S/ 70.00
4	1	Plumilla roja (Caja de 6 unidades) Graphic Controls P/N: 1055722 Modelo: 82-39-0102-06	S/ 70.00	S/ 70.00
5	2	Servicio de escáner	S/ 2.00	S/ 4.00
TOTAL				S/ 234.00

(Fuente: Propia)

CAPÍTULO III: DISEÑO DEL ALGORITMO EN MATLAB

Este capítulo contiene el diseño del algoritmo desarrollado en el software Matlab, para la obtención de las presiones diferencial y estática partir del uso de técnicas matemáticas de procesamiento digital de imágenes. Se inicia con la adquisición y digitalización de las imágenes de cartas gráficas, luego se continúa con el recorte, aplicación de filtros de color, obtención de los datos trazados, y finalmente se halla el flujo instantáneo y totalizado. Se utilizó el software MATLAB debido a la eficiencia que tienen las librerías para el procesamiento digital de imágenes.

3.1. Adquisición y Digitalización de imagen

Una vez trazadas las dos cartas gráficas de modelo M-100-H, se procedió a digitalizarlas a través del escáner Epson Workforce WF-7710DWF; para ello, se utilizó un fondo gris en el escáner para obtener un mayor contraste con la carta gráfica. Adicionalmente, se obtuvieron dos fotografías digitales con 24 bits/pixel y en formato de archivo JPG debido a que es el tipo de formato imagen más utilizado en su tipo. Tales archivos fueron localizados en la carpeta TESIS de la PC utilizada en este trabajo de tesis; y, con apoyo del software Matlab, se procedió a realizar la lectura de las dos muestras utilizando el comando IMREAD y asignándolas a las variables del tipo arreglo: F1, G1.

```
>> F1 = imread('C:\Tesis\CHART00F.jpg');  
>> G1 = imread('C:\Tesis\CHART00G.jpg');  
>> subplot(1,2,1), imshow(F1); subplot(1,2,2), imshow(G1);
```

Seguidamente, en la figura 5, se muestran las imágenes digitalizadas de dos cartas gráficas, las cuales fueron representadas por las variables F1 y G1, respectivamente.



Figura 5. Representación de dos Cartas Gráficas digitalizadas
(Fuente: Propia)

Luego, se utilizó el comando `IMDISTLINE`, del Matlab, el cual es una herramienta que crea una distancia arrastrable en la imagen obtenida, se logró obtener el valor de radio aproximado de la carta gráfica en píxeles. Este valor fue igual a 1676.08 y 1654.09 respectivamente para cada carta analizada. En la figura 6, se representa la carta gráfica con el valor de radio aproximado para la imagen identificada con la variable `F1`.

```
>> r=imdistline;
```

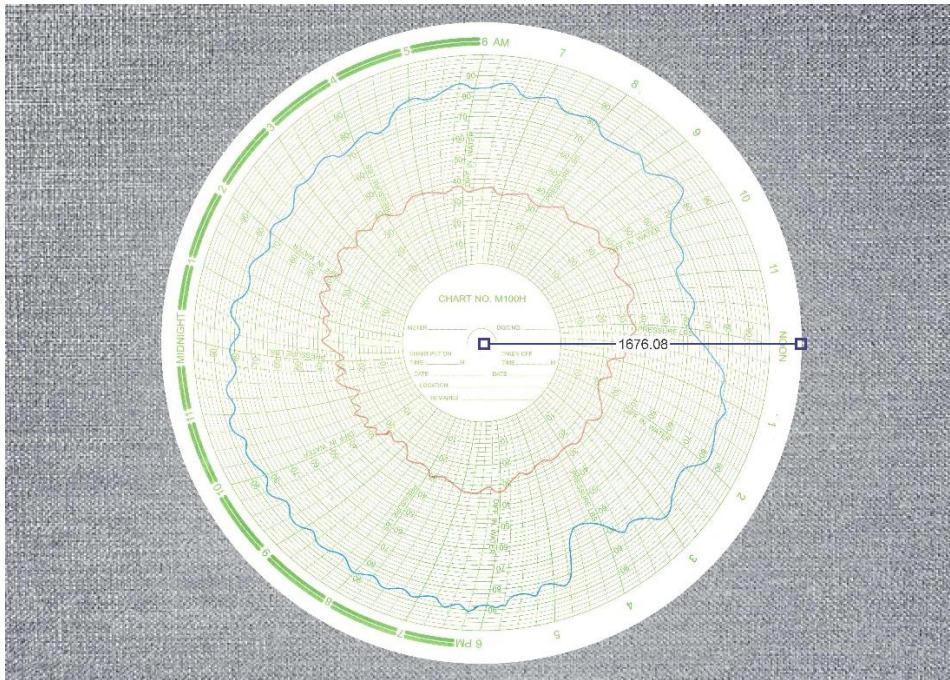


Figura 6. Carta Gráfica escaneada asignada a `F1` con valor de Radio aproximado.
(Fuente: Propia)

3.2. Recorte y delimitación de espacios

Una vez obtenido el radio aproximado, se procedió con la ejecución del comando `IMFINDCIRCLES` del Matlab, el cual se encarga de ubicar todas las figuras circulares de la imagen representada numéricamente como `F1`; luego, para tener una mayor precisión y detectar únicamente la circunferencia mayor (correspondiente a la circunferencia de la carta), se utilizaron los rangos de radios en función al valor del radio obtenido en el paso anterior (1676.08), y con una sensibilidad de 0.998 que se obtuvo a través de prueba y error, ya que una sensibilidad muy alta detecta circunferencias donde no existen, y una sensibilidad muy baja no detecta ninguna circunferencia.

Una vez ubicada la circunferencia del perímetro de la carta se procedió a graficarla con el comando `VISCIRCLES`, del Matlab, para poder conseguir su verificación. Por

lo tanto, se muestra parte del código desarrollado en el software Matlab, utilizando la función `IMFINDCIRCLES` donde las dos cantidades entre corchetes, `[1650 1700]`, representan al radio mínimo y máximo para la búsqueda del círculo; y las variables “centers” y “radii” corresponden a las coordenadas del centro y el radio, respectivamente. A continuación, la figura 7 muestra la representación de la circunferencia mayor obtenida con el comando `VISCIRCLES`.

```
>> [centers,radii]=imfindcircles(F1,[1650 1700],'Sensitivity',0.998);
>> viscircles(centers, radii);
>> centers, radii
centers =
    2492.2    1769.6
radii =
    1674.8
```

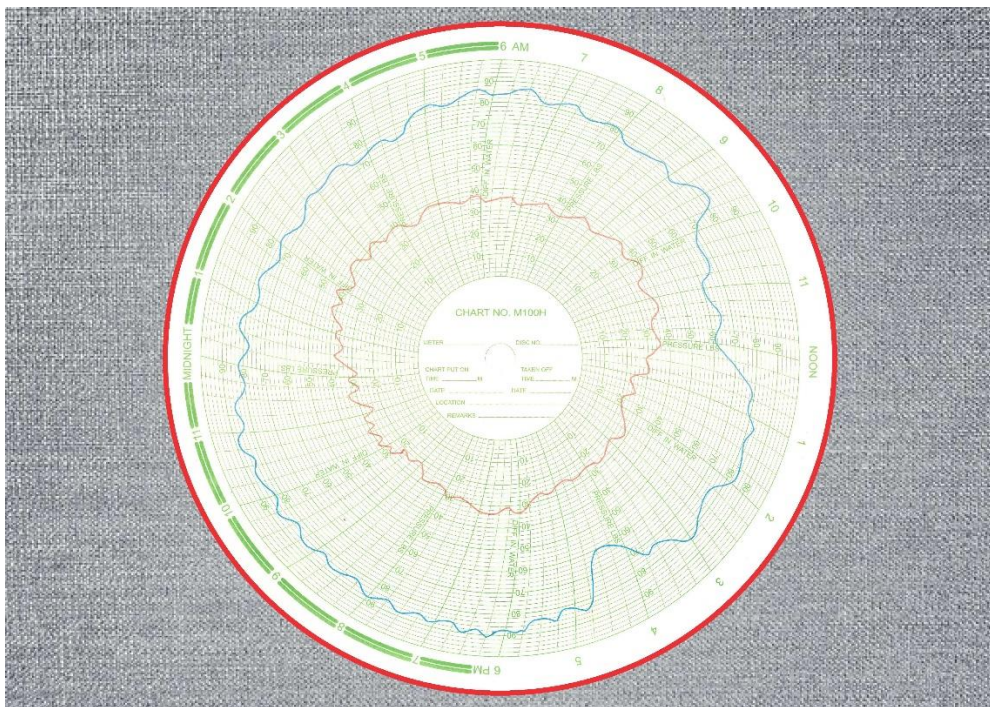


Figura 7. Imagen F1 y circunferencia obtenida con el comando `VISCIRCLES`.
(Fuente: Propia)

Seguidamente, con la herramienta `IMCROP` del Matlab, se recortó la imagen utilizando las coordenadas obtenidas de la circunferencia y especificando los límites de ésta; posteriormente, se regularizó el tamaño de la imagen para contenerla en una matriz de 999x999 píxeles. A continuación, se muestra el código de Matlab

empleado, donde “x” e “y” representan las coordenadas del centro del círculo de la carta grafica; los dos primeros parámetros del comando `IMCROP` representan la coordenada de inicio de corte y los dos últimos parámetros representan el alcance del recorte de la imagen. Por otro lado, la variable `IMRESIZE` reasigna el tamaño de la matriz en 999x999 píxeles. A continuación, la figura 8 muestra el resultado del recorte de la imagen para que contenga solamente una resolución de 999x999 píxeles.

```
>> x=centers*[1;0];
>> y=centers*[0;1];
>> F2 = imcrop(F1,[[x-radii y-radii 2*radii 2*radii]]); imshow (F2);
>> [row, col, m] = size(F2);
>> F3 = imresize(F2,[999 999]);
```

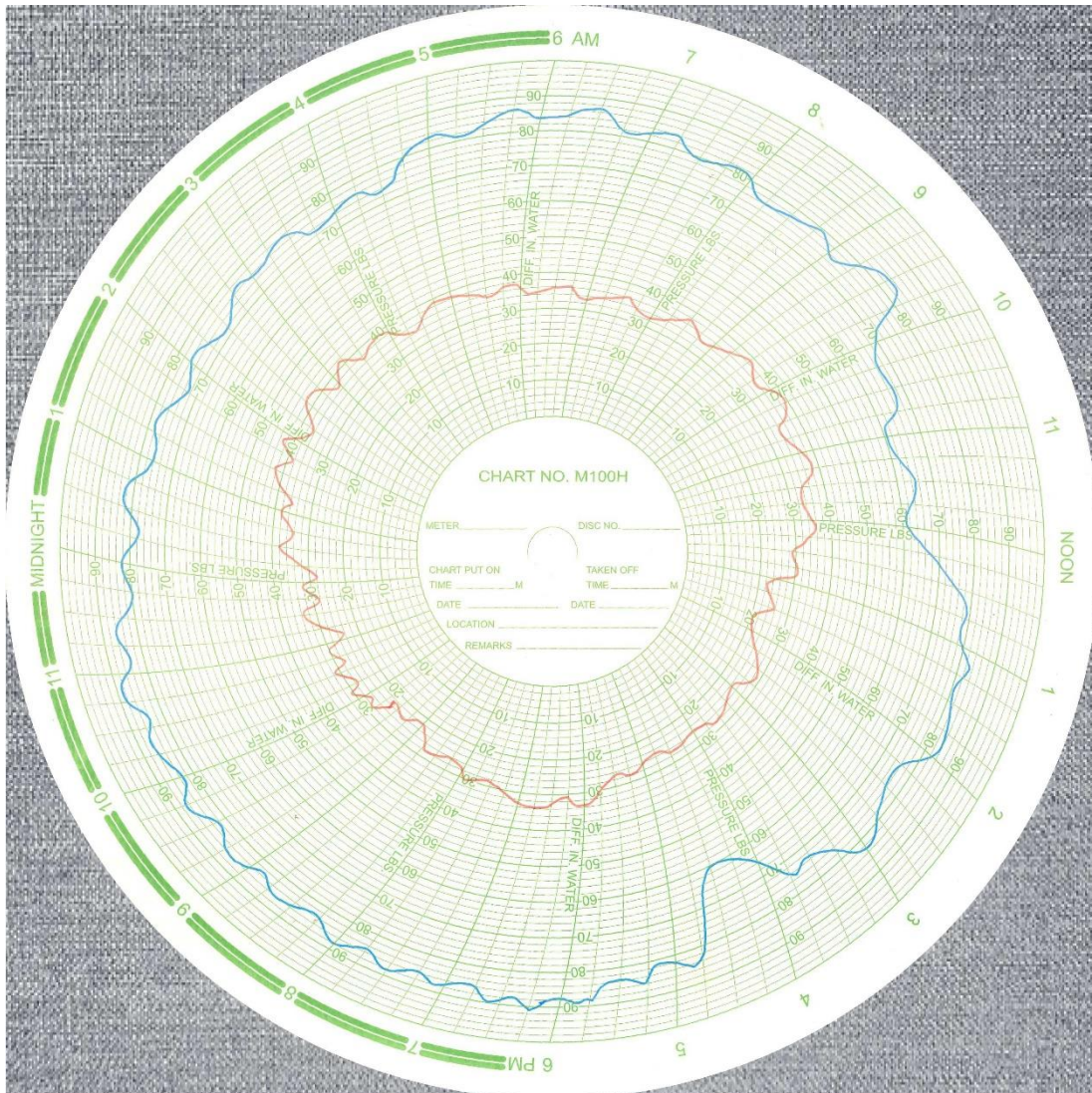


Figura 8. Imagen F3 luego de recortar y contener en 999x999 píxeles.
(Fuente: Propia)

3.3. Filtrado de Color Rojo - Variable de Presión Diferencial

Para realizar la operación de filtrado, primero se descompuso la imagen representada por la variable F3 en sus tres capas de color: R, G y B, como matrices; seguidamente, se transformó cada matriz al formato “double” ya que este permite realizar operaciones matemáticas de punto flotante. Seguidamente, se analizó la tonalidad de colores del trazo, obteniendo un código promedio RGB del color de la presión diferencial con las cantidades de [220 155 140]; con los cuales se procedió a realizar una operación de filtrado con valores por encima y por debajo en 30 unidades aproximadamente que se obtuvo por prueba y error (ver la figura 9).

De esta manera, se muestra el código de programa empleado en el Matlab donde las variables R, G y B representan las matrices de las capas roja, verde y azul de la imagen representa con la variable F3, y las variables RR, RG, RB representan los valores binarizados de las tres capas después del filtrado, las cuales se multiplicaron entre sí obteniéndose la imagen FR4 que corresponde al trazo binarizado de la presión diferencial (trazo rojo). Asimismo, para este filtrado se empleó como elemento estructurante los comandos FOR e IF para el condicionamiento de los umbrales de color en cada punto de cada matriz (ver la figura 9). Los cuales finalmente pasaron por la operación morfológica de dilatación con los comandos STREL (para un elemento estructural en forma de cruz) e IMDILATE (comando para dilatar una imagen) para completar los pixeles vacíos que se perdieron en la operación de filtrado (ver la figura 10).

```
>> R=double(F3(:,:,1));
>> G=double(F3(:,:,2));
>> B=double(F3(:,:,3));
>> for(i=1:999)
    for(j=1:999)
        if (185<R(i,j) & R(i,j)<255) ;RR(i,j)=1;else RR(i,j)=0; end
        if (120<G(i,j) & G(i,j)<190) ;RG(i,j)=1;else RG(i,j)=0; end
        if (110<B(i,j) & B(i,j)<170) ;RB(i,j)=1;else RB(i,j)=0; end
    end
end
```

```
>> FR4=RR.*RG.*RB;imshow(FR4);
```

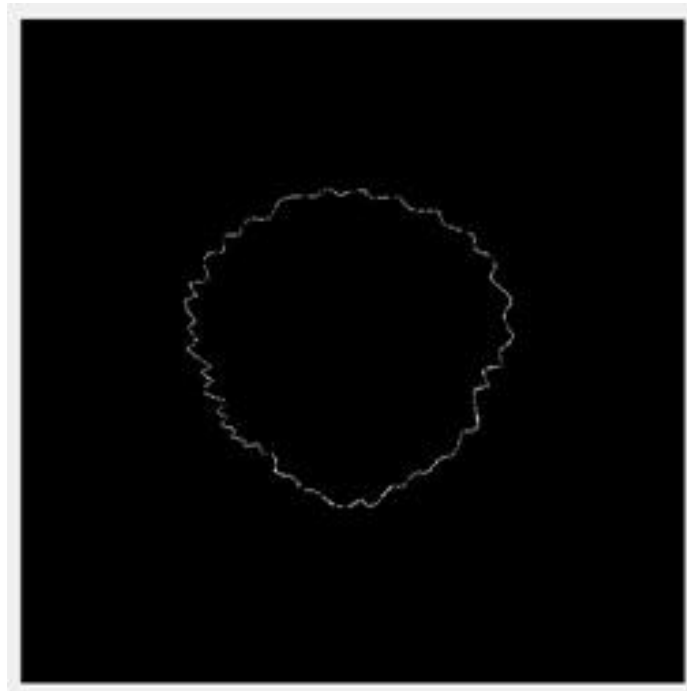


Figura 9. Imagen FR4 luego de filtrar el trazo rojo
(Fuente: Propia)

```
>> S=strel('arbitrary',[0 1 0;1 1 1;0 1 0]);
```

```
>> FR5=imdilate(FR4,S);
```

```
>> imshow(FR5);
```

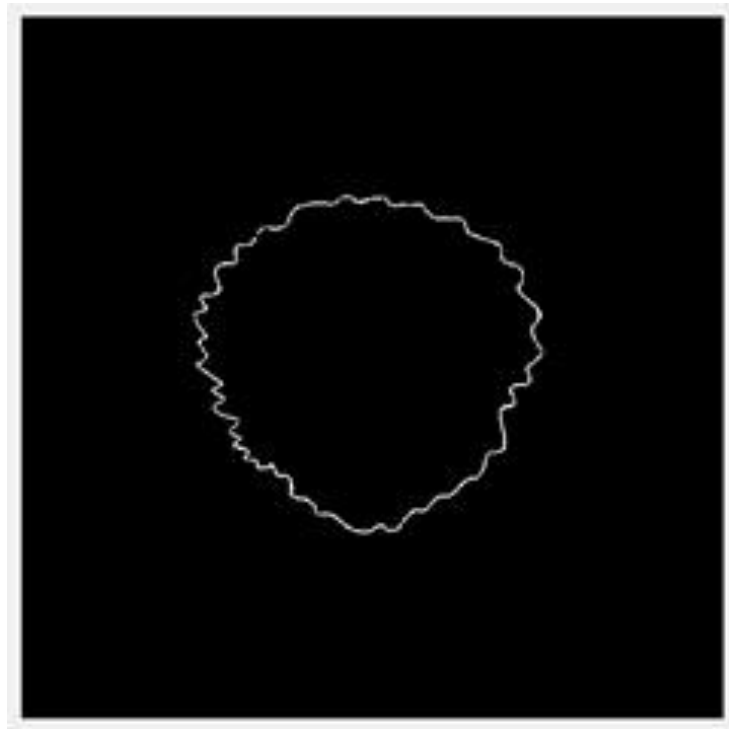


Figura 10. Imagen FR5 luego de dilatar y rellenar puntos perdidos.
(Fuente: Propia)

3.4. Filtrado de Color Azul - Variable de Presión Estática

En esta etapa se repitió el proceso de la sección 3.3 pero trabajando en función al trazo de color azul cuyo código de color promedio fue [100 190 215]. Por lo que las variables BR, BG, BB representan los valores binarizados de las tres capas después del filtrado, las cuales se multiplicaron entre sí obteniéndose la imagen FB4 que corresponde al trazo binarizado de la presión estática (trazo azul) que al igual que el paso anterior se dilató para completar los píxeles perdidos en el filtrado. A continuación, la figura 11 muestra la representación de la imagen FB4 después de utilizar el filtro de TRAZO AZUL.

```
>> for(i=1:999)
for(j=1:999)
if (50<R(i,j) & R(i,j)<150) ;BR(i,j)=1;else BR(i,j)=0; end
if (150<G(i,j) & G(i,j)<230) ;BG(i,j)=1;else BG(i,j)=0; end
if (180<B(i,j) & B(i,j)<255) ;BB(i,j)=1;else BB(i,j)=0; end
end
end
>> FB4=BR.*BG.*BB;imshow(FB4);
```

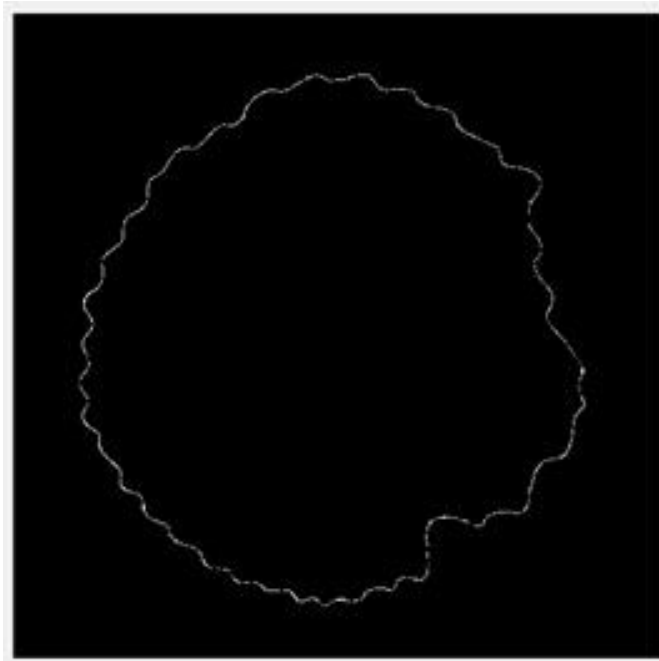


Figura 11. Imagen FB4 luego de filtrar el trazo azul.
(Fuente: Propia)

```
>> S=strel('arbitrary',[0 1 0;1 1 1;0 1 0]);
>> FB5=imdilate(FB4,S);
```



```
>> imshow(FB5);
```

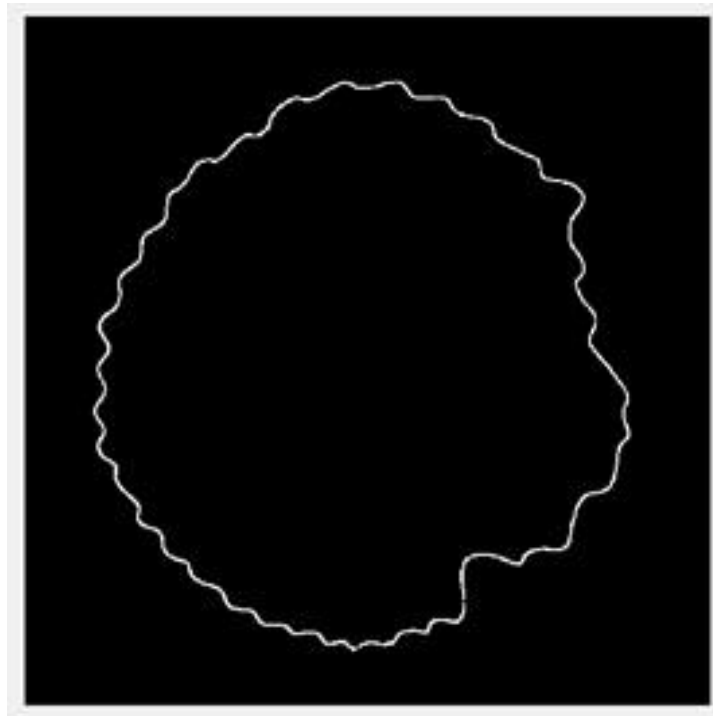


Figura 12. Imagen FR5 luego de dilatar y rellenar puntos perdidos.
(Fuente: Propia)

3.5. Obtención de datos trazados

Para la realización de esta etapa, previamente se diseñó una imagen en blanco con una línea guía en el instante de tiempo inicial (00:00 horas); seguidamente, se convirtió a escala de grises y después se transformó en una matriz lógica. Luego, se invirtieron los valores de la matriz, con el fin de tener los “unos” lógicos en la línea guía y no en el fondo de la imagen, para finalmente contenerla en una resolución de 999x999 píxeles. A continuación, se muestra el procedimiento realizado utilizando los comandos del Matlab y el valor de umbral igual a 0.5431 obtenido en automático con apoyo del comando GRAYTHRESH (ver las figuras 13 y 14).

```
>> A1=imread('C:\Tesis\guia.png');  
>> imshow (A1);
```

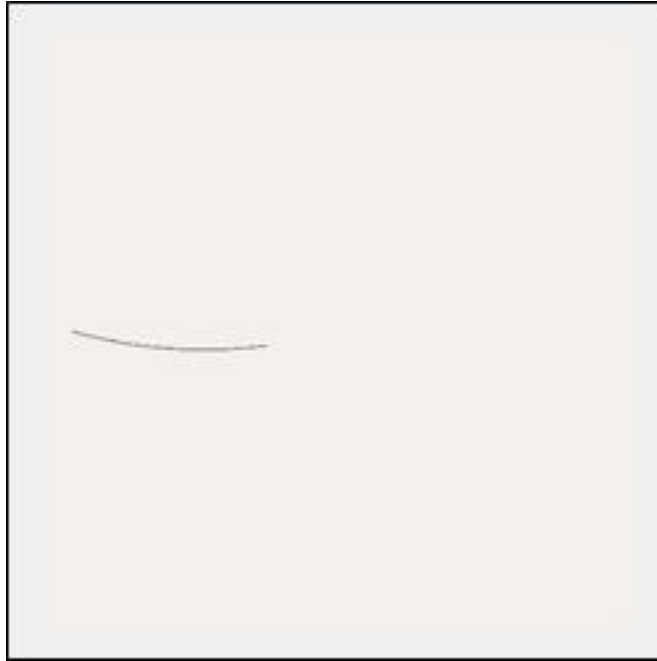


Figura 13. Imagen A1 de guía en tiempo 00:00 horas.
(Fuente: Propia)

```
>> A2=rgb2gray(A1);  
>> A3=graythresh(A2);  
>> A3=0.5431  
>> A4=im2bw(A1,A3);  
>> A5=imcomplement(A4);  
>> A6 = imresize(A5,[999 999]); imshow (A6);
```

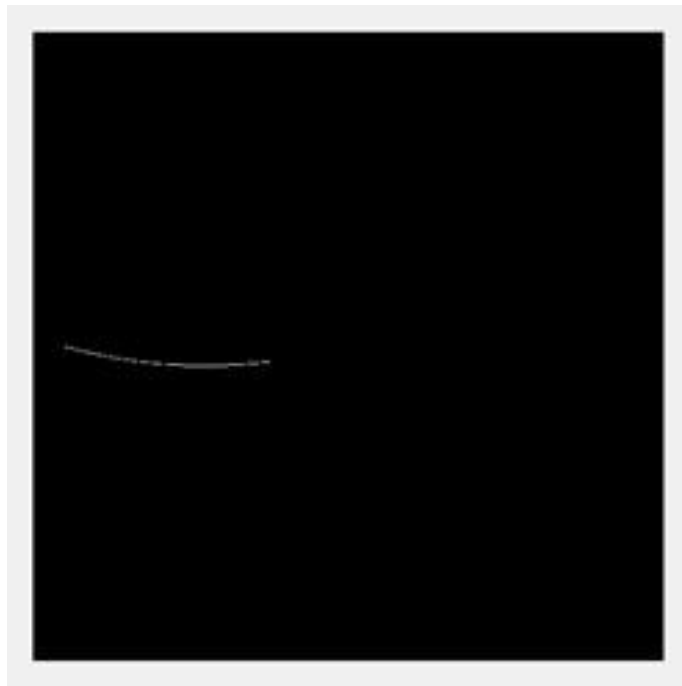


Figura 14. Matriz lógica A6 con línea de guía en instante de tiempo 00:00 horas.
(Fuente: Propia)

Una vez obtenida la matriz de guía, esta fue multiplicada por las matrices de la presión diferencial y estática para obtener los puntos de intersección, los cuales representan los valores de la presión diferencial y estática en el instante de tiempo inicial (00:00 horas). Luego, se aplicó el comando de cálculo de distancia BWDIST hacia el centro de la carta gráfica (coordenada en píxeles 500;500).

Posteriormente, se introdujo la operación en un bucle para repetir la operación en cada instante de tiempo mientras se iba girando la imagen de guía simulando el proceso de rotación de un integrador convencional. En esta operación se capturaron 24 muestras cada 15 grados sexagesimales para completar una vuelta (un día). A su vez, es posible capturar menos o más muestras dependiendo de la resolución necesitada. Seguidamente se muestra el código de Matlab empleado para la realización de la rotación y cálculo de la distancia. En cuanto a la variable “Inf”, utilizada en el condicional dentro del bucle repetitivo, corresponde a un valor infinito que es generada por la distancia a un píxel vacío en un determinado instante de tiempo, para evitar ese error se aplicó un condicional que repita el valor anterior y reemplace esa indeterminación.

```
>> grados=15;
>> Pdp=zeros(24,1);
>> Psp=zeros(24,1);
>> for i=1:muestra
    a=imrotate(A6,-(grados)*(i-1),'bilinear','crop').*FR5;
    b= bwdist(a,'euclidean');
    if (b(500,500)<Inf)
        Pdp(i,1)=b(500,500);
    else Pdp(i,1)=Pdp(i-1,1);
    end
    c=imrotate(A6,-(grados)*(i-1),'bilinear','crop').*FB5;
    d= bwdist(c,'euclidean');
    if (d(500,500)<Inf);
        Psp(i,1)=d(500,500);
    else Psp(i,1)=Psp(i-1,1)
    end
end
```

A continuación, se muestra una representación gráfica de la obtención de los datos de la matriz “c”, a partir del comando IMROTATE del Matlab. En este caso, se puede apreciar una rotación horaria de la imagen representada con la variable A6, y la captura de los puntos de intersección con la matriz FB5 (presión estática), usando la interpolación bilineal y recortando con la propiedad “crop” la imagen girada, para ajustarse finalmente a la resolución de 999x999 píxeles. (Ver la figura 15).

```
>> c=imrotate(A6,-(grados)*(i-1),'bilinear','crop').*FB5;
```

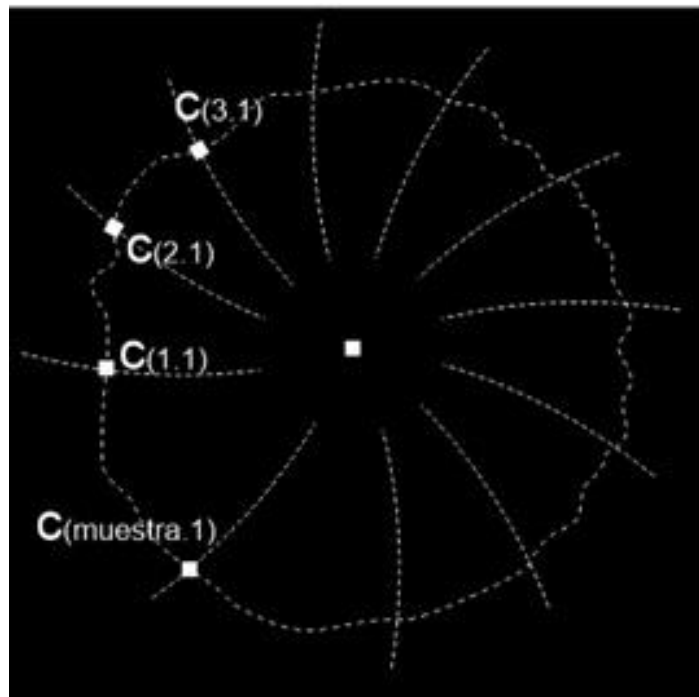


Figura 15. Matriz “c” obtenida de la multiplicación y rotación de A6 con FB5.
(Fuente: Propia)

De la misma manera, se muestra una representación gráfica de la obtención de distancias del trazo hacia el centro de la carta, a partir del comando BWDIST del Matlab. En este caso se registró en la matriz “d” cada distancia obtenida de cada rotación, desde el punto de intersección (“c”) hacia el centro de la carta gráfica (coordenada 500;500); además, se utilizó la opción “euclidiano” ya que nos muestra un distancia radial y directa entre punto y punto (ver la figura 16).

```
>> d = bwdist(c, 'euclidean');
```

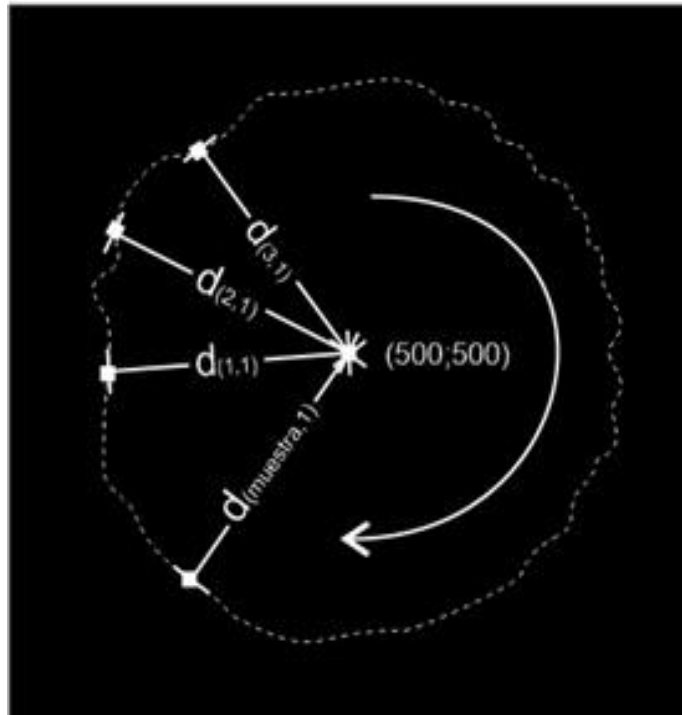


Figura 16. Matriz “d” obtenida de las distancias de la matriz “c” al punto medio.
(Fuente: Propia)

Para el caso de las matrices “a” y “b” correspondientes a los valores de la presión diferencial, se realizó la misma operación del paso anterior, multiplicando la matriz representada por la variable FR5 (trazo rojo) con la línea de guía A6 para obtener la matriz “a”; luego, se realizó el cálculo de distancias hacia la coordenada del centro (500;500) para obtener la matriz “b”.

Finalmente, se registraron en las variables “Pdp” y “Psp” los valores obtenidos en las matrices “b” y “d”, correspondientes a la presión diferencial en píxeles y presión estática en píxeles, respectivamente. Seguidamente, se muestra el contenido de la variable “Pdp”.

>> Pdp

Pdp =

225.0089

247.3479

257.0992

244.4361

248.6001

248.4673

242.8600

230.9567

229.5387

235.2276

241.8119

242.1570

236.9072

205.4069

194.0644

204.4016

207.0869

209.1722

232.0797

229.9652

213.5509

196.0102

211.4639

211.9292

24 muestras obtenidas de Presión diferencial en píxeles

De la misma manera, se muestran los valores de Presión estática en píxeles.

>> Psp

Psp =

391.2505

372.4742

367.6316

369.5673

365.0164

391.9452

394.2144

389.6100

385.1259

373.0643

352.2386

321.3378

322.9690

381.1469

392.3531

392.6742

340.3087

391.2812

407.1228

403.8539

407.1855

394.7708

392.0944

403.7252



24 muestras obtenidas de Presión estática en píxeles

3.6. Recolección y registro de valores

Una vez obtenido los valores de la presión diferencial y presión estática, se procedió con la transformación de píxeles a las unidades: pulgadas de agua y psi, respectivamente; esto se debe a que todas las operaciones y valores obtenidos del procesamiento de imágenes realizadas en el Matlab, se encuentran en píxeles. Previamente, se utilizó un software de diseño gráfico para medir los píxeles de la cuadrícula, y así operarlos para realizar la transformación. A continuación, en la figura 17, se muestra la medida del radio del centro de la carta hasta el límite inferior (0 inH₂O), el radio del centro de la carta hacia el límite de superior (100 inH₂O) y el radio total de la carta, una vez medido esos tres datos se realiza la equivalencia entre píxel y inH₂O. Debido a que la carta seleccionada tiene la misma magnitud en inH₂O y en psi, se puede usar la misma ecuación de conversión para ambos casos.

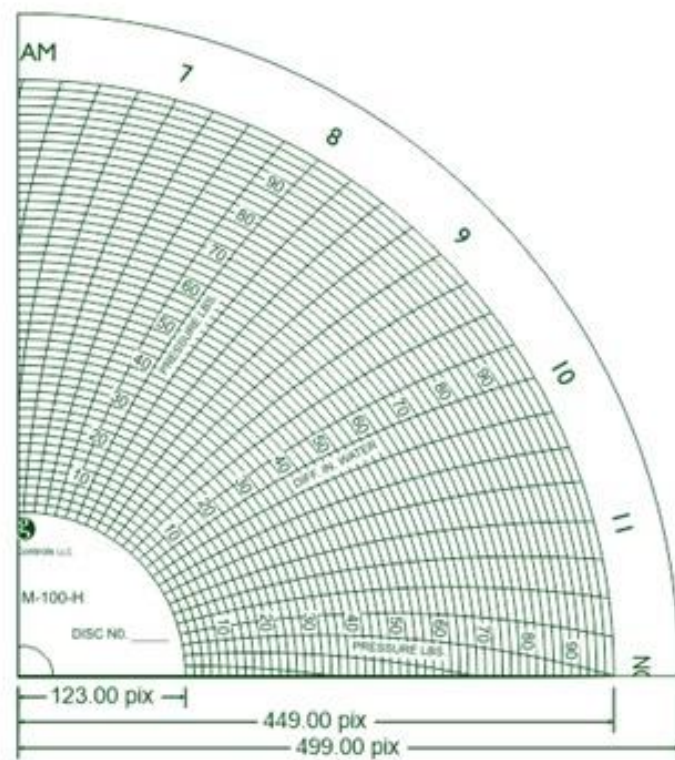


Figura 17. Medidas en píxeles de la carta gráfica.
(Fuente: Propia)

Una vez obtenido los valores en píxeles se procedió a realizar la transformación en función a la ecuación de la recta obtenida de inH₂O Vs. Píxeles. Esto se aprecia en la figura 18, donde el eje de las abscisas corresponde a los valores de píxeles y el eje de las ordenadas corresponde a pulgadas de agua (inH₂O).

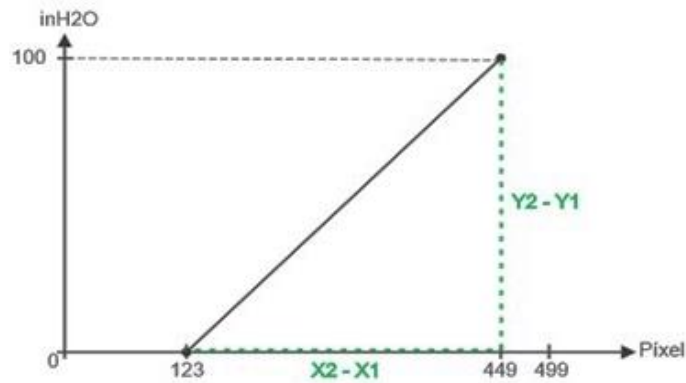


Figura 18. Gráfica de recta inH₂O vs Píxel
(Fuente: Propia)

Seguidamente, se muestra el procedimiento matemático de conversión a través de un conjunto de ecuaciones. En primer lugar, se utiliza la ecuación 1 para el cálculo de la pendiente y tal como se observa a continuación.

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{100 - 0}{449 - 123}$$

$$m = \frac{100}{326} \quad (1)$$

Luego, en la ecuación 2, se continúa con el cálculo de la ecuación general de la recta en base a la pendiente.

$$m = \frac{100}{326} = \frac{y - 0}{x - 123} \quad (2)$$

$$326y = 100x - 12300$$

$$y = \frac{100}{326}x - 37.73$$

Seguidamente, se utiliza la ecuación 3 para la conversión de píxeles a pulgadas de agua, para representar la presión diferencial.

$$in H_2O = \frac{100}{326} Píxel - 37.73 \quad (3)$$

Y, posteriormente, se utiliza la ecuación 4 para la conversión de píxeles a psi, para representar la presión estática:

$$psi = \frac{100}{326} Píxel - 37.73 \quad (4)$$

Consecutivamente, se ingresa la fórmula al software Matlab con la finalidad de obtener la presión diferencial en pulgadas de agua y la presión estática en psi.

A continuación, se muestran los valores de presión diferencial en unidades de pulgadas de agua, que es el resultado de la conversión realizada a partir de la ecuación (3) para la presión diferencial y de la ecuación (4) para la presión estática.

>> Pd=Pdp*(100/326)-37.73; %% Conversión Píxel - Pulgada de agua

>> Pd

Pd=

31.2911

38.1436

41.1348

37.2504

38.5277

38.4870

36.7669

33.1156

32.6806

34.4257

36.4454

36.5513

34.9409

25.2783

21.7990

24.9699

25.7936

26.4332

33.4601

32.8115

27.7764

22.3958

27.1362

27.2790

24 muestras obtenidas de Presión diferencial en inH₂O

>> $Ps = P_{sp} * (MxPs / 326) - 37.73$; %% Conversión Píxel - Psi

>> Ps

Ps=

82.2855

76.5259

75.0404

75.6342

74.2382

82.4986

83.1947

81.7823

80.4068

76.7069

70.3186

60.8399

61.3403

79.1862

82.6237

82.7222

66.6592

82.2949

87.1543

86.1516

87.1735

83.3653

82.5444

86.1121

24 muestras obtenidas de Presión diferencial en PSI.

3.7. Operacionalización de variable

Como es de saber, la medición de flujo volumétrico por el principio de presión diferencial tiene las siguientes variables y asimismo, se calcula de la siguiente manera de acuerdo con el AGA 3. Ver la (Ecuación 5):

$$Q_v = \frac{Q_m}{\rho_b} = \frac{N_1 \cdot C_d \cdot E_v \cdot Y \cdot d^2 \sqrt{\rho_{t,p} \cdot \Delta P}}{\rho_b} \quad (5)$$

Donde:

Qv: Flujo volumétrico

Qm: Flujo másico

N1: Factor de conversión de unidad

Cd: Coeficiente de descarga

Ev: Velocidad de Approach

Y: Coeficiente de expansión (fluidos compresibles)

d: Diámetro de orificio

pt,p: Densidad en condiciones de proceso

pb: Densidad en condiciones base

ΔP: Presión diferencial

A continuación, se indican algunos conceptos importantes para comprender las diferentes variables necesarias para la aplicación y cálculo de flujo basándonos en el reporte AGA 3, que es aplicado para medición de flujo de gas natural usando placa orificio.

Factor de conversión de unidad (N₁) Es el cociente de $\sqrt{2} \cdot \pi/4$ multiplicado por los coeficientes de la homogenización de unidades; para este caso, la presión diferencial y estática se miden en las unidades de pulgadas de agua y en psi, que da un valor de N₁= 0.09971019.

Coeficiente de descarga (Cd) Es la relación entre el flujo verdadero y el flujo teórico, y se aplica a la ecuación de flujo teórico para obtener el flujo real (verdadero). Ver la Ecuación 6:

$$C_d = 0.5959 + 0.0315\beta^{2.1} - 0.184\beta^8 + 0.039\beta^4(1-\beta^4)^{-1} - 0.0337D^{-1}\beta^3 + 91.71\beta^{2.5}Re_D^{-0.75} \quad (6)$$

Entonces, para un beta de 0.5 en una tubería de 2 pulgadas con $Re_D = 4000$, el $C_d = 0.63063$.

Velocidad de Approach (E_v): Es la velocidad del factor de aproximación. Además, se considera como una expresión matemática que relaciona la velocidad del fluido que fluye en la sección de aproximación del medidor de orificio (tubo del medidor aguas arriba), hacia el fluido velocidad en el orificio de la placa de orificio ($E_v=1.032795559$). Ver la ecuación 7.

$$E_v = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} \quad (7)$$

El factor de expansión (Y): Es una expresión empírica utilizada para corregir la variación de la densidad que el fluido experimenta cuando pasa a través de la placa; este factor está en función del beta (β) y la presión estática. Ver la ecuación 8:

$$Y = 1 - (0.41 + 0.35\beta^4) \left(\frac{h}{27.73P_k} \right) \quad (8)$$

Densidad en condiciones de proceso ($\rho_{t,p}$): Para el caso de los gases, está dado a partir de la siguiente expresión. Ver la ecuación 9:

$$\rho_{t,p} = \frac{G_i \cdot Mr_{air} \cdot P_s}{Z_f \cdot R \cdot T_f} \quad (9)$$

Donde:

G_i : Gravedad específica del gas en proceso (0.65)

Mr_{air} : Masa molar del aire (0.063845871 lb/mol)

P_s : Presión estática (Valores obtenidos de la carta gráfica)

Z_f : Factor de compresibilidad (En caso no haya corrección $Z_f=1$)

R : Constante universal de los gases (0.0425865 psia.ft³.lb.mol⁻¹.K⁻¹)

T_f : Temperatura del fluido (293°K)

Densidad en condiciones base (ρ_b): se define a partir de la expresión matemática que se muestra a continuación. Ver la (ecuación 10):

$$\rho_b = \frac{G_i \cdot Mr_{air} \cdot P_b}{Z_b \cdot R \cdot T_b} \quad (10)$$

Donde:

Gi: Gravedad específica del gas en proceso (0.65)

Mr: Masa molar del aire (0.063845871 lb/mol)

Pb: Presión atmosférica (14.696 psi)

Zb: Factor de compresibilidad (Zb=1)

R: Constante universal de los gases (0.0425865 psia.ft³.lb.mol⁻¹.K⁻¹)

Tb: Temperatura ambiente (293°K)

3.8. Resultado del flujo instantáneo y totalizado

Para el procedimiento de cálculo del flujo, en primer lugar se asignaron todas las variables estandarizadas y particulares del proceso. A continuación, se muestra el código de Matlab empleado para tal operación.

```
%% Constantes universales
>> Mr=0.063845871; %%Masa molar aire
>> Pb=14.696; %% Presión atmosférica
>> Zb=1; %Factor compresibilidad
>> R=0.0425865; %Constante universal de los gases
>> Tb=293; %Temperatura ambiente °K

%% Variables iniciales de proceso
>> dm=1.034; %diámetro menor
>> DM=2.067; %diámetro mayor
>> beta=0.5; %beta
>> Gi=0.65; %Gravedad específica del gas en proceso
>> Zf=1; %Factor compresibilidad
>> Tf=293; %Temperatura fluido °K
>> N1=0.09971019; %Factor conversión
>> Cd=0.63063; %Coeficiente de descarga
>> Ev=1.032795559; %Velocidad aprox
>> Y=1-(0.41+0.35*beta^4)*((Pd./Ps)/(27.73)); %Coeficiente expansión

%% Cálculo de las densidades
>> dstp=(Gi*Mr*Ps)/(Zf*R*Tf); %densidad fluido
>> dsb=(Gi*Mr*Pb)/(Zb*R*Tb); %densidad base
```

`%% Cálculo del flujo según AGA3 en pies cúbicos por segundo`

```
>> Flow=((N1*Cd*Ev*dm^2)/dsb).*((sqrt(dstp.*Pd).*Y)); %Flujo ft3/s
```

Luego, una vez realizada la asignación, se procedió con la visualización de la variable “Flow” en el entorno del Matlab.

```
>> Flow
```

```
Flow =
```

```
4.1325
```

```
4.3919
```

```
4.5128
```

```
4.3152
```

```
4.3460
```

```
4.5828
```

```
4.4998
```

```
4.2366
```

```
4.1730
```

```
4.1805
```

```
4.1139
```

```
3.8272
```

```
3.7591
```

```
3.6471
```

```
3.4626
```

```
3.7059
```

```
3.3766
```

```
3.8019
```

```
4.3976
```

```
4.3299
```

```
4.0113
```

```
3.5251
```

```
3.8575
```

```
3.9511
```

24 muestras obtenidas de Flujo en pies cúbicos/segundo

Seguidamente, se realizaron cálculos de conversión para obtener el flujo en pies cúbicos por hora y finalmente, toda la producción diaria en pies cúbicos por día. A continuación, el código de Matlab empleado para obtener tal conversión:

```
>> TFlow=((24*60*60)/24).*Flow; % Convierte el ft3/s a ft3/hora
>> TotalFlow=sum(TFlow);
>> TotalFlow
TotalFlow = 3.4970e+05 %% El flujo totalizado = 349 700 Sft3/day
```


CAPÍTULO IV: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se muestra la representación y el análisis de los resultados. Para ello, se opta por adjuntar un conjunto de tablas que permiten realizar la verificación de las medidas, respecto a un valor teórico observado.

4.1. Resultados y análisis (error relativo).

Una vez lograda la integración de las cartas, se procedió a comparar los valores obtenidos con los valores medidos visualmente del trazo realizado en cada instante de tiempo, cabe mencionar que los valores medidos visualmente están sujetos a la interpretación que le asigna cada observador, es por ello que en la sección 4.2 se plantea una forma más precisa de determinar el error. A continuación, en las Tablas 1 y 2 se muestran los resultados de las lecturas del flujo total teórico y el flujo medido, así como también el flujo totalizado de las cartas gráficas con trazado manual para determinar el objetivo de la técnica planteada (ver anexos 1 y 2).

Tabla 2. Características de medición de Carta Gráfica con trazado manual F1.

CARTA GRÁFICA CON TRAZADO MANUAL F1									
	Valores Teóricos observados			Valores Medidos			Error		
Muestra Hora	Presión Diferencial	Presión Estática	Flujo Volumétrico	Presión Diferencial	Presión Estática	Flujo Volumétrico	Presión Dif.	Presión Estática	Flujo Volum.
#	Pd ("H2O)	Ps (psi)	Flow (ft3/s)	Pd ("H2O)	Ps (psi)	Flow (ft3/s)	% error	% error	% error
00:00	30.0000	82.0000	4.0402	31.2911	82.2855	4.1325	4.3037	0.3482	2.2845
01:00	38.0000	76.0000	4.3684	38.1436	76.5259	4.3919	0.3779	0.6920	0.5380
02:00	40.0000	75.0000	4.45	41.1348	75.0404	4.5128	2.8370	0.0539	1.4112
03:00	37.0000	75.0000	4.2825	37.2504	75.6342	4.3152	0.6768	0.8456	0.7636
04:00	37.8000	74.5000	4.3132	38.5277	74.2382	4.3460	1.9251	0.3514	0.7605
05:00	38.2000	82.9000	4.5772	38.487	82.4986	4.5828	0.7513	0.4842	0.1223
06:00	36.1000	83.9000	4.4785	36.7669	83.1947	4.4998	1.8474	0.8406	0.4756
07:00	33.1000	82.3000	4.2492	33.1156	81.7823	4.2366	0.0471	0.6290	0.2965
08:00	32.9000	80.3000	4.184	32.6806	80.4068	4.1730	0.6669	0.1330	0.2629
09:00	35.0000	75.8000	4.1894	34.4257	76.7069	4.1805	1.6409	1.1964	0.2124
10:00	37.5000	70.0000	4.1624	36.4454	70.3186	4.1139	2.8123	0.4551	1.1652
11:00	37.0000	60.8000	3.8489	36.5513	60.8399	3.8272	1.2127	0.0656	0.5638
12:00	35.0000	61.6000	3.7703	34.9409	61.3403	3.7591	0.1689	0.4216	0.2971
13:00	24.8000	79.8000	3.6269	25.2783	79.1862	3.6471	1.9286	0.7692	0.5569
14:00	21.8000	82.8000	3.4664	21.799	82.6237	3.4626	0.0046	0.2129	0.1096
15:00	24.5000	83.0000	3.6774	24.9699	82.7222	3.7059	1.9180	0.3347	0.7750
16:00	25.8000	66.0000	3.3601	25.7936	66.6592	3.3766	0.0248	0.9988	0.4911
17:00	26.7000	82.2000	3.8186	26.4332	82.2949	3.8019	0.9993	0.1155	0.4373
18:00	33.8000	87.8000	4.4362	33.4601	87.1543	4.3976	1.0056	0.7354	0.8701
19:00	33.0000	87.7000	4.3815	32.8115	86.1516	4.3299	0.5712	1.7656	1.1777
20:00	28.3000	88.0000	4.0679	27.7764	87.1735	4.0113	1.8502	0.9392	1.3914
21:00	22.4000	84.9000	3.558	22.3958	83.3653	3.5251	0.0187	1.8077	0.9247
22:00	28.5000	83.5000	3.9753	27.1362	82.5444	3.8575	4.7853	1.1444	2.9633
23:00	25.5000	85.7000	3.8121	27.279	86.1121	3.9511	6.9765	0.4809	3.6463
ft3/día	Flujo Total Teórico	349540.6	Flujo Total Medido	349696.44	Error promedio por variable				
Error del flujo totalizado Teórico vs Medido (%)						0.0446	1.6396	0.6592	0.9374

Fuente: Propia

Tabla 3. Características de medición de Carta Gráfica con trazado manual G1.

CARTA GRÁFICA CON TRAZADO MANUAL G1									
	Valores Teóricos observados			Valores Medidos			Error		
Muestra Hora	Presión Diferencial	Presión Estática	Flujo Volumétrico	Presión Diferencial	Presión Estática	Flujo Volumétrico	Presión Dif.	Presión Estática	Flujo Volum.
#	Pd ("H2O)	Ps (psi)	Flow (ft3/s)	Pd ("H2O)	Ps (psi)	Flow (ft3/s)	% error	% error	% error
00:00	76.5000	39.5000	4.3676	76.2075	40.1165	4.3958	0.3824	1.5608	0.6457
01:00	77.5000	36.8000	4.2316	77.556	37.1901	4.2570	0.0723	1.0601	0.6002
02:00	90.2000	37.9000	4.6125	90.2356	38.1554	4.6301	0.0395	0.6739	0.3816
03:00	95.9000	35.8000	4.6000	95.6703	36.3896	4.6359	0.2395	1.6469	0.7804
04:00	92.3000	35.5000	4.4997	91.7357	35.7720	4.5056	0.6114	0.7662	0.1311
05:00	86.2000	41.8000	4.7597	85.906	42.4159	4.7893	0.3411	1.4734	0.6219
06:00	72.0000	44.9000	4.5417	72.8531	45.2635	4.5866	1.1849	0.8096	0.9886
07:00	71.5000	43.0000	4.4250	71.9423	43.2202	4.4499	0.6186	0.5121	0.5627
08:00	72.1000	41.0000	4.3323	71.7414	40.6111	4.3004	0.4974	0.9485	0.7363
09:00	74.0000	39.5000	4.3000	73.4908	39.6448	4.2944	0.6881	0.3666	0.1302
10:00	73.5000	39.0000	4.2575	73.8139	38.8970	4.2601	0.4271	0.2641	0.0611
11:00	82.0000	41.3000	4.6202	81.9117	41.2760	4.6164	0.1077	0.0581	0.0822
12:00	81.2000	43.5000	4.7274	81.3659	43.4680	4.7301	0.2043	0.0736	0.0571
13:00	80.0000	57.0000	5.4113	80.1512	57.2833	5.4302	0.1890	0.4970	0.3493
14:00	75.5000	48.8000	4.8530	75.3134	48.6370	4.8388	0.2472	0.3340	0.2926
15:00	71.9000	51.5000	4.8768	71.5538	50.9543	4.8386	0.4815	1.0596	0.7833
16:00	77.0000	50.8000	5.0029	76.7986	50.6327	4.9880	0.2616	0.3293	0.2978
17:00	90.0000	53.8000	5.5522	88.7609	53.7865	5.5151	1.3768	0.0251	0.6682
18:00	85.5000	50.5000	5.2413	85.629	49.5344	5.1919	0.1509	1.9121	0.9425
19:00	97.8000	47.8000	5.4230	97.0112	46.9976	5.3540	0.8065	1.6787	1.2724
20:00	95.5000	53.9000	5.7156	95.0953	53.0022	5.6537	0.4238	1.6657	1.0830
21:00	92.9000	49.2000	5.3758	92.8577	48.8388	5.3537	0.0455	0.7341	0.4111
22:00	80.8000	43.0000	4.6877	81.341	43.1917	4.7135	0.6696	0.4458	0.5504
23:00	71.8000	43.0000	4.4337	70.3308	42.8141	4.3805	2.0462	0.4323	1.1999
ft3/día	Flujo Total Teórico	413454.6	Flujo Total Medido	412954.56	Error promedio por variable				
Error del flujo totalizado Teórico vs Medido (%)						-0.1209	0.5047	0.8053	0.5679

Fuente: Propia

4.2. Medición de porcentaje de error

Para obtener un error porcentual más preciso, se escaneó una carta gráfica en blanco y se dibujaron digitalmente los trazos de presiones con valores constantes y con alta precisión, con la finalidad de poder comparar los valores medidos con los valores teóricos; se repitió el proceso con las 10 cartas gráficas y con valores de presiones aleatorios que cubran todo el espectro de la carta. A continuación, en la Tabla 3 se muestra resultados del flujo total teórico, medido y también flujo totalizado, a comparación de las dos anteriores, estas cartas graficas fueron trazadas digitalmente (ver anexos del 3 al 12).

Tabla 4 Características de medición de Carta Gráfica con trazado digital N°1.

CARTA GRÁFICA CON TRAZADO DIGITAL N°1									
	Valores Teóricos			Valores Medidos			Error		
Muestra Hora	Presión Diferencial	Presión Estática	Flujo Volumétrico	Presión Diferencial	Presión Estática	Flujo Volumétrico	Presión Dif.	Presión Estática	Flujo Volum.
#	Pd ("H2O)	Ps (psi)	Flow (ft3/s)	Pd ("H2O)	Ps (psi)	Flow (ft3/s)	% error	% error	% error
00:00	1	36	0.4913	0.7116	35.8538	0.4137	28.8400	0.4061	15.7948
01:00	1	36	0.4913	0.7128	35.9331	0.4145	28.7200	0.1858	15.6320
02:00	1	36	0.4913	0.8789	35.8193	0.4595	12.1100	0.5019	6.4726
03:00	1	36	0.4913	0.7251	35.7720	0.4171	27.4900	0.6333	15.1028
04:00	1	36	0.4913	0.7654	35.7720	0.4285	23.4600	0.6333	12.7824
05:00	1	36	0.4913	0.5448	35.8673	0.3621	45.5200	0.3686	26.2976
06:00	1	36	0.4913	0.7116	35.8538	0.4137	28.8400	0.4061	15.7948
07:00	1	36	0.4913	0.7128	35.9331	0.4145	28.7200	0.1858	15.6320
08:00	1	36	0.4913	0.8789	35.9842	0.4605	12.1100	0.0439	6.2691
09:00	1	36	0.4913	0.7251	35.9593	0.4182	27.4900	0.1131	14.8789
10:00	1	36	0.4913	0.7654	36.0154	0.4300	23.4600	0.0428	12.4771
11:00	1	36	0.4913	0.8204	35.9842	0.4450	17.9600	0.0439	9.4240
12:00	1	36	0.4913	1.0127	36.1582	0.4955	1.2700	0.4394	0.8549
13:00	1	36	0.4913	0.7128	36.2371	0.4162	28.7200	0.6586	15.2860
14:00	1	36	0.4913	0.8789	36.1021	0.4613	12.1100	0.2836	6.1062
15:00	1	36	0.4913	1.1509	36.1474	0.5282	15.0900	0.4094	7.5107
16:00	1	36	0.4913	0.9665	36.2594	0.4848	3.3500	0.7206	1.3230
17:00	1	36	0.4913	1.0964	36.1512	0.5155	9.6400	0.4200	4.9257
18:00	1	36	0.4913	1.0127	36.1582	0.4955	1.2700	0.4394	0.8549
19:00	1	36	0.4913	1.0188	35.9331	0.4955	1.8800	0.1858	0.8549
20:00	1	36	0.4913	0.8789	35.9842	0.4605	12.1100	0.0439	6.2691
21:00	1	36	0.4913	0.7251	35.9593	0.4182	27.4900	0.1131	14.8789
22:00	1	36	0.4913	0.7654	35.8295	0.4289	23.4600	0.4736	12.7010
23:00	1	36	0.4913	0.8204	35.8673	0.4442	17.9600	0.3686	9.5868
ft3/día	Flujo Total Teórico		42448.32	Flujo Total Medido		38597.76	Error promedio por variable		
Error del flujo totalizado Teórico vs Medido (%)						-9.0712	19.1279	0.3384	10.3213

Fuente: Propia

Tabla 5 Características de medición de Carta Gráfica con trazado digital N°2.

CARTA GRÁFICA CON TRAZADO DIGITAL N°2									
	Valores Teóricos			Valores Medidos			Error		
Muestra Hora	Presión Diferencial	Presión Estática	Flujo Volumétrico	Presión Diferencial	Presión Estática	Flujo Volumétrico	Presión Dif.	Presión Estática	Flujo Volum.
#	Pd ("H2O)	Ps (psi)	Flow (ft3/s)	Pd ("H2O)	Ps (psi)	Flow (ft3/s)	% error	% error	% error
00:00	14	54	2.2435	14.212	54.0555	2.2614	1.5143	0.1028	0.7979
01:00	14	54	2.2435	14.0087	54.0514	2.2452	0.0621	0.0952	0.0758
02:00	14	54	2.2435	14.0051	54.0944	2.2459	0.0364	0.1748	0.1070
03:00	14	54	2.2435	14.1894	53.9775	2.2580	1.3529	0.0417	0.6463
04:00	14	54	2.2435	14.1132	54.0206	2.2529	0.8086	0.0381	0.4190
05:00	14	54	2.2435	14.1604	54.0744	2.2577	1.1457	0.1378	0.6329
06:00	14	54	2.2435	14.212	54.0555	2.2614	1.5143	0.1028	0.7979
07:00	14	54	2.2435	14.0369	54.0514	2.2475	0.2636	0.0952	0.1783
08:00	14	54	2.2435	14.1867	54.0944	2.2602	1.3336	0.1748	0.7444
09:00	14	54	2.2435	14.3676	54.1738	2.2762	2.6257	0.3219	1.4575
10:00	14	54	2.2435	14.3098	54.2710	2.2737	2.2129	0.5019	1.3461
11:00	14	54	2.2435	14.5668	54.3625	2.2958	4.0486	0.6713	2.3312
12:00	14	54	2.2435	14.5146	54.3610	2.2917	3.6757	0.6685	2.1484
13:00	14	54	2.2435	14.3143	54.3538	2.2758	2.2450	0.6552	1.4397
14:00	14	54	2.2435	14.4001	54.3732	2.2830	2.8579	0.6911	1.7606
15:00	14	54	2.2435	14.3676	54.4095	2.2812	2.6257	0.7583	1.6804
16:00	14	54	2.2435	14.5452	54.4483	2.2959	3.8943	0.8302	2.3356
17:00	14	54	2.2435	14.2881	54.3625	2.2739	2.0579	0.6713	1.3550
18:00	14	54	2.2435	14.2636	54.3610	2.2719	1.8829	0.6685	1.2659
19:00	14	54	2.2435	14.3143	54.3538	2.2758	2.2450	0.6552	1.4397
20:00	14	54	2.2435	14.2926	54.2229	2.2713	2.0900	0.4128	1.2391
21:00	14	54	2.2435	14.1894	54.1738	2.2621	1.3529	0.3219	0.8291
22:00	14	54	2.2435	14.1132	54.2710	2.2581	0.8086	0.5019	0.6508
23:00	14	54	2.2435	14.1604	54.0744	2.2577	1.1457	0.1378	0.6329
ft3/día	Flujo Total Teórico		193838.4	Flujo Total Medido		195963.48	Error promedio por variable		
Error del flujo totalizado Teórico vs Medido (%)						1.0963	1.8250	0.3929	1.0963

Fuente: Propia

Tabla 6 Características de medición de Carta Gráfica con trazado digital N°3.

CARTA GRÁFICA CON TRAZADO DIGITAL N°3									
	Valores Teóricos			Valores Medidos			Error		
Muestra Hora	Presión Diferencial	Presión Estática	Flujo Volumétrico	Presión Diferencial	Presión Estática	Flujo Volumétrico	Presión Dif.	Presión Estática	Flujo Volum.
#	Pd ("H2O)	Ps (psi)	Flow (ft3/s)	Pd ("H2O)	Ps (psi)	Flow (ft3/s)	% error	% error	% error
00:00	26	68	3.4242	26.1267	68.0070	3.4327	0.4873	0.0103	0.2482
01:00	26	68	3.4242	26.1577	67.9683	3.4337	0.6065	0.0466	0.2774
02:00	26	68	3.4242	26.1827	68.0382	3.4371	0.7027	0.0562	0.3767
03:00	26	68	3.4242	26.0744	68.1160	3.4320	0.2862	0.1706	0.2278
04:00	26	68	3.4242	26.0338	68.0204	3.4270	0.1300	0.0300	0.0818
05:00	26	68	3.4242	26.1518	68.1000	3.4367	0.5838	0.1471	0.3650
06:00	26	68	3.4242	26.1267	68.0070	3.4327	0.4873	0.0103	0.2482
07:00	26	68	3.4242	26.1577	68.0284	3.4352	0.6065	0.0418	0.3212
08:00	26	68	3.4242	26.1827	68.0382	3.4371	0.7027	0.0562	0.3767
09:00	26	68	3.4242	26.2578	68.1160	3.4439	0.9915	0.1706	0.5753
10:00	26	68	3.4242	26.0338	68.0204	3.4270	0.1300	0.0300	0.0818
11:00	26	68	3.4242	26.0302	68.1000	3.4288	0.1162	0.1471	0.1343
12:00	26	68	3.4242	26.1267	68.0070	3.4327	0.4873	0.0103	0.2482
13:00	26	68	3.4242	26.1577	67.9683	3.4337	0.6065	0.0466	0.2774
14:00	26	68	3.4242	26.0102	68.0382	3.4259	0.0392	0.0562	0.0496
15:00	26	68	3.4242	26.0744	68.1160	3.4320	0.2862	0.1706	0.2278
16:00	26	68	3.4242	26.0338	67.9358	3.4248	0.1300	0.0944	0.0175
17:00	26	68	3.4242	26.0302	67.9078	3.4239	0.1162	0.1356	0.0088
18:00	26	68	3.4242	25.8232	68.0070	3.4129	0.6800	0.0103	0.3300
19:00	26	68	3.4242	25.8876	67.9683	3.4161	0.4323	0.0466	0.2366
20:00	26	68	3.4242	26.0102	67.9024	3.4224	0.0392	0.1435	0.0526
21:00	26	68	3.4242	26.0744	68.1160	3.4320	0.2862	0.1706	0.2278
22:00	26	68	3.4242	26.0338	67.9358	3.4248	0.1300	0.0944	0.0175
23:00	26	68	3.4242	26.0302	68.1000	3.4288	0.1162	0.1471	0.1343
ft3/día	Flujo Total Teórico		295850.9	Flujo Total Medido		296330.04	Error promedio por variable		
Error del flujo totalizado Teórico vs Medido (%)						0.1620	0.3825	0.0851	0.2143

Fuente: Propia

Tabla 7 Características de medición de Carta Gráfica con trazado digital N°4.

CARTA GRÁFICA CON TRAZADO DIGITAL N°4									
	Valores Teóricos			Valores Medidos			Error		
Muestra Hora	Presión Diferencial	Presión Estática	Flujo Volumétrico	Presión Diferencial	Presión Estática	Flujo Volumétrico	Presión Diferencial	Presión Estática	Flujo Volumétrico
#	Pd ("H2O)	Ps (psi)	Flow (ft3/s)	Pd ("H2O)	Ps (psi)	Flow (ft3/s)	% error	% error	% error
00:00	38	80	4.4836	37.9847	80.1512	4.4870	0.0403	0.1890	0.0758
01:00	38	80	4.4836	38.1436	79.8519	4.4877	0.3779	0.1851	0.0914
02:00	38	80	4.4836	38.1554	79.9927	4.4924	0.4089	0.0091	0.1963
03:00	38	80	4.4836	38.1113	79.7210	4.4821	0.2929	0.3487	0.0335
04:00	38	80	4.4836	38.0375	79.8795	4.4824	0.0987	0.1506	0.0268
05:00	38	80	4.4836	37.9723	79.5671	4.4697	0.0729	0.5411	0.3100
06:00	38	80	4.4836	37.9847	79.8571	4.4787	0.0403	0.1786	0.1093
07:00	38	80	4.4836	38.1436	79.8519	4.4877	0.3779	0.1851	0.0914
08:00	38	80	4.4836	38.1554	79.9927	4.4924	0.4089	0.0091	0.1963
09:00	38	80	4.4836	38.1113	79.7210	4.4821	0.2929	0.3487	0.0335
10:00	38	80	4.4836	38.0375	79.8795	4.4824	0.0987	0.1506	0.0268
11:00	38	80	4.4836	38.0872	79.9515	4.4873	0.2295	0.0606	0.0825
12:00	38	80	4.4836	38.2892	79.8571	4.4963	0.7611	0.1786	0.2833
13:00	38	80	4.4836	38.1436	79.8519	4.4877	0.3779	0.1851	0.0914
14:00	38	80	4.4836	38.1554	79.9927	4.4924	0.4089	0.0091	0.1963
15:00	38	80	4.4836	38.1113	79.9287	4.4881	0.2929	0.0891	0.1004
16:00	38	80	4.4836	38.2229	79.8795	4.4931	0.5866	0.1506	0.2119
17:00	38	80	4.4836	38.0872	79.9515	4.4873	0.2295	0.0606	0.0825
18:00	38	80	4.4836	37.9847	79.8571	4.4787	0.0403	0.1786	0.1093
19:00	38	80	4.4836	38.1436	79.8519	4.4877	0.3779	0.1851	0.0914
20:00	38	80	4.4836	38.1554	79.9927	4.4924	0.4089	0.0091	0.1963
21:00	38	80	4.4836	38.1113	79.9287	4.4881	0.2929	0.0891	0.1004
22:00	38	80	4.4836	38.0375	79.8795	4.4824	0.0987	0.1506	0.0268
23:00	38	80	4.4836	37.9723	79.9515	4.4806	0.0729	0.0606	0.0669
ft3/día	Flujo Total Teórico		387383	Flujo Total Medido		387600.12	Error promedio por variable		
Error del flujo totalizado Teórico vs Medido (%)						0.0560	0.2787	0.1543	0.1179

Fuente: Propia

Tabla 8 Características de medición de Carta Gráfica con trazado digital N°5.

CARTA GRÁFICA CON TRAZADO DIGITAL N°5									
	Valores Teóricos			Valores Medidos			Error		
Muestra Hora	Presión Diferencial	Presión Estática	Flujo Volumétrico	Presión Diferencial	Presión Estática	Flujo Volumétrico	Presión Diferencial	Presión Estática	Flujo Volumétrico
#	Pd ("H2O)	Ps (psi)	Flow (ft3/s)	Pd ("H2O)	Ps (psi)	Flow (ft3/s)	% error	% error	% error
00:00	44	92	5.1736	44.0436	91.7357	5.1685	0.0991	0.2873	0.0986
01:00	44	92	5.1736	44.1759	91.5728	5.1715	0.3998	0.4643	0.0406
02:00	44	92	5.1736	43.997	91.6062	5.1621	0.0068	0.4280	0.2223
03:00	44	92	5.1736	44.0937	91.5629	5.1665	0.2130	0.4751	0.1372
04:00	44	92	5.1736	43.8674	91.7357	5.1583	0.3014	0.2873	0.2957
05:00	44	92	5.1736	43.9556	91.4985	5.1567	0.1009	0.5451	0.3267
06:00	44	92	5.1736	44.0436	91.4290	5.1598	0.0991	0.6207	0.2667
07:00	44	92	5.1736	44.1759	91.5728	5.1715	0.3998	0.4643	0.0406
08:00	44	92	5.1736	43.997	91.7549	5.1664	0.0068	0.2664	0.1392
09:00	44	92	5.1736	44.0937	91.9967	5.1789	0.2130	0.0036	0.1024
10:00	44	92	5.1736	44.1144	91.7357	5.1726	0.2600	0.2873	0.0193
11:00	44	92	5.1736	44.0678	91.7934	5.1716	0.1541	0.2246	0.0387
12:00	44	92	5.1736	44.0436	91.7357	5.1685	0.0991	0.2873	0.0986
13:00	44	92	5.1736	44.1759	91.9448	5.1822	0.3998	0.0600	0.1662
14:00	44	92	5.1736	44.278	91.7549	5.1826	0.6318	0.2664	0.1740
15:00	44	92	5.1736	44.3331	91.9967	5.1927	0.7570	0.0036	0.3692
16:00	44	92	5.1736	44.1144	91.7357	5.1726	0.2600	0.2873	0.0193
17:00	44	92	5.1736	44.2413	91.7934	5.1816	0.5484	0.2246	0.1546
18:00	44	92	5.1736	44.0436	91.7357	5.1685	0.0991	0.2873	0.0986
19:00	44	92	5.1736	44.1759	91.9448	5.1822	0.3998	0.0600	0.1662
20:00	44	92	5.1736	44.278	91.7549	5.1826	0.6318	0.2664	0.1740
21:00	44	92	5.1736	44.0937	91.9967	5.1789	0.2130	0.0036	0.1024
22:00	44	92	5.1736	44.1144	91.7357	5.1726	0.2600	0.2873	0.0193
23:00	44	92	5.1736	44.0678	91.7934	5.1716	0.1541	0.2246	0.0387
ft3/día	Flujo Total Teórico		446999	Flujo Total Medido		446907.60	Error promedio por variable		
Error del flujo totalizado Teórico vs Medido (%)						-0.0205	0.2795	0.2755	0.1379

Fuente: Propia

Tabla 9 Características de medición de Carta Gráfica con trazado digital N°6.

CARTA GRÁFICA CON TRAZADO DIGITAL N°6									
	Valores Teóricos			Valores Medidos			Error		
Muestra Hora	Presión Diferencial	Presión Estática	Flujo Volumétrico	Presión Diferencial	Presión Estática	Flujo Volumétrico	Presión Diferencial	Presión Estática	Flujo Volumétrico
#	Pd ("H2O)	Ps (psi)	Flow (ft3/s)	Pd ("H2O)	Ps (psi)	Flow (ft3/s)	% error	% error	% error
00:00	54	36	3.5278	54.0555	35.8928	3.5240	-0.1028	0.2978	0.1077
01:00	54	36	3.5278	54.1031	35.9746	3.5297	0.1909	0.0706	0.0539
02:00	54	36	3.5278	54.2229	35.9842	3.5339	0.4128	0.0439	0.1729
03:00	54	36	3.5278	54.1738	36.1474	3.5407	0.3219	0.4094	0.3657
04:00	54	36	3.5278	54.271	36.0741	3.5400	0.5019	0.2058	0.3458
05:00	54	36	3.5278	54.1805	36.1512	3.5411	0.3343	0.4200	0.3770
06:00	54	36	3.5278	54.361	36.1582	3.5471	0.6685	0.4394	0.5471
07:00	54	36	3.5278	54.1031	35.9746	3.5297	0.1909	0.0706	0.0539
08:00	54	36	3.5278	54.2229	36.1021	3.5399	0.4128	0.2836	0.3430
09:00	54	36	3.5278	54.1738	36.1474	3.5407	0.3219	0.4094	0.3657
10:00	54	36	3.5278	54.271	36.0154	3.5370	0.5019	0.0428	0.2608
11:00	54	36	3.5278	54.0744	35.9842	3.5293	0.1378	0.0439	0.0425
12:00	54	36	3.5278	54.0555	35.8538	3.5220	0.1028	0.4061	0.1644
13:00	54	36	3.5278	54.0514	35.9331	3.5259	0.0952	0.1858	0.0539
14:00	54	36	3.5278	54.0944	35.9842	3.5299	0.1748	0.0439	0.0595
15:00	54	36	3.5278	53.9775	35.9593	3.5250	0.0417	0.1131	0.0794
16:00	54	36	3.5278	54.0206	35.8295	3.5196	0.0381	0.4736	0.2324
17:00	54	36	3.5278	54.0744	35.8673	3.5232	0.1378	0.3686	0.1304
18:00	54	36	3.5278	54.0555	35.8538	3.5220	0.1028	0.4061	0.1644
19:00	54	36	3.5278	54.0514	35.9331	3.5259	0.0952	0.1858	0.0539
20:00	54	36	3.5278	54.0944	35.8193	3.5214	0.1748	0.5019	0.1814
21:00	54	36	3.5278	54.1738	35.9593	3.5311	0.3219	0.1131	0.0935
22:00	54	36	3.5278	54.271	36.0154	3.5370	0.5019	0.0428	0.2608
23:00	54	36	3.5278	54.0744	35.9842	3.5293	0.1378	0.0439	0.0425
ft3/día	Flujo Total Teórico		304801.9	Flujo Total Medido		305083.44	Error promedio por variable		
Error del flujo totalizado Teórico vs Medido (%)						0.0924	0.2424	0.2342	0.1897

Fuente: Propia

Tabla 10 Características de medición de Carta Gráfica con trazado digital N°7.

CARTA GRÁFICA CON TRAZADO DIGITAL N°7									
	Valores Teóricos			Valores Medidos			Error		
Muestra Hora	Presión Diferencial	Presión Estática	Flujo Volumétrico	Presión Diferencial	Presión Estática	Flujo Volumétrico	Presión Diferencial	Presión Estática	Flujo Volumétrico
#	Pd ("H2O)	Ps (psi)	Flow (ft3/s)	Pd ("H2O)	Ps (psi)	Flow (ft3/s)	% error	% error	% error
00:00	64	54	4.7273	64.3762	54.3610	4.7571	0.5878	0.6685	0.6304
01:00	64	54	4.7273	64.4214	54.3538	4.7583	0.6584	0.6552	0.6558
02:00	64	54	4.7273	64.2038	54.2229	4.7447	0.3184	0.4128	0.3681
03:00	64	54	4.7273	64.4812	54.4095	4.7630	0.7519	0.7583	0.7552
04:00	64	54	4.7273	64.2813	54.4483	4.7576	0.4395	0.8302	0.6410
05:00	64	54	4.7273	64.2273	54.3625	4.7518	0.3552	0.6713	0.5183
06:00	64	54	4.7273	64.3762	54.3610	4.7571	0.5878	0.6685	0.6304
07:00	64	54	4.7273	64.1202	54.3538	4.7476	0.1878	0.6552	0.4294
08:00	64	54	4.7273	64.2038	54.2229	4.7447	0.3184	0.4128	0.3681
09:00	64	54	4.7273	64.4812	54.1738	4.7523	0.7519	0.3219	0.5288
10:00	64	54	4.7273	64.1091	54.2710	4.7435	0.1705	0.5019	0.3427
11:00	64	54	4.7273	64.2273	54.0744	4.7388	0.3552	0.1378	0.2433
12:00	64	54	4.7273	64.0703	54.0555	4.7323	0.1098	0.1028	0.1058
13:00	64	54	4.7273	64.0624	54.0514	4.7318	0.0975	0.0952	0.0952
14:00	64	54	4.7273	64.2038	54.0944	4.7388	0.3184	0.1748	0.2433
15:00	64	54	4.7273	64.0486	54.1738	4.7369	0.0759	0.3219	0.2031
16:00	64	54	4.7273	64.1091	54.2710	4.7435	0.1705	0.5019	0.3427
17:00	64	54	4.7273	64.2273	54.0744	4.7388	0.3552	0.1378	0.2433
18:00	64	54	4.7273	64.0703	54.0837	4.7336	0.1098	0.1550	0.1333
19:00	64	54	4.7273	64.0624	54.0514	4.7318	0.0975	0.0952	0.0952
20:00	64	54	4.7273	64.2038	54.0944	4.7388	0.3184	0.1748	0.2433
21:00	64	54	4.7273	64.4812	54.1738	4.7523	0.7519	0.3219	0.5288
22:00	64	54	4.7273	64.2813	54.2710	4.7496	0.4395	0.5019	0.4717
23:00	64	54	4.7273	64.2273	54.1805	4.7436	0.3552	0.3343	0.3448
ft3/día	Flujo Total Teórico		408438.7	Flujo Total Medido		409997.88	Error promedio por variable		
Error del flujo totalizado Teórico vs Medido (%)						0.3817	0.3618	0.4005	0.3817

Fuente: Propia

Tabla 11 Características de medición de Carta Gráfica con trazado digital N°8.

CARTA GRÁFICA CON TRAZADO DIGITAL N°8									
	Valores Teóricos			Valores Medidos			Error		
Muestra Hora	Presión Diferencial	Presión Estática	Flujo Volumétrico	Presión Diferencial	Presión Estática	Flujo Volumétrico	Presión Diferencial	Presión Estática	Flujo Volumétrico
#	Pd ("H2O)	Ps (psi)	Flow (ft3/s)	Pd ("H2O)	Ps (psi)	Flow (ft3/s)	% error	% error	% error
00:00	74	68	5.7130	73.7721	68.0070	5.7048	0.3080	0.0103	0.1435
01:00	74	68	5.7130	73.8695	67.9683	5.7068	0.1764	0.0466	0.1085
02:00	74	68	5.7130	74.2147	68.0382	5.7227	0.2901	0.0562	0.1698
03:00	74	68	5.7130	73.9239	68.1160	5.7152	0.1028	0.1706	0.0385
04:00	74	68	5.7130	73.8139	68.0204	5.7069	0.2515	0.0300	0.1068
05:00	74	68	5.7130	73.827	68.1000	5.7109	0.2338	0.1471	0.0368
06:00	74	68	5.7130	73.7721	68.0070	5.7048	0.3080	0.0103	0.1435
07:00	74	68	5.7130	73.8695	67.9683	5.7068	0.1764	0.0466	0.1085
08:00	74	68	5.7130	73.8021	68.0382	5.7073	0.2674	0.0562	0.0998
09:00	74	68	5.7130	73.9239	68.1160	5.7152	0.1028	0.1706	0.0385
10:00	74	68	5.7130	73.8139	68.0204	5.7069	0.2515	0.0300	0.1068
11:00	74	68	5.7130	73.827	68.1000	5.7109	0.2338	0.1471	0.0368
12:00	74	68	5.7130	73.7721	68.0070	5.7048	0.3080	0.0103	0.1435
13:00	74	68	5.7130	73.8695	67.9683	5.7068	0.1764	0.0466	0.1085
14:00	74	68	5.7130	73.8021	68.0382	5.7073	0.2674	0.0562	0.0998
15:00	74	68	5.7130	73.9239	68.1160	5.7152	0.1028	0.1706	0.0385
16:00	74	68	5.7130	73.8139	68.1907	5.7143	0.2515	0.2804	0.0228
17:00	74	68	5.7130	73.827	68.1000	5.7109	0.2338	0.1471	0.0368
18:00	74	68	5.7130	73.7721	68.0070	5.7048	0.3080	0.0103	0.1435
19:00	74	68	5.7130	73.8695	67.9683	5.7068	0.1764	0.0466	0.1085
20:00	74	68	5.7130	74.2147	68.0382	5.7227	0.2901	0.0562	0.1698
21:00	74	68	5.7130	73.9239	68.1160	5.7152	0.1028	0.1706	0.0385
22:00	74	68	5.7130	73.8139	68.0204	5.7069	0.2515	0.0300	0.1068
23:00	74	68	5.7130	73.9218	68.1000	5.7144	0.1057	0.1471	0.0245
ft3/día	Flujo Total Teórico		493603.2	Flujo Total Medido		493377.48	Error promedio por variable		
Error del flujo totalizado Teórico vs Medido (%)						-0.0457	0.2199	0.0872	0.0908

Fuente: Propia

Tabla 12 Características de medición de Carta Gráfica con trazado digital N°9.

CARTA GRÁFICA CON TRAZADO DIGITAL N°9									
	Valores Teóricos			Valores Medidos			Error		
Muestra Hora	Presión Diferencial	Presión Estática	Flujo Volumétrico	Presión Diferencial	Presión Estática	Flujo Volumétrico	Presión Diferencial	Presión Estática	Flujo Volumétrico
#	Pd ("H2O)	Ps (psi)	Flow (ft3/s)	Pd ("H2O)	Ps (psi)	Flow (ft3/s)	% error	% error	% error
00:00	88	80	6.7561	87.7676	79.8571	6.7413	0.2641	0.1786	0.2191
01:00	88	80	6.7561	87.5590	79.8519	6.7333	0.5011	0.1851	0.3375
02:00	88	80	6.7561	87.7361	79.9927	6.7460	0.2999	0.0091	0.1495
03:00	88	80	6.7561	87.6772	79.7210	6.7320	0.3668	0.3487	0.3567
04:00	88	80	6.7561	87.6885	79.8795	6.7393	0.3540	0.1506	0.2487
05:00	88	80	6.7561	87.5830	79.9515	6.7386	0.4739	0.0606	0.2590
06:00	88	80	6.7561	87.7676	79.8571	6.7413	0.2641	0.1786	0.2191
07:00	88	80	6.7561	87.7856	79.8519	6.7417	0.2436	0.1851	0.2131
08:00	88	80	6.7561	87.7361	79.9927	6.7460	0.2999	0.0091	0.1495
09:00	88	80	6.7561	87.6885	79.9287	6.7415	0.3540	0.0891	0.2161
10:00	88	80	6.7561	87.6885	79.8795	6.7393	0.3540	0.1506	0.2487
11:00	88	80	6.7561	87.9639	79.9515	6.7527	0.0410	0.0606	0.0503
12:00	88	80	6.7561	87.7676	79.8571	6.7413	0.2641	0.1786	0.2191
13:00	88	80	6.7561	87.7856	79.8519	6.7417	0.2436	0.1851	0.2131
14:00	88	80	6.7561	87.7361	79.9927	6.7460	0.2999	0.0091	0.1495
15:00	88	80	6.7561	87.6772	79.9287	6.7411	0.3668	0.0891	0.2220
16:00	88	80	6.7561	87.6885	79.8795	6.7393	0.3540	0.1506	0.2487
17:00	88	80	6.7561	87.5830	79.9515	6.7386	0.4739	0.0606	0.2590
18:00	88	80	6.7561	87.7676	79.8571	6.7413	0.2641	0.1786	0.2191
19:00	88	80	6.7561	87.7856	79.8519	6.7417	0.2436	0.1851	0.2131
20:00	88	80	6.7561	87.7361	79.9927	6.7460	0.2999	0.0091	0.1495
21:00	88	80	6.7561	87.6772	79.7210	6.7320	0.3668	0.3487	0.3567
22:00	88	80	6.7561	87.6885	79.8795	6.7393	0.3540	0.1506	0.2487
23:00	88	80	6.7561	87.6697	79.9515	6.7418	0.3753	0.0606	0.2117
ft3/día	Flujo Total Teórico		583727	Flujo Total Medido		582419.16	Error promedio por variable		
Error del flujo totalizado Teórico vs Medido (%)						-0.2241%	0.3218	0.1338	0.2241

Fuente: Propia

Tabla 13 Características de medición de Carta Gráfica con trazado digital N°10.

CARTA GRÁFICA CON TRAZADO DIGITAL N°10									
	Valores Teóricos			Valores Medidos			Error		
Muestra Hora	Presión Diferencial	Presión Estática	Flujo Volumétrico	Presión Diferencial	Presión Estática	Flujo Volumétrico	Presión Diferencial	Presión Estática	Flujo Volumétrico
#	Pd ("H2O)	Ps (psi)	Flow (ft3/s)	Pd ("H2O)	Ps (psi)	Flow (ft3/s)	% error	% error	% error
00:00	100	92	7.7250	99.3869	91.7357	7.6906	0.6131	0.2873	0.4453
01:00	100	92	7.7250	99.4003	91.5728	7.6840	0.5997	0.4643	0.5307
02:00	100	92	7.7250	99.5457	91.6062	7.6909	0.4543	0.4280	0.4414
03:00	100	92	7.7250	99.5704	91.9967	7.7088	0.4296	0.0036	0.2097
04:00	100	92	7.7250	99.4332	91.7357	7.6923	0.5668	0.2873	0.4233
05:00	100	92	7.7250	99.5594	91.7934	7.6995	0.4406	0.2246	0.3301
06:00	100	92	7.7250	99.3869	91.7357	7.6906	0.6131	0.2873	0.4453
07:00	100	92	7.7250	99.6967	91.9448	7.7112	0.3033	0.0600	0.1786
08:00	100	92	7.7250	99.5457	91.7549	7.6974	0.4543	0.2664	0.3573
09:00	100	92	7.7250	99.5704	91.9967	7.7088	0.4296	0.0036	0.2097
10:00	100	92	7.7250	99.5871	91.7357	7.6981	0.4129	0.2873	0.3482
11:00	100	92	7.7250	99.5594	91.7934	7.6995	0.4406	0.2246	0.3301
12:00	100	92	7.7250	99.6933	91.7357	7.7020	0.3067	0.2873	0.2977
13:00	100	92	7.7250	99.6967	91.9448	7.7112	0.3033	0.0600	0.1786
14:00	100	92	7.7250	99.5457	91.7549	7.6974	0.4543	0.2664	0.3573
15:00	100	92	7.7250	99.5704	91.9967	7.7088	0.4296	0.0036	0.2097
16:00	100	92	7.7250	99.4332	92.1565	7.7106	0.5668	0.1701	0.1864
17:00	100	92	7.7250	99.5594	91.7934	7.6995	0.4406	0.2246	0.3301
18:00	100	92	7.7250	99.3869	91.7357	7.6906	0.6131	0.2873	0.4453
19:00	100	92	7.7250	99.4003	91.5728	7.6840	0.5997	0.4643	0.5307
20:00	100	92	7.7250	99.5457	91.6062	7.6909	0.4543	0.4280	0.4414
21:00	100	92	7.7250	99.5704	91.9967	7.7088	0.4296	0.0036	0.2097
22:00	100	92	7.7250	99.4332	91.7357	7.6923	0.5668	0.2873	0.4233
23:00	100	92	7.7250	99.5594	91.7934	7.6995	0.4406	0.2246	0.3301
ft3/día	Flujo Total Teórico		667440	Flujo Total Medido		665162.28	Error promedio por variable		
Error del flujo totalizado Teórico vs Medido (%)						-0.3413	0.4735	0.2305	0.3413

Fuente: Propia

Asimismo, en la tabla N°13, se observa el porcentaje de error de flujo totalizado de las diferentes cartas gráficas, para así tener el grado de exactitud medido de la técnica utilizada. Para esta tabla se consideran los signos de los diferentes porcentajes de error con el fin de observar si hay una tendencia hacia un error negativo o positivo. La expresión matemática utilizada para obtener el Porcentaje de Error de Flujo Totalizado fue la siguiente:

$$\%Error \text{ Flujo Totalizado} = \frac{\text{Flujo total teórico} - \text{Flujo total medido}}{\text{Flujo total teórico}} \quad (13)$$

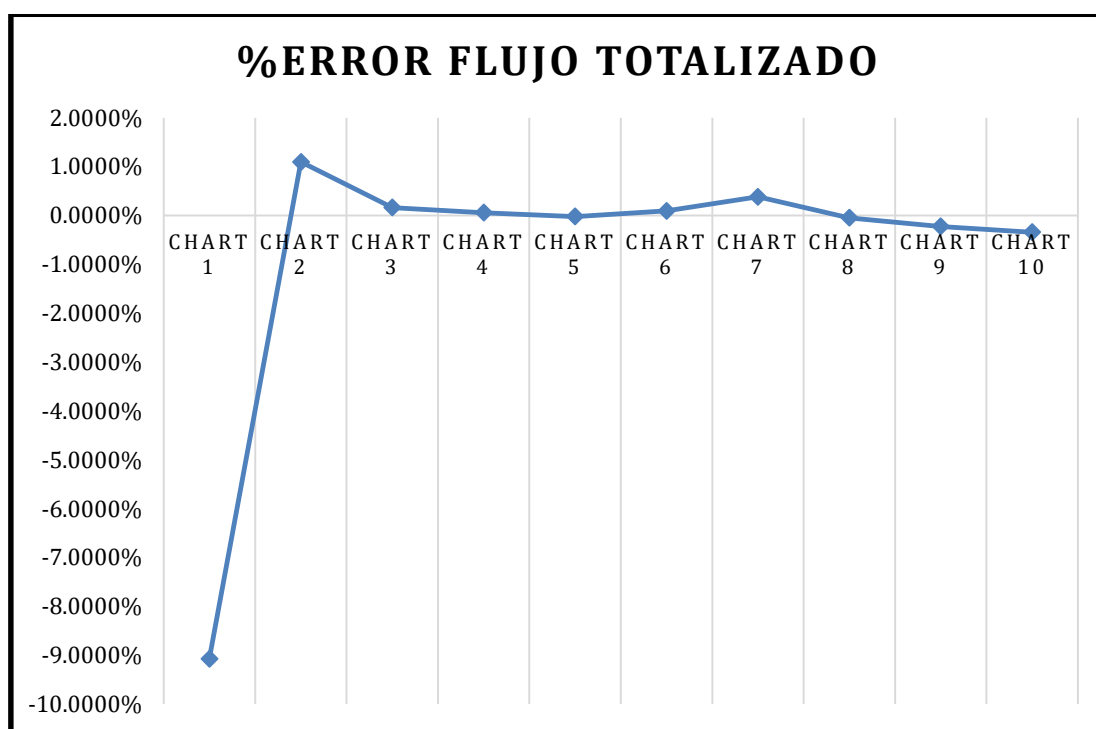
Tabla 14 Recolección de errores de las 10 cartas simuladas

CARTAS GRÁFICAS	ERROR (%) FLUJO TOTALIZADO
Chart 1	-9.0712%
Chart 2	1.0963%
Chart 3	0.1620%
Chart 4	0.0560%
Chart 5	-0.0205%
Chart 6	0.0924%
Chart 7	0.3817%
Chart 8	-0.0457%
Chart 9	-0.2241%
Chart 10	-0.3413%
PROMEDIO	-0.7914%

Fuente: Propia

Finalmente, en la figura N°19, se muestra el gráfico de la pendiente de las cartas gráficas con su respectivo porcentaje de error de Flujo Totalizado; asimismo, se puede observar que existe un pico de error de -9.0712% ocasionado por la presión diferencial en el valor mínimo de 1 inH2O generado por el grosor del trazo. También se aprecia un error promedio menor al 1%, el cual podría mejorarse promediando el grosor de los trazos de las plumillas.

Figura 19. Error (%) Flujo totalizado



Fuente: Propia

CONCLUSIONES

- 1) Se logró desarrollar el algoritmo de la técnica de procesamiento digital de imágenes, utilizando el software Matlab para realizar la interpretación de valores de las cartas gráficas, fue importante identificar de manera correcta la circunferencia mayor de la carta gráfica con el Matlab ya que en base a esa circunferencia se realizó el desarrollo de los cálculos y operaciones. Al momento de realizar el filtrado se observó que al aumentar los umbrales del filtro se obtenía una imagen con menos impurezas, pero se perdía parte de la información mostrando algunos agujeros en el trazo; por lo que se tuvo que diseñar dos algoritmos de protección, uno que “dilata” los valores cercanos completando los agujeros encontrados y otro que complete cada píxel vacío con la información del píxel anterior. Todo esto se encuentra en el tercer capítulo del proyecto de tesis, con sus respectivas figuras, códigos de programación y uso de comandos del Matlab.
- 2) Se compararon los valores obtenidos a través del software Matlab con los valores graficados observando que eran los correctos en todo el recorrido de la carta, por lo que se procedió con la operacionalización de las variables utilizando las ecuaciones y normas del reporte AGA #3 obteniendo el flujo instantáneo y el flujo el totalizado. En esta etapa se capturaron 24 muestras por carta gráfica equivalentes a una muestra de presión (diferencial y estática) por cada hora en un día. Esto también se encuentra en el tercer capítulo, donde se han incluido las principales ecuaciones para el cálculo, conversión, así como código de programación de Matlab.
- 3) En el análisis de las 10 cartas gráficas con valores fijos alrededor de toda la cuadrilla se obtuvo un error promedio de 0.7914%, tal como se observa en la Tabla 13. Por lo tanto, se concluye que se obtuvo un error menor en el flujo totalizado respecto al de las presiones, ya que al momento de realizar la integración se está sumando todos los valores lo cual da origen al área de la figura; por lo cual, esto hace que se resten algunos valores de la dispersión. Entonces, esto nos indica que la solución propuesta tiene una mejor precisión que exactitud. Finalmente, el tiempo de procesamiento que tardó el Matlab en arrojar los resultados está sujeto al tamaño de la imagen escaneada y el procesador de la PC utilizada. Para este trabajo de investigación se usó una laptop core i5 de 4GB de RAM, tamaño de imagen escaneada de 3540x4984píxeles y se tomaron 24 muestras por trazo; teniendo un tiempo de espera para la obtención de los resultados de 60 segundos, aproximadamente.

RECOMENDACIONES

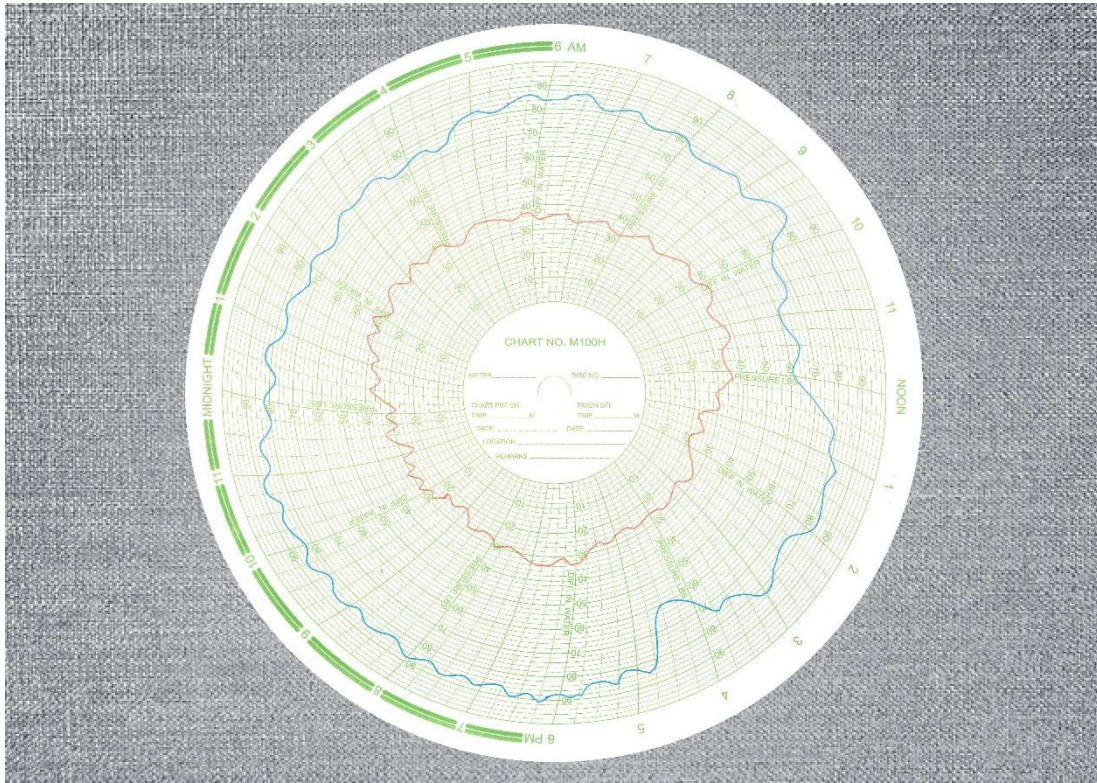
- 1) Los registradores de flujo operan bajo el principio de medición de la presión diferencial, y algunos de ellos grafican el flujo directamente (en una escala adimensional de 0 a 10) por lo que no sería necesario extraer la raíz cuadrada de la presión diferencial ($Q=K\sqrt{\Delta P}$).
- 2) Para la aplicación de la técnica propuesta, al igual que un integrador convencional, es importante conocer previamente las condiciones de proceso en el cual está instalado el registrador, tales como el tipo de fluido, gravedad específica, temperatura de proceso, coeficiente de descarga, diámetro de orificio o tubería y el valor beta.
- 3) En el caso de tener como fluido un líquido en vez de un gas, se tiene que modificar las ecuaciones de las densidades y usar como densidad base la del agua. A su vez, debido a que el agua no es un fluido compresible, no habría factor de expansión y no sería necesario monitorear la presión estática.
- 4) Como un complemento a esta investigación podría agregarse una plumilla al registrador para que trace la temperatura en tiempo real, haciendo que la temperatura sea una variable dinámica y se registre en una matriz al igual que la presión estática y dinámica. Esto mejoraría la precisión de la integración del flujo ya que la temperatura en un proceso no es perfectamente constante.
- 5) Para convertir este proyecto en una aplicación más eficiente para la industria, podría realizarse un empaquetado de toda la programación en un solo acceso directo. Por lo cual, al abrir el software este solicitaría las condiciones de proceso, el tipo de variables trazadas, la carga de imagen de la carta gráfica y finalmente mostraría los resultados obtenidos a elección del usuario.
- 6) Durante la etapa de pruebas y resultados del proyecto se pudo apreciar que el software Matlab nos permitió obtener resultados del flujo mediante una fotografía tomada de la carta gráfica, necesitando que se capture una buena imagen para el procesamiento; pero, si la imagen tomada tiene variaciones de angulación tendremos capturas fuera de precisión y nitidez, que pueden ser resueltas por medio de la técnica propuesta, pero presentarían mayor error.
- 7) Para determinar si la técnica tiene la capacidad de procesar otros modelos de cartas gráficas u otros colores de plumillas, es necesario realizar variaciones en los cálculos matemáticos de los límites de valores acordes al tipo de modelo de carta gráfica y en los parámetros de la programación del filtrado según el color de la plumilla.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

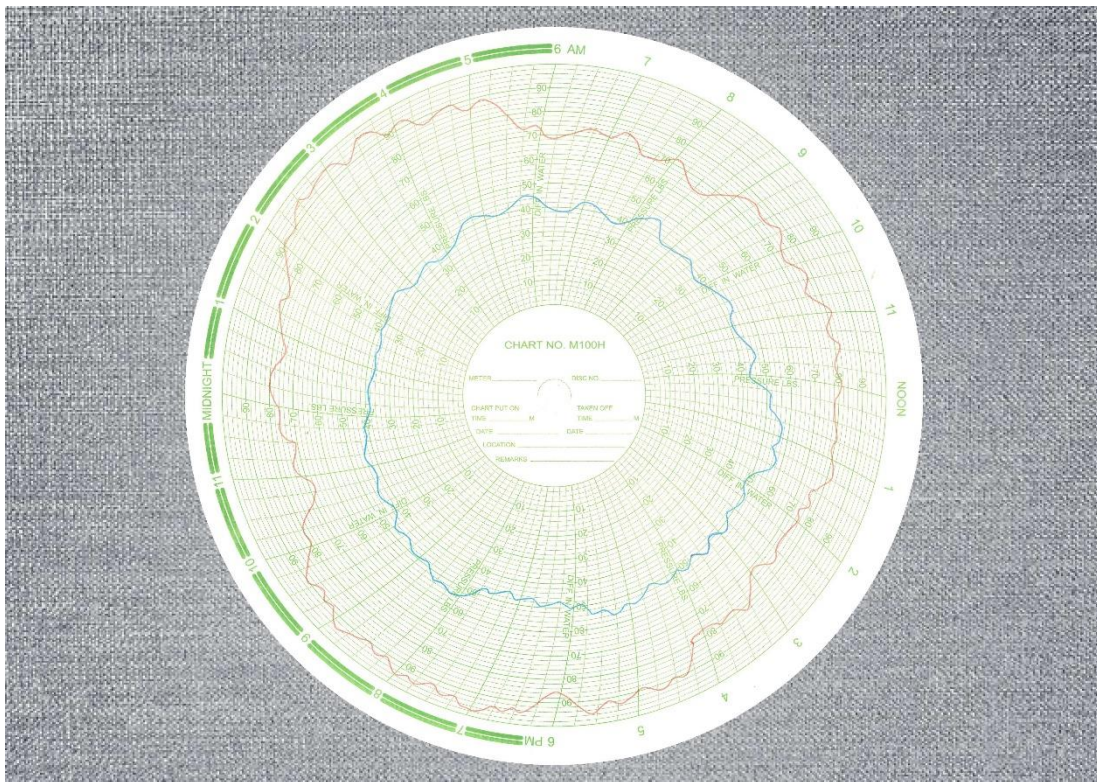
- [1]. Creus, A. (2011). Instrumentación Industrial. México: Marcombo - 8ª Edición Alfaomega.
- [2]. Chong, H. (2017). Optimización de la medición de flujo bajo el principio de la presión diferencial y su importancia en la Ingeniería de Control y Automatización industrial.
- [3]. Huamaní Navarrete, P. F. (2017). Red neuronal ART2 embebida en hardware para el reconocimiento de patrones de voz en tiempo real.
- [4]. A.G.A. Report No. 3 (2012). Orifice metering of natural gas and other related hydrocarbon fluids; Part 1 – General equations and uncertainty guidelines. American Gas Association.
- [5]. Miller, R. (1983). Flow Measurement Engineering Handbook – Third Edition. McGraw-Hill.
- [6]. Cuevas, E., Zaldívar, D., & Pérez, M. (2016). Procesamiento digital de imágenes con MATLAB & Simulink. Ra-Ma.
- [7]. Kovesi, P. D. (2000). MATLAB and Octave functions for computer vision and image processing. Centre for Exploration Targeting, School of Earth and Environment, The University of Western Australia.
- [8]. Considine, D. (1985). Process Instruments and Control Handbook. California: McGrawHill.
- [9]. Ediciones GPA-2145-08 (2005). "Table of Physical Properties for Hydrocarbons and Other Compounds of Interest to the Natural Gas Industry". Tulsa: Gas Processors Association
- [10]. Cameron Measurement Systems, 2019, Visible body: Chart Recorders. EU.: Schlumberger Global Oilfield Services & Equipment (10 de octubre de 2019) Recuperado de <https://www.products.slb.com>
- [11]. Cameron Measurement Systems, 2019, Visible body: Scanner 2000 Series Wired and Wireless. EU.: Schlumberger Global Oilfield Services & Equipment (10 de octubre de 2019) Recuperado de <https://www.products.slb.com>
- [12]. Productos Graphic Controls, 2019, Visible body: American Meter MC M-100-H EU.: Graphic Controls Co, (07 de noviembre de 2019) Recuperado de <http://www.graphiccontrols.com>

ANEXOS

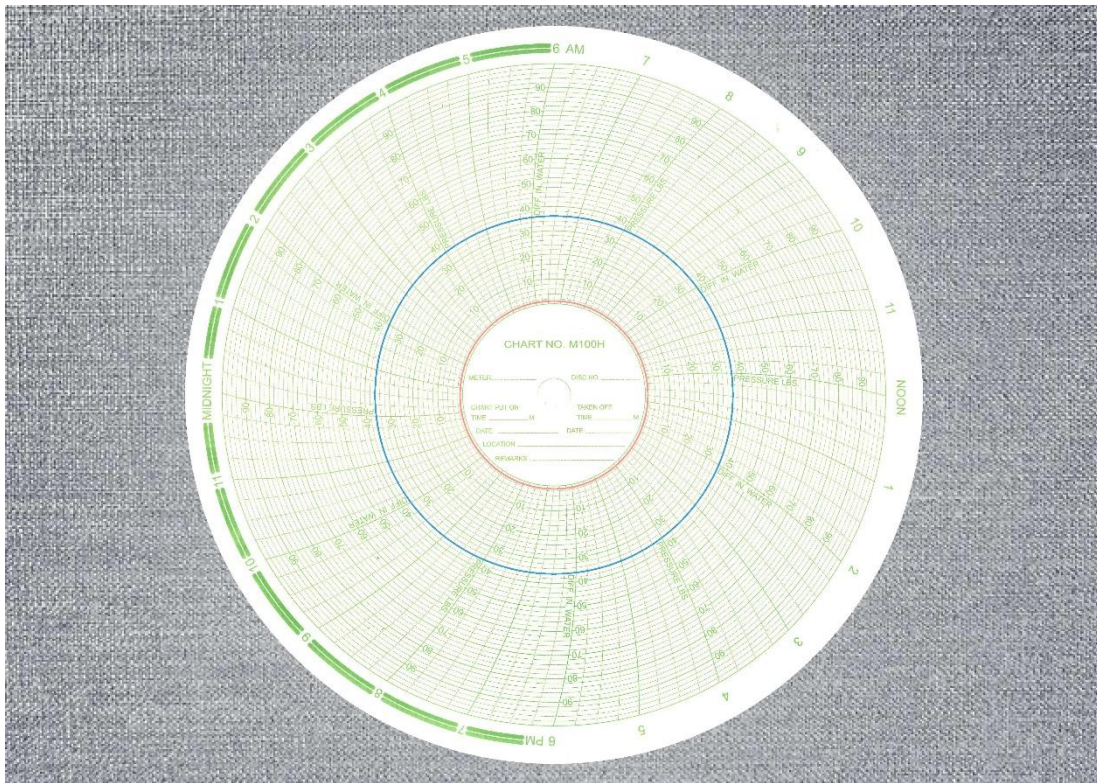
Anexo 1: Carta gráfica F trazada manualmente.



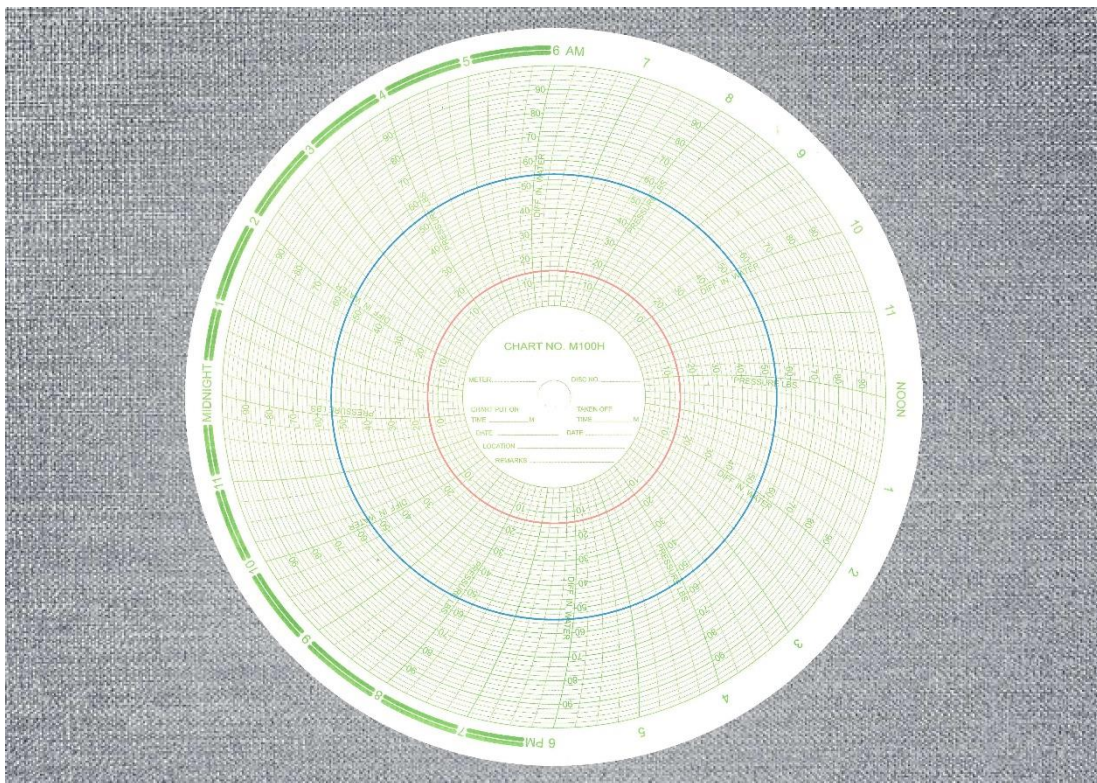
Anexo 2: Carta gráfica G trazada manualmente.



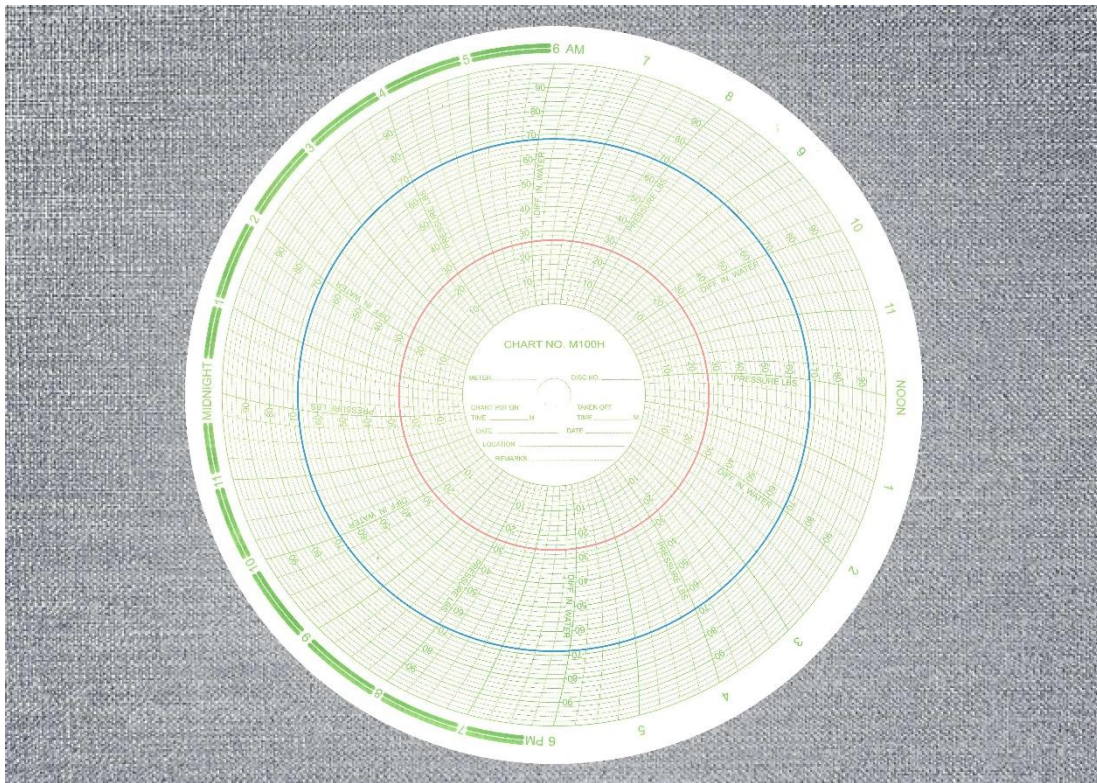
Anexo 3: Carta gráfica trazada digitalmente 1.



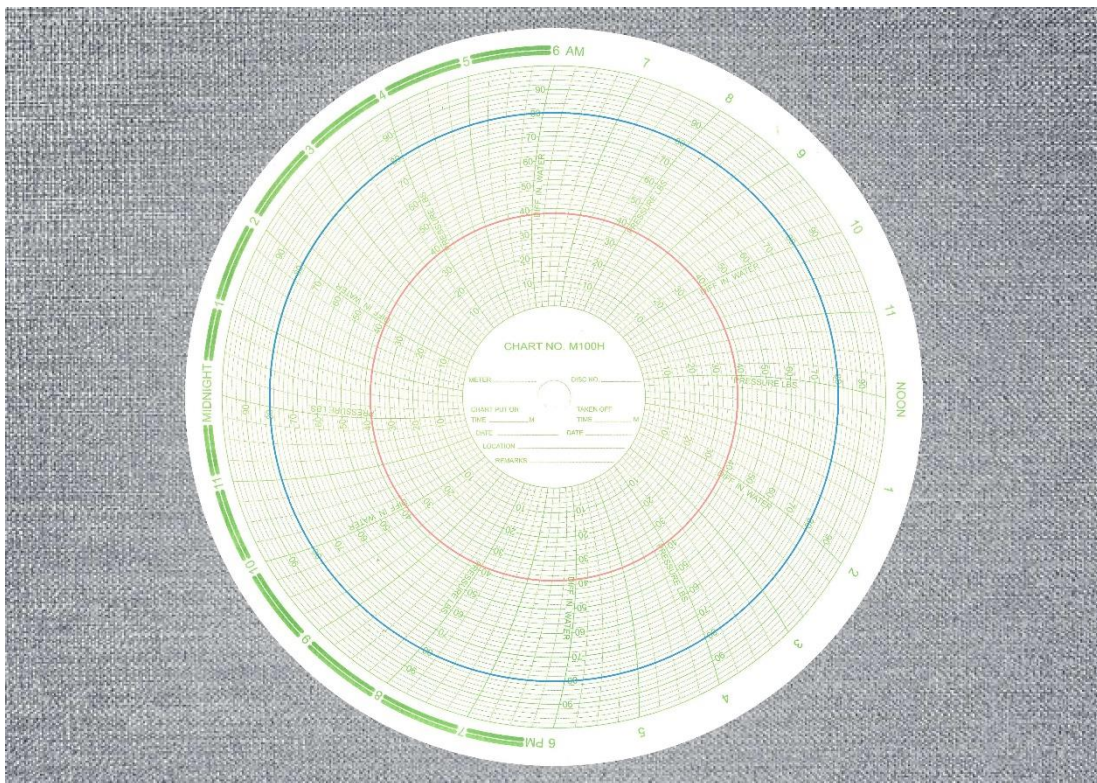
Anexo 4: Carta gráfica trazada digitalmente 2.



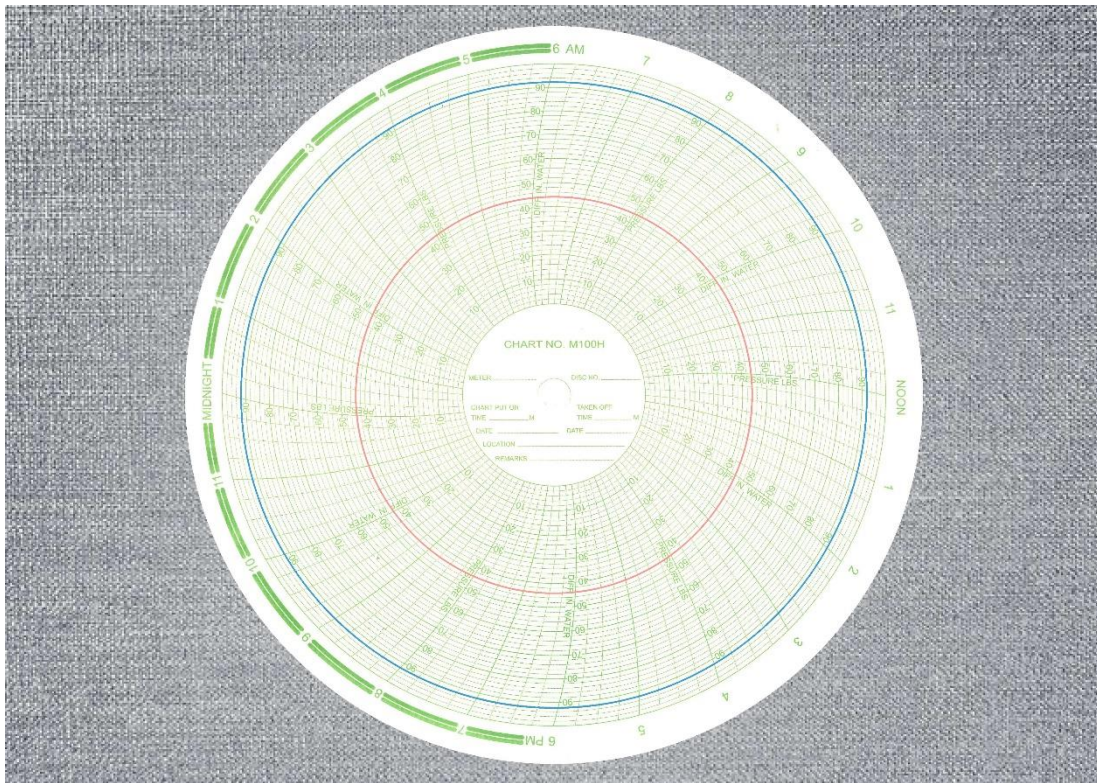
Anexo 5: Carta gráfica trazada digitalmente 3.



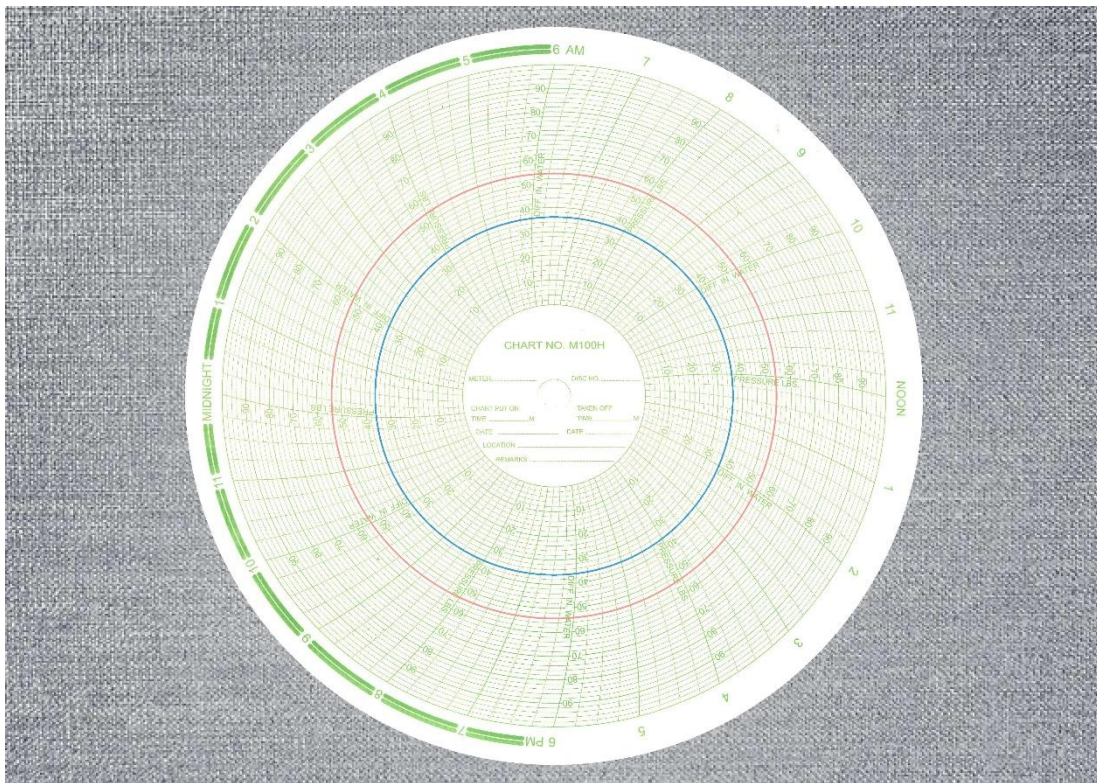
Anexo 6: Carta gráfica trazada digitalmente 4.



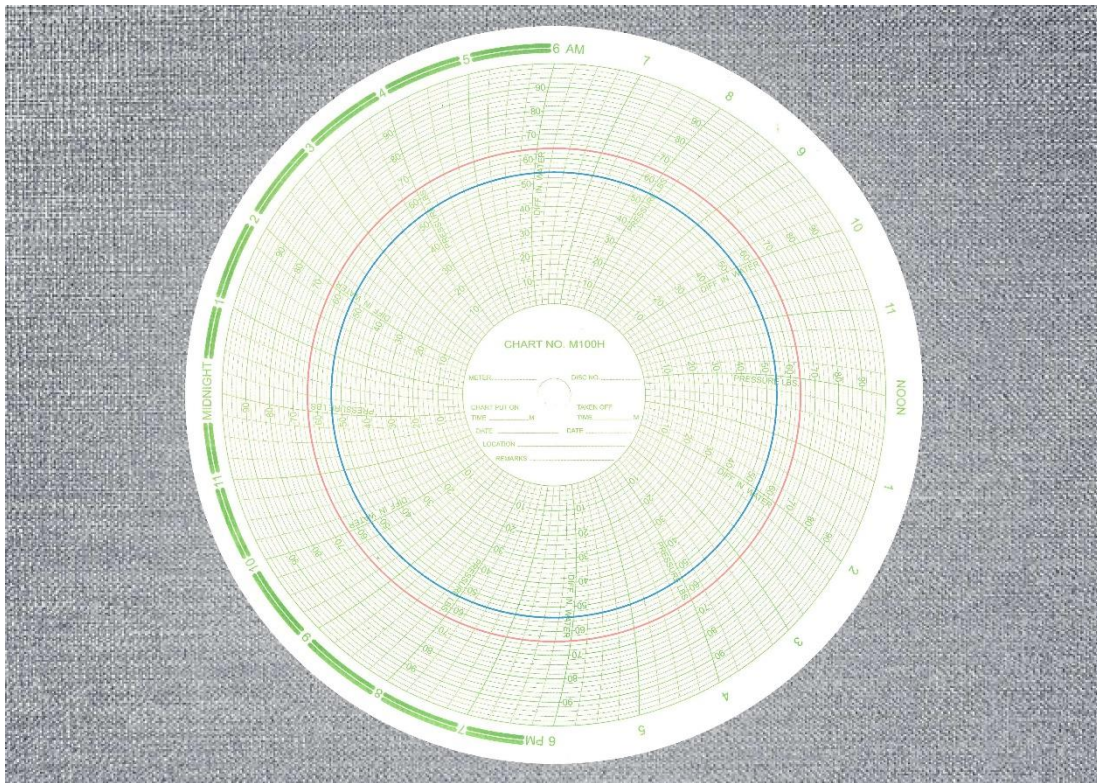
Anexo 7: Carta gráfica trazada digitalmente 5.



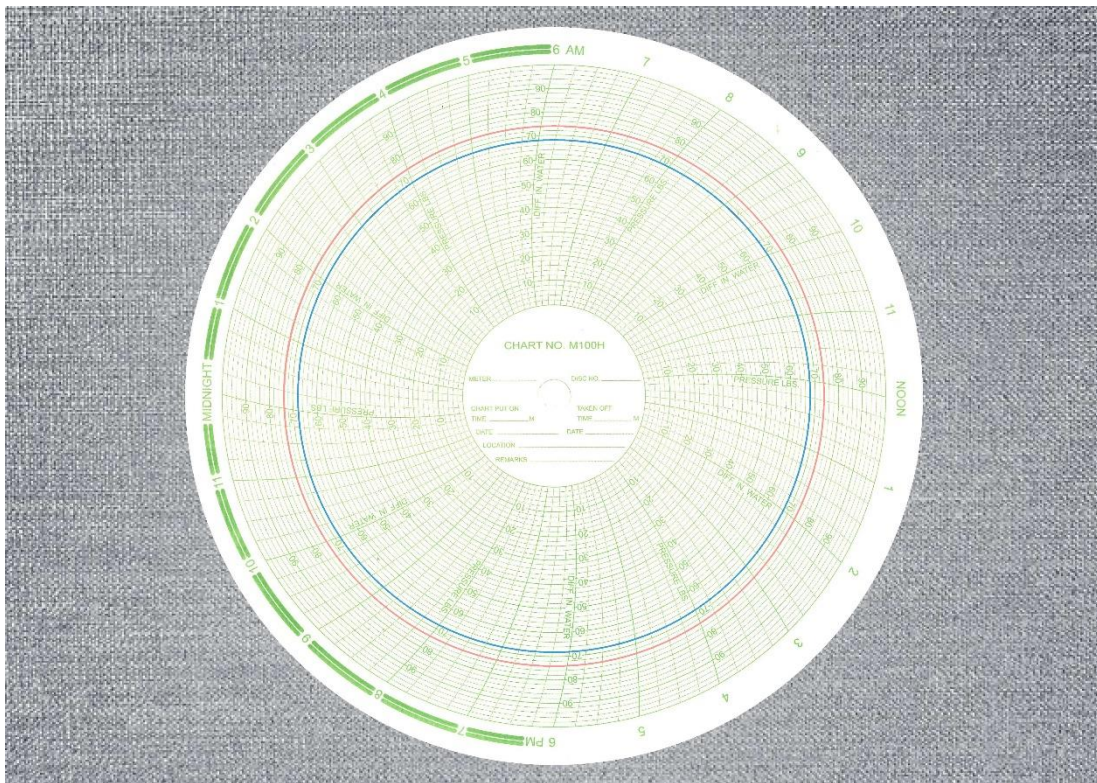
Anexo 8: Carta gráfica trazada digitalmente 6.



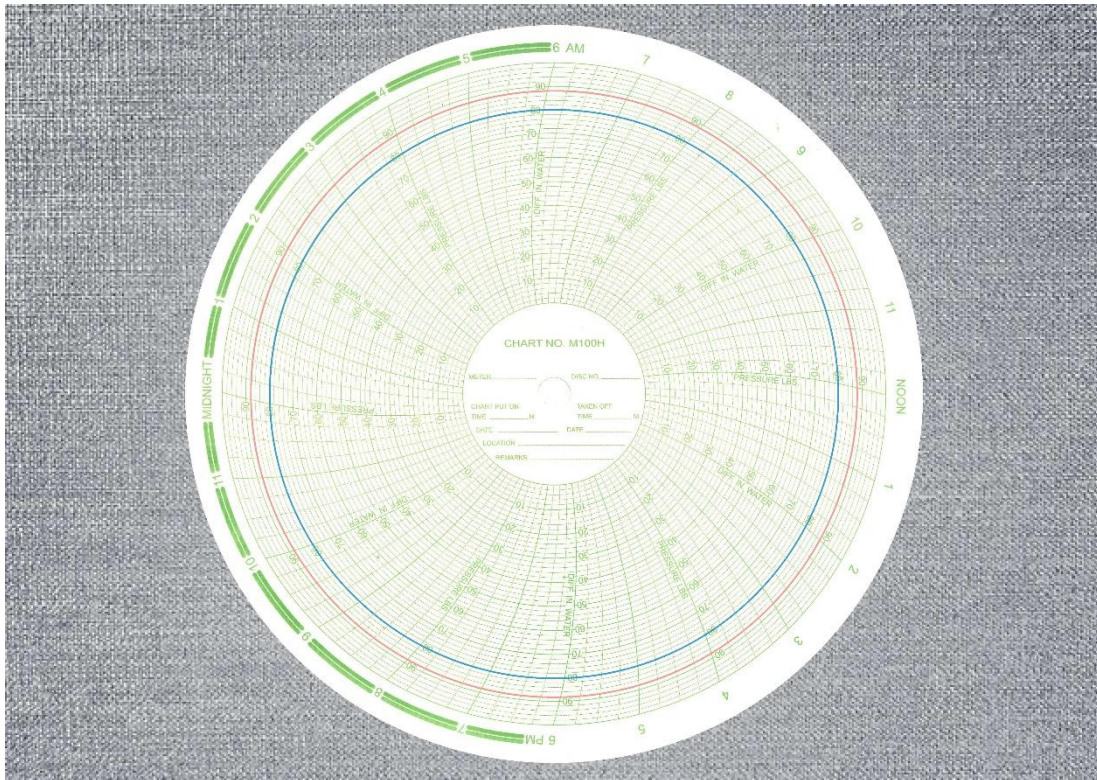
Anexo 9: Carta gráfica trazada digitalmente 7.



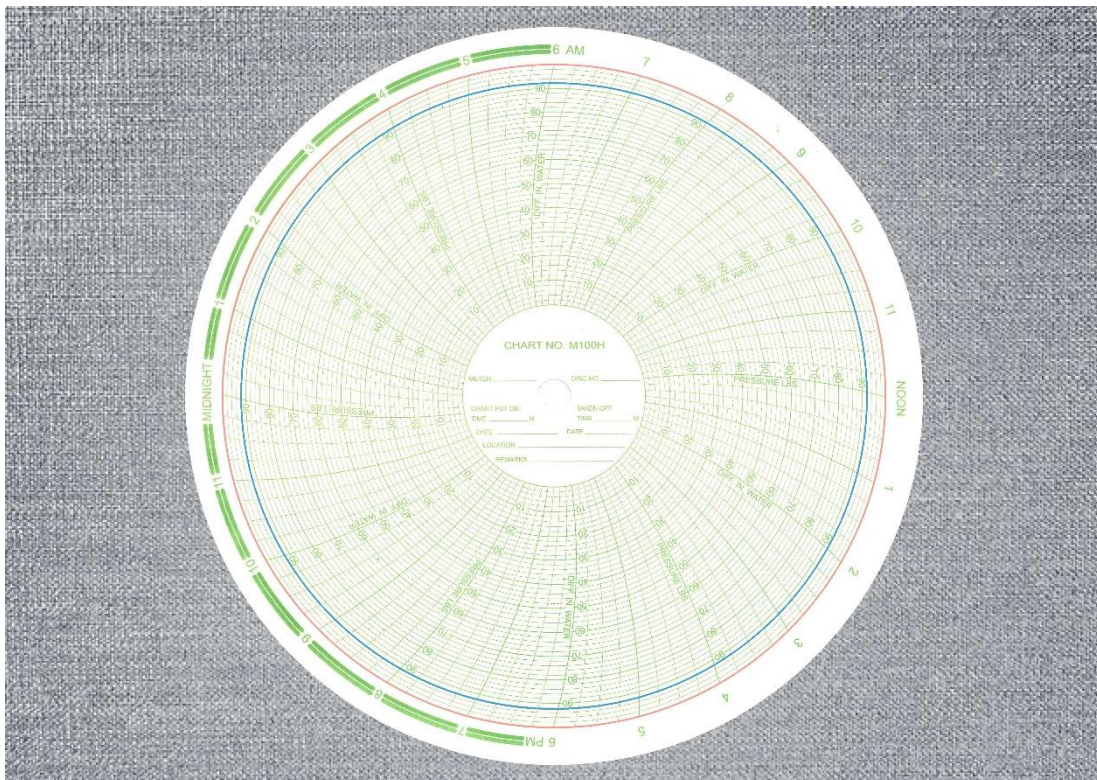
Anexo 10: Carta gráfica trazada digitalmente 8.



Anexo 11: Carta gráfica trazada digitalmente 9.



Anexo 12: Carta gráfica trazada digitalmente 10.



Anexo 13: Hoja técnica de datos del registrado Barton 202E.



BARTON Chart Recorders Models 202E, 202N, 242E and J8A

Cameron's BARTON® chart recorders are the industry standard for accurate, reliable measurement and recording of pressure, differential pressure and temperature in a variety of applications. Differential pressure models, like the 202E and 202N, utilize the BARTON rupture-proof bellows DPU as the actuating unit, featuring over-range protection and pulsation dampening.



Common Components

- **Case** – The case is made of rugged, lightweight die-cast aluminum that features a built-in rainshield. It is finished in polyurethane electrostatic powder paint that has a high resistance to weathering, scratches, and industrial fumes. An aircraft-type door hinge (made of 302 SST) provides excellent resistance to salt spray and H₂S. The seal between the door and the case is made of neoprene, a material that is non-absorbant and resistant to oils and most solvents.
- **Chart Drive** – Chart drives are available in battery and spring-wound versions with a wide variety of rotation speeds. All chart drives have a simple, positive chart lock hub and are interchangeable.
- **NUFLO™ Charts** – The charts are made from wood-free paper – a special, low-shrinkage, high quality product that eliminates eccentric and elliptical errors. Charts are shrink-wrapped to help maintain the factory default size until the package is opened by the user. Once a box of charts is opened, it can be stored in the supplied, plastic, resealable storage bag.
- **Recording Mechanism** – All parts are stainless steel for long life. The pen mount is exceptionally rugged and pen shafts are fitted with ball pivots to minimize friction. All links are adjustable, with micrometer adjustments for accurate calibration. All adjustments have screwdriver slots to simplify calibration. Disposable pens are standard.
- **Thermal Systems** – The systems consist of a bourdon tube, a capillary with stainless steel armor and a bulb with a bendable extension. All parts are stainless steel. Systems are available in Class I liquid fill with a 3/8" OD bulb. Temperature ranges for each design are listed below. A thermal system must have a span of more than 50° F (27° C) and the high temperature limit must be greater than 95° F (35° C).
 - **Class IB** (liquid environmental fill – case compensated) 14° F to 300° F (-20° C to 150° C)
 - **Class IA** (liquid hydrocarbon, fully compensated) – temperature range varies with fill material
 - Ethyl-benzene: -125° F to 350° F (-87° C to 177° C)
 - Consult factory for other fill materials and ranges
 - **Class IB** (liquid hydrocarbon, case compensated) – temperature range varies with fill material
 - Ethyl-benzene: -125° F to 350° F (-87° C to 177° C)
 - Consult factory for other fill materials and ranges
 - **Uncertainty** ± 1.0% of Full Scale
 - **Hardware** Capillary standard length is 10'. Case compensated available up to 20'. Lengths longer than 20' feet must be fully compensated
- **Pressure Elements** – Used in Models 202E, 242E, and J8A, genuine BARTON pressure elements are a precision wound helical-type, available in a variety of pressure ranges from 0 to 25 psi (1.72 bar), up to 0 to 30,000 psi (2068 bar). The Model 202N uses a Monel K500 pressure element in ranges from 0 to 250 psi (17 bar), up to 0 to 6000 psi (414 bar). Connections available in 1/4" NPT for ranges up to 10,000 psi (689 bar). Ranges greater than 10,000 psi (689 bar) utilize an Aminco 9/16–18 (1/4" ODT) female connection.
 - **Uncertainty** ± 1.0% of Full Scale

Models 202E (DP)

The 202E is a 12" chart recorder, widely used in gas transmission and in production fields because of its high accuracy recording mechanism, even under extreme variations in flowing pressure and ambient temperatures.

The 202E is available in 1 to 4 pen configurations (DP+ 3 additional pens). The additional pens can be used to record temperature and pressure data.

The 202E is actuated by a BARTON Model 199 DPU. Standard materials available with working pressures up to 6000 psi (414 bar SWP) – see DPU bulletin #NF00039 for details. Static pressure and temperature pens are actuated by precision wound elements (see page 1).

Model 202N (DP) (NACE)

The 202N is a 12" chart recorder designed to measure flow, static pressure and temperature in sour gas applications. The 202N meets all NACE requirements for H2S environments, per MR-01-75 (2009) and ISO 15156:2009.

Static pressure is measured by precision wound helical elements, constructed of Monel K500. Temperature systems are isolated from the process using NACE-compliant thermowells. All other features and benefits are the same as the 202E recorder.

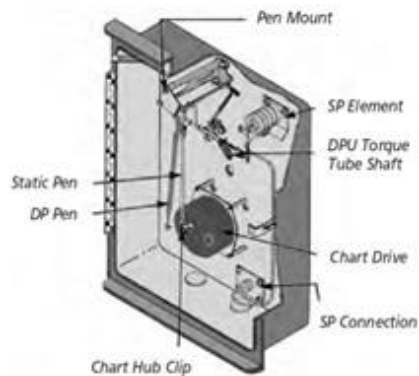
The 202N is actuated by BARTON's M199 NACE DPU. The standard version has a SWP up to 2000 psi (138 bar). For higher working pressures, see optional NACE versions of 202N.

Standard Service DPU Configurations

SWP (psi)		Materials of Construction				
Standard	CRN*	Bolts	Hsg & Center Plate	BelloWS	Gasket	Torque Tube
1000 PSI	800 PSI	B7	316 SS	316 SS	Nickel	BeCu
2500 PSI	1500 PSI	B7	C1018 CS	316 SS	Fiber	BeCu
3000 PSI	3000 PSI	E4140 CS	316 SS	316 SS	Nickel	BeCu
4500 PSI	3500 PSI	E4140 CS	E4142 CS	316 SS	Fiber	BeCu
6000 PSI	N/A	E4140 CS	E4142 CS	316 SS	Fiber	BeCu

NACE DPU Configurations

SWP (psi)		Materials of Construction				
Standard	CRN*	Bolts	Hsg & Center Plate	BelloWS	Gasket	Torque Tube
2000 PSI	800 PSI	LB7M	C1018 CS	316 SS	VITON	Monel
3000 PSI	2000 PSI	LB7M	316 SS	Inconel	TFE/SS	BeCu
CRN Only	2000 PSI	LB7M	E4142 CS	316 SS	TFE/SS	Monel
4500 PSI	2000 PSI	LB7M	E4142 CS	Inconel	TFE/SS	BeCu



Specifications

Safe Working Pressure	up to 6000 psi (414 bar)
DP Ranges	Minimum span of 0-10" WC (0-25 mbar) Maximum span of 0-100 PSID (0-6.9 bar)
Uncertainty	± 0.5% Full Scale
Ambient Temperature Limits	-40° F to 180° F (-40° C to 82° C)

202E / 202N Chart Recorder Weights

DPU Material	Forged Steel			Forged SST	
	2500	4500	6000	1000	3000
DPU SWP					
Weight in lbs (kgs)	68 (31)	69 (31)	71 (32)	59 (27)	69 (31)