

**COMPARACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA ENTRE LOS PROTOCOLOS DE
COMUNICACIÓN HART (4-20 mA) y FOUNDATION FIELDBUS, PARA
LA INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO APLICADA A UN PROCESO DE
TRANSPORTE DE CRUDO**

ANDRES JULIAN AYALA CUBIDES

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA**

2014

**COMPARACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA ENTRE LOS PROTOCOLOS DE
COMUNICACIÓN HART (4-20 mA) y FOUNDATION FIELDBUS, PARA LA
INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO APLICADA A UN PROCESO DE
TRANSPORTE DE CRUDO**

ANDRES JULIAN AYALA CUBIDES

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO EN GERENCIA DE
HIDROCARBUROS**

DIRECTOR:

JAIME AMAYA

INGENIERO ELECTRÓNICO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA**

2014

INDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
1. CONCEPTUALIZACIÓN	19
1.1 Buses de alta velocidad y baja funcionalidad.....	21
1.1.1 CAN	21
1.1.2 ASI.....	22
1.2 Buses de alta velocidad y funcionalidad media.....	22
1.2.1 DeviceNet	22
1.2.2 InterBus-S:.....	23
1.3 Buses de alta velocidad y funcionalidad	23
1.3.1 PROFIBUS	23
1.3.2 FOUNDATION FIELDBUS.....	23
1.3.3 HART (4-20 mA).....	28
2. CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA UN BUS DE CAMPO, APLICADO A LAS PLANTAS DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS	33
2.1 Madurez y aceptación de la tecnología en el mercado	34
2.2 Robustez en la comunicación	35
2.3 Despeño del sistema.....	37
2.4 Capacidad Multivariable y Control	38
2.5 Impacto en el CAPEX y OPEX del proyecto	38
3. EXPLICAR UN CASO DE APLICACIÓN DE DOS TECNOLOGÍAS DE BUSES DE CAMPO (HART Y FOUNDATION FIELDBUS), EN UNA PLANTA PILOTO DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS	42
4. EVALUACIÓN ECONÓMICA Y TÉCNICA DEL CASO DE APLICACIÓN	46
4.1 CAPEX del proyecto	47
4.2 OPEX del proyecto	50
4.2.1 Costos fijos.....	50
4.3 Depreciación.....	52

4.4 Ingresos.....	53
4.5 Impuestos	54
4.6 Evaluación económica.	55
4.6.1 Evaluación de la tecnología HART (4-20mA)	56
4.6.2 Evaluación FOUNDATION FIELDBUS	57
4.6.3 Comparación de resultados económicos para selección de la alternativa	58
4.6.4 Análisis de sensibilidad variando el porcentaje de ingresos de la planta para invertir en proyectos de instrumentación y control	59
4.6.5 Análisis de sensibilidad variando la cantidad de barriles diarios transportados	61
4.6.6 Ventajas y desventajas técnica aplicada al proyecto	63
CONCLUSIONES.....	66
BIBLIOGRAFÍA	68

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Clasificación general de buses de comunicación	21
Figura 2 Estadísticas de uso de FOUNDATION FIELDBUS en la industria	24
Figura 3 Tendencia de dominación de la tecnología FIELDBUS en el tiempo	24
Figura 4 Esquemático típico arquitectura de comunicación FOUNDATION FIELDBUS.....	26
Figura 5 Ejemplo para determinar longitud máxima de un segmento FOUNDATION FIELDBUS.....	27
Figura 6 Arquitectura típica HART (4-20 mA).....	29
Figura 7 Transmisión de señal HART sobre 4-20 mA	30
Figura 8 Instrumentación inteligente, datos entregados por el protocolo HART....	31
Figura 9 Estadísticas de crecimiento protocolo HART	32
Figura 10 Rango de la señal 4-20mA.....	35
Figura 11 Flujo de caja HART	56
Figura 12 Flujo de caja FOUNDATION FIELDBUS	56
Figura 13 Resultado análisis de sensibilidad VPN	60
Figura 14 Resultado análisis de sensibilidad TIR.....	60
Figura 15 Resultado análisis de sensibilidad Relación Costo/Beneficio.....	61
Figura 16 Resultado análisis de sensibilidad VPN variando la cantidad de barriles diarios.....	62
Figura 17 Resultado análisis de sensibilidad VPN variando la cantidad de barriles diarios.....	63
Figura 18 P&ID Estación de recibo A.....	72
Figura 20 Planimetría de bandejas y ductos estación de recibo A	73
Figura 21 Arquitectura de control estación A (HART 4-20mA).....	74
Figura 22 Arquitectura de control estación A (FOUNDATION FIELDBUS)	75

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Límites claves del segmento H1 FOUNDATION FIELDBUS.....	28
Tabla 2 Desempeño comparativo HART vs FOUNDATION FIELDBUS	37
Tabla 3 Comparación HART y Foundation con respecto a OPEX y CAPEX	40
Tabla 4 Premisas iniciales proyecto HART y FOUNDATION FIELDBUS.....	47
Tabla 5 Costo instrumentación de las dos alternativas	48
Tabla 6 Costo sistema de control de las dos alternativas	48
Tabla 7 Costo instalación y comisionamiento de las dos alternativas.....	49
Tabla 8 Costo sistema de control de las dos alternativas	49
Tabla 9 Consolidado CAPEX Alternativas.....	49
Tabla 10 Consolidado OPEX Alternativas	52
Tabla 11 Resumen Consolidado Depreciación Alternativas.....	52
Tabla 12 Resumen Consolidado Ingresos Alternativas	54
Tabla 13 Consolidado impuestos Alternativas.....	55
Tabla 14 Consolidado Criterios de Evaluación HART	57
Tabla 15 Consolidado criterios de evaluación FOUNDATION FIELDBUS	57
Tabla 16 Sensibilidad % de Inversión HART (4-20mA).....	59
Tabla 17 Sensibilidad % de Inversión FOUNDATION FIELDBUS	59
Tabla 18 Sensibilidad Barriles diarios Transportados FOUNDATION FIELDBUS	62
Tabla 19 Sensibilidad Barriles diarios Transportados HART	62
Tabla 20 Consolidado Capex	76
Tabla 21 Consolidad OPEX HART (4-20mA)	77
Tabla 22 Consolidad OPEX FOUNDATION FIELDBUS	78
Tabla 23 Consolidado Depreciación.....	79
Tabla 24 Consolidado Ingresos Estación A alternativa HAT (4-20mA)	80
Tabla 25 Consolidado Ingresos Estación A FOUNDATION FIELDBUS.....	81
Tabla 26 Consolidado Flujo de Caja HART(4-20mA).....	82

Tabla 27 Consolidado Flujo de Caja FOUNDATION FIELDBUS 84

TABLA DE ANEXOS

ANEXO A P&ID ESTACIÓN DE RECIBO A.....	72
ANEXO B TRAZADO DE BANDEJAS Y DUCTOS ESTACIÓN A	73
ANEXO C ARQUITECTURA DE CONTROL HARTY FOUNDATION FIELDBUS	74
ANEXO D CAPEX	76
ANEXO F OPEX.....	77
ANEXO G DEPRECIACIÓN.....	79
ANEXO H INGRESOS	80
ANEXO I FLUJO DE CAJA	82

GLOSARIO

ACTUADOR: Dispositivo cuya tarea es generar un movimiento mecánico en otro dispositivo, con el objetivo de modificar una variable de proceso. Estos actuadores pueden ser accionados por fuerza mecánica, fuerza eléctrica o fuerza hidráulica.

AUTOMATIZACIÓN: Es el uso de sistemas hidráulicos o computarizados que tienen como objetivo controlar y supervisar procesos industriales en tiempo real.

BUS DE CAMPO: Es el nombre genérico dado a las redes de tipo industrial computarizadas, usadas para conectar la instrumentación de campo con computadores de control de proceso. Estas redes se caracterizan por ser de tipo digital, su comunicación es bidireccional y pueden conectar varios dispositivos a la vez por un solo canal de comunicación.¹

KBPD: Miles de barriles por día.

CAPEX: Capital Expenditures- Inversión en bienes de capital. Es la inversión inicial de dinero que se realiza para la ejecución de un proyecto.

COMUNICACIÓN TRADICIONAL 4-20 mA: Es la transmisión de información a un sistema de control por medio de un instrumento y consiste en convertir los cambios de la variable de proceso en corriente. Esta salida de corriente varía de 4mA a 20mA, donde 4mA es el valor mínimo de la escala de la variable de proceso y 20mA el valor máximo.

COMISIONAMIENTO: Proceso para realizar pruebas de funcionamiento y comunicaciones de la instrumentación instalada en planta, bajo condiciones de proceso simuladas.

CONEXIÓN PUNTO A PUNTO: Son arquitecturas de red de control cuyo canal de comunicaciones está dedicado a la transmisión de datos entre dos dispositivos electrónicos.

¹ García Moreno, Emilio. Automatización de procesos industriales: Fieldbus. Valencia: Servicios de publicaciones caminos de Vera. 120p.

CONEXIÓN PUNTO A MULTIPUNTO: Son arquitecturas de red de control, en donde su canal de comunicaciones está dedicado a la transmisión de datos entre un dispositivo a varios dispositivos.

COMPUTADOR DE FLUJO: Unidad de procesamiento aritmético con memoria asociada, acepta señales de entrada de medición de un líquido o gas convertidas eléctricamente. Pueden ser expansibles y ejercer funciones básicas de control.²

DCS: Distributed Control System - Sistema Distribuido de Control. Es un sistema de control de proceso, en donde sus elementos están distribuidos por subsistemas. Cada subsistema es controlado por uno o más controladores.

DETERMINÍSTICO: Son modelos matemáticos en donde perturbaciones en la variable de entrada genera siempre la misma respuesta en el tiempo, siendo el resultado independiente del azar.

DISPONIBILIDAD: El factor que indica cuánto es el tiempo operativo de un equipo en comparación con su tiempo deseable de funcionamiento. Este factor se expresa normalmente en porcentaje.

FUNDATION FIELDBUS: Es un tecnología de control abierta, no propietaria, resultante de la cooperación entre fabricantes de instrumentos de control y usuarios. Consiste en un bus de datos digital, serie y multipunto entre dispositivos de campo y/o sistemas de un entorno industrial. El entorno FIELDBUS está diseñado para satisfacer las necesidades restrictivas establecidas por la norma IEC 1158-2.³

HART (HIGHWAY ADDRESSABLE TRANSDUCER): Es un protocolo de comunicación digital para instrumentación industrial. La comunicación se hace efectiva por 2 cables físicos, donde por este mismo medio se transporta una corriente que varía de 4 a 20mA.⁴

INSTRUMENTACIÓN ELECTRONICA: La instrumentación industrial son

² Fernández Arboleda, Brenda. Análisis técnico económico de los impactos de la automatización y control en los sistemas de transporte de hidrocarburos de Colombia. Especialista en gerencia de hidrocarburos. Bogotá: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas. 24 p.

³ Creus, Antonio. Instrumentación Industrial: Foundation Fieldbus. 8 ed. Barcelona: 2011 Marcobo S.A.

⁴ Thompson, Lawrence M. Industrial Data Communication: Selected industrial Networks. 4 ed. United States of America: ISA, 2008. 126p.

dispositivos electrónicos o mecánicos que responde al cambio de una variable en un proceso, como por ejemplo aumento o disminución de la temperatura en una caldera. En respuesta a estos cambios, se produce una señal proporcional de tipo mecánica o eléctrica. Esta señal de respuesta es recibida por un indicador local o un computador que procesara esta señal para ser interpretada por el ojo humano.⁵

MODULACIÓN FSK: Frequency Shift Keying- Modulación por desplazamiento de frecuencia o FSK, Es una técnica para la transmisión digital usando una o más frecuencias diferentes. La señal portadora o moduladora varía entre dos valores como son "1" o "0".

MANTENIMIENTO PREDICTIVO: Diagnostica y repara la falla de un equipo con el lapso de tiempo suficiente para su remplazo, evitando paradas de proceso.

MANTENIMIENTO CORRECTIVO: Diagnostica y repara la error de un equipo, después de presentar la falla.

MEDICIÓN DE TRANSFERENCIA DE CUSTODIA: Es la fiscalización de producto en base a una medición.

OPEX: Operating Expenses- Gastos de operación. Se relaciona con los gastos permanentes para la operación y mantenimiento de un sistema de proceso industrial.

PLC: Programmable Logic Controller - Controlador lógico Programable.

P&ID: Diagrama de Instrumentación y Proceso.

PATÍN DE MEDICIÓN: Sistema de medición de flujo volumétrico o másico para hidrocarburos en estado liquido o gaseoso.

RIO: Remote I/O- Unidades Remotas de entrada/salida. Son equipos de control conformados por tarjetas de entrada y salida para la lectura de instrumentación y sensores de campo de forma remota.

RELÉ: Es un equipo electromecánico y funciona como interruptor.

SISTEMA DE CONTROL: Sistema conformado por PLCs o DCs y estaciones de trabajo, para la supervisión y control de la instrumentación de proceso.

SENSOR: Un sensor es un equipo con la capacidad de detectar variables físicas

⁵ Prasad, Janardan; M.N Jayaswal y Priye Vishnu. Instrumentation Process Control: Definition of Transducer. New Delhi: International Publishing House ,2010.

de un proceso y transformarlas en señales mecánicas o eléctricas que puedan ser interpretadas por un sistema computarizado.

TRANSMISOR INTELIGENTE: Instrumentación industrial con la capacidad de sensor las variables de proceso en campo y transmitir las por un lazo de corriente o por bus de campo en formato digital a un sistema de control.

TAG: Es una etiqueta asignada a los instrumentos o dispositivos de campo, para su identificación.

TRANSDUCTOR: Dispositivo que cambia un tipo de energía en otra (energía mecánica a eléctrica).

TRANSFERENCIA EN CUSTODIA: Es entregar un hidrocarburo a un tercero para su custodia a título de propiedad.

TIR: Tasa interna de retorno.

VPN: Valor presente neto.

R B/C: Relación beneficio/costo.

RESUMEN

TITULO: COMPARACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA ENTRE LOS PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN HART (4-20 mA) y FOUNDATION FIELDBUS, PARA LA INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO APLICADA A UN PROCESO DE TRANSPORTE DE CRUDO.*

AUTOR: ANDRES JULIAN AYALA CUBIDES**

PALABRAS CLAVES: HART, FOUNDATION FIELDBUS, BUS DE CAMPO.

CONTENIDO: El gobierno colombiano a nivel energético, tiene como objetivo "alcanzar una producción de hidrocarburos de 1,4 millones de barriles diarios"⁶. Para dar cumplimiento a lo anterior, el país se ha visto en la necesidad de optimizar las redes de oleoductos existentes para transportar el crudo desde las facilidades de producción a los puertos marítimos, para su posterior comercialización. Uno de los factores fundamentales para el mejoramiento de los sistemas de transporte de crudo existente, es la instrumentación y automatización de sus procesos.

Dentro de las tecnologías de mayor uso en proyectos de automatización en la industria del transporte de crudo en el país, se encuentran los buses de campo:

- Protocolo HART (4-20 mA)
- Protocolo FOUNDATION FIELDBUS.

Estas dos tecnologías tienen sus respectivas similitudes y diferencias a nivel técnico y económico. Por esta razón surge la necesidad de analizar cuál de los dos buses de campo es más económico para su adquisición e implementación, cubriendo las necesidades técnicas de un proyecto de transporte de hidrocarburos aplicable en Colombia.

Partiendo de la necesidad expresada en el párrafo anterior, en este documento se desarrollará un análisis técnico económico entre las dos tecnologías de instrumentación HART (4-20mA) y FOUNDATION FIELDBUS, aplicando los criterios de evaluación de proyectos, para seleccionar el bus de campo más adecuado para esta solución.

⁶Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014: prosperidad para todos [en línea]. [citado en 3 de Enero de 2014]. Disponible en internet: http://wsp.presidencia.gov.co/Prensa/2010/Noviembre/Paginas/20101112_10.aspx

*Proyecto de Grado

**Facultad de CIENCIAS FÍSICOQUÍMICAS Escuela INGENIERÍA DE PETROLEOS Director Jaime Amaya

SUMMARY

TITLE: COMPARACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA ENTRE LOS PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN HART (4-20 mA) y FOUNDATION FIELDBUS, PARA LA INSTRUMENTACIÓN DE CAMPO APLICADA A UN PROCESO DE TRANSPORTE DE CRUDO.*

AUTHOR: ANDRES JULIAN AYALA CUBIDES**

KEY WORDS: HART, FOUNDATION FIELDBUS, FIELD BUS.

CONTENT: The Colombian government has the objective of "Achieve an oil production of 1.4 million barrels per day". To comply with this, the country has seen the need to optimize existing networks of pipelines to transport crude oil from production facilities to seaports for subsequent commercialization. Therefore one of the key for improving transportation systems is the instrumentation and automation of its processes.

The most widely used technologies in automation projects in the oil transportation industry in the country are two:

- HART Protocol (4-20 mA)
- FOUNDATION fieldbus protocol.

These two technologies have their similarities and differences at the technical and economic level. Thus arises the need to analyze which of the two technologies is cheaper to purchase and implement, covering the technical needs of a project of oil transportation.

Based on the need expressed in the previous paragraph, this document provides a technical economic analysis will be performed between the two technologies HART instrumentation (4-20mA) and FOUNDATION FIELDBUS applied to a transport pilot plant, concluding which of the two is the most adequate to implement.

* Graduation Project

** Faculty CIENCIAS FÍSICOQUÍMICAS School INGENIERÍA DE PETROLEOS Director Jaime Amaya

INTRODUCCIÓN

Actualmente en Colombia se ha incrementado la producción de petróleo para su venta en puertos de exportación. Sin embargo la gran mayoría de los campos de producción se encuentran en lugares remotos y se tiene la necesidad de transportar los hidrocarburos desde estas facilidades a centros de recolección y acopio.

Esto crea la necesidad que los transportadores de crudo en el país mejoren y amplíen la infraestructura de los oleoductos para llevar el hidrocarburo líquido desde las facilidades de producción a los puertos marítimos de exportación. El transporte por oleoductos es importante porque:

- Permite la explotación y desarrollo de los campos petroleros.
- Reduce el transporte de crudo por camiones, reduciendo la contaminación por posibles derrames y la inseguridad en las vías.
- Es el medio más económico para transportar los hidrocarburos y sus derivados.
- Son sistemas confiables que permiten cumplir con las metas de producción y venta de crudo del país, reduciendo tiempos de transporte.

De acuerdo con lo anterior, es importante tener sistemas robustos y confiables de transporte, y uno de los aspectos para lograr estos objetivos es la inversión en proyectos enfocados a la automatización de estas plantas. Este tipo de inversiones en plantas de transporte, tienen como finalidad mejorar y optimizar sus procesos, disminuyendo tiempos de producción, reduciendo costos asociados al proceso y minimizando los riesgos ambientales y laborales.

Para la automatización de este tipo de plantas, se encuentran en el mercado

diferentes tecnologías de buses de campo para poder comunicar la instrumentación de los procesos, a un sistema centralizado de control, entre los que se destacan HART (4-20mA) y FOUNDATION FIELDBUS. Estas dos tecnologías difieren en sus aspectos técnicos y económicos de implementación.

De acuerdo con este orden de ideas, en este documento se expondrá un caso de aplicación para la implementación de las dos tecnologías en una planta piloto de transporte de crudo, con el objetivo de poder realizar una evaluación técnica y económica permitiendo seleccionar la alternativa que:

- Optimice tiempos de mantenimiento.
- Optimice tiempos de transporte de crudo.
- Reducción en costos de implementación.
- Reducción en costos de mantenimiento
- Generar la mayor rentabilidad en el proyecto.

1. CONCEPTUALIZACIÓN

Actualmente la automatización de procesos en plantas de transporte se realiza por medio de instrumentación electrónica inteligente e instrumentación análoga tradicional, con la capacidad de leer las diferentes variables de proceso para su posterior control. Entre las variables más importantes a sensor se encuentran:

- Temperatura.
- Presión.
- Nivel.
- Flujo.
- Posición de apertura o cierre de válvulas.

Esta instrumentación electrónica debe transmitir el dato de las variables leída a un sistema de control (PLC o DCS) por medio de un canal de comunicaciones bidireccional denominado bus de campo.

Los buses de campo son redes de comunicación de tipo industrial computarizadas, usadas para conectar la instrumentación de campo con computadores de control de proceso. Estas redes se caracterizan por ser de tipo digital, su comunicación es bidireccional y pueden conectar varios dispositivos a la vez por un solo canal de comunicación

Los buses de campo simplifican enormemente la instalación y operación de máquinas y equipos industriales utilizados en procesos de producción. El objetivo de un bus de campo es sustituir la tradicional conexión punto a punto entre los elementos de campo y el equipo de control y permitir la conexión punto a multipunto.

A continuación se citan las características más relevantes de un bus de campo:

- Son redes de tipo digital.

- Su comunicación es bidireccional.
- Conexión punto-multipunto.
- Su montaje es sobre un bus serie, que conectan dispositivos de campo como PLCs, transductores, actuadores y sensores.
- Cada dispositivo de campo incorpora cierta capacidad de proceso, que lo convierte en un dispositivo inteligente, manteniendo siempre un bajo costo.
- Con el bus de campo se pueden ejecutar funciones simples de diagnóstico, control o mantenimiento.⁷

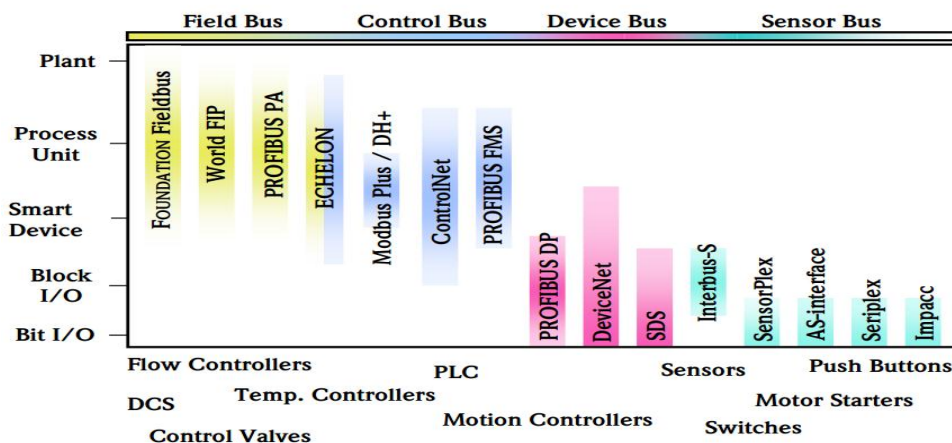
Gracias a estas características listadas, los buses de campo digitales han permitido un gran avance en la automatización de los procesos en planta de transporte de hidrocarburos. Al ser de tipo digital, permiten ser interpretados por computadores de proceso capaces de realizar funciones de control complejas. Además el bus de campo realiza diagnósticos de mantenimiento, permitiendo menores paradas de proceso y garantizando una mayor disponibilidad de servicio de la planta.

Adicionalmente los buses de campos permiten conexión punto multipunto, generando escalabilidad en el sistema de control, con la ventaja de poder crecer su infraestructura a nivel de instrumentación sin afectar la operación.

Para la implementación de estos buses de campo, diferentes fabricantes de instrumentación y sistemas de control, han desarrollado a través de la historia diferentes tipos de tecnología para ser implementadas en la industria. En la Figura 1 se puede observar un esquema de clasificación de los diferentes buses de campo aplicados en la industria en general.

⁷Kaschel, Héctor. Análisis del estado del arte de los buses de campo aplicados al control de procesos industriales. En línea]. [consultado el 09-01-2014]. Disponible en [http://www.ingeborda.com/biblioteca/Biblioteca% 20Internet / Articulos% 20 Tecnicos%20de%20Consulta/Instalaciones%20Electricas%20Industriales/Buses%20Industriales.pdf](http://www.ingeborda.com/biblioteca/Biblioteca%20Internet%20Articulos%20Tecnicos%20de%20Consulta/Instalaciones%20Electricas%20Industriales/Buses%20Industriales.pdf)>

Figura 1 Clasificación general de buses de comunicación



Fuente: Ichtertz Francois, Analog to Fieldbus Digital Communication Foundation Fieldbus-Basic-Training. . Endress+Hauser. p.16.

De acuerdo con la Figura 1, hay buses para diferentes aplicaciones, de acuerdo a su instrumentación asociada. Por ejemplo los buses de campo son especializados en instrumentación de campo inteligente como transmisores de presión, transmisores de temperatura y transmisores de nivel. Los buses de control, como su nombre lo indica, son utilizados generalmente para comunicar dispositivos de control, como PLC's con sistemas supervisorios o RIO's de campo con PLC's. Los buses de sensores, son especializados en comunicar dispositivos discretos y simples.

1.1 Buses de alta velocidad y baja funcionalidad

Están diseñados para integrar dispositivos simples como finales de carrera, fotocélulas, relés y actuadores simples, funcionando en aplicaciones de tiempo real, y agrupados en una pequeña zona de la planta. Dentro de este grupo se encuentran:⁸

1.1.1 CAN

Es un protocolo que fue creado en primera instancia para la automatización de vehículos. Este protocolo evoluciono a CAN-Open, el cual se utiliza para el

⁸ Ibid., p.

control de máquinas, dispositivos médicos, vehículos ferroviarios, electrónica marítima, automatización de edificios, y generación de energía.⁹

1.1.2 ASI

El protocolo sensor actuador (AS-i) es ampliamente conocida como la opción más simple y de menor costo para los actuadores y sensores en la industria de redes.

- Opera en el nivel más bajo en la jerarquía de buses de campo.
- AS-i está diseñado principalmente para sensores binarios (on-off) y actuadores, aunque también se incorporan elementos analógicos.
- AS-i es una solución abierta.
- Definido en 1990 por los estándares IEC62026 y EN50295.¹⁰

1.2 Buses de alta velocidad y funcionalidad media

Se basan en el diseño de una capa de enlace para el envío eficiente de bloques de datos de tamaño medio. Estos mensajes permiten que el dispositivo tenga mayor funcionalidad de modo que permite incluir aspectos como la configuración, calibración o programación del dispositivo. Son buses capaces de controlar dispositivos de campo complejos, de forma eficiente y a bajo costo¹¹.

1.2.1 DeviceNet

Es un bus de campo simple y abierto que reduce costos y tiempo para cablear e instalar la automatización de equipos industriales. Al ser un protocolo abierto, permite la integración de equipos de diferentes fabricantes. Este bus de campo desarrollado por Allen Bradley, está basado y desarrollado sobre el protocolo CAN¹².

⁹ Can open [en línea]. [Consultado 10-02-2014]. Disponible en < <http://www.can-cia.org/index.php?id=canopen>>

¹⁰ Verwer Andy, Analog Overview of AS-Interface Technology. En: (Octubre , 2003, Manchester). Automation Systems Centre, Manchester Metropolitan University. p.6-8.

¹¹ Kachel. Op. cit., p.

¹² Divecenet Network Overview [en línea]. [consultado 31-01-2014]. Disponible en < <http://www.ab.com/en/epub/catalogs/12762/2181376/214372/1768364/3404052/print.html>>

1.2.2 InterBus-S:

INTERBUS se ha desarrollado como un bus sensor/actuador para la transmisión de datos de proceso con el objetivo de aumentar la productividad de las máquinas y equipos, al mismo tiempo reducir los costos. Es una tecnología que está normalizado según IEC 61158 e IEC 61784. INTERBUS ofrece una comunicación rápida y de fácil manejo, con capacidades de diagnóstico integral y alta inmunidad a la interferencia a través de la utilización de la tecnología de fibra óptica. Estas propiedades han llevado a 17 millones de dispositivos instalados a la gran aceptación del sistema de bus de campo.¹³

1.3 Buses de alta velocidad y funcionalidad

1.3.1 PROFIBUS

Es uno de los buses de campo más populares con 43.8 millones de equipos instalados a finales de 2012 y con 7.5 millones de estos en la industria de procesos. Utiliza una comunicación simple, independiente y estandarizada.¹⁴

1.3.2 FOUNDATION FIELDBUS

Es una red de comunicación digital de tiempo real, diseñada específicamente para el control de aplicaciones de proceso. Esta nueva tecnología reemplaza 4-20 mA análogo y señales ON/OFF, para conectar instrumentación como transmisores, analizadores, posicionadores de válvulas de control y válvulas ON/OFF a un DCS o PLC.¹⁵

Es una tecnología que ha tomado bastante fuerza en la industria de procesos en los últimos años de acuerdo con las siguientes estadísticas:

- 9 de las 10 compañías líderes del mundo en hidrocarburos utilizan FIELDBUS.
- 24 de las 25 farmacéuticas más importantes del mundo utilizan FIELDBUS.

¹³ INTERBUS. [en línea]. [Consultado 23-12-2013]. Disponible en <<http://www.profibus.com/technology/interbus/>>

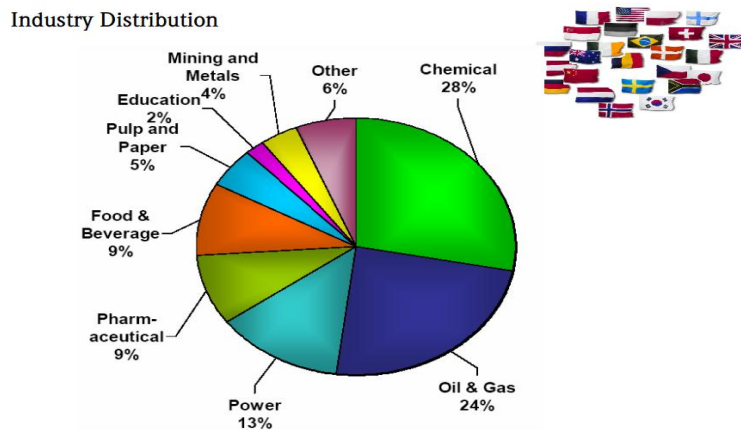
¹⁴ PROFILBUS [en línea]. [consultado 10-01-2014]. Disponible en <<http://www.profibus.com/technology/profibus/overview/>>

¹⁵ FOUNDATION™Fieldbus:The Power of Digital for your Process Devices. [en línea]. [consultado 12-01-2014].Disponible en <www.fieldbus.org/images/stories/technology/aboutthetechology/overview/fieldbus_brochure.pdf>

- 23 de 25 compañías químicas del mundo utilizan FIELDBUS.
- 15 de las 20 compañías procesadoras de pulpa de papel utilizan FIELDBUS.
- 10 de las 20 compañías de alimentos del mundo utilizan FIELDBUS.¹⁶

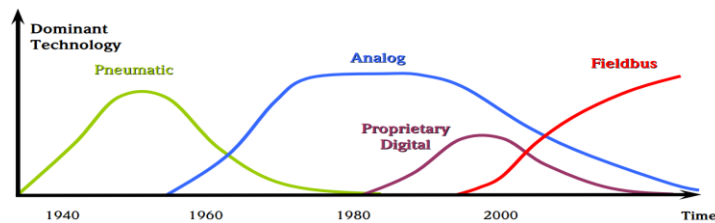
Las estadísticas de cubrimiento de FIELDBUS en la industria a nivel mundial, también se pueden observar en la Figura 2 y Figura 3.

Figura 2 Estadísticas de uso de FOUNDATION FIELDBUS en la industria



Fuente: Ichtertz Francois, Foundation Fieldbus Market Foundation Fieldbus-Basic-Training. . Endress+Hauser. p.5.

Figura 3 Tendencia de dominación de la tecnología FIELDBUS en el tiempo



Fuente: Ichtertz Francois, Analog to Fieldbus Digital Communication Foundation Fieldbus-Basic-Training. . Endress+Hauser. p.2.

En la Figura 2 es posible observar la base instalada a nivel mundial de FOUNDATION FIELDBUS, la cual tiene un porcentaje de 24% en la industria de petróleo y gas, comparado con otro tipo de industria. Adicionalmente después del año 2000, FOUNDATION comenzó un importante crecimiento, alcanzando la

¹⁶ Ichtertz Francois, Analog to Fieldbus Digital Communication Foundation Fieldbus-Basic-Training. . Endress+Hauser. p.7

categoría de tecnología dominante en la industria, por encima de la tradicional instrumentación análoga (4-20mA) (Ver Figura 3). Las razones de su crecimiento serán expuestas en capítulos posteriores de este documento.

1.3.2.1 Componentes que conforman el bus de campo FOUNDATION FIELDBUS:

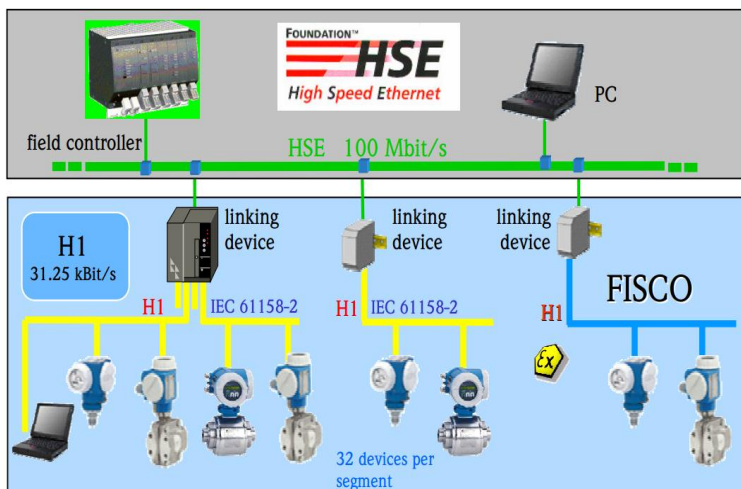
Fundación H1: Componente de FOUNDATION FIELDBUS que tiene como función principal:

- Control de proceso.
- Interfaz a nivel de campo.
- Integración de instrumentos y dispositivos.

Este componente de FIELBUS funciona a una velocidad de 31,25 kbit /s para transmitir la información a los dispositivos, transmisores y actuadores interconectados al bus de campo. H1 está diseñado para funcionar por un segmento de cable físico par trenzado, por el cual se transporta datos y alimentación. En la Figura 4 se observa un esquemático de la conexión típica de los instrumentos al bus de campo.¹⁷

¹⁷SHOSHANI, Gil; MITSCHKE, Stephen y STEPHAN, Stan. En: Industrial fieldbus technology and fieldbus cable overview – cable standards and electrical qualifications. En: IEEE Xplore. [Base de datos en línea]. [consultado 15-02-2014]. Disponible en: <
http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5666839&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5666839>

Figura 4 Esquemático típico arquitectura de comunicación FOUNDATION FIELDBUS



Fuente: Ichtertz Francois, Physical Layer Properties Fieldbus-Basic-Training. Endress+Hauser. p.3.

Las ventajas de conectar dispositivos inteligentes al segmento H1 son:

- Reduce el número de cables y gabinetes de campo.
- Reduce el número de tarjetas de entrada y salida análogas.
- Reduce el número de fuentes de poder.
- Reduce el tamaño de los cuartos de control.
- Se puede realizar la configuración remota de dispositivos.
- Tiene más información disponible de mantenimiento.¹⁸

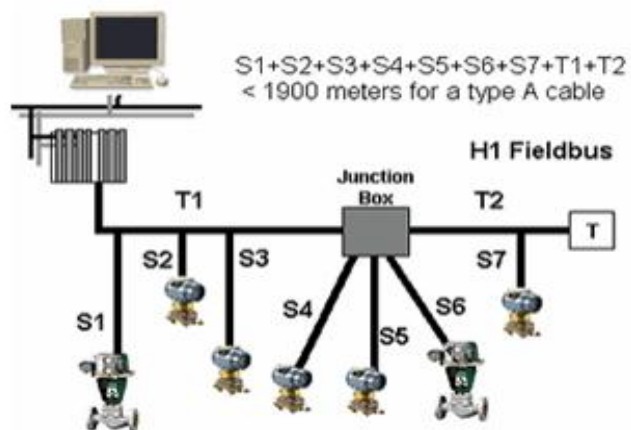
Los dispositivos conectados a un segmento H1 tienen embebidos bloques de funciones, los cuales publican las variables de proceso leídas, transmiten alarmas y tendencias. Los dispositivos pueden actuar como maestros de tiempo, permitiendo una mejor velocidad en la transmisión de datos en el bus. Adicionalmente H1 permite a los equipos de campo y otros dispositivos ejecutar funciones propias de control, reduciendo la carga de trabajo en DCS's y PLC's. Al ser H1 de tipo digital, se eliminan la necesidad de convertir los datos a señales análogas¹⁹.

¹⁸FOUNDATION H1. [En línea]. [Consultado ene. 2014]. Disponible en http://www.fieldbus.org/index.php?option=com_content&task=view&id=137&Itemid=313

¹⁹SHOSHANI, Gil; MITSCHKE, Stephen y STEPHAN, Stan. Industrial fieldbus technology and fieldbus cable overview – cable standards and electrical qualifications. En: IEEE Xplore. [Base de datos en línea]. [consultado 15-02-2014]. Disponible en: <

La distancia máxima permitida para la conexión del bus de campo, se determina sumando la longitud de todas las secciones del segmento. La longitud total del segmento debe estar dentro del valor máximo permitido de 1900 m. En la Figura 5 se proporciona un ejemplo para determinar la distancia máxima permitida.²⁰

Figura 5 Ejemplo para determinar longitud máxima de un segmento FOUNDATION FIELDBUS



Fuente: EMERSON PROCESS MANAGEMENT. [En línea].[Consultado 10-01-2014]. Disponible en http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Central%20Web%20Documents/EngSch-Fieldbus_301_es.pdf

La cantidad máxima de dispositivos que pueden ser conectados a un segmento H1 se pueden observar en la Tabla 1.

http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5666839&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5666839

²⁰ EMERSON PROCESS MANAGEMENT. [En línea].[Consultado 10-01-2014]. Disponible en http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Central%20Web%20Documents/EngSch-Fieldbus_301_es.pdf

Tabla 1 Límites claves del segmento H1 FOUNDATION FIELDBUS

Límites clave del segmento	Valores típicos
Máximo 32 dispositivos por segmento sin un repetidor	4 a 16 dispositivos por segmento
Máximo 240 dispositivos por segmento con un repetidor	
Cada dispositivo debe tomar cuando menos 8 mA del segmento	Consumo de corriente de 15 a 25 mA para un dispositivo de dos hilos 8.5 mA para un dispositivo de 4 hilos 400 mA, límite típico de segmento
Rango de voltaje 9-32 Vcd	24 Vcd

Fuente: EMERSON PROCESS MANAGEMENT. Op.

1.3.3 HART (4-20 mA)

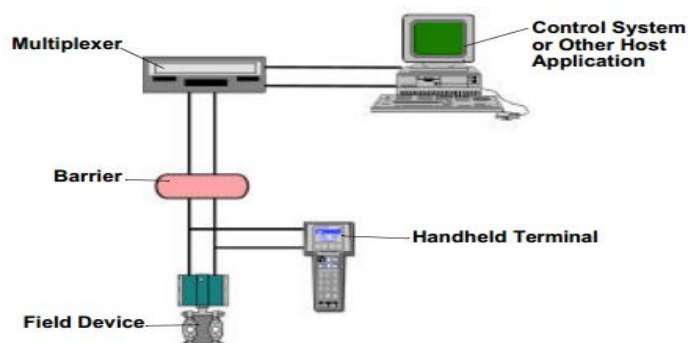
Es un bus de campo basado en comunicación digital y bidireccional, que proporciona acceso a datos entre los equipos de campo inteligentes y sistemas de control (PLCS o DCS). Al ser la mayoría de las redes de automatización basadas en el cableado tradicional analógica de 4 -20mA, la tecnología HART tiene un papel fundamental, ya que la información digital se transmite simultáneamente con la señal análoga.

HART es un protocolo maestro/esclavo, es decir el instrumento de campo es esclavo, y contesta solamente cuando un maestro, en este caso un PLC que interprete protocolo HART le solicite información. La configuración de conexión más común de un instrumento con protocolo HART a un sistema de control o computador, es como se muestra en la

Figura 6.²¹

²¹ What is HART? [Consultado 15. Ene. 2014]. Disponible en: http://www.hartcomm.org/protocol/about/aboutprotocol_what.html

Figura 6 Arquitectura típica HART (4-20 mA)



Fuente: HART field communications protocol. [En línea] [Consultado 15. Ene. 2014]. Disponible en <www.pacontrol.com/download/Hart-Application-Guide.pdf>

Como se puede observar en la

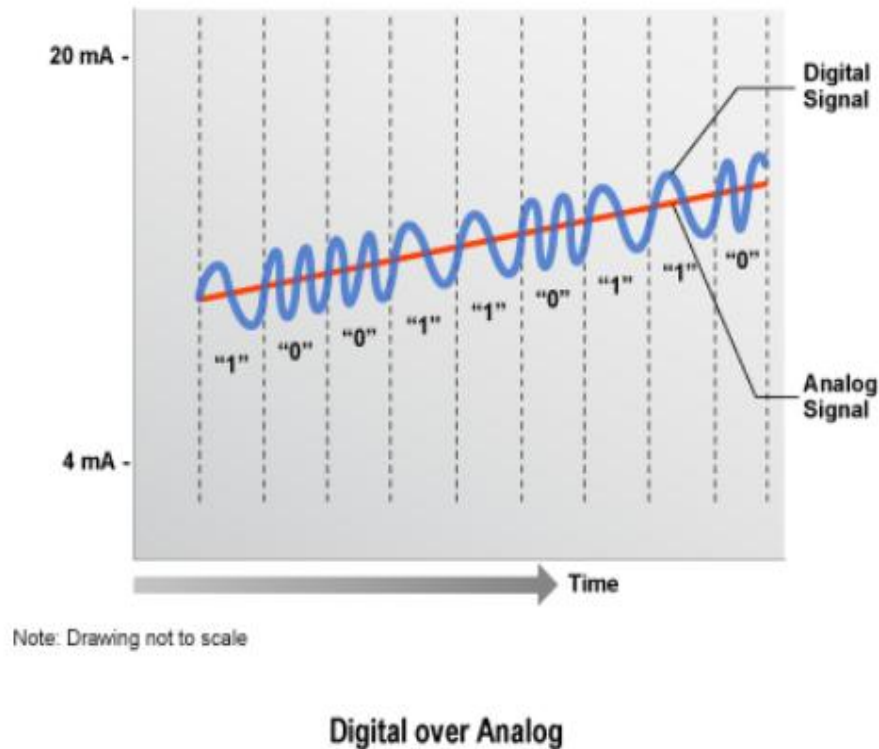
Figura 6, la conexión típica de los instrumentos HART (4-20mA) es de punto a punto. Significa que por el mismo cable se recomienda instalar un solo instrumento a un solo canal de entrada o de salida del computador de proceso, puesto que las variables de proceso de los instrumentos son proporcionadas por el lazo de corriente 4-20mA y al mismo tiempo el protocolo HART administra los parámetros del proceso, la configuración de dispositivos, la calibración y la información de diagnóstico, todo por el mismo medio físico. La principal diferencia entre el protocolo HART y las otras tecnologías de comunicación digitales abiertas es su compatibilidad con los sistemas existentes.²²

HART utiliza la transmisión FSK para superponer la señal digital a un bajo nivel, sobre la señal 4-20 mA. El protocolo se transmite a una tasa de 1200 bps sin interrumpir la señal 4-20 mA y permite a una aplicación maestra (computador) adquirir dos o más actualizaciones por segundo. Como la transmisión por FSK es continua, no interfiere con la señal analógica. En la Figura 7 se puede observar

²² Gouchen, An; Zhiyong, Meng; et al. Design of Intelligent Transmitter based on HART Protocol. En: IEEE Xplore. [Base de datos en línea]. [consultado 15-01-2014]. Disponible en: <<http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.uniandes.edu.co:8080/xpls/icp.jsp?arnumber=5522916>>

cómo se transporta la señal HART a través de la señal analógica 4-20 mA.²³

Figura 7 Transmisión de señal HART sobre 4-20 mA



Fuente: Gouchen, An; Zhiyong, Meng; et al. Design of Intelligent Transmitter based on HART Protocol. En: IEEE Xplore. [Base de datos en línea]. [Consultado 15-01-2014]. Disponible en: <<http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.uniandes.edu.co:8080/xpls/icp.jsp?arnumber=5522916>>

Los instrumentos basados en HART pueden ser instalados y comisionados en una fracción menor de tiempo al requerido por la instrumentación tradicional. Lo mantenedores u operadores quienes usan instrumentación HART pueden fácilmente identificar un equipo por su TAG y verificar si los parámetros de configuración de instrumento son correctos. La verificación de los lazos de control

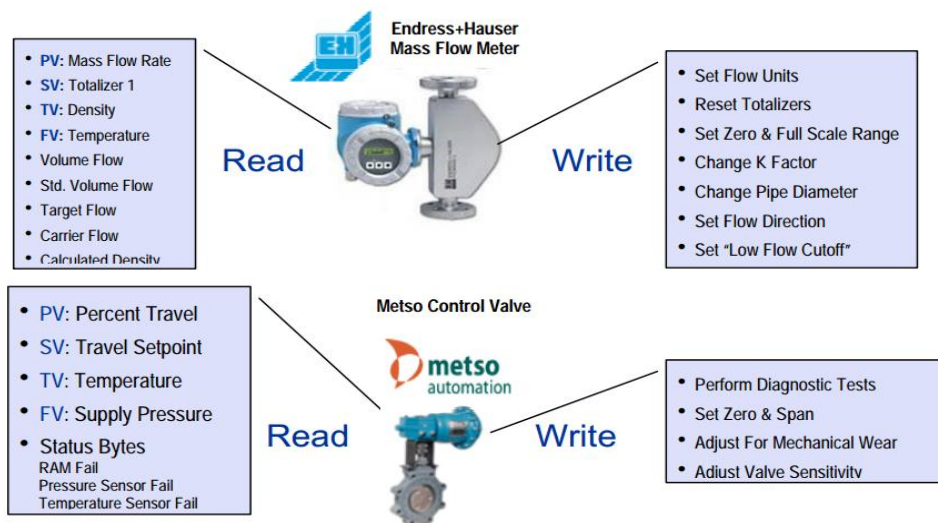
²³ Helson, Ronald .HART Communication: A solution Enabling Technology. [En línea][Consultado 23. Ene. 2014].Disponible en <http://een.iust.ac.ir/profs/Shahri/Computer%20Buses_84/harttech.pdf >

de corriente puede ser ejecutado rápidamente, ordenando al instrumento por medio de HART colocar su salida de corriente a un valor predeterminado.²⁴

El protocolo HART no solo soporta la comunicación punto a punto, si no comunicación multipunto en un solo cable de par trenzado. Esta configuración puede ahorrar cableado en aplicaciones especiales como monitoreo de tanques. Sin embargo este tipo de configuración no es recomendable, porque HART no es un protocolo de control, si no para diagnóstico y mantenimiento.

Alguno de los datos que se pueden extraer utilizando el protocolo HART, se pueden observar en la Figura 8.²⁵

Figura 8 Instrumentación inteligente, datos entregados por el protocolo HART



Fuente: HART field communications protocol. [En línea][consultado 15. Ene. 2014]. Disponible en <<http://www.spectrumcontrols.com/pdfs/abio/HartNetworkWhitePaper.pdf>>

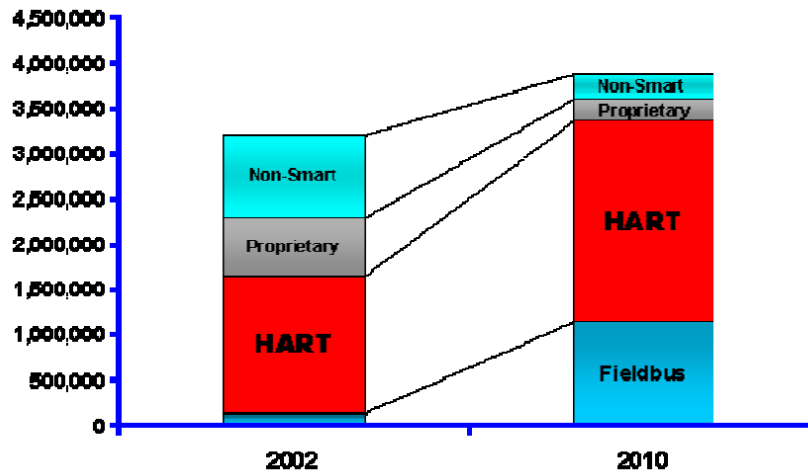
Hoy en día más de 14 millones de dispositivos HART son instalados alrededor del mundo y 70% de los instrumentos inteligentes instalados cada año, usan la tecnología HART. En la Figura 9 se puede observar estadísticas del crecimiento de HART desde el año 2002 al año 2010.²⁶

²⁴ HART field communications protocol. [En línea][consultado 15. Ene. 2014]. Disponible en <www.pacontrol.com/download/Hart-Application-Guide.pdf>

²⁵ Ibid, p.

²⁶ Helson, Ron. HART Communication: Driving New Product Developments. [En línea][consultado 23. Ene. 2014]. Disponible en <<http://www.hcf->

Figura 9 Estadísticas de crecimiento protocolo HART



Fuente: Helson, Ron. HART Communication: Driving New Product Developments. [En línea] [consultado 23. Ene. 2014]. Disponible en <http://www.hcf-files.com/webasyst/published/DD/html/scripts/getfolderfile_zoho.php?DL_ID=MTEwMQ%3D%3D&ID=30eb4279d57b9a8a0568322db6bfefff&DB_KEY=V0VCRkIMRVM%3D>

De acuerdo con la Figura 9, el crecimiento de HART entre el año 2002 y 2010 es bastante significativo. Ha pasado de 1, 500,000 de dispositivos instalados en el 2002 a 3,500,000 de dispositivos en el 2010, lo cual se traduce en un aumento del 44% aproximadamente en solo 8 años, resaltando el hecho de la gran aceptación de esta tecnología en la industria y con un crecimiento superior a FILEDBUS.

2. CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA UN BUS DE CAMPO, APLICADO A LAS PLANTAS DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS

Debido a la necesidad del país para evacuar los volúmenes de crudo a los puertos de exportación de forma segura y sin contaminar el medio ambiente, se ha tornado crítico la disponibilidad de los equipos de las plantas de transporte. Una baja disponibilidad resulta en paros de proceso no programados, retrasando la entrega de los barriles de crudo en puertos de exportación, generando pérdidas de dinero para el negocio del transporte de hidrocarburos.

Para garantizar una buena disponibilidad de servicio y seguridad en la operación de este tipo de plantas, uno de los componentes importantes a tomar en cuenta es la automatización industrial de sus instalaciones, lo cual permite un control electrónico y centralizado de los procesos, ayudando a anticipar problemas de mantenimiento, visualizar alarmas, generar históricos de las variables de proceso, evitando paros de planta no programados y derrames con consecuencias ambientales. En este orden de ideas, las características que enfoquen este tipo de proyectos deben cumplir con:

- Mejores costos adquisición e implementación.
- Alto desempeño.
- Monitorear la integridad del sistema.
- Asegurar en todo momento las condiciones de seguridad operacional de los sistemas en forma que no se excedan los parámetros y restricciones de la infraestructura.
- Alertar sobre posibles fallas, asegurar la calidad de medición del hidrocarburo transportado.
- Coordinar las acciones operativas bajo condiciones de contingencia.

De acuerdo con el capítulo 1 de este documento, dentro de las tecnologías más utilizadas y populares en la industria, se encuentran FOUNDATION FIELDBUS y HART (4-20 mA) y basados en los requerimientos anteriores, a continuación se citan los criterios de selección para escoger el tipo de bus de campo a implementar:

- Madurez de la tecnología.
- Robustez Comunicaciones.
- Desempeño del sistema
- Capacidad Multivariable y control.
- Impacto en el CAPEX y OPEX para implementación del proyecto.

2.1 Madurez y aceptación de la tecnología en el mercado

La instrumentación electrónica de campo analógica (4-20 mA), es una tecnología bien desarrollada, ampliamente utilizada en la industria petrolera por más de 40 años. La adición de la tecnología digital HART a este protocolo existente ha sido igualmente aceptada y madurada en la industria por los últimos 25 años. En la Figura 9 se puede observar el crecimiento en su base instalada de 2002 a 2010, donde se aumento 1,500000 dispositivos a 3,500 000 dispositivos, aproximadamente un incremento del 44%.

De otra parte FOUNDATION FIELDBUS es una tecnología relativamente nueva, alcanzado un alto grado de aceptación dentro de la industria petrolera. FIELDBUS es una iniciativa que comenzó en la década de 1990 y está siendo impulsado por más de los 130 principales proveedores de automatización e instrumentación del mundo. Actualmente FIELDBUS tiene una pequeña base instalada en todas las industrias en comparación con los sistemas HART (4-20mA), sin embargo se espera un aumento de FOUNDATION FIELDBUS en la próxima década.²⁷

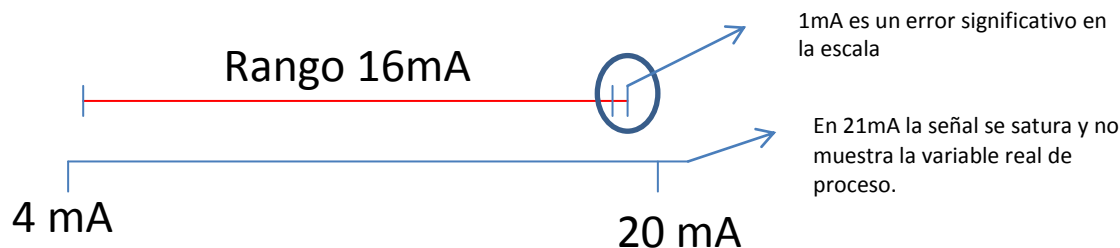
²⁷ Electronic Signal Protocol Selection Study Report. WorleyParsons Services Pty Ltd. [En línea]. [Consultado 14-01-2014]. Disponible en <<https://ems.worleyparsons.com/emi3.aspx>>

2.2 Robustez en la comunicación

La robustez en la comunicación, está definida como la habilidad para que la señal de comunicación sea enviada y recibidas de manera oportuna, llegando la información a tiempo y con la menor cantidad de errores²⁸.

El protocolo HART está protegido por la robustez de la señal análoga 4-20 mA. Como el rango total de la señal son 16 mA, 1 mA puede representa un error significativo (Ver Figura 10). Adicionalmente una falla en la escala de los dispositivos es generalmente indetectable y si la variable de proceso va por arriba o por debajo del rango ajustado, la señal análoga se satura, impidiendo que el operador pueda observar el verdadero valor de proceso.²⁹

Figura 10 Rango de la señal 4-20mA



Fuente: El autor

Para garantizar una buena robustez en la señal, se debe tener especial cuidado en la instalación, aterrizaje y tendido del cableado para la transmisión de la comunicación. Además es importante garantizar la robustez del protocolo, utilizando la señal 4-20 mA para control y la señal HART para la detección de errores y ajuste de la instrumentación.³⁰

FOUNDATION FIELDBUS utiliza una señal digital diferencial igual a la corriente consumida por el dispositivo, por lo general 15 mA de pico a pico, a una frecuencia de 31,25 kbps. Debido a su alta velocidad, se tienen un buen desempeño en la

²⁸ An End User Functional Comparison of HART® and FOUNDATION™ Fieldbus Protocols [en línea]. [citado en 3 de Enero de 2014]. Disponible en internet: < <http://www.emersonprocessxperts.com/papers/FFHARTFunctionalComparison.pdf>>. p.5.

²⁹ Ibid., p.5.

³⁰ Ibid., p.6.

actualización de datos para una buena control de procesos. Por ser un protocolo determinístico, esto quiere decir que si un mensaje es enviado por un dispositivo y no es recibido adecuadamente por el sistema de control, FOUNDATION FIELDBUS tiene la función de reintento de mensajes durante el mismo ciclo de comunicaciones del mensaje original. Este reintento de mensajes, ayudan a los usuarios a evaluar si un segmento FOUNDATION FIELDBUS está teniendo dificultades en la comunicación, y puede con frecuencia aislar los problemas a un nodo específico del sistema.³¹

En general, la robustez de las comunicaciones FOUNDATION FIELDBUS es "excelente". Es importante recordar las buenas prácticas de cableado y aterrizaje de la instrumentación, para lograr el buen desempeño de este protocolo.³²

³¹ *Ibid.*, p.6.

³² *Ibid.*, p.6.

2.3 Despeño del sistema

Tabla 2 Desempeño comparativo HART vs FOUNDATION FIELDBUS

	HART (4-20 mA)	FIELDBUS
DESEMPEÑO DEL SISTEMA	<ul style="list-style-type: none"> * HART una señal digital de baja velocidad (1200 bps), y por esta razón no es adecuada para control de procesos. Por lo tanto es necesario asignar esta tarea a la señal análoga 4-20 mA. * El cableado punto a punto de este protocolo garantiza una buena integridad del sistema. * No es recomendable tener configuración de bus para este protocolo, debido al bajo desempeño de HART como señal de control. * La información adicional de diagnóstico, comparada con FIELDBUS, es bastante limitada. * Es adecuada para aplicación de seguridad de proceso. 	<ul style="list-style-type: none"> * Señal de alta velocidad y desempeño. * Su configuración permite una arquitectura escalable. * Es posible que no todos los instrumentos de la planta sean compatibles con FIELDBUS, por lo tanto es necesario combinar instrumentación tradicional, con instrumentación de bus de campo. * No se puede implementar para sistemas de seguridad de la planta, debido a que la tecnología no cubre este tipo de dispositivos. * Se tiene mayor capacidad de diagnóstico de fallas en el instrumento comparado con HART. * No es necesario escalizar la señal de corriente a unidades de ingeniería, esto permite que el sistema pueda realiza otras tareas como control avanzado en campo, mejorar la interfaz hombre-máquina y centralización de datos.

Fuente: Electronic Signal Protocol Selection Study Report. WorleyParsons Services Pty Ltd. [En línea]. [Consultado 14-01-2014]. Disponible en <<https://ems.worleyparsons.com/emi3.aspx>>

De acuerdo con la Tabla 2, HART no es un protocolo de comunicación adecuado para control debido a su baja velocidad de respuesta, es necesario que este acompañado de la señal 4-20mA para esta tarea. Por tal motivo, HART debe estar dedicado al diagnóstico de mantenimiento y ajuste de los instrumentos.

Además su configuración solo puede ser punto a punto, esto se traduce en mayor

cantidad de cableado, bandejas, ductos e infraestructura en el hardware del sistema de control, en comparación con FOUNDATION.

De otra parte, FOUNDATION FIELDBUS tiene la capacidad de realizar control y diagnóstico de mantenimiento avanzado por el mismo protocolo de comunicaciones, gracias a su buena velocidad de desempeño. Al ser comunicación de tipo digital no requiere que la señal sea escalizada a unidades de ingeniería como HART (4-20mA), permitiendo enfocar su procesamiento en otras actividades como control avanzado en campo, mejora en HMI de proceso y centralización de datos.

De otra parte, plantas con tecnología HART que requieran implementar sistemas de seguridad, solo deben realizar una ampliación con equipos similares, sin afectar de manera significativa la infraestructura existente de la planta.

2.4 Capacidad Multivariable y Control

La tecnología HART (4-20 mA) tiene la capacidad de leer múltiples variables, sin embargo está disponible sólo en modo digital y esta característica no es bien aceptada por la industria, debido a la limitación de HART con respecto a su velocidad de transmisión para control. La señal análoga 4-20 mA es la encargada de realizar las tareas de control. Esto limita la eficiencia de este protocolo para el manejo de múltiples variables.

FOUNDATION FIELDBUS tiene la capacidad funcional de leer e interpretar múltiples variables como temperatura, presión y flujo desde un mismo instrumento permitiendo un gran ahorro en cableado, bandejas, tubería e instrumentación. Debido a su alta velocidad de transmisión digital es ideal para el control multivariable de alta precisión.³³

2.5 Impacto en el CAPEX y OPEX del proyecto

En el momento de implementar un proyecto de automatización, es necesario tener

³³ *Ibid.*, p.7-8.

en cuenta dos conceptos muy importantes para su evaluación de viabilidad económica y son el CAPEX y OPEX. El CAPEX es la inversión inicial de dinero para comenzar el desarrollo de un proyecto. Aplicado a las plantas de transporte de crudo, es la inversión necesaria para la compra y puesta en marcha de equipos como instrumentación, bombas, motores eléctricos, trampas de despacho, sistemas de medición e ingeniería necesaria para el desarrollo del proyecto.

OPEX son los costos operativos una vez el proyecto entra en funcionamiento. Dentro de estos gastos se encuentra el mantenimiento de equipos, repuestos, sueldos de técnicos de la planta, capacitaciones. En el capítulo 4 del documento se amplía el concepto de CAPEX y OPEX para el proyecto piloto de transporte.

En la Tabla 3 se puede observar una comparación de OPEX y CAPEX para la selección técnica entre las tecnologías HART y FOUNDATIO FIELDBUS.

Tabla 3 Comparación HART y Foundation con respecto a OPEX y CAPEX

	HART (4-20 mA)	FOUNDATION FIELDBUS
IMPACTO EN OPEX	<p>*Información adicional de mantenimiento por medio de la señal digital, facilitando el mantenimiento correctivo, sin embargo presenta deficiencia en el mantenimiento predictivo en comparación con FOUNDATION FIELDBUS.</p> <p>*Instrumentos fáciles de ajustar, permitiendo reducir el tiempo de mantenimiento.</p> <p>*Mejora de la resolución de problemas a través de la información de diagnóstico adicional.</p>	<p>*Mejora el diagnóstico desde los instrumentos de campo, permitiendo una mejor utilización del mantenimiento predictivo.</p> <p>*Ahorros en el aumento de la disponibilidad y la visibilidad de los diagnósticos de instrumentos, lo que reduce los paros y cortes de producción. Esto se traduce en una mayor utilización de los activos.</p> <p>*Los instrumentos FOUNDATION no son adecuados para sistema de seguridad, por lo tanto si se requiere implementar sistemas de seguridad y proceso, es necesario combinar HART y FOUNDATION, lo que aumentan el número de repuestos. En caso contrario, HART puede ser utilizado para ambos sistemas.</p>

	HART (4-20 mA)	FOUNDATION FIELDBUS
IMPACTO EN CAPEX	<ul style="list-style-type: none"> *Costos de gama media para los instrumentos. *Costos adicionales asociados a hardware para lectura del protocolo HART. *No es necesario un amplio programa de capacitaciones. 	<ul style="list-style-type: none"> *Costos altos de los instrumentos, pero reducción en gabinetes de campo y cableado. *Dispositivos de campo multivariables, resultando en una reducción potencial en las cantidades de instrumentos, reducción en cableado, transmisiones en circuito, calibración y puesta en marcha. *Se tiene el riesgo relacionado con esta nueva tecnología debido a la falta de experiencia de los usuarios y los diseñadores. *Reducción en tiempo de comisión.

Fuente: Electronic Signal Protocol Selection Study Report. WorleyParsons Services Pty Ltd. [En línea]. [Consultado 14-01-2014]. Disponible en <<https://ems.worleyparsons.com/emi3.aspx>>

De acuerdo con la Tabla 3, se puede concluir que FOUNDATION FIELDBUS tiene una mayor ventaja a nivel de mantenimiento comparado con HART. FOUNDATION permite realizar un amplio mantenimiento predictivo reduciendo tiempo de reparación y la reducción de tiempo se traduce en disminución de costos. Esto se refleja en la disminución del OPEX de FOUNDATION con respecto a HART.

Otra ventaja evidente de FOUNDATION, es su comunicación punto a multipunto, lo cual permite un ajuste de instrumentos desde un punto centralizado, reduciendo el tiempo de comisionamiento comparado con HART.

Con respecto al CAPEX, el valor de adquisición de la instrumentación FOUNDATION FIELDBUS es más elevado en comparación con HART, influyendo en un aumento en el costo de suministros para el proyecto. De otra parte FOUNDATION FIELDBUS permite un ahorro en cableado, reduciendo costos de implementación en relación con HART.

3. EXPLICAR UN CASO DE APLICACIÓN DE DOS TECNOLOGÍAS DE BUSES DE CAMPO (HART Y FOUNDATION FIELDBUS), EN UNA PLANTA PILOTO DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS

El caso de aplicación es la instrumentación y automatización con tecnología HART (4-20mA) y una segunda alternativa con FOUNDATION FIELDBUS, para una planta de recibo de crudo (Estación A), ubicada en el departamento de Casanare a 24 km de la ciudad de Yopal, en la cual se recibe un flujo promedio de 53 KBPD desde una segunda planta de despacho (Estación B) ubicada a 20 minutos de la ciudad de Monterrey, en el Departamento del Casanare. El ducto que une las dos estaciones tiene una longitud de 100 km y un tamaño de 12".

En la Figura 18 se puede consultar el P&ID de la estación de recibo de crudo A, donde se observa la instrumentación necesaria para el proceso.

De acuerdo con el P&ID, la planta A estará comprendida por los siguientes subsistemas:

- Una trampa de recibo de crudo.
- Un sistema de filtración redundante.
- Un sistema de control de presión redundante.
- Un sistema de dos brazos de medición.
- Un manifold de recibo.
- 4 tanques de almacenamiento de 50 KBc/u.

Se justifica la necesidad de un sistema de control de presión por la alta presión estática generada en la trampa de despacho debido a la topografía del oleoducto (700 psig). De no implementarse una válvula de control de presión no se podrá usar el patín de medición propuesto en el diseño, cuya máxima presión admisible de operación no debe superar los 270 psig, y en caso de tenerse presiones mayores a las permitidas, se generarían velocidades de flujo excesivas y los

tanques de almacenamiento llegarían a sufrir daños estructurales. La caída de presión requerida en la válvula esta alrededor de los 300 psig.

Para garantizar el funcionamiento de la válvula ante una eventualidad, se requiere de un tanque pulmón que le brinde autonomía a la válvula por un lapso de tiempo no menor a 30 minutos.

Para proteger el sistema de control de presión de abrasión por partículas sólidas se requiere el sistema de filtración de recibo. Para ello se consideran dos filtros, en configuración principal y respaldo. Estos filtros deben estar permanentemente monitoreados por para evitar una obstrucción suficiente como para vencer la resistencia del recipiente.

Luego de que el crudo recibido por la trampa de recibo sea filtrado y despresurizado, debe ser enviado hacia el patín de medición de recibo para que sea contabilizado. El patín de medición no será de transferencia en custodia, ya que la estación A y la estación B pertenecen a la misma compañía de transporte y la fiscalización del producto se realizará en el punto B. En este orden de ideas, la medición de recibo será de referencia para el operador A y no se requiere de computador de flujo para el ajuste de los medidores de caudal. Por lo tanto el control de los medidores será comunicado al sistema de control de proceso.

El nuevo cabezal en el múltiple de llenado de tanques, contará con válvulas motorizadas que permitan seleccionar el tanque que almacenará el crudo recibido desde el cuarto de control.

Con los parámetros de diseño establecido, la instrumentación requerida para el proyecto es la siguiente:

- Transmisores de presión diferencial.
- Transmisores de presión manométrica.
- Transmisores de temperatura.
- Transmisores de nivel.
- Válvulas motorizadas y de accionamiento manual.

- Manómetros.
- Válvulas de alivio térmico.
- Válvulas de seguridad por presión.
- Válvulas de control.

Para la integración y comunicación de esta instrumentación, se requiere de un sistema de control de proceso confiable, con una arquitectura redundante en comunicaciones que permita dar continuidad y estabilidad al sistema. Las arquitecturas de control propuestas por cada tipo de tecnología se pueden consultar la Figura 20 y Figura 21.

En la arquitectura de control para instrumentación HART (4-20mA) de acuerdo con la Figura 20, requiere una terminal remota I/O (RIO), encargada de concentrar las señales punto a punto de cada instrumento. Esta RIO estará compuesta por tarjetas de entrada/salida análoga y digital, fuentes de alimentación redundantes y tarjetas de comunicación redundantes para la interacción con el controlador principal (PLC de proceso).

El PLC estará compuesto por tarjetas de comunicación para conectarse a dos estaciones de operación por medio de una red Ethernet, donde se visualizara el supervisorio de la estación. Adicionalmente este sistema cuenta con tarjetas para comunicarse con la RIO de campo por medio de una red propietaria y contara con doble procesador para garantizar redundancia.

En cuanto a la arquitectura FIELDBUS, su hardware requerido se reduce con respecto a la arquitectura HART. En esta tipo de arquitectura se elimina la necesidad de una RIO y los instrumentos son conectados directamente al controlador principal de proceso e intercomunicados a una tarjeta H1. Por este mismo segmento se tiene el control, mantenimiento y alimentación de la instrumentación conectada al bus.

Para la especificación y compra de la instrumentación y sistema de control, se requiere del desarrollo de algunos entregables de ingeniería que podrán determinar las cantidades de obras necesarias para determinar el CAPEX por

cada tipo de tecnología:

- Cantidades de cable y ducto.
- Lista de instrumentos.
- Arquitectura de control.

4. EVALUACIÓN ECONÓMICA Y TÉCNICA DEL CASO DE APLICACIÓN

Para el análisis de la evaluación económica de las dos alternativas, se proyectará un flujo de caja, representando gráficamente los ingresos y egresos del proyecto y asociado a una periodicidad será de tipo anual. Para evaluar la rentabilidad de las dos alternativas y seleccionar la más adecuada a nivel económico, se utilizarán los siguientes indicadores de rentabilidad:

- Valor presente neto (VPN).
- Tasa Interna de Retorno (TIR).
- Relación Costo/Beneficio (RB/C).

En concordancia con la teoría financiera de evaluación de proyecto, la VPN es la diferencia entre el valor actual de los costos operativos e inversiones. Representa la riqueza adicional que se consigue en el proyecto sobre la mejor alternativa. El indicador es válido, para resultados de VPN mayores a cero (0).³⁴

La TIR es la tasa intertemporal a la cual los ingresos netos del proyecto apenas cubren los costos de inversión, operación y rentabilidad sacrificada. Es la rentabilidad interna del proyecto. Este indicador es válido si es mayor a la tasa de descuento. Este criterio es válido para flujos regulares de caja (primeros años de generación de desembolsos, años posteriores de ingresos y beneficios).³⁵

La RB/C, es un indicador que sirve para medir la rentabilidad del proyecto. Esta se define como la relación existente entre el valor presente de los ingresos y el valor presente de los costos e inversiones. El indicador es válido si es mayor a uno

³⁴ Manual de Soporte Conceptual para el uso de la Metodología General para Formulación y Evaluación de Proyectos: prosperidad para todos [en línea]. [citado en 3 de Enero de 2014]. Disponible en internet: <http://wsp.presidencia.gov.co/Prensa/2010/Noviembre/Paginas/20101112_10.aspx>.

³⁵ *Ibíd.*

(1).³⁶

Las premisas iniciales que aplican para las el análisis de las dos alternativas se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4 Premisas iniciales proyecto HART y FOUNDATION FIELDBUS

Premisas iniciales	
Tasa de descuento	12%
Vida útil de Proyecto (años)	8

Fuente: El Autor

La tasa de descuento para este tipo de proyectos se asume normalmente del 12%, y se estableció en un periodo de 8 años de acuerdo con Verhappen 2000³⁷ para proyectos de automatización. El periodo cero comenzara en el 2014 y el último periodo se desarrollara en el 2022.

4.1 CAPEX del proyecto

Como primera actividad para desarrollar el flujo de caja, se deberá establecer la inversión inicial de capital para las dos alternativas, aplicada al caso expuesto en el capítulo 3 de este documento. En este parámetro se estimaran los costos iniciales de inversión de capital como son:

- La instrumentación de proceso.
- Sistema de control de proceso.
- El comisionamiento de la instrumentación.
- Ingeniería para el desarrollo del proyecto.
- Cantidades de obra en las que se incluyen cableado, bandejas y tubería. En la Figura 19 del documento se ilustra el plano general de equipos de la planta y sus rutas de cableado.

En la tabla Tabla 20 se puede consultar la tabla detallada del CAPEX, de la cual se pueden resaltar algunos aspectos importantes relacionados con las diferencias

³⁶ *Ibíd.*

³⁷ Verhappen, Ian. Foundation Fieldbus economics comparison. En: *ISA Transactions 2000*, vol.39 p. 281-285 [en línea]. [Citado 14, junio, 2014]. Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com/biblioteca.uniandes.edu.co:8080/science/article/pii/S0019057800000057>>

de costos y cantidades entre las dos alternativas.

De acuerdo con la Tabla 5, la tecnología FOUNDATION es un 16% más costosa comparado con HART, creando la primera diferencia en el CAPEX de las dos alternativas.

Tabla 5 Costo instrumentación de las dos alternativas

CAPEX	Unidad de medida	Valor Unitario HART \$US	Valor Unitario FOUNDATION FIELDBUS \$US	Cantidad HART (4-20 mA)	Cantidad FOUNDATION FIELBUS	HART (4-20mA) US\$	FOUNDATION FIELBUS US\$
Compra de instrumentación							
Pressure Indicator Transmitter (0-150 PSIG)	UN	\$ 2,000	\$ 3,000	5	5	\$ 10,000	\$ 15,000
Pressure Indicator Transmitter (0-2000 PSIG)	UN	\$ 2,500	\$ 3,300	6	6	\$ 15,000	\$ 19,800
Válvula de control 6" ANSI 900	UN	\$ 80,000	\$ 100,000	2	2	\$ 160,000	\$ 200,000
Válvula de control 8" ANSI 150	UN	\$ 45,000	\$ 47,000	2	2	\$ 90,000	\$ 94,000
Transmisor de temperatura (0-300 °F)	UN	\$ 3,500	\$ 4,000	6	6	\$ 21,000	\$ 24,000
Medidor de coriolis 6"	UN	\$ 60,000	\$ 70,000	2	2	\$ 120,000	\$ 140,000
Indicador transmisor de nivel LIT	UN	\$ 2,100	\$ 3,000	4	4	\$ 8,400	\$ 12,000
TOTAL						\$ 424,400	\$ 504,800

Fuente: El Autor

En la Tabla 6 se puede observar un aumento del 14% del precio en el sistema de control de proceso para HART comparado con FOUNDATION. Esto es consecuencia del aumento de Hardware requerido por HART, por ser una tecnología punto a punto. De otro punto de vista, FOUNDATION necesita menos Hardware a nivel de control, por ser un bus punto-multipunto.

La Figura 20 y Figura 21 ilustra las arquitecturas de control por alternativa y para HART es necesario un gabinete de I/Os remotas (RIO), aumentando el valor del CAPEX en este ítem en comparación con FOUNDATION.

Tabla 6 Costo sistema de control de las dos alternativas

CAPEX	Unidad de medida	Valor Unitario HART \$US	Valor Unitario FOUNDATION FIELDBUS \$US	Cantidad HART (4-20 mA)	Cantidad FOUNDATION FIELBUS	HART (4-20mA) US\$	FOUNDATION FIELBUS US\$
Compra del sistema de control							
Sistema de control HART	UN	\$ 350.000	\$ -	1	0	\$ 350.000	\$ -
Sistema de control FOUNDATION FIELDBUS	UN	\$ -	\$ 300.000	0	1	\$ -	\$ 300.000
TOTAL						\$ 350.000	\$ 300.000

Fuente: El Autor

En relación con la Tabla 7, el costo de instalación y comisionamiento de los instrumentos FOUNDATION es menor un 8,3% con respecto a HART. Por ser FOUNDATION un bus de campo digital, su comisionamiento requiere menor

tiempo con respecto a la otra alternativa (ver Tabla 3).

Tabla 7 Costo instalación y comisionamiento de las dos alternativas.

CAPEX	Unidad de medida	Valor Unitario HART \$US	Valor Unitario FOUNDATION FIELDBUS \$US	Cantidad HART (4-20 mA)	Cantidad FOUNDATION FIELBUS	HART (4-20mA) US\$	FOUNDATION FIELBUS US\$
Instalación y Comisionamiento de la instrumentación							
Transmisor de presión PIT	UN	\$ 500	\$ 460	11	11	\$ 5.500	\$ 5.060
Transmisor de temperatura	UN	\$ 1.000	\$ 900	6	6	\$ 6.000	\$ 5.400
Válvula de control	UN	\$ 600.000	\$ 550.000	4	4	\$ 2.400.000	\$ 2.200.000
Medidor de Coriolis	UN	\$ 350	\$ 300	2	2	\$ 700	\$ 600
Indicador de nivel	UN	\$ 300	\$ 243	4	4	\$ 1.200	\$ 972
TOTAL						\$ 2.413.400	\$ 2.212.032

Fuente: El Autor

En la Tabla 8 se expone un aumento del 18% en el costo de cableado, excavaciones y bandejas necesarias para la instalación de instrumentos HART con respecto a FOUNDATION. La razón de esta diferencia en costos es la necesidad de mayor cantidad de bandejas portacable, ductos y cableado para HART por ser tecnología punto a punto, en comparación con HART.

Tabla 8 Costo sistema de control de las dos alternativas

CAPEX	Unidad de medida	Valor Unitario HART \$US	Valor Unitario FOUNDATION FIELDBUS \$US	Cantidad HART (4-20 mA)	Cantidad FOUNDATION FIELBUS	HART (4-20mA) US\$	FOUNDATION FIELBUS US\$
Tendido eléctrico							
Ductos 1" instrumentación	m	\$ 5	\$ 5	10000	6284	\$ 50.000	\$ 31.420
Excavación para banco de ductos	GL	\$ 65.000	\$ 40.000	1	1	\$ 65.000	\$ 40.000
Cable para instrumentación	m	\$ 3	-	11000	-	\$ 33.000	-
Cable FIELD BUS	m	\$ -	\$ 10	0	5000	\$ -	\$ 50.000
TOTAL						\$ 148.000	\$ 121.420

Fuente: El Autor

En la Tabla 9 se puede observar un resumen de todos los costos involucrados en el CAPEX por alternativa.

Tabla 9 Consolidado CAPEX Alternativas

	HART (4-20mA) \$US	FOUNDATION FIELBUS \$US
CAPEX	\$ 4.435.800	\$ 4.588.252

Fuente: El Autor

4.2 OPEX del proyecto

Los costos de operación del proyecto están conformados por los costos fijos y no se involucran costos variables para este caso en particular, ya que la rentabilidad del proyecto no depende de la operación como tal, asumiendo una trasporte constante de 53KBPD. El consolidado del OPEX para las dos alternativas se puede observar en la Tabla 21 y Tabla 22.

4.2.1 Costos fijos

Los costos fijos del están asociados con los costos para mantener la infraestructura de la instrumentación y sistema de control de la planta. No dependen de los barriles transportados.

4.2.1.1 Repuestos de instrumentación y control

Se estima un costo de los repuestos de instrumentación y control, partiendo de la base de datos de proyectos similares.

Se relacionan menores costos de repuestos de instrumentación y control de la tecnología FOUNDATION con respecto a HART y esto se fundamentan en la ventaja de los mantenimientos predictivo de FOUNDATION, permitiendo una disminución en la cantidad de repuestos requeridos por año.

En la Tabla 21 y Tabla 22 se observa que el total de costos por repuestos de instrumentación de HART es un 33% más elevado en comparación con FOUNDATION y en relación con repuestos de control, HART es 50% más costoso comparado con FOUNDATION.

4.2.1.2 Mantenimiento sistema de control e instrumentación

Este costo es asociado con la mano de obra para el mantenimiento de los sistemas de control e instrumentación. FOUNDATION requiere menores horas de mantenimiento con respecto a HART, de acuerdo con las afirmaciones listadas en la Tabla 3.

Con respecto a la Tabla 21 y Tabla 22, la diferencia en porcentaje de costos es la siguiente:

- FOUNDATION es un 50% más económico en mantenimiento del sistema de control en comparación con HART.
- FOUNDATION es un 25% más económico en mantenimiento de su instrumentación de campo en comparación con HART

4.2.1.3 Cursos de actualización

Por ser FOUNDATION una tecnología relativamente nueva con respecto a HART, es necesario más horas en cursos de actualización para el personal de mantenimiento y operación por año. Los costos de los cursos para FOUNDATION son un 11% más elevado en comparación con HART.

4.2.1.4 Salarios

El costo de salarios se estima con respecto al equipo mínimo de técnicos necesarios para el mantenimiento del sistema de control e instrumentación. FOUNDATION al contar con mayor facilidad en sus reportes predictivos de mantenimiento, permite menos intervenciones al sistema y por lo tanto disminuye la cantidad de personal requerido para esta actividad.

Citando la Tabla 21 y Tabla 22, el costo del equipo técnico para el mantenimiento de HART es 50% más elevado si se compara con FOUNDATION.

4.2.1.5 Consolidado OPEX

Con los datos de los numerales anteriores, se establece un OPEX, cuyo resumen se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10 Consolidado OPEX Alternativas

OPEX	HART (4-20mA) US\$	FOUNDATION FIELD BUS US\$
2014	\$ 350.000	\$ 243.000
2015	\$ 360.500	\$ 250.290
2016	\$ 371.315	\$ 257.799
2017	\$ 382.454	\$ 265.533
2018	\$ 393.928	\$ 273.499
2019	\$ 405.746	\$ 281.704
2020	\$ 417.918	\$ 290.155
2021	\$ 430.456	\$ 298.859
TOTAL	\$ 3.112.318	\$ 2.160.838

Fuente: El Autor

4.3 Depreciación

La depreciación se define como el valor que un activo pierde anualmente por su uso. En la tecnología HART se define un periodo de depreciación de 5 años y para FOUNDATION un periodo de 6 años. Estos valores se determinaron con datos de proyectos similares en el sector. En la Tabla 23 se presenta en detalle el consolidado de la Depreciación y en la Tabla 11 un resumen para las dos alternativas.

Tabla 11 Resumen Consolidado Depreciación Alternativas

DEPRECIACIÓN	Hart (4-20 mA)	Foundation Fieldbus
2014	\$ -	\$ -
2015	\$ 887.160	\$ 764.709
2016	\$ 887.160	\$ 764.709
2017	\$ 887.160	\$ 764.709
2018	\$ 887.160	\$ 764.709
2019	\$ 887.160	\$ 764.709
2020	\$ -	\$ 764.709
2021	\$ -	\$ -
2022	\$ -	\$ -

Fuente: El Autor

En la Tabla 11, el periodo de depreciación de FOUNDATION es menor en comparación con HART y la razón técnica radica en que FOUNDATION requiere

menor cantidad de Hardware por ser bus punto-multipunto evitando menores puntos de falla. Adicionalmente las ventajas de mantenimiento predictivo de FOUNDATION con respecto a HART, permite menores tiempos de mantenimiento correctivo y mayor tiempo de duración de los activos.

4.4 Ingresos

Los ingresos se causaran con una tarifa de USD\$ 0,99 x Barril que se reciba y este valor es regido por el Ministerio de Mina y Energía.³⁸

Como premisa de diseño, la estación recibirá 53 KBPD, generando un promedio de 19 millones de barriles al año transportados. Para el desarrollo de este ejercicio, se relacionan a continuación los porcentajes de inversión de los ingresos por cada especialidad de ingeniería.

- 15% para el desarrollo de proyectos de instrumentación.
- 25% para el desarrollo de proyectos mecánicos y tubería.
- 34% para proyectos civiles.
- 26% para proyectos de infraestructura eléctrica.

En la Tabla 12 se ilustra el resumen del ingreso del proyecto por cada tipo de tecnología y en la Tabla 24 y Tabla 25 el consolidado de los mismos.

³⁸ MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA (Colombia). Resolución 181258 (14 de julio de 2010). Por la cual se reglamenta el transporte de crudos por oleoducto. Bogotá D.C. El ministerio, 2010 22p

Tabla 12 Resumen Consolidado Ingresos Alternativas

INGRESO	Hart (4-20 mA) US\$	FOUNDATION FIELD BUS US\$
2014	\$ -	\$ -
2015	\$ 2,611,575.0	\$ 2,611,575.0
2016	\$ 2,611,575.0	\$ 2,611,575.0
2017	\$ 2,611,575.0	\$ 2,611,575.0
2018	\$ 2,611,575.0	\$ 2,611,575.0
2019	\$ 2,611,575.0	\$ 2,611,575.0
2020	\$ 2,611,575.0	\$ 2,611,575.0
2021	\$ 2,611,575.0	\$ 2,611,575.0
2022	\$ 2,611,575.0	\$ 2,611,575.0

Fuente: El Autor

4.5 Impuestos

Estos impuestos son aprobados por el ministerio de Minas y Energía y se determina de la siguiente forma: si el oleoducto proviene del occidente de la cima de la cordillera oriental, es del 6% y si proviene del oriente es del 2%. Este impuesto se rige de acuerdo con el Artículo 52 del Código de Petróleos y el artículo 17 del decreto 2140 de 1955. El pago de este impuesto lo hacen las empresas operadoras y en este caso de aplicación la operadora de la estación A asumirá los impuestos de transporte en un 2%.

En la Tabla 13 se muestra el resumen de los impuestos causados.

Tabla 13 Consolidado impuestos Alternativas

IMPUESTOS	Hart (4-20 mA) US\$	Foundation Fieldbus US\$
2014		
2015	\$ 52.714,5	\$ 52.714,5
2016	\$ 52.714,5	\$ 52.714,5
2017	\$ 52.714,5	\$ 52.714,5
2018	\$ 52.714,5	\$ 52.714,5
2019	\$ 52.714,5	\$ 52.714,5
2020	\$ 52.714,5	\$ 52.714,5
2021	\$ 52.714,5	\$ 52.714,5
2022	\$ 52.714,5	\$ 52.714,5

Fuente: El Autor

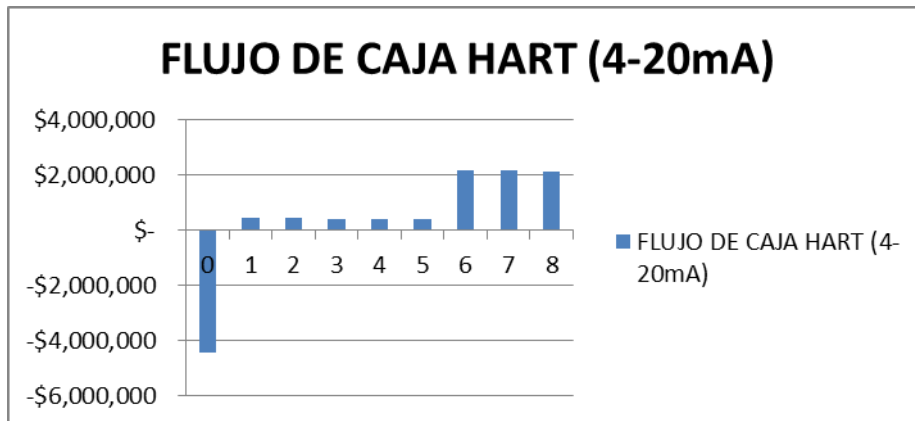
4.6 Evaluación económica.

Con los datos obtenidos en los numerales anteriores, se procederá a realizar la evaluación económica, tomando en cuenta los siguientes criterios de evaluación:

- La tasa interna de retorno TIR.
- El valor presente neto VPN.
- Relación Costo/Beneficio.

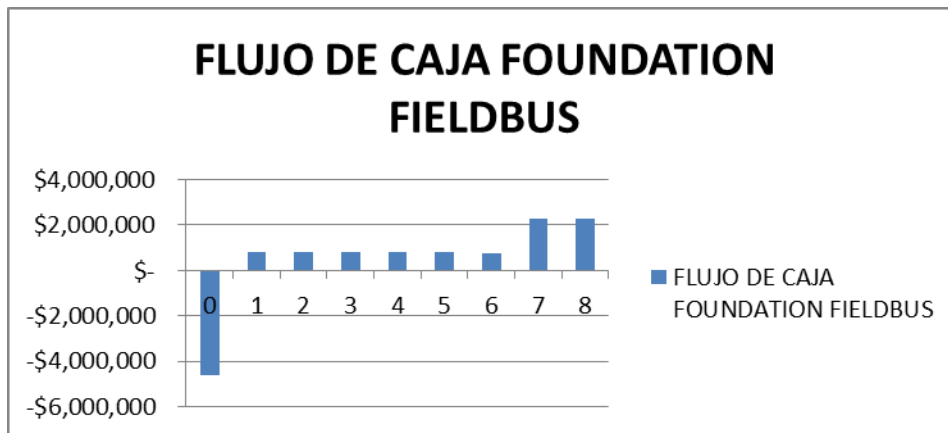
Para ilustrar el movimiento del dinero en el tiempo (periodo de 8 años), se ilustraran los flujos de caja por alternativa (Ver Figura 11 y Figura 12).

Figura 11 Flujo de caja HART



Fuente: El Autor

Figura 12 Flujo de caja FOUNDATION FELDBUS



Fuente: El Autor

En la Figura 11 y Figura 12, se observa que los flujo de caja para las dos tecnologías es de tipo convencional (primer año generación de desembolso, años posteriores generación de ingresos), permitiendo la aplicación de los criterios de evaluación citados en este capítulo.

4.6.1 Evaluación de la tecnología HART (4-20mA)

En la Tabla 14 se puede observar el resultado de los indicadores de evaluación aplicados a la tecnología HART. El desarrollo detallado para la obtención de los resultados se puede consultar en la Tabla 26 y Tabla 27.

Tabla 14 Consolidado Criterios de Evaluación HART

HART (4-20mA)	
Criterio de Evaluación	Resultado
Tasa de descuento	12%
TIR	12,2%
VPN	\$53.385,2
Relación B/C	1,01

Fuente: El Autor

En este caso, el VPN fue mayor a cero (0), esto indicando que el proyecto es rentable, porque se recupera la inversión inicial y se obtendrá una ganancia al final del proyecto.

La TIR es mayor que la Tasa de descuento, indicando que el proyecto es rentable y generará valor al final del ejercicio.

Finalmente la relación B/C es mayor a 1, esto quiere decir que por US\$1 invertido en el proyecto, se genera una ganancia de US\$0,01.

4.6.2 Evaluación FOUNDATION FIELDBUS

En la Tabla 15 se puede observar el resultado de los indicadores de evaluación aplicados a la tecnología FOUNDATION. El desarrollo detallado para la obtención de los resultados se puede consultar en la Tabla 26 y Tabla 27.

Tabla 15 Consolidado criterios de evaluación FOUNDATION FIELDBUS

FOUNDATION FIELDBUS	
Criterio de Evaluación	Resultado
Tasa de descuento	12%
TIR	15,2%
VPN	\$643.786,7
Relación B/C	1,14

Fuente: El Autor

En este caso, el VPN fue mayor a cero (0), esto quiere decir que el proyecto es rentable, porque se recupera la inversión inicial y se obtendrá una ganancia al final del proyecto.

La TIR es mayor que la tasa de descuento, indicando que el proyecto es rentable y generará valor.

Finalmente la relación B/C es mayor a 1 e indica que por US\$1 invertido en el proyecto, se genera una ganancia de US\$0,14.

4.6.3 Comparación de resultados económicos para selección de la alternativa

Conforme a los datos obtenidos en la evaluación económica, los dos proyectos son atractivos para invertir, por esta razón se debe realizar una comparación de los resultados obtenidos en el numeral 4.6.1 y 4.6.2 de este documento y determinar cuál de las dos tecnologías es más conveniente de implementar en la planta piloto de transporte.

En la Tabla 6 y Tabla 7 se pueden observar los siguientes resultados:

- TIR del HART=12.2% < TIR de FOUNDATION FIELDBUS=15.2%.

La anterior comparación, indica que FOUNDATION tendrá una mayor rentabilidad con respecto a HART. Si se observan los flujos de caja proyectados de la Figura 11 y Figura 12, el retorno de la inversión inicial de HART será efectiva en el sexto periodo y FOUNDATION en el quinto periodo del proyecto.

- VPN HART=US\$53.38 < VPN de FOUNDATION FIELDBUS=US\$ 643,78.

Con HART se obtendrá una ganancia de US\$53,38 y con FOUNDATION una ganancia final de US\$643,78. Esto indica que la segunda alternativa es más rentable, entregando mayor peso en el criterio de selección económica.

- R B/C HART=1,01 < R B/C FOUNDATION FIELDBUS=1,14

Con FOUNDATION por cada dólar invertido en el proyecto, se genera US\$0,13 más en comparación con HART.

Las anteriores comparaciones de resultados, indican que FOUNDATION es la alternativa más atractiva para invertir en el proyecto de automatización de la planta piloto de transporte. Sin embargo es interesante variar algunos de los parámetros iniciales y mirar el comportamiento de los indicadores económicos.

4.6.4 Análisis de sensibilidad variando el porcentaje de ingresos de la planta para invertir en proyectos de instrumentación y control

Como premisa inicial, se estableció un 15% de inversión de los ingresos de la planta para proyectos de automatización. En la Tabla 16 y Tabla 17, se presenta el resultado de la variación del porcentaje entre 12% y el 18% para las dos tecnologías y se ilustrara el comportamiento de los indicadores económicos.

Tabla 16 Sensibilidad % de Inversión HART (4-20mA)

% DE INVERSIÓN	12%	13%	14%	15%	16%	17%	18%
TIR	0,23%	4,33%	8,32%	12,25%	16,11%	19,94%	23,74%
VPN	\$ (2.489.394,1)	\$ (1.641.801,0)	\$ (794.207,9)	\$ 53.385,2	\$ 900.978,3	\$ 1.748.571,4	\$ 2.596.164,5
RBC	0,44	0,63	0,82	1,01	1,20	1,39	1,59

Fuente: El Autor

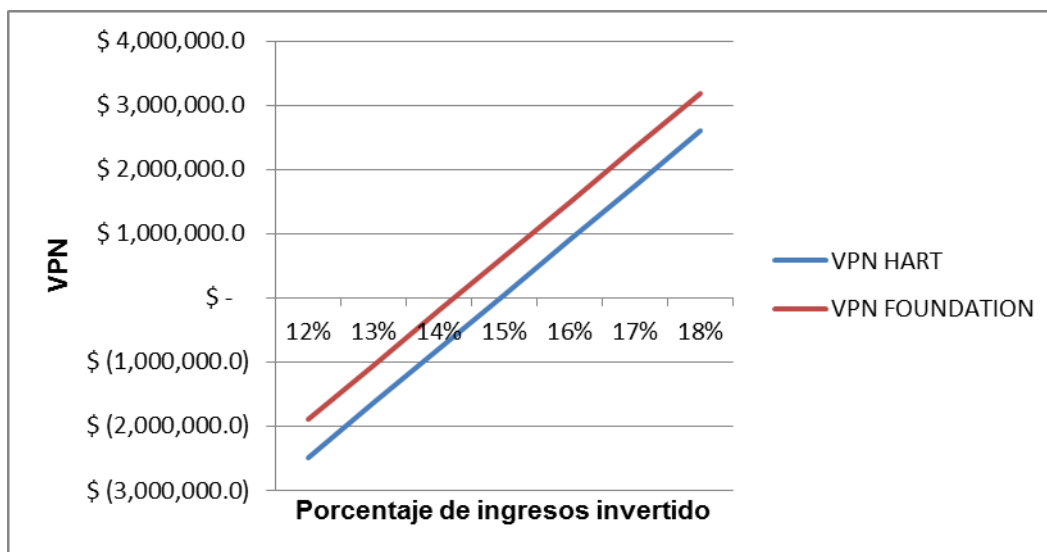
Tabla 17 Sensibilidad % de Inversión FOUNDATION FIELDBUS

% DE INVERSIÓN	12%	13%	14%	15%	16%	17%	18%
TIR	2,21%	6,66%	10,98%	15,19%	19,30%	23,35%	27,34%
VPN	\$ (1.898.992,6)	\$ (1.051.399,5)	\$ (203.806,4)	\$ 643.786,7	\$ 1.491.379,8	\$ 2.338.972,9	\$ 3.186.566,0
RBC	0,59	0,77	0,96	1,14	1,33	1,51	1,69

Fuente: El Autor

Se observa que todos los indicadores son sensibles a la variación en el porcentaje de los ingresos para proyectos de automatización de la planta y su comportamiento se muestra en la Figura 13, Figura 14 y Figura 15.

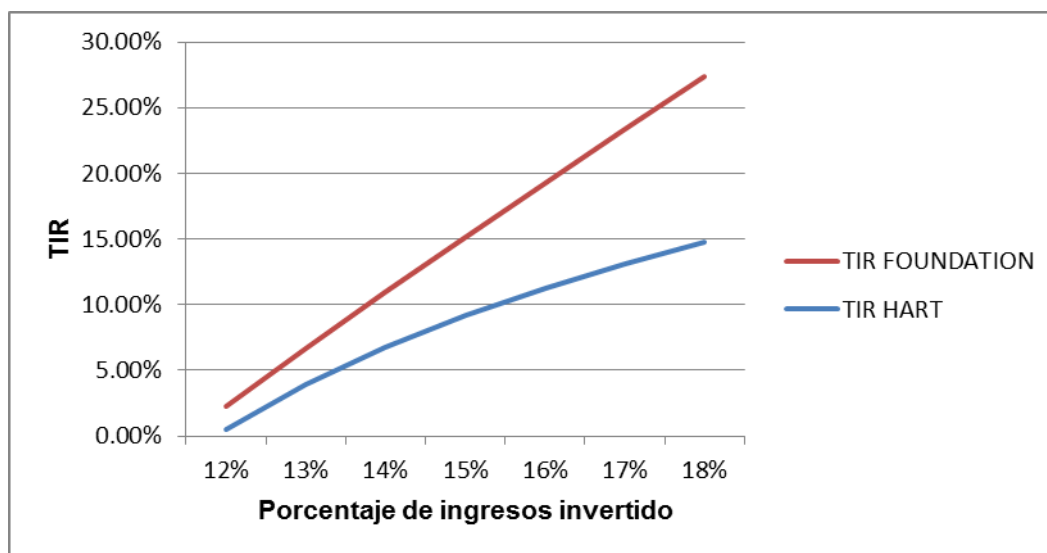
Figura 13 Resultado análisis de sensibilidad VPN



Fuente: El Autor

En la Figura 13, el VPN de la tecnología FOUNDATION es mayor a cero para un porcentaje del 13,7%, sin embargo en este mismo punto el VPN de HART es negativo. De esta gráfica se puede deducir que el proyecto FOUNDATION es sostenible con un menor porcentaje de inversión en comparación con HART.

Figura 14 Resultado análisis de sensibilidad TIR

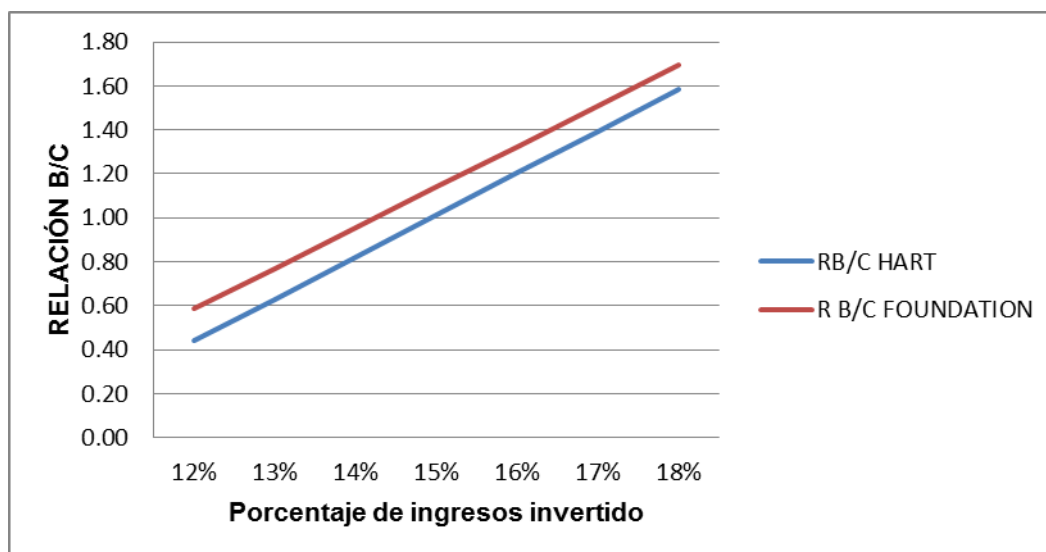


Fuente: El Autor

En la Figura 14, la TIR de FOUNDATION aumenta en proporción al ingreso de

inversión (tendencia en línea recta). La tendencia de HART no es lineal, y se aleja de la grafica de FOUNDATION a medida que aumenta el valor del eje X de la gráfica.

Figura 15 Resultado análisis de sensibilidad Relación Costo/Beneficio



Fuente: El Autor

En la Figura 15, la gráfica de la relación B/C de FOUNDATION está por encima de HART. Esto se traduce que por cada dólar invertido en el proyecto FOUNDATION, se obtendrá más centavos de dólar en comparación con HART.

4.6.5 Análisis de sensibilidad variando la cantidad de barriles diarios transportados

Como premisa de diseño para el proyecto, se estableció un flujo de recibo de crudo a una tasa de 53KBPD. En la Tabla 18 y Tabla 19 se ilustra el análisis de sensibilidad para los criterios económicos, variando el flujo recibido desde 40KBPD hasta 53KBPD.

Tabla 18 Sensibilidad Barriles diarios Transportados FOUNDATION FIELDBUS

Barriles por día	40000	45000	50000	53000	60000	100000	150000
TIR	-2.6%	3.3%	8.9%	12.2%	19.9%	62.4%	116.0%
VPN	-\$3,065,117.75	-\$1,865,693.54	-\$666,269.34	\$53,385.18	\$1,732,579.06	\$11,327,972.68	\$23,322,214.71
RBC	0.3	0.6	0.8	1.0	1.4	3.6	6.3

Fuente: El Autor

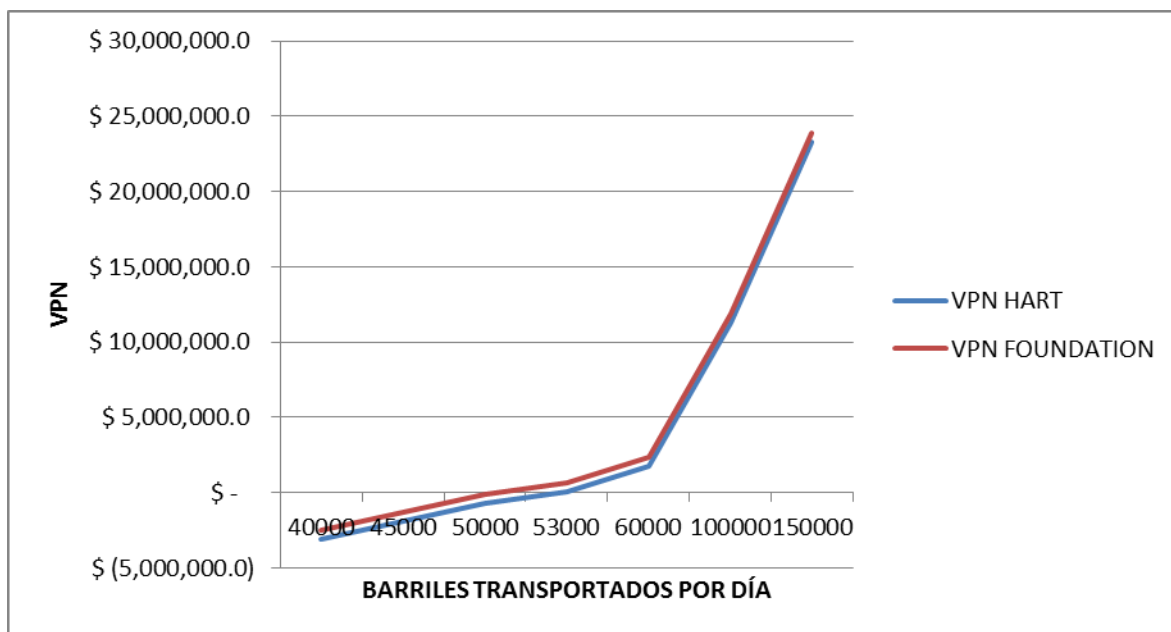
Tabla 19 Sensibilidad Barriles diarios Transportados HART

Barriles por día	40000	45000	50000	53000	60000	100000	150000
TIR	-0.9%	5.5%	11.6%	15.2%	23.3%	66.8%	119.6%
VPN	-\$2,474,716.21	-\$1,275,292.00	-\$75,867.80	\$643,786.72	\$2,322,980.60	\$11,918,374.22	\$23,912,616.25
RBC	0.5	0.7	1.0	1.1	1.5	3.6	6.2

Fuente: El Autor

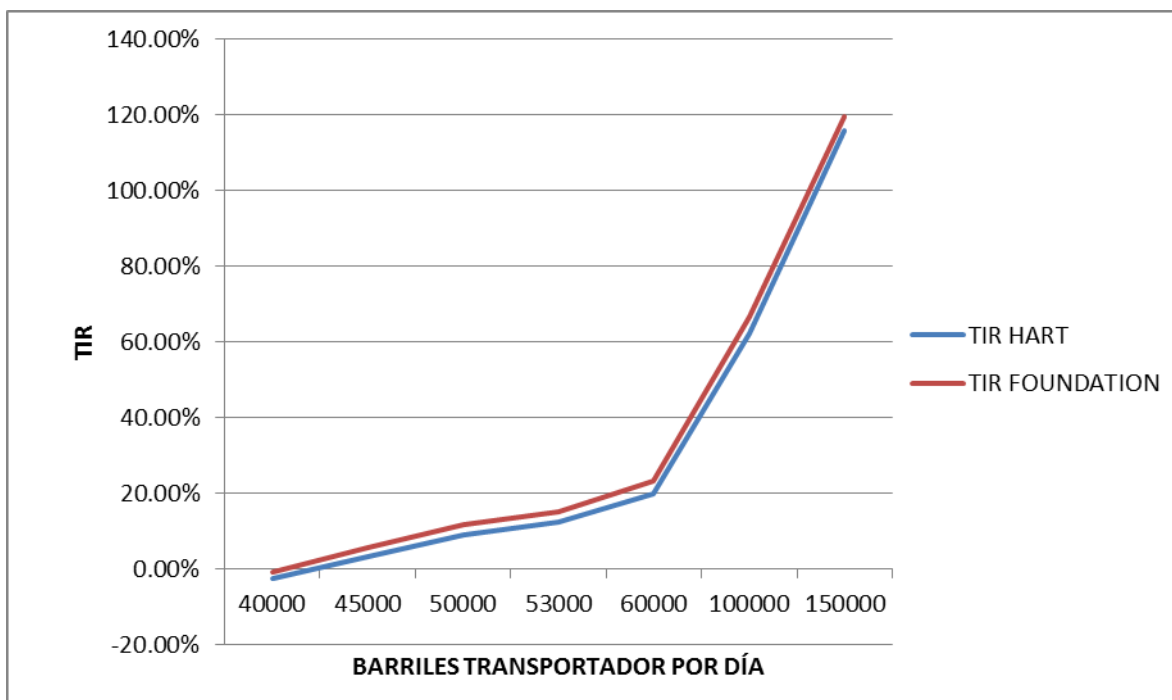
En la Tabla 18 se observa que para 40KBPD, el VPN y la TIR para los dos proyectos son negativos, solo se tienen proyectos viables por encima de los 53KBPD. En la Figura 16 y Figura 17 se ilustran el comportamiento del VPN y la TIR variando la cantidad de barriles transportados para las dos alternativas.

Figura 16 Resultado análisis de sensibilidad VPN variando la cantidad de barriles diarios.



Fuente: El Autor

Figura 17 Resultado análisis de sensibilidad VPN variando la cantidad de barriles diarios.



Fuente: El Autor

Analizando las Figura 16 y Figura 17, se puede observar que las gráficas del VPN y la TIR de HART siempre están por debajo de las tendencias de FOUNDATION, indicando una mayor rentabilidad de esta última tecnología, en variación con los barriles transportados. Sin embargo después de un aumento de 57KBPD, los parámetros de los proyectos se comienzan a comportar de forma similar.

4.6.6 Ventajas y desventajas técnica aplicada al proyecto

Con las criterios de selección enunciados en el capítulo 2, los requerimientos técnicos para el proyecto citados en el capítulo 3 y los datos obtenidos de la evaluación económica, se realiza un la lista de ventajas y desventajas aplicadas a cada tecnología.

Ventajas de HART (4-20mA):

- Es una tecnología ampliamente aceptada en la industria a nivel mundial, generando una reducción en costos de capacitaciones para operadores y mantenedores.

- Es una tecnología de fácil ajuste y mantenimiento.
- El costo de sus equipos es más bajo comparado con FOUNDATION (Tabla 20).

Desventajas de HART (4-20mA):

- Requiere mayor cantidad de insumos para su implementación. Esto se refleja en el aumento en cantidades de cables, bandejas, metros cúbicos de excavación para ductos y aumento en gabinetes de control.
- Esta tecnología es limitada en información de mantenimiento predictivo en comparación con FOUNDATION, aumentando la cantidad de repuestos en bodega y tiempos de mantenimiento.
- No es un bus de comunicación punto-multipunto, lo que significa aumento en el hardware del sistema de control.
- Es una tecnología robusta en comunicaciones, sin embargo en caso de saturación de la escala en corriente del instrumento (corriente mayor a 20mA), la variable de proceso presentará un error con respecto a su valor real, indicando datos erróneos al operador y posibles paros de planta no programados.
- Es adecuada para la implementación de proyectos de seguridad de proceso.

Ventajas de FOUNDATION FIELDBUS:

- Es una tecnología multivariable, lo que permite comunicar varios instrumentos por un mismo canal de comunicaciones. Esto se refleja en disminución de cableado, bandejas, ductos y hardware asociado al sistema de control.
- Presenta un diagnóstico de mantenimiento predictivo más amplio comparado con HART, lo que disminuye tiempos de mantenimiento y cantidad de repuestos en bodega.
- Al estar todos los instrumentos conectados por un mismo canal de comunicaciones, es posible realizar el comisionamiento de los instrumentos desde un punto centralizado.

Desventajas de FOUNDATION FIELDBUS:

- Es una tecnología reciente en el mercado, su uso está en crecimiento y se requiere mayores costos en capacitaciones para el personal de mantenimiento y operaciones.
- El costo de los instrumentos en el mercado es mayor comparado con HART, esto se traduce en un aumento de la inversión inicial del proyecto.
- No es posible su implementación en aplicaciones de seguridad de proceso, esto conlleva a la necesidad de mezclar tecnologías.

CONCLUSIONES

FOUNDATION presenta notorias ventajas técnicas en comparación con HART. Dentro de esas ventajas se pueden destacar su buena gestión en diagnósticos de mantenimiento predictivo, lo cual permite una mayor reducción en tiempos de mantenimiento, cantidades de repuestos y una mayor conservación de los activos.

Por ser FOUNDATION una tecnología de bus punto a multipunto y multivariable, permite la integración de diferentes dispositivos por un mismo medio de comunicación. Esto se traduce en una ventaja económica de reducción de equipos de control, reducción en cables, bandejas y ductos, permitiendo ahorros en la etapa constructiva del sistema en comparación con HART.

HART tiene la ventaja de ser una tecnología ampliamente acogida por todo tipo de industrias a nivel mundial, por su alta robustez y por estar en combinación con la tradicional tecnología 4-20mA. FOUNDATION por ser una tecnología relativamente nueva, requiera más horas de capacitación en el personal técnico y por lo tanto su crecimiento a nivel mundial es menor en comparación con HART.

Para el caso de aplicación expuesto en este documento, FOUNDATION fue seleccionada como la alternativa más atractiva de adquirir e implementar, ya que los criterios VPN, TIR y Relación B/C presentaron un mayor valor con respecto a HART. Esto se traduce en que FOUNDATION es un proyecto de mayor rentabilidad.

En cuanto al análisis de sensibilidad, variando el porcentaje de ingresos de la planta para invertir en proyectos de automatización y variando la cantidad de barriles transportados, se puede observar que FOUNDATION en sus tres criterios de evaluación económica es superior a HART, indicando que es un proyecto de mayor rentabilidad. Por ejemplo en la Figura 13, el VPN de la tecnología

FOUNDATION es positivo para un porcentaje de inversión del 13,7%, sin embargo en este mismo punto el VPN de HART es negativo. De esta gráfica se puede deducir que FOUNDATION recupera la inversión inicial a un porcentaje menor de inversión en comparación con HART.

Si se varía la cantidad de barriles transportados de la planta de 40KBPD a 53KBPD, los parámetros TIR y VPN de FOUNDATION tienen un valor superior a los parámetros de HART. Sin embargo después de un aumento de 57KBPD, los parámetros de las dos alternativas se comienzan a comportar de forma similar.

Finalmente se concluye que la alternativa FOUNDATION será rentable siempre y cuando se garantice un recibo de crudo de 53KBPD y una inversión en los ingresos de los barriles transportados mayor al 13,7%.

BIBLIOGRAFÍA

An End User Functional Comparison of HART® and FOUNDATION™ Fieldbus Protocols [en línea]. [citado en 3 de Enero de 2014]. Disponible en internet: <<http://www.emersonprocessxperts.com/papers/FFHARTFunctionalComparison.pdf>>.

Can Open [en línea]. [Consultado 10-02-2014]. Disponible en: < <http://www.can-cia.org/index.php?id=canopen>>.

TARIFAS VIGENTES – CENIT, 2013. [consultado 19-01-2014] Disponible en internet: <<http://www.cenit-transporte.com/tarifas-vigentes/>>

Creus, Antonio. Instrumentación Industrial: Foundation Fieldbus. 8 ed. Barcelona: 2011 Marcombo S.A.

Divecenet Network Overview [en línea]. [consultado 31-01-2014]. Disponible en < <http://www.ab.com/en/epub/catalogs/12762/2181376/214372/1768364/3404052/print.html>>.

Electronic Signal Protocol Selection Study Report. WorleyParsons Services Pty Ltd. [En línea]. [Consultado 14-01-2014]. Disponible en <<https://ems.worleyparsons.com/emi3.aspx>>.

EMERSON PROCESS MANAGEMENT. [En línea]. [Consultado 10-01-2014]. Disponible en: <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Central%20Web%20Documents/EngSch-Fieldbus_301_es.pdf>.

FOUNDATION H1.[En línea].[Consultado ene. 2014].Disponible en <http://www.fieldbus.org/index.php?option=com_content&task=view&id=137&Itemid=313>.

FOUNDATION™Fieldbus:The Power of Digital for your Process Devices. [en línea]. [consultado 12-01-2014]. Disponible en <www.fieldbus.org/images/stories/technology/aboutthetechology/overview/fieldbus_brochure.pdf>.

Fernández Arboleda, Brenda. Análisis técnico económico de los impactos de la automatización y control en los sistemas de transporte de hidrocarburos de Colombia. Especialista en gerencia de hidrocarburos. Bogotá: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas. 24 p.

García Moreno, Emilio. Automatización de procesos industriales: Fieldbus. Valencia: Servicios de publicaciones caminos de Vera. 120p.

Gouchen, An; Zhiyong, Meng; et al. Design of Intelligent Transmitter based on HART Protocol. En: IEEE Xplore. [Base de datos en línea]. [consultado 15-01-2014]. Disponible en: <<http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.uniandes.edu.co:8080/xpls/icp.jsp?arnumber=5522916>>.

HART field communications protocol. [En línea][Consultado 15. Ene. 2014]. Disponible en <www.pacontrol.com/download/Hart-Application-Guide.pdf>.

Helson, Ron.HART Communication: Driving New Product Developments.[En línea][consultado 23. Ene. 2014].Disponible en <http://www.hcf-files.com/webasyst/published/DD/html/scripts/getfolderfile_zoho.php?DL_ID=MTEwMQ%3D%3D&ID=30eb4279d57b9a8a0568322db6bfefff&DB_KEY=V0VCRkIMRVM%3D>.

Helson, Ronald .HART Communication: A solution Enabling Technology. [En

línea][Consultado 23. Ene. 2014]. Disponible en <http://een.iust.ac.ir/profs/Shahri/Computer%20Buses_84/harttech.pdf>.

Ichertz Francois, Analog to Fieldbus Digital Communication Foundation Fieldbus-Basic-Training. . Endress+Hauser. p.7.

INTERBUS.[en línea]. [Consultado 23-12-2013]. Disponible en <<http://www.profibus.com/technology/interbus/>>.

Kaschel, Héctor. Análisis del estado del arte de los buses de campo aplicados al control de procesos industriales. [En línea]. [Consultado el 09-01-2014].Disponible en <http://www.ingeborda.com/biblioteca/Biblioteca%20Internet/Articulos%20Tecnicos%20de%20Consulta/Instalaciones%20Electricas%20Industriales/Buses%20Industriales.pdf>>.

Manual de Soporte Conceptual para el uso de la Metodología General para Formulación y Evaluación de Proyectos: prosperidad para todos [en línea]. [citado en 3 de Enero de 2014]. Disponible en internet: <http://wsp.presidencia.gov.co/Prensa/2010/Noviembre/Paginas/20101112_10.aspx>.

Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014: prosperidad para todos [en línea]. [citado en 3 de Enero de 2014]. Disponible en internet: <http://wsp.presidencia.gov.co/Prensa/2010/Noviembre/Paginas/20101112_10.aspx>.

Prasad, Janardan; M.N Jayaswal y Priye Vishnu. Instrumentation Process Control: Definition of Transducer. New Delhi: International Publishing House ,2010. PROFILBUS [en línea]. [Consultado 10-01-2014]. Disponible en <<http://www.profibus.com/technology/profibus/overview/>>.

SHOSHANI, Gil; MITSCHEKE, Sthephen y STHEPHAN, Stan. Industrial fieldbus technology and fieldbus cable overview – cable standards and electrical qualifications. En: IEEE Xplore. [Base de datos en línea]. [consultado 15-02-2014]. Disponible en: < http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5666839&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5666839> .

SHOSHANI, Gil; MITSCHEKE, Sthephen y STHEPHAN, Stan. En: Industrial fieldbus technology and fieldbus cable overview – cable standards and electrical qualifications. En: IEEE Xplore. [Base de datos en línea]. [consultado 15-02-2014]. Disponible en: < http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5666839&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5666839> .

Thompson, Lawrence M. Industrial Data Communication: Selected industrial Networks. 4 ed. United States of America: ISA, 2008. 126p.

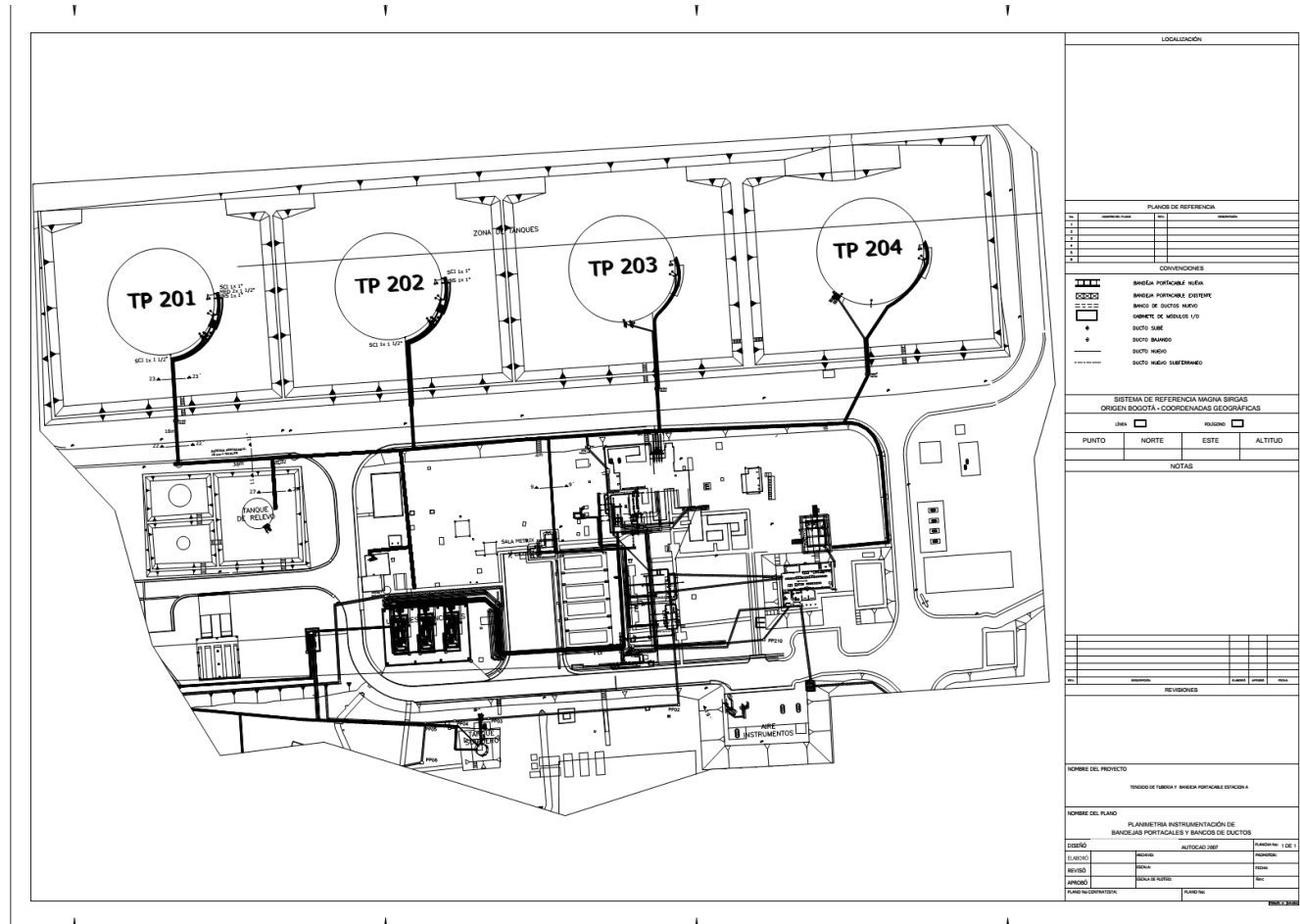
Verhappen, Ian. Foundation Fieldbus economics comparison. En: ISA Transactions 2000, vol.39 p. 281-285 [en línea]. [Citado 14, junio, 2014]. Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com/biblioteca.uniandes.edu.co:8080/science/article/pii/S0019057800000057>> .

Verwer Andy, Analog Overview of AS-Interface Technology. En: (Octubre, 2003, Manchester). Automation Systems Centre, Manchester Metropolitan University. p.6-8.

What is HART?. [Consultado 15. Ene. 2014]. Disponible en: <http://www.hartcomm.org/protocol/about/aboutprotocol_what.html> .

ANEXO B TRAZADO DE BANDEJAS Y DUCTOS ESTACIÓN A

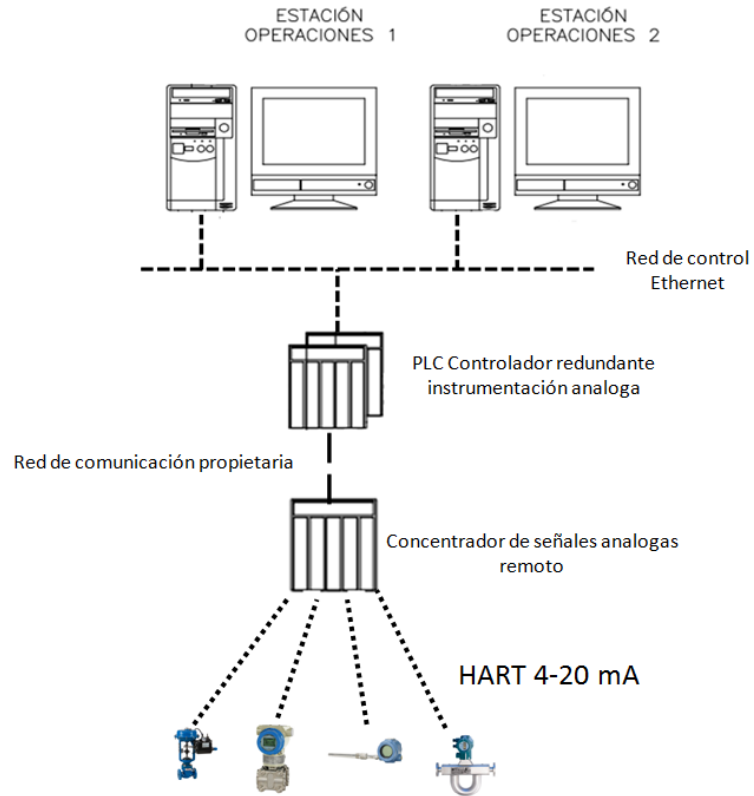
Figura 19 Planimetría de bandejas y ductos estación de recibo A



Fuente: El Autor

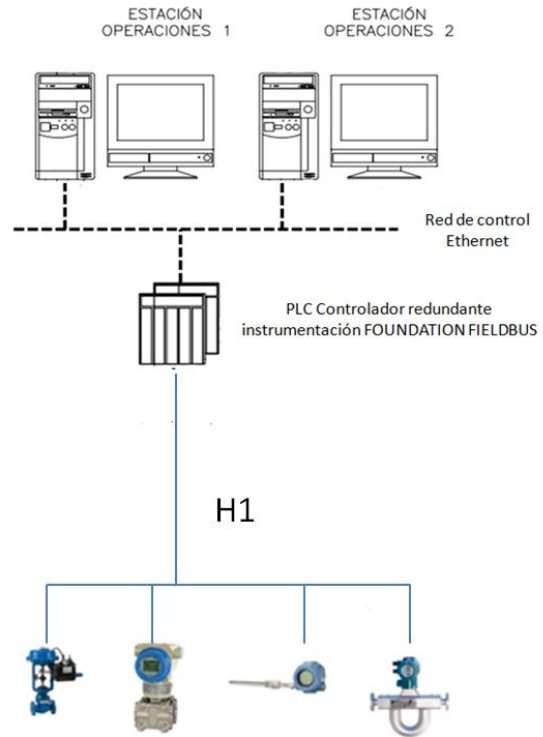
ANEXO C ARQUITECTURA DE CONTROL HARTY FOUNDATION FIELDBUS

Figura 20 Arquitectura de control estación A (HART 4-20mA)



Fuente: El Autor

Figura 21 Arquitectura de control estación A (FOUNDATION FIELDBUS)



Fuente: El Autor

ANEXO D CAPEX

Tabla 20 Consolidado Capex

CAPEX	Unidad de medida	Valor Unitario HART \$US	Valor Unitario FOUNDATION FIELDBUS \$US	Cantidad HART (4-20 mA)	Cantidad Foundation Fiedbus	HART (4-20mA) \$US	FOUNDATIO N FIELBUS \$US
Compra de instrumentación							
Pressure Indicator Transmitter (0-150 PSIG)	UN	\$ 2.000	\$ 3.000	5	5	\$ 10.000	\$ 15.000
Pressure Indicator Transmitter (0-2000 PSIG)	UN	\$ 2.500	\$ 3.300	6	6	\$ 15.000	\$ 19.800
Valvula de control 6" ANSI 900	UN	\$ 80.000	\$ 100.000	2	2	\$ 160.000	\$ 200.000
Valvula de control 8" ANSI 150	UN	\$ 45.000	\$ 47.000	2	2	\$ 90.000	\$ 94.000
Transmisor de temperatura (0-300 °F)	UN	\$ 3.500	\$ 4.000	6	6	\$ 21.000	\$ 24.000
Medidor de coriolis 6"	UN	\$ 60.000	\$ 70.000	2	2	\$ 120.000	\$ 140.000
Level Indicator Transmitter LIT	UN	\$ 2.100	\$ 3.000	4	4	\$ 8.400	\$ 12.000
Compra del sistema de control							
Sistema de control HART	UN	\$ 350.000	\$ -	1	0	\$ 350.000	\$ -
Sistema de control FOUNDATION FIELDBUS	UN	\$ -	\$ 300.000	0	1	\$ -	\$ 300.000
Instalacion y Comisionamiento de la instrumentación							
Transmisor de presión PIT	UN	\$ 500	\$ 460	11	11	\$ 5.500	\$ 5.060
Transmisor de temperatura	UN	\$ 1.000	\$ 900	6	6	\$ 6.000	\$ 5.400
Valvula de control	UN	\$ 600.000	\$ 550.000	4	4	\$ 2.400.000	\$ 2.200.000
Medidor de Coriolis	UN	\$ 350	\$ 300	2	2	\$ 700	\$ 600
Indicador de nivel	UN	\$ 300	\$ 243	4	4	\$ 1.200	\$ 972
Tendido electrico							
Ductos 1" instrumentación	m	\$ 5	\$ 5	10000	6284	\$ 50.000	\$ 31.420
Excavación para banco de ductos	GL	\$ 65.000	\$ 40.000	1	1	\$ 65.000	\$ 40.000
Cable para instrumentación	m	\$ 3	-	11000	-	\$ 33.000	-
Cable FIELD BUS	m	\$ -	\$ 10	0	5000	\$ -	\$ 50.000
Ingenieria							
Gestoria	n/a	\$ 600.000	\$ 600.000	1	1	\$ 600.000	\$ 600.000
Diseño (copnsultoria)	n/a	\$ 500.000	\$ 850.000	1	1	\$ 500.000	\$ 850.000
Capacitaciones							
					Total	\$ 4.435.800	\$ 4.588.252

Fuente: El Autor

ANEXO E OPEX

Tabla 21 Consolidación OPEX HART (4-20mA)

HART 4-20 mA								
OPEX	Repuestos Instrumentos	Repuestos control	Cursos de actualización y capacitación	Mantenimiento instrumentación	Mantenimiento sistema de control	Salarios técnicos de instrumentación	Costos Fijos	Total OPEX
	USD\$	USD\$	USD\$	USD\$	USD\$	USD\$	USD\$	USD\$
2015	\$ 60.000	\$ 50.000	\$ 27.000	\$ 40.000	\$ 100.000	\$ 60.000	\$ 337.000	\$ 337.000
2016	\$ 61.800	\$ 51.500	\$ 27.810	\$ 41.200	\$ 103.000	\$ 61.800	\$ 347.110	\$ 347.110
2017	\$ 63.654	\$ 53.045	\$ 28.644	\$ 42.436	\$ 106.090	\$ 63.654	\$ 357.523	\$ 357.523
2018	\$ 65.564	\$ 54.636	\$ 29.504	\$ 43.709	\$ 109.273	\$ 65.564	\$ 368.249	\$ 368.249
2019	\$ 67.531	\$ 56.275	\$ 30.389	\$ 45.020	\$ 112.551	\$ 67.531	\$ 379.296	\$ 379.296
2020	\$ 69.556	\$ 57.964	\$ 31.300	\$ 46.371	\$ 115.927	\$ 69.556	\$ 390.675	\$ 390.675
2021	\$ 71.643	\$ 59.703	\$ 32.239	\$ 47.762	\$ 119.405	\$ 71.643	\$ 402.396	\$ 402.396
2022	\$ 73.792	\$ 61.494	\$ 33.207	\$ 49.195	\$ 122.987	\$ 73.792	\$ 414.467	\$ 414.467

Fuente: El Autor

Tabla 22 Consolidación OPEX FOUNDATION FIELD BUS

FOUNDATION FIELD BUS								
OPEX	Repuestos Instrumentos	Repuestos control	Cursos de actualización y capacitación	Mantenimiento instrumentación	Mantenimiento sistema de control	Salarios técnicos de instrumentación	Costos Fijos	Total OPEX
	USD\$	USD\$	USD\$	USD\$	USD\$	USD\$	USD\$	USD\$
2015	\$ 40.000	\$ 25.000	\$ 30.000	\$ 30.000	\$ 50.000	\$ 45.000	\$ 220.000	\$ 220.000
2016	\$ 41.200	\$ 25.750	\$ 30.900	\$ 30.900	\$ 51.500	\$ 46.350	\$ 226.600	\$ 226.600
2017	\$ 42.436	\$ 26.523	\$ 31.827	\$ 31.827	\$ 53.045	\$ 47.741	\$ 233.398	\$ 233.398
2018	\$ 43.709	\$ 27.318	\$ 32.782	\$ 32.782	\$ 54.636	\$ 49.173	\$ 240.400	\$ 240.400
2019	\$ 45.020	\$ 28.138	\$ 33.765	\$ 33.765	\$ 56.275	\$ 50.648	\$ 247.612	\$ 247.612
2020	\$ 46.371	\$ 28.982	\$ 34.778	\$ 34.778	\$ 57.964	\$ 52.167	\$ 255.040	\$ 255.040
2021	\$ 47.762	\$ 29.851	\$ 35.822	\$ 35.822	\$ 59.703	\$ 53.732	\$ 262.692	\$ 262.692
2022	\$ 49.195	\$ 30.747	\$ 36.896	\$ 36.896	\$ 61.494	\$ 55.344	\$ 270.572	\$ 270.572

Fuente: El Autor

ANEXO F DEPRECIACIÓN

Tabla 23 Consolidado Depreciación

HART (4-20mA)		Periodo
AÑOS	CAPEX Usd\$	5
2014	\$ 4.435.800	\$ -
2015		\$ 887.160
2016		\$ 887.160
2017		\$ 887.160
2018		\$ 887.160
2019		\$ 887.160
2020		
2021		\$ -
2022		\$ -
Total	\$ 4.435.800	\$ -

Foundation		Periodo
AÑOS	CAPEX usd\$	6
2014	\$ 4.588.252	\$ -
2015		\$ 764.709
2016		\$ 764.709
2017		\$ 764.709
2018		\$ 764.709
2019		\$ 764.709
2020		\$ 764.709
2021		\$ -
2022		\$ -
Total	\$ 4.588.252	\$ -

Fuente: El Autor

ANEXO G INGRESOS

Tabla 24 Consolidado Ingresos Estación A alternativa HAT (4-20mA)

HART (4-20mA)					
Año		Barriles Transportados a Cobrar			INGRESOS
		ESTACIÓN A	PRESUPUESTO INSTRUMENTACIÓN	BO TRANSPORTADO	
		BO	BO INSTRUMENTACION	USD\$/BO	USD\$
0	2014	-			
1	2015	19.345.000	2.901.750	0,9	\$ 2.611.575,0
2	2016	19.345.000	2.901.750	0,9	\$ 2.611.575,0
3	2017	19.345.000	2.901.750	0,9	\$ 2.611.575,0
4	2018	19.345.000	2.901.750	0,9	\$ 2.611.575,0
5	2019	19.345.000	2.901.750	0,9	\$ 2.611.575,0
6	2020	19.345.000	2.901.750	0,9	\$ 2.611.575,0
7	2021	19.345.000	2.901.750	0,9	\$ 2.611.575,0
8	2022	19.345.000	2.901.750	0,9	\$ 2.611.575,0
	Totales	154.760.000	23.214.000		\$ 20.892.600,0

Fuente: El Autor

Tabla 25 Consolidado Ingresos Estación A FOUNDATION FIELDBUS

FOUNDATION FIELDBUS					
Año		Barriles Transportados a Cobrar			INGRESOS
		ESTACIÓN A	PRESUPUESTO INSTRUMENTACIÓN	BO TRANSPORTADO	
		BO	BO INSTRUMENTACION	USD\$/BO	USD\$
0	2014	-			
1	2015	19.345.000	2.901.750	0,9	\$ 2.611.575,0
2	2016	19.345.000	2.901.750	0,9	\$ 2.611.575,0
3	2017	19.345.000	2.901.750	0,9	\$ 2.611.575,0
4	2018	19.345.000	2.901.750	0,9	\$ 2.611.575,0
5	2019	19.345.000	2.901.750	0,9	\$ 2.611.575,0
6	2020	19.345.000	2.901.750	0,9	\$ 2.611.575,0
7	2021	19.345.000	2.901.750	0,9	\$ 2.611.575,0
8	2022	19.345.000	2.901.750	0,9	\$ 2.611.575,0
	Totales	154.760.000	23.214.000		\$ 20.892.600,0

Fuente: El Autor

ANEXO F FLUJO DE CAJA

Tabla 26 Consolidado Flujo de Caja HART(4-20mA)

Año		INGRESOS	CAPEX			Depreciación	Costos Totales	Utilidad Antes de Impuestos	Impuestos Proyecto (2%)	Utilidad	Flujo de caja
			PROYECTO	Costos Fijos	Proyecto	Proyecto	Proyecto				
		USD\$	USD\$	USD\$	USD\$	USD\$	USD\$				
0	2014	\$ -	\$ 4.435.800								-\$ 4.435.800
1	2015	\$ 2.611.575	\$ -	\$ 337.000	\$ 337.000	\$ 887.160	\$ 1.224.160	\$ 1.387.415	\$ 52.232	\$ 1.335.184	\$ 448.024
2	2016	\$ 2.611.575	\$ -	\$ 347.110	\$ 347.110	\$ 887.160	\$ 1.234.270	\$ 1.377.305	\$ 52.232	\$ 1.325.074	\$ 437.914
3	2017	\$ 2.611.575	\$ -	\$ 357.523	\$ 357.523	\$ 887.160	\$ 1.244.683	\$ 1.366.892	\$ 52.232	\$ 1.314.660	\$ 427.500
4	2018	\$ 2.611.575	\$ -	\$ 368.249	\$ 368.249	\$ 887.160	\$ 1.255.409	\$ 1.356.166	\$ 52.232	\$ 1.303.935	\$ 416.775
5	2019	\$ 2.611.575	\$ -	\$ 379.296	\$ 379.296	\$ 887.160	\$ 1.266.456	\$ 1.345.119	\$ 52.232	\$ 1.292.887	\$ 405.727
6	2020	\$ 2.611.575	\$ -	\$ 390.675	\$ 390.675	\$ -	\$ 390.675	\$ 2.220.900	\$ 52.232	\$ 2.168.668	\$ 2.168.668
7	2021	\$ 2.611.575	\$ -	\$ 402.396	\$ 402.396	\$ -	\$ 402.396	\$ 2.209.179	\$ 52.232	\$ 2.156.948	\$ 2.156.948
8	2022	\$ 2.611.575	\$ -	\$ 414.467	\$ 414.467		\$ 414.467	\$ 2.197.108	\$ 55.714	\$ 2.144.876	\$ 2.144.876

Fuente: El Autor

Tabla 27 Consolidado Flujo de Caja FOUNDATION FIELDBUS

Año		INGRESOS	CAPEX			Depreciación	Costos Totales	Utilidad Antes de Impuestos	Impuestos Proyecto (2%)	Utilidad	Flujo de caja
		PROYECTO	Costos Fijos	Proyecto	Proyecto	Proyecto					
		USD\$	USD\$	USD\$	USD\$	USD\$					
0	2014		\$ 4.588.252								-\$ 4.588.252
1	2015	\$ 2.611.575		\$ 220.000	\$ 220.000	\$ 764.709	\$ 984.709	\$ 1.626.866	\$ 52.232	\$ 1.574.635	\$ 809.926
2	2016	\$ 2.611.575		\$ 226.600	\$ 226.600	\$ 764.709	\$ 991.309	\$ 1.620.266	\$ 52.232	\$ 1.568.035	\$ 803.326
3	2017	\$ 2.611.575		\$ 233.398	\$ 233.398	\$ 764.709	\$ 998.107	\$ 1.613.468	\$ 52.232	\$ 1.561.237	\$ 796.528
4	2018	\$ 2.611.575		\$ 240.400	\$ 240.400	\$ 764.709	\$ 1.005.109	\$ 1.606.466	\$ 52.232	\$ 1.554.235	\$ 789.526
5	2019	\$ 2.611.575		\$ 247.612	\$ 247.612	\$ 764.709	\$ 1.012.321	\$ 1.599.254	\$ 52.232	\$ 1.547.023	\$ 782.314
6	2020	\$ 2.611.575		\$ 255.040	\$ 255.040	\$ 764.709	\$ 1.019.749	\$ 1.591.826	\$ 52.232	\$ 1.539.595	\$ 774.886
7	2021	\$ 2.611.575		\$ 262.692	\$ 262.692	\$ -	\$ 262.692	\$ 2.348.883	\$ 52.232	\$ 2.296.652	\$ 2.296.652
8	2022	\$ 2.611.575		\$ 270.572	\$ 270.572	\$ -	\$ 270.572	\$ 2.341.003	\$ 52.232	\$ 2.288.771	\$ 2.288.771

Fuente: El Autor