

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS EN FONDO Y
SUPERFICIE PARA CONTROL DE CALENTAMIENTO DE POZO**

**EDISON ALEXANDER RUIZ VACA
JORGE ARMANDO PÉREZ VERGARA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN “GISEL”
BUCARAMANGA**

2008

DISEÑO DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS EN FONDO Y SUPERFICIE PARA CONTROL DE CALENTAMIENTO DE POZO

EDISON ALEXANDER RUIZ VACA
JORGE ARMANDO PÉREZ VERGARA

CÓDIGO: 2013107
CÓDIGO: 2021008



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

GRUPO DE INVESTIGACIÓN “GISEL”
BUCARAMANGA

2008

Dedico este trabajo especialmente a Dios y su hijo Jesucristo, por entregarme todo lo necesario para alcanzar esta meta, por estar siempre a mi lado en los momentos más difíciles brindándome fortaleza, humildad y sabiduría.

Al incansable esfuerzo de mis Padres, a su preocupación, comprensión y aliento en todos los momentos difíciles, Además por ser el pilar de mis mejores valores. También por el hecho de depositar toda su confianza y amor en mí.

A toda mi familia por creer en mí, A mis tíos Jaime Ernesto, Guillermo, Luz Marina, Isabel, Anadelia y Mauricio Vaca. A Ángel María y Gladis Ruiz, A mis Abuelos Juan Hipólito Vaca y María Vega por todo el apoyo y cariño que me brindaron a lo largo de todo este proceso.

A Simón Bernal y familia por su amistad y colaboración incondicional.

A todos mis familiares y amigos, quienes directa o indirectamente aportaron su grano de arena para la culminación de este gran sueño.

Edison Alexander.

Dedico este Logro.

A Dios por brindarme lo necesario para alcanzar esta meta, y por la fortaleza entregada en los momentos difíciles.

A mis Padres, por su apoyo incondicional, sus consejos y todas las cosas buenas que me han infundido en su labor.

A mis Hermanas Dina, Yeimi y Mirla, por compartir momentos especiales conmigo y acompañarme en este proceso.

A mi novia Angélica María, por su paciencia y apoyo para lograr este sueño y todos los que están por realizarse a su lado.

A toda mi familia por creer en mí y ser pilares fundamentales en mi formación.

A todos mis amigos y compañeros, con los que compartí agradables momentos este recorrido.

Jorge Armando

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Los profesores Hermann Raúl Vargas y Omar Leonardo Peña, por su apoyo y constante colaboración en la orientación de este trabajo.

El ingeniero Fernando Calvete - Coordinador de operaciones e ingeniería, a la ingeniera Karen L Pachano - División de yacimientos, a la ingeniera Laura Cristina Amaya - Coordinadora Administrativa y en general a todo el equipo de Campo Escuela Colorado UIS-ECOPETROL, por todos sus aportes y valiosa contribución en el desenlace de este proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander por la oportunidad brindada.

A todos los docentes, que con sus enseñanzas y aportes hicieron posible este sueño.

A la Empresa Colombiana de Petróleos ECOPETROL y el Instituto Colombiano de Petróleos ICP, por la valiosa información suministrada en sus artículos, textos, y documentos.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. FUNDAMENTACIÓN TEORICA	2
1.1. CONCEPTOS SOBRE PETRÓLEO Y POZOS PETROLEROS	2
1.2. CONCEPTOS BÁSICOS DE INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA	6
1.3. MEDIDORES DE TEMPERATURA	8
1.3.1. DETECTORES DE TEMPERATURA DE RESISTENCIA (RTD)	9
1.3.2. TERMISTORES	10
1.3.3. SENSORES DE CIRCUITO INTEGRADO IC	11
1.3.4. TERMOCUPLAS	12
1.3.5. SENSORES DE TEMPERATURA DE FIBRA ÓPTICA	13
1.3.6. COMPARATIVO DE LOS SENSORES DE TEMPERATURA	14
1.4. MEDIDORES DE CORRIENTE	15
1.4.1. SENSORES DE CORRIENTE INDUCTIVOS	15
1.4.2. SENSORES DE CORRIENTE RESISTIVOS	16
1.4.3. SENSORES DE BOBINA ROGOSWKI	16
1.4.4. SENSORES DE CORRIENTE MÁGNETICOS	18
1.4.5. COMPARATIVO DE LOS SENSORES DE CORRIENTE	23
1.5. MEDIDORES DE TENSIÓN	24
1.5.1. TRANSFORMADOR DE TENSIÓN	24
1.5.2. DIVISOR DE TENSIÓN	25
1.5.3. SENSOR DE TENSIÓN DE EFECTO HALL	26
1.5.4. COMPARATIVO DE LOS SENSORES DE TENSIÓN	28
1.6. MEDIOS DE TRANSMISIÓN	29
1.6.1. MEDIOS DE TRANSMISIÓN NO GUIADOS	29
1.6.2. MEDIOS DE TRANSMISIÓN GUIADOS	29
1.6.3. COMPARATIVO DE LOS MEDIOS DE TRANSMISIÓN GUIADOS	32

1.7.	SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS (SAD) -----	34
1.7.1.	ELEMENTOS DE LOS SISTEMAS DE ADQUISICION DE DATOS-----	35
2.	<i>CARACTERÍSTICAS DEL POZO Y ESPECIFICACIONES REQUERIDAS POR EL SICP RELEVANTES PARA EL DISEÑO DEL SADFP</i> -----	36
2.1.	CARACTERIZACIÓN DE POZO MODELO COLOMBIANO PARA DISEÑO DEL (SADFP) -----	37
2.1.1.	DESCRIPCIÓN DE CAMPO ESCUELA COLORADO-----	37
2.1.2.	DESCRIPCIÓN DEL POZO C-70-----	39
2.1.3.	CARACTERÍSTICAS RELEVANTES DEL POZO C-70 PARA DISEÑO DEL SADFP---	41
2.2.	SISTEMA DE INYECCIÓN DE CORRIENTE (SICP): -----	48
2.2.1.	DEFINICIÓN DE ESPECIFICACIONES REQUERIDAS POR EL SICP PARA LA ADECUADA SELECCIÓN DEL SADFP:-----	50
2.3.	RESUMEN DE LOS PARÁMETROS DEFINIDOS PARA EL DISEÑO CONCEPTUAL DEL SADFP A PARTIR DEL POZO C-70 Y EL SICP -----	57
3.	<i>SELECCIÓN SENSORES</i> -----	58
3.1.	SELECCIÓN DEL SENSOR DE TEMPERATURA -----	58
3.1.1.	SENSOR DE TEMPERATURA DE FIBRA ÓPTICA FISO FOT-M-----	60
3.2.	SELECCIÓN DEL SENSOR DE CORRIENTE -----	66
3.2.1.	SENSOR DE CORRIENTE DE EFECTO HALL CYHCS-D1-50A-----	68
3.3.	SELECCIÓN DEL SENSOR DE TENSION -----	69
3.3.1.	SENSOR DE TENSIÓN DE EFECTO HALL CYHVS100T-----	71
4.	<i>SELECCIÓN DEL MEDIO DE TRANSMISIÓN Y DEL DISPOSITIVO DE CAMPO.</i> -----	73
4.1.	SELECCIÓN DEL MEDIO DE TRANSMISIÓN -----	73
4.1.1.	ESPECIFICACIONES DE LA EXTENCIÓN DE CABLE DE FIBRA ÓPTICA FISO-----	76
4.2.	SELECCIÓN DEL DISPOSITIVO DE CAMPO -----	77
4.2.1.	DISPOSITIVO DE CAMPO COMPACT FIELD POINT-----	78
4.2.2.	MÓDULOS DEL COMPACT FIELD POINT CFP- 2020-----	79

4.2.3.	CONEXIÓN DE LOS MÓDULOS DEL COMPACT FIELD POINT -----	85
5.	<i>INTEGRACIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS EN FONDO Y SUPERFICIE DE POZO (SADFSP). -----</i>	88
5.1.	DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SADFSP -----	88
5.2.	FUNCIONAMIENTO Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA -----	89
5.3.	CARACTERÍSTICAS DEL SADFSP -----	92
5.4.	COSTO TOTAL DEL SADFSP -----	94
5.5.	OBSERVACIONES -----	95
5.6.	CONCLUSIONES -----	97
	<i>BIBLIOGRAFÍA -----</i>	99

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1-1: Viscosidad del petróleo</i>	4
<i>Figura 1-2: Características del Pozo</i>	6
<i>Figura 1-3: Medición de temperatura con técnica de los dos hilos.</i>	9
<i>Figura 1-4: Medición de temperatura con técnica de los 4 hilos.</i>	10
<i>Figura 1-5: Sensor de temperatura de fibra óptica.</i>	13
<i>Figura 1-6: Transformador de corriente.</i>	15
<i>Figura 1-7: Modelo de la bobina Rogowski.</i>	18
<i>Figura 1-8: efecto Hall.</i>	19
<i>Figura 1-9: Representación gráfica del efecto Hall.</i>	19
<i>Figura 1-10: Sensores de efecto Hall</i>	21
<i>Figura 1-11: Funcionamiento del sensor de efecto Hall.</i>	21
<i>Figura 1-12: Sensor de corriente efecto Hall closed loop.</i>	23
<i>Figura 1-13: Circuito equivalente del transformador.</i>	25
<i>Figura 1-14: Divisor de tensión.</i>	26
<i>Figura 1-15: Sensor de tensión de efecto Hall closed loop.</i>	26
<i>Figura 1-16: Configuración de un sensor de tensión de efecto Hall.</i>	27
<i>Figura 1-17: Sensor de tensión de efecto Hall Calibrado.</i>	27
<i>Figura 1-18: Diagrama del cono de aceptación.</i>	31
<i>Figura 1-19: Partes componentes de la fibra óptica.</i>	32
<i>Figura 2-1: Campo Escuela Colorado.</i>	37
<i>Figura 2-2: Localización del Campo Escuela Colorado.</i>	38
<i>Figura 2-3: Cabeza de Pozo C-70 Campo Escuela Colorado.</i>	39
<i>Figura 2-4: Disminución de diámetro en tubing por precipitación de parafinas y asfáltenos.</i>	39
<i>Figura 2-5: Dimensiones pozo C-70.</i>	41
<i>Figura 2-6: Ubicación de sensores en el espacio anular del pozo C-70.</i>	45
<i>Figura 2-7: Variación de viscosidad respecto a la temperatura.</i>	47
<i>Figura 2-8: Configuración de pozo para el sistema Tubing-Casing.</i>	49
<i>Figura 2-9: Vista del sistema tubo de producción como un cable coaxial.</i>	49
<i>Figura 2-11: Vista frontal y superior del sistema de tubos.</i>	54
<i>Figura 2-12: MTE de propagación de campos Eléctrico y Magnético en Pozo.</i>	55

<i>Figura 3-1: Tamaño del sensor de temperatura Fiso FOT-M.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 3-2: Dimensiones del sensor de temperatura FOT-M.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 3-3: Acondicionador de señal UMI 4-LR para sensores de fibra óptica.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 3-4: Diagrama de tiempos de operación del UMI 4-LR en modo automático.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 3-5: Sensor de corriente de efecto Hall CYHCS-D1-50A.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 3-6: Sensor de tensión de efecto Hall CYHVS100T.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 4-1: Adecuación de cable de fibra óptica en tubing para fondo de pozo.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 4-2: Configuración del cable de fibra óptica FISO.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 4-3: Controlador de Automatización programable ‘PAC’ Compact Field Point.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 4-4: Compact Field Point CFP-2020.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 4-5: Interfaz controladora CFP-2020.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 4-6: Características físicas del CFP-2020.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 4-7: Módulo de entrada analógica CFP – AI - 110.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 4-8: Módulo CFP-AI-110 y bloque conector CFP-CB-1.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 4-9: Bloque conector CFP-CB-1.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 4-10: Panel trasero CFP-BP- 4.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 4-11: Fuente de potencia NI PS-5.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 4-12: Conexión de la interfaz controladora en el panel trasero.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 4-13: Conexión del módulo de entrada analógica en el panel trasero.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 4-14: Conexión del bloque conector en el panel trasero.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 5-1: Diagrama de bloques del SADFP.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 5-2: Sistema de adquisición de datos en fondo y superficie de pozo SADFP.....</i>	<i>90</i>

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1-1: Clasificación de los crudos por su gravedad.....</i>	<i>4</i>
<i>Tabla 1-2: Tipos de termocuplas.....</i>	<i>12</i>
<i>Tabla 1-3: Comparativo de los diferentes sensores de temperatura.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 1-4: Características y efectos de las diversas tecnologías de sensores de corriente.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 1-5: Características y efectos de las diversas tecnologías de sensores de tensión.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 1-6: Cuadro comparativo de los medios de transmisión guiados.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 2-1: Características del Pozo C-70 / Campo Escuela Colorado.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 2-2: Curva viscosidad crudo Pozo C-70.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 2-3: Parámetros de impedancia en tubería de pozo C-70.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 2-4: Impedancia total de tubería a distintas frecuencias.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 2-5: Valores de Tensión, Corriente, Impedancia y Potencia aparente a diferentes frecuencias.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 3-1: Cuadro comparativo para selección de sensor temperatura.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 3-2: Características de los sensores de temperatura FOT-M.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 3-3: Especificaciones del UMI 4-LR.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 3-4: Cuadro comparativo para la selección del sensor de corriente.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 3-5: Características del sensor CYHCS-D1-50A.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 3-6: Cuadro comparativo para la selección del sensor de tensión.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 3-7: Características del sensor CYHVS100T.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 4-1: Características del cable de fibra óptica FISO.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 4-2: Características del módulo de entrada analógica CFP-AI-110.....</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 4-3: Resumen de las características de la fuente de potencia NI PS-5.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 4-4: Costos de los módulos CFP para el SADFSP:.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 5-1: Contraste entre los requerimientos mínimos y las características del SADFSP.....</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 5-2: Costos totales para el SADFSP:.....</i>	<i>94</i>

LISTA DE ANEXOS

<i>Anexo A: Viscosidades pozos C/38-70-72-75.....</i>	<i>107</i>
<i>Anexo B: Modelo de impedancia eléctrica para Tubing.....</i>	<i>108</i>
<i>Anexo C: Calculo de impedancia Tubing Casing.....</i>	<i>109</i>
<i>Anexo D: Norma API 5CT ISO 11960.....</i>	<i>110</i>
<i>Anexo E: Proceso de calentamiento en tubería.....</i>	<i>111</i>
<i>Anexo F: Descripción del calentamiento del SICP.....</i>	<i>112</i>
<i>Anexo G: Funcionamiento del sensor de fibra óptica.....</i>	<i>113</i>
<i>Anexo H: Datasheet del sensor FOT-M / FISO.....</i>	<i>114</i>
<i>Anexo I: Datasheet del acondicionador de señal UMI 4-LR.....</i>	<i>115</i>
<i>Anexo J: Informe de FISO.....</i>	<i>116</i>
<i>Anexo K: Datasheet sensor corriente de efecto Hall CYHCS-D1-50A / CHEN YANG.....</i>	<i>117</i>
<i>Anexo L: Datasheet sensor de tensión de efecto Hall CYHVS100T / CHEN YANG.....</i>	<i>118</i>
<i>Anexo M: Datasheet NI CFP 2020 y Labview real-time.....</i>	<i>119</i>
<i>Anexo N: CFP accesorios de entrada-salida.....</i>	<i>120</i>
<i>Anexo O: Módulos CFP para entradas análogas.....</i>	<i>121</i>
<i>Anexo P: Catálogo de CFP.....</i>	<i>122</i>
<i>Anexo Q: Diseño del SICP.....</i>	<i>123</i>

RESUMEN

TÍTULO:

DISEÑO Y ESPECIFICACIÓN DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA FONDO Y SUPERFICIE DE POZO.

AUTORES:

Edison Alexander Ruiz Vaca
Jorge Armando Pérez Vergara

PALABRAS CLAVES: Tensión, Temperatura, Corriente, Tubing, Casing, SICP, SAD, SADFSP, °API.

DESCRIPCIÓN: El objetivo general de este proyecto fue registrar y especificar los equipos para un sistema de adquisición de datos en fondo y superficie de pozo (SADFSP). Este sistema tiene la finalidad de monitorear tres variables: Tensión, Corriente y Temperatura. Dichas variables han de ser utilizadas por un sistema de inyección de corriente (SICP) para efectuar maniobras de control.

El sistema de adquisición de datos propuesto tiene la capacidad de enfrentarse a las condiciones extremas presentes en el ambiente del pozo, también de ser inmune a la alta interferencia electromagnética originada por el (SICP). Además se acondiciona perfectamente a las reducidas dimensiones entre el Tubing y el Casing. Por otra parte debido a que es ineficiente la instalación de repetidores o equipos electrónicos en el interior del pozo, el sistema se ha provisto de un medio de transmisión caracterizado por sus reducidas pérdidas de atenuación, lo cual permite en este caso descartar el uso de estos. El medio de transmisión junto con los sensores sugeridos tiene la capacidad de soportar los esfuerzos mecánicos, así como la capacidad de entregar datos confiables.

La metodología de investigación incluyó el desarrollo individual de cada objetivo de acuerdo a lo planteado en el plan de trabajo, incluyendo una revisión minuciosa del estado del arte al respecto.

En conclusión se propone un sistema robusto, eficiente y confiable, que cumple con todas las condiciones de diseño, capaz de garantizar el monitoreo de sus variables durante el tiempo que dure la vida útil del pozo.

* Proyecto de grado.

** Facultad de ciencias Físico-Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica Electrónica y Telecomunicaciones
Directores: Dr. Hermann Raúl Vargas T. Profesor Titular (UIS).
Ing. Omar Leonardo Peña.

ABSTRACT

TITLE: DATA SYSTEM ACQUISITION DESIGN AND SPECIFICATION FOR BOTTOM AND SURFACE OF WELL.

AUTORS

Edison Alexander Ruiz Vaca
Jorge Armando Pérez Vergara

KEYWORDS: Tension, Temperature, Current, Tubing, Casing, SICP, SAD, SADFSP, °API.

DESCRIPTION: The general aim of this project was to register and to specify the equipments the data acquisition system in bottom and surface of well (SADFSP). This system has the purpose of measure three variables: Tension, Current and Temperature. The above mentioned variables have to be used by a system of injection of current (SICP) for effecting maneuvers of control.

The data acquisition system proposed has the capacity facing to the extreme present conditions in the environment of the well, also of being immune to the high electromagnetic present interference originated by the (SICP). In addition it is conditioned perfectly to the limited and small dimensions between the Tubing and the Casing. On the other hand due to the fact that there is inefficient the installation of repeaters or electronic equipments inside the well, the system has been provided with a conduit characterized by his limited and small losses of extenuation, which allows in this case rejecting the use of these. The conduit together with the suggested sensors has the aptitude to support the mechanical efforts, as well as the aptitude to deliver reliable information.

The methodology of investigation included the individual development of every aim of agreement to the raised in the plan of work, including a meticulous review of the condition of the art in the matter.

In conclusion one proposes a robust, efficient and reliable system, which expires with all the conditions of design, capable of guaranteeing the monitoring of his variables during the time that lasts the useful life of the well .

* Degree project.

** Faculty of Physical & Mechanical Sciences, School of Electrical Engineering.

Advisors: Dr. Hermann Raúl Vargas T. Honored Professor (UIS).

Ing. Omar Leonardo Peña.

GLOSARIO

API:	American Petroleum Institute, formada en 1917. Es una organización sin fines de lucro, que sirve para coordinar y promover el interés de la industria petrolera en su relación con gobiernos y otros.
CASING:	Tubería del mismo diámetro del pozo, actúa para contenerlo evitando que se derrumbe. Posee orificios en la pared en diferentes profundidades a lo largo del yacimiento en los estratos con petróleo.
CORRIENTE:	Es igual a la cantidad de carga que atraviesa una determinada sección de un conductor por unidad de tiempo. Su unidad de medida en el sistema internacional es el Ampere (A).
SAD:	Sistema de Adquisición de Datos.
SADFSP:	Sistema de Adquisición de Datos en Fondo y Superficie de Pozo.
GRADO API:	Clasificación para petróleo con propósitos particulares en función de su densidad.
SICP:	Sistema de Inyección de Corriente.
TEMPERATURA:	Es la energía media de las moléculas que componen una sustancia. Su unidad de medida en el sistema internacional es el grado Celsius (°C).
TENSION:	Diferencia de potencial eléctrico que corresponde al valor de la energía entregada por unidad de carga.
TUBING:	Tubería de producción encargada de transportar el hidrocarburo hasta la superficie.
YACIMIENTO:	Área de superficie bajo la cual existe uno o más reservorios que estén produciendo o que se haya probado que son capaces de producir hidrocarburos.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el acelerado desarrollo de la electrónica ha motivado a que todos los campos de la sociedad estén en la búsqueda de nuevas tecnologías que aporten un mejor desempeño y mayor rentabilidad en sus procesos. La industria petrolífera no ha sido la excepción a la hora de adoptar mejores sistemas para solucionar diversos problemas, tal como ocurre con la extracción de crudos con precipitación de parafinas. En ciertos pozos, la parafina ocasiona taponamientos reduciendo el diámetro efectivo de la tubería de producción, generando así grandes pérdidas económicas. Por tal razón existen investigaciones que buscan diseñar sistemas que permitan reemplazar la forma actual con la que se ataca este problema.

Una de estas investigaciones propone facilitar la extracción de crudos parafínicos, mediante un sistema de calentamiento automático que permite aumentar la temperatura de la tubería de producción y derretir la parafina. Esto implica el control de algunas variables en el pozo de producción. Para realizar el registro de dichas variables se requiere una investigación para especificar el diseño de un sistema de adquisición de datos, siendo el principal objetivo del trabajo. El sistema además debe permitir que las variables sean transmitidas a un dispositivo de campo para el posterior procesamiento del lazo de control.

En el presente trabajo se hará la selección de sensores, medios de transmisión y dispositivos de campo adecuados para las características presentes en el lugar, basados en una investigación del estado del arte en esta área.

1. FUNDAMENTACIÓN TEORICA

Para aquellos lectores que no estén familiarizados con algunos conceptos básicos de electrónica y petróleos, se ha dotado este documento con alguna terminología y teoría necesaria para comprender con mayor facilidad los temas abordados.

1.1. CONCEPTOS SOBRE PETRÓLEO Y POZOS PETROLEROS

1.1.1. EL PETRÓLEO:

La etimología de la palabra petróleo, petro=roca - óleum=aceite, gramaticalmente significa aceite de roca. Este aceite tiene una composición química-orgánica por contener el elemento carbono (C) en sus moléculas, teniendo asociados una extensa variedad de compuestos formados con el hidrógeno (H) denominados hidrocarburos [19]. Los hidrocarburos pueden ser gaseosos, líquidos, semisólidos y sólidos, dependiendo de cómo se presenten en los diversos sitios de la superficie terrestre o en las formaciones geológicas en el subsuelo [1].

El petróleo se encuentra en el subsuelo contenido en rocas madre. Al hablar de reservorio o reservatorio, se imagina una especie de tanque en el cual el petróleo y el gas se encuentran almacenados. La realidad es diferente. Ese reservorio es en general alguna roca porosa de tipo arcilloso o arena [19]. No es un gran agujero vacío. Dentro de la roca madre se puede encontrar petróleo, gas, ya sea natural o carbónico (CO₂), agua, una mezcla total o parcial de los anteriores o nada. Existen acumulaciones que son solo gas. En estado líquido se presentan los petróleos livianos, medianos y pesados. Sin embargo, algunos petróleos pesados y extrapesados tienden a ser semisólidos, o sea de muy poca fluidez o alta viscosidad.

1.1.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL PETRÓLEO:

Todos los petróleos: livianos, medianos, pesados y extrapesados, generalmente llamados crudos en la jerga diaria petrolera, tienen características y propiedades físicas y químicas que a la vista sirven para distinguir y apreciar unos de otros. Otras características tienen que ser determinadas por análisis de laboratorio.

➤ **Densidad:**

Los crudos pueden pesar menos que el agua (livianos y medianos) o tanto o más que ésta (pesados y extrapesados). La densidad, la gravedad específica o los grados API (API es la abreviatura de American Petroleum Institute) denotan la relación correspondiente de peso específico y de fluidez de los crudos con respecto al agua. La industria petrolera internacional adoptó hace ya más de setenta años la fórmula elaborada por el API, el 4 de mayo de 1922, la cual consiste en la modificación de las dos fórmulas que llevan el nombre del químico francés Antoine Baumé (†1804) [1], empleadas para comparar la densidad de líquidos más livianos o más pesados que el agua. La fórmula general del API se muestra en la ecuación (1.1):

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{\text{Gravedad específica(a } 15,5^{\circ}\text{C)}} - 31,5 \quad (1.1)$$

Un crudo de 10 °API tiene la misma gravedad específica que el agua. La clasificación de crudos por rango de gravedad °API utilizada en la industria Colombiana de los hidrocarburos se muestra en la Tabla 1-1.

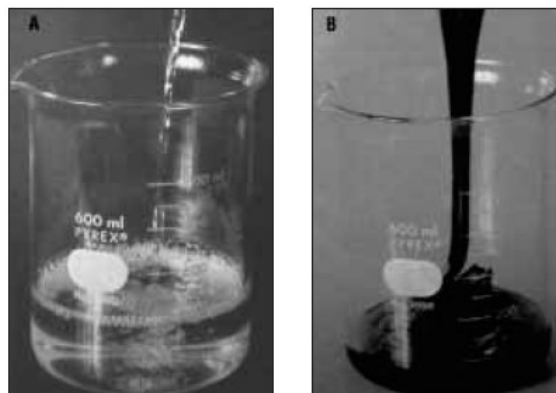
Tabla 1-1: Clasificación de los crudos por su gravedad.

CLASE DE CRUDO	°API
Extrapesados	menos de 9.9°
Pesados	menos de 20 °
Medianos	20,1 - 29,9 °
Livianos	30 ° y más

➤ **Viscosidad:**

La viscosidad, indica la resistencia que opone el crudo al flujo interno (Ver Figura 1-1), se obtiene por varios métodos y se le designa por varios valores de medición. El poise o centipoise (0,01 poise) se define como la fuerza requerida en dinas para mover un plano de un centímetro cuadrado de área, sobre otro de igual área y separado un centímetro de distancia entre sí y con el espacio relleno del líquido investigado, para obtener un desplazamiento de un centímetro en un segundo. Es muy importante el efecto de la temperatura sobre la viscosidad de los crudos, en el yacimiento o en la superficie, especialmente en lo concerniente a crudos pesados y extrapesados [1].

Figura 1-1: Viscosidad del petróleo



Fuente: [1].

➤ **Calor específico:**

Es la cantidad de calor necesaria para aumentar en un grado la temperatura de la unidad de masa de una sustancia. Es de gran importancia en la Ingeniería de Petróleos ya que interviene en todos los cálculos de calentamiento y enfriamiento a que deban ser sometidos los fluidos.

➤ **Punto de nube:**

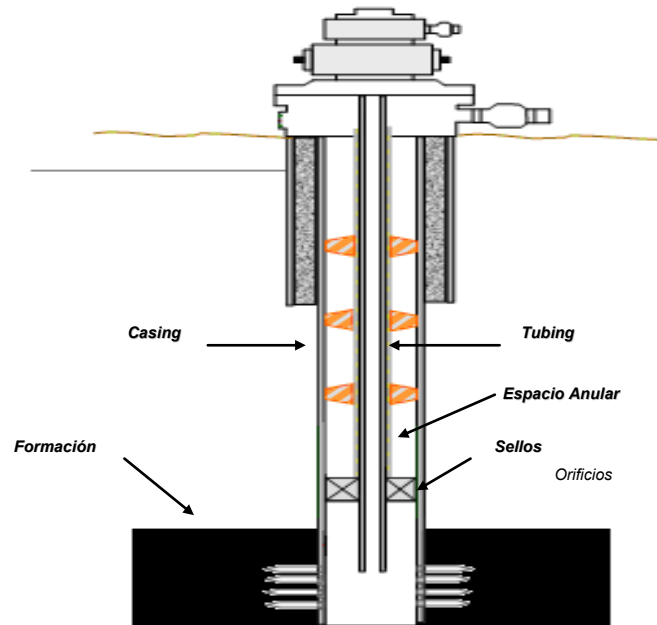
Es la temperatura a la cual aparece el primer cristal de parafina en forma de nube en el líquido cuando es enfriado bajo ciertas condiciones previstas.

1.1.3. POZOS PETROLEROS PRODUCTORES:

Un pozo petrolero clásico consta de dos tuberías concéntricas de diferente diámetro, una que tiene el mismo diámetro del pozo y actúa para contenerlo y que no se derrumbe. Esta tubería se llama Casing, precisamente por encapsular al pozo, la cual a su vez posee orificios en la pared en diferentes profundidades a lo largo del yacimiento en los estratos con petróleo. La segunda es una tubería interna de menor diámetro que se va descendiendo por dentro del Casing. A esta tubería se la llama "Tubing" y será la encargada de transportar el hidrocarburo hacia la superficie. El espacio que queda entre Tubing y Casing se denomina espacio anular. (Ver Figura 1-2).

La estructura del pozo es básicamente la misma en todos los yacimientos que requieran bombeo mecánico, independientemente de si el crudo es pesado o liviano. Lo que puede llegar a cambiar sobremanera es dicho sistema de bombeo.

Figura 1-2: Características del Pozo



1.2. CONCEPTOS BÁSICOS DE INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

➤ MEDICIÓN:

La medición es un valor numérico obtenido experimentalmente como comparación de una magnitud con otra de la misma especie elegida como patrón, con el fin de establecer relaciones deduciendo conclusiones. En realidad no todas las variables son susceptibles de ser medidas directamente, y es necesaria la adecuación de transductores que permitan obtener una relación del fenómeno físico con la unidad patrón, llamándose así mediciones indirectas.

➤ **CAMPO DE MEDIDA (RANGO):**

Espectro o conjunto de los valores de la variable medida que están comprendidos dentro de los límites superior e inferior de la capacidad de medida o de transmisión del instrumento; se expresa estableciendo los dos valores extremos.

➤ **ALCANCE (SPAN):**

Es la diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del campo de medida del instrumento.

➤ **PRECISION (ACCURACY):**

La precisión es la tolerancia de medida o de transmisión del instrumento y define los límites de los errores cometidos cuando el instrumento se emplea en condiciones normales de servicio.

➤ **RESOLUCIÓN:**

Es la mínima cantidad que se puede medir con certeza. Es el significado del dígito menos significativo.

➤ **ERROR:**

Es la diferencia algebraica entre el valor leído o transmitido por el instrumento y el valor real de la variable medida. Si el proceso está en condiciones de régimen permanente existe el llamado error estático. En condiciones dinámicas el error varía considerablemente debido a que los instrumentos tienen características

comunes a los procesos físicos, absorben energía del proceso y esta transferencia requiere tiempo para ser transmitida, lo cual da lugar a retardos en la lectura del aparato. Los errores pueden ser Gruesos, Sistemáticos o Aleatorios.

1.3. MEDIDORES DE TEMPERATURA

La temperatura es la energía media de las moléculas que componen una sustancia. Los átomos y las moléculas no siempre se mueven a la misma velocidad. Esto significa que hay un rango de energías entre ellas. En un gas, por ejemplo, las moléculas se mueven en direcciones aleatorias y a diferentes velocidades. A veces estas moléculas colisionan entre sí. Cuando esto tiene lugar las moléculas que se mueven más deprisa transfieren parte de su energía a las que se mueven más despacio, haciendo que las más rápidas se ralenticen y las más lentas se aceleren. Si se coloca más energía en el sistema, la velocidad media de las moléculas se incrementa, lo que hace que se produzca energía térmica o calor. Por lo tanto, temperaturas altas corresponden a sustancias que tienen un movimiento medio molecular mayor, ya que la temperatura es una medida relativa.

Las escalas que se basan en puntos de referencia deben ser usadas para medir la temperatura con precisión. Hay tres escalas comúnmente usadas actualmente para medir la temperatura: la escala Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$), la escala Celsius ($^{\circ}\text{C}$), y la escala Kelvin (K).

Los transductores de temperatura más empleados en los sistemas de adquisición de datos suelen ser los detectores de temperatura de resistencia (RTD), termistores, sensores de IC¹ y termopares. Existen además, otros sensores de temperatura menos comunes, pero no menos importantes, como son los sensores de fibra óptica. La elección de los transductores de temperatura adecuados y su

¹ Circuito Integrado.

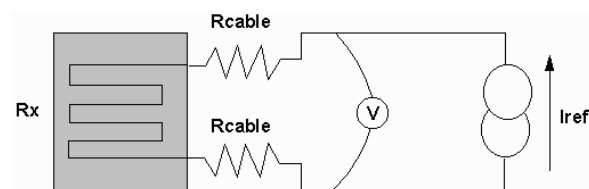
correcta utilización puede marcar la diferencia entre unos resultados equívocos y unas cifras fiables. Por tal razón, en el presente trabajo se dedicará un espacio para la descripción de cada uno de los anteriores y la comparación entre sus características.

1.3.1. DETECTORES DE TEMPERATURA DE RESISTENCIA (RTD):

Este tipo de transductor se basa en el principio según el cual la resistencia de todos los metales depende de la temperatura. Los metales puros poseen un coeficiente de resistencia de temperatura positivo, es decir, la resistencia aumenta con la temperatura, siendo este coeficiente la razón de cambio de resistencia al cambio de temperatura. Los RTD por lo general son de platino, níquel o aleaciones de éste y pueden proporcionar medidas en un rango promedio de -200°C a $+850^{\circ}\text{C}$.

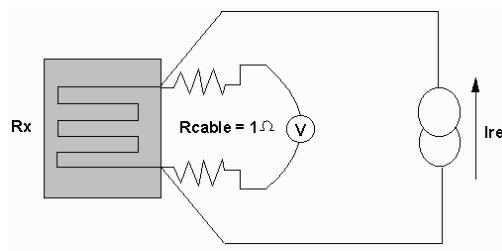
Cuando se utilizan los RTD para medir temperatura, existen varios métodos tales como la técnica de dos hilos (Ver Figura 1-3) y la técnica de cuatro hilos (Ver Figura 1-4). En la primera, la resistencia se mide en los terminales del sistema de adquisición de datos, por lo que la resistencia de los hilos forma parte de la cantidad desconocida que se pretende medir. Por el contrario la segunda técnica mide la resistencia en los terminales del RTD, con lo cual la resistencia de los hilos queda eliminada de la medida. La contrapartida es que se necesita el doble de cables y el doble de canales de adquisición de datos. Es un sensor muy lineal, repetibilidad alta y presentan un error del 0,1% a 1%.

Figura 1-3: Medición de temperatura con técnica de los dos hilos.



Fuente: [15]

Figura 1-4: Medición de temperatura con técnica de los 4 hilos.



Fuente: [15]

1.3.2. TERMISTORES:

Compuestos de una mezcla sintetizada de óxidos metálicos, el termistor es esencialmente un semiconductor que se comporta como un "resistor térmico" con un coeficiente térmico de temperatura negativo de valor muy elevado. Los termistores también se pueden encontrar en el mercado con la denominación NTC² habiendo casos especiales de coeficiente positivo cuando su resistencia aumenta con la temperatura y se los denomina PTC³.

En algunos casos, la resistencia de un termistor a la temperatura ambiente puede disminuir en hasta 6% por cada 1°C de aumento de temperatura. Esta elevada sensibilidad a variaciones de temperatura hace que el termistor resulte muy adecuado para mediciones precisas de temperatura, utilizándose ampliamente para aplicaciones de control.

La relación entre la resistencia y la temperatura viene dada por la ecuación (1.2).

$$R_t = R_0 e^{\beta \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (1.2)$$

² Negative Temperatura Coeficient.

³ Positive Temperatura Coeficient.

Donde:

- ▲ R_t = Resistencia en ohmios a la temperatura absoluta T_s .
- ▲ R_0 = Resistencia en ohmios a la temperatura absoluta de referencia T_0 .
- ▲ β = constante dentro de un intervalo moderado de temperaturas.

Los termistores se conectan a puentes de Wheatstone convencionales o a otros circuitos de medida de resistencia. En intervalos amplios de temperatura, los termistores tienen características no lineales. Al tener un alto coeficiente de temperatura permiten incluso intervalos de medida de 1°C (span). Son de pequeño tamaño y su tiempo de respuesta depende de la capacidad térmica y de la masa del termistor variando de fracciones de segundo a minutos.

1.3.3. SENSORES DE CIRCUITO INTEGRADO IC:

Los sensores de circuitos integrados resuelven el problema de la linealidad y ofrecen altos niveles de rendimiento. Son, además, relativamente económicos y bastante precisos a temperatura ambiente. Sin embargo, los sensores de IC no tienen tantas opciones de configuraciones del producto o de gama de temperaturas, y además son dispositivos activos, por lo que requieren una fuente de alimentación.

Los sensores de IC son transductores cuya inteligencia incorporada facilita las actividades de reducción y análisis de datos que el usuario debe realizar normalmente en el sistema de adquisición de datos.

1.3.4. TERMOCUPLAS:

Este tipo de transductor de temperatura está compuesto de dos hilos de metales diferentes unidos en un extremo y abiertos en el otro. La tensión que pasa por el extremo abierto es función tanto de la temperatura de la unión como de los metales utilizados en los dos hilos. Todos los pares de metales distintos presentan esta tensión, denominada tensión de Seebeck en honor a su descubridor, Thomas Seebeck⁴.

Es posible encontrar en el mercado hasta nueve tipos de termocuplas, diferenciadas unas de otras por los tipos de metales que las constituyen. Esta diferencia se refleja en los rangos de temperatura que pueden medir, por tal razón es importante poder distinguir entre un tipo y otro. Al momento de seleccionarlos para una aplicación específica se les ha designado una letra a cada tipo como se muestra en la Tabla 1-2.

Tabla 1-2: Tipos de termocuplas.

TIPO	MATERIALES	RANGO DE APLICACIÓN (°C)	TENSIÓN DE SALIDA (mV)
B	Platinum 30% Rhodium (+) y Platinum 6% Rhodium (-)	100 – 3270	0,007-13,499
C	W5Re Tungsten 5% Rhenium (+) y W26Re Tungsten 26% Rhenium (-)	3000-4200	-
E	Chromel (+) y Constantan (-)	32 – 1800	0 – 75,12
J	Iron (+) y Constantan (-)	-300 – 1600	-7,52 – 50,05
K	Chromel (+) y Alumel (-)	-300 – 2300	-5,51 – 51,05
N	Nicrosil (+) y Nisil (-)	1200-2300	-
R	Platinum 13% Rhodium (+) y Platinum (-)	32 - 2900	0 – 18,636
S	Platinum 10% Rhodium (+) y Platinum (-)	32 - 2800	0 – 15,979
T	Copper (+) y Constantan (-)	-300 – 750	-5,28 – 20,80

⁴ Físico Alemán descubridor del efecto que lleva su mismo apellido en 1821.

1.3.5. SENSORES DE TEMPERATURA DE FIBRA ÓPTICA:

La aplicación principal de las fibras ópticas se encuentra en el área de telecomunicaciones. Años de investigación y desarrollo han logrado una tecnología firmemente establecida en la que destaca la gran capacidad de este medio, su baja atenuación, y tamaño pequeño respecto a los cables tradicionales. Por otro lado, también están explotándose los beneficios y ventajas de las fibras ópticas en el campo de los sensores, control e instrumentación.

Figura 1-5: Sensor de temperatura de fibra óptica.



Fuente: [25]

El campo de sensores comenzó a extenderse utilizando fibras y componentes que se habían desarrollado para las telecomunicaciones, fibras de baja-atenuación, acopladores, multicanalizadores de longitud de onda, LEDs de alta calidad y fuentes de láseres. En la actualidad, es un campo grande y competitivo en la industria sobre todo en aquellas aplicaciones donde abunda el ruido electromagnético.

Los sensores de temperatura basados en fibra óptica surgen por la necesidad de hacer mediciones en ambientes con presencia de interferencia electromagnética donde los métodos convencionales no funcionan adecuadamente.

Este tipo de sensores utiliza la luz para determinar la temperatura a través de una unidad de acondicionamiento, la cual es de suma importancia ya que se encarga de procesar e interpretar la señal proveniente de los sensores.

1.3.6. COMPARATIVO DE LOS SENSORES DE TEMPERATURA

En la Tabla 1-3 Se muestra algunas de las principales características de las formas expuestas para medir temperatura, las cuales se traducirán en ventajas o desventajas de acuerdo a cual sea la aplicación.

Tabla 1-3: Comparativo de los diferentes sensores de temperatura

	<i>RTD</i>	<i>TERMISTOR</i>	<i>SENSOR DE IC</i>	<i>TERMOCUPLAS</i>	<i>SENSOR F.O.</i>
Características	Precisa fuente de Alimentación.	Precisa fuente de Alimentación.	Precisa fuente de alimentación.	Autoalimentado	Autoalimentado
	Caro.	Económico	Económico	Económico.	Económico.
	Más lineal que los termopares	No lineal.	Lineal	No lineal	Lineal
	Lento.	Lento	Lento	Rápido	Rápido
	Autocalentable	Autocalentable	Autocalentable	No Autocalentable	No Autocalentable
	Débil a IEM	Débil a IEM	Débil a IEM	Débil a IEM	Inmune a IE.
	Grande	Mediano	Pequeño	Mediano	Pequeño
	Respuesta Eléctrica	Respuesta Eléctrica.	Respuesta Eléctrica.	Respuesta Eléctrica	Respuesta óptica.
					Necesita de un instrumento acondicionador de señal que interprete la medida.

1.4. MEDIDORES DE CORRIENTE

Actualmente existen diversas formas de medir corriente, sin embargo no todas son útiles en aplicaciones donde se requiera realizar control de esta variable. A continuación se realizará una descripción de los sensores de corriente más utilizados industria.

1.4.1. SENSORES DE CORRIENTE INDUCTIVOS:

➤ ***Transformadores de corriente:***

Figura 1-6: Transformador de corriente.



Fuente: <http://www.ampere.com>

El transformador de corriente (TC) usa el principio de un transformador para convertir la corriente primaria inducida en una corriente secundaria más pequeña. Es un aparato pasivo que no necesita circuitos adicionales de control. Sin embargo, el material ferrítico empleado en el núcleo se puede saturar cuando la corriente primaria es muy alta o cuando hay un componente importante de DC en la corriente. Una vez magnetizado, el núcleo contendrá histéresis y su precisión se degradará a menos que éste se desmagnetice de nuevo.

Consta de un núcleo magnético, con un bobinado en el secundario, por donde se hace pasar el conductor en el que se quiere medir la corriente induciendo así una corriente en el núcleo que se manifiesta como una tensión en el secundario, ésta tensión es proporcional a la corriente que circula por el cable. Los transformadores de corriente proporcionan además de la medida un aislamiento galvánico.

La no linealidad magnética de los núcleos de los transformadores de medida, impone limitaciones físicas inevitables en los rangos y las clases de medición.

1.4.2. SENSORES DE CORRIENTE RESISTIVOS:

➤ *Shunt:*

De acuerdo con la ley de Ohm, al hacer pasar una corriente por una resistencia, la caída de tensión entre sus extremos es proporcional a ésta. Con este principio se pueden detectar variaciones de la corriente calculando las variaciones en la tensión de una resistencia. Las resistencias “shunt” proporcionan una medición precisa y directa de la corriente, pero no ofrecen ningún aislamiento galvánico.

Es importante seleccionar una resistencia “shunt” apropiada de sensor de corriente. Debe tener un valor muy bajo de resistencia para minimizar la disipación de potencia, un valor bajo de inductancia y una tolerancia razonablemente pequeña para mantener una precisión global en el circuito.

1.4.3. SENSORES DE BOBINA ROGOSWKI:

La bobina Rogowski se basa en medir los cambios del campo magnético que se producen alrededor de un hilo portador de corriente para producir una señal de tensión, la cual es proporcional a la derivada de la corriente (di/dt) para lo cual un

integrador es necesario para convertir este valor a la señal apropiada. La tarea de crear un integrador que fuera estable y exacto durante la larga vida del medidor hasta hace algún tiempo era muy complicado. Sin embargo, la reciente implementación digital del integrador tiene la promesa de convertir esta tecnología en una realidad para los medidores eléctricos.

En la Figura 1-7 se puede apreciar que cuando una corriente $i(t)$ pasa a través de un conductor largo en el eje z , el campo magnético en un punto aleatorio 'p' que tiene las coordenadas (r,q,z) en coordenadas cilíndricas es:

$$\vec{B} = \frac{\mu}{2\pi} \times \frac{i(t)}{\rho} \quad (1.3)$$

La fuerza electromotriz (FEM) generada por el campo magnético en cualquier área en el espacio puede ser calculada empleando la ecuación de Maxwell:

$$FEM = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \bullet \vec{dS} \quad (1.4)$$

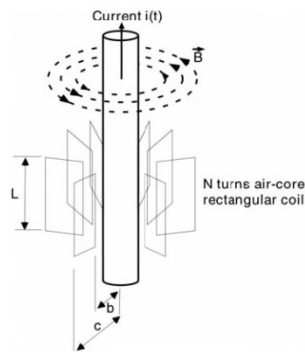
Asumiendo que hay N vueltas en la bobina rectangular con núcleo de aire dispuestas en sentido perpendicular al campo magnético como se muestra en la Figura 1-7, la FEM de la bobina en esta disposición está dada por la ecuación (1.5):

$$FEM = \frac{\mu_{aire} NL}{2\pi} \ln\left(\frac{c}{b}\right) \frac{di}{dt} \quad (1.5)$$

$$V = \mathcal{E}EM = M \frac{di}{dt} \quad (1.6)$$

El término constante M es la inductancia mutua de la bobina Rogowski. Esta indica el nivel de señal de la salida de la bobina por unidad di/dt . La salida de tensión de la bobina depende solamente de los cambios en la corriente primaria (1.6). Cuando se conecta a un circuito integrado con integrador digital incluido en el chip, hacer un medidor con una bobina Rogowski es tan sencillo como usar sensores de corriente como el TC o el shunt. La bobina con núcleo de aire no tiene histéresis, saturación, o problemas de no linealidad. Además, tiene una capacidad extraordinaria para manejar altas corrientes donde el límite superior teórico de la bobina es la tensión de ruptura (breakdown) del mismo aire⁵.

Figura 1-7: Modelo de la bobina Rogowski.



Fuente: [11]

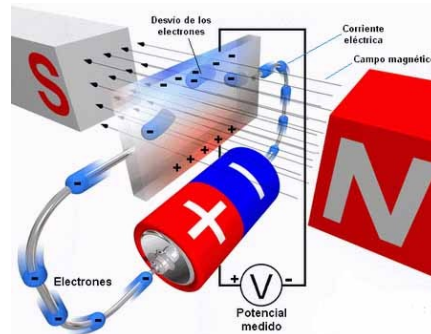
1.4.4. SENSORES DE CORRIENTE MÁGNETICOS:

Este tipo de sensores se basan en el efecto que descubrió el científico Edwin Herbert Hall. Este físico norteamericano ha pasado a la posteridad debido a una singularidad electromagnética que descubrió por causalidad en el curso de un montaje eléctrico: el "efecto Hall".

⁵ Tomado de desarrollos en sensores de corriente de estado sólido en www.analogo.com

▲ **El efecto Hall:**

Figura 1-8: efecto Hall.

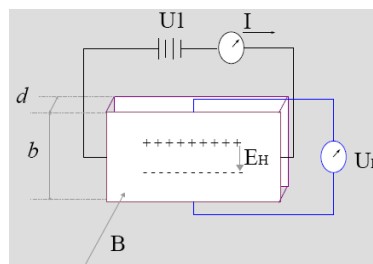


Fuente: [16]

Cuando por un material conductor o semiconductor, circula una corriente eléctrica, estando este mismo material en el seno de un campo magnético, de acuerdo con el efecto de la fuerza de Lorentz, aparece una fuerza magnética en los portadores de carga que los reagrupa dentro del material. Los portadores de carga se desvían y agrupan a un lado del material conductor o semiconductor, apareciendo así un campo eléctrico perpendicular al campo magnético y al propio campo eléctrico generado por la fuente de poder. Este campo eléctrico se denomina campo Hall y ligado a él aparece una diferencia de potencial llamada tensión Hall. El montaje para este fenómeno se puede apreciar en la Figura 1-8.

▲ **Definición cuantitativa del efecto Hall:**

Figura 1-9: Representación gráfica del efecto Hall.



Fuente: <http://www.crmagnetics.com>

Como se puede observar en la Figura 1-9, cuando por un material se hace circular una corriente con una velocidad (v) y al mismo tiempo se le aplica un campo magnético B , aparece una fuerza magnética F_m . Los portadores de carga se agrupan en una región del material, ocasionando la aparición de una tensión U_H , junto con un campo eléctrico E_H en la misma dirección. Este campo ocasiona a su vez la aparición de una fuerza eléctrica F_e con la misma dirección pero sentido opuesto a F_m . Cuando estas dos fuerzas llegan a un estado de equilibrio se describe mediante las siguientes expresiones:

$$F_e = F_m \quad (1.7)$$

$$F_e = I * E_H \quad (1.8)$$

$$E_H = v * B \quad (1.9)$$

$$v * B = U_H / b \quad (1.10)$$

De donde se obtiene finalmente la ecuación (1.11).

$$U_H = v * B * b \quad (1.11)$$

Donde:

U_H = Tensión de Hall.

v = Velocidad de movimiento de los electrones.

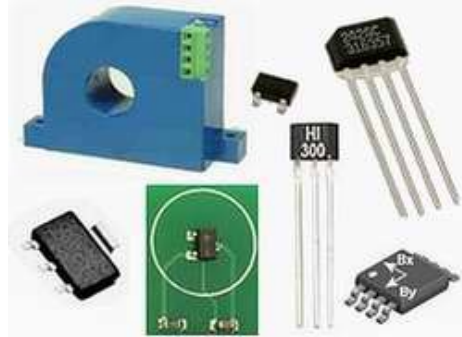
B = Campo magnético.

b = Altura del material.

d = Ancho del material.

➤ **SENSORES DE EFECTO HALL:**

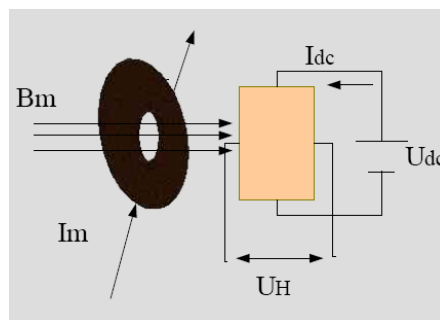
Figura 1-10: Sensores de efecto Hall



Fuente: <http://robotsargentina.htm>

Estos sensores se pueden utilizar tanto para corriente alterna como para corriente continua. La corriente ocasiona un campo magnético en el cual se posiciona un dispositivo Hall, un semiconductor de un tipo específicamente seleccionado para este uso en función al factor de Hall del material. Dentro de la sonda se produce un campo eléctrico que se sitúa transversalmente a la corriente de excitación que pasa a través de él y que es transversal con el campo magnético. La tensión de salida es proporcional al campo magnético, con una corriente de excitación constante.

Figura 1-11: Funcionamiento del sensor de efecto Hall.



Fuente: <http://www.crmagnetics.com>

El campo magnético se genera usualmente mediante un núcleo toroidal ferromagnético con entrehierro por el que circula el conductor que transporta la corriente a medir de acuerdo con.

$$B = \mu_0 n I_m \quad (1.12)$$

$$I_m = \frac{U_H}{R_H} \frac{1}{q n v b d} \quad (1.13)$$

Donde:

B_m = Campo magnético

I_m = Corriente a ser determinada.

μ_0 = Permeabilidad magnética del núcleo en la bobina de medición.

q = Carga de un electrón: $1,6 \cdot 10^{-19}$ Culombs.

n = Número de electrones por unidad de volumen.

v = Velocidad de movimiento de los electrones.

b = Altura del material.

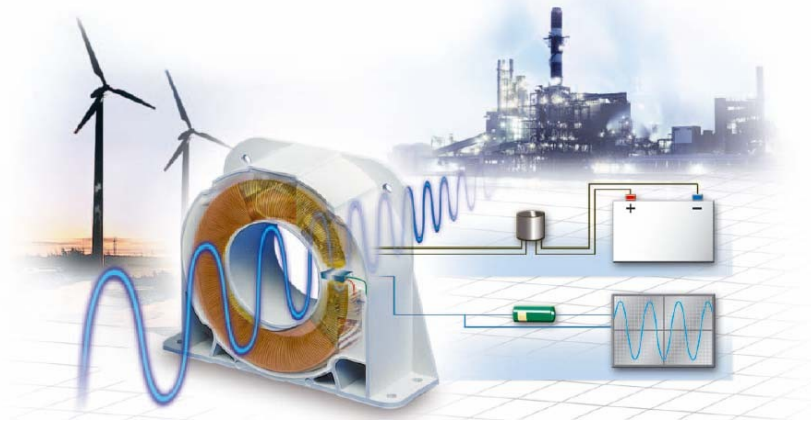
d = Ancho del material.

Combinando las expresiones (1.12) y (1.13) en la ecuación (1.11), se obtiene finalmente que la corriente medida por un sensor de efecto Hall está dada por (1.14):

$$I_m = \frac{U_H q d}{R_H \mu_0} \quad (1.14)$$

Siendo datos conocidos la carga del electrón 'q', la tensión U_H , la corriente de excitación de la sonda Hall I_{dc} , el ancho 'd' del material y la permeabilidad magnética del núcleo de la bobina de medición μ_0 .

Figura 1-12: Sensor de corriente efecto Hall closed loop.



Fuente: <http://www.abb.com/ProductGuide>.

Existen dos tipos principales de sensores de efecto Hall, anillo abierto (open-loop) y anillo cerrado (closed-loop). El segundo ofrece mejor precisión y rangos dinámicos más amplios pero a un costo mayor. El sensor de efecto Hall tiene una excelente respuesta a la frecuencia y está capacitado para medir corrientes muy altas. Sin embargo, las desventajas incluyen un resultado con alta deriva por temperatura. Esto, adicionado al relativo alto costo, hace que los sensores de efecto Hall sean de uso limitado en la industria.

1.4.5. COMPARATIVO DE LOS SENSORES DE CORRIENTE:

En la Tabla 1-4 se realiza una comparación de los sensores más utilizados para medir corriente, resaltando factores como costo, consumo de potencia, desacoplamiento eléctrico y capacidad de medición en un rango de frecuencias variables, lo cual permite establecer la opción más viable a la hora de seleccionarlos para una aplicación específica.

Tabla 1-4: Características y efectos de las diversas tecnologías de sensores de corriente

SENSOR DE CORRIENTE	CARACTERÍSTICAS	EFFECTOS
Shunt	De 100 - 500 $\mu\Omega$ Bajo costo. Inmune al problema de saturación DC. No está aislado. Buena linealidad. No útiles para grandes corrientes.	Alta disipación de potencia en forma de calor. Necesidad de aislamiento galvánico.
Transformador de Corriente	Capacidad de medir altas corrientes. Baja disipación comparada con la del shunt. Proporciona aislamiento. Tiene problemas de saturación DC	Un desfase de 0.1° Produce un error en la medición.
Bobina Rogowski	Tiene todas las ventajas del transformador de corriente, pero es más barato. Necesita un integrador. Inmune a saturación DC. Buena linealidad y bajo consumo	Es difícil tener un integrador que sea muy estable con el tiempo.
Efecto Hall	Costo alto, linealidad media, pero buenos para altas corrientes. Permiten mediciones en un rango de frecuencias.	Consumo medio. Variación alta con la temperatura.

1.5. MEDIDORES DE TENSIÓN

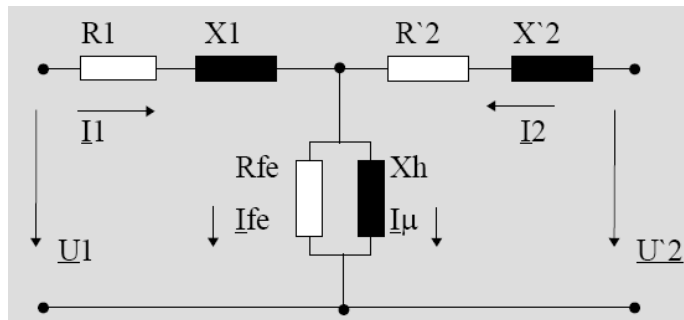
1.5.1. TRANSFORMADOR DE TENSIÓN:

El transformador de tensión es el dispositivo más empleado como sensor de tensión en corriente alterna, sobre todo en circuitos de distribución eléctrica. Este reduce la tensión elevada de entrada a una tensión inferior en el lado secundario.

El punto principal a tener en cuenta es que el secundario debe estar conectado a una impedancia de valor alto, de modo que la corriente del secundario sea la menor posible. El error en esta medición se ve afectado tanto por el efecto de la corriente del secundario como de magnetización.

Para el minimizar el error, el valor de estas debe ser el menor posible. El circuito equivalente del transformador se muestra en la Figura 1-13.

Figura 1-13: Circuito equivalente del transformador.



Fuente: <http://www.crmagnetics.com>

Del circuito mostrado se deduce que si:

$$I_0 = I_{fe} + I_{\mu} \quad (1.15)$$

Suponiendo que I_2 es aproximadamente cero, entonces:

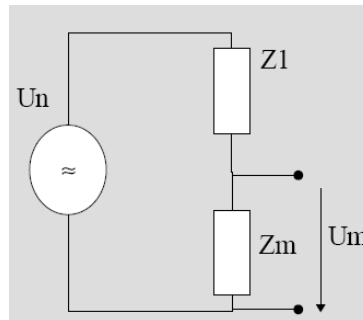
$$I_0 \approx I_1 \quad (1.16)$$

Por lo tanto U_2 sólo se verá afectada por la caída de tensión propia de la impedancia del primario.

1.5.2. DIVISOR DE TENSIÓN:

Otro método para sensar tensión eléctrica, pero en baja potencia, es el método de divisor de tensión, el cual consiste en dos impedancias conectadas en serie con sus terminales extremos conectados a la fuente de tensión tal como se muestra en la Figura 1-14.

Figura 1-14: Divisor de tensión.



Fuente: <http://www.crmagnetics.com>

De lo que se deduce por la ley de tensiones de Kirchhoff y la ley de Ohm la ecuación (1.17)

$$U_m = \frac{U_n * Z_m}{Z_m + Z_n} \quad (1.17)$$

El divisor de tensión entrega una señal proporcional a la tensión primaria fase - tierra. Las principales ventajas de esta medición son las buenas características en lo inherente a las condiciones de gran rango dinámico y alta linealidad.

1.5.3. SENSOR DE TENSIÓN DE EFECTO HALL:

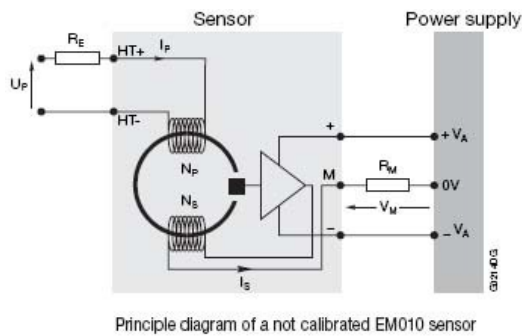
Figura 1-15: Sensor de tensión de efecto Hall closed loop.



Fuente: <http://www.abb.com/ProductGuide>.

Este sensor funciona de la misma manera descrita en la sección 1.4.4, además tiene las mismas características que el sensor de corriente. Tan solo cambia que se agrega una resistencia ' R_E ' de compensación y alguna electrónica interna para establecer una relación exacta entre la tensión y la corriente, tal como se observa en la Figura 1-16.

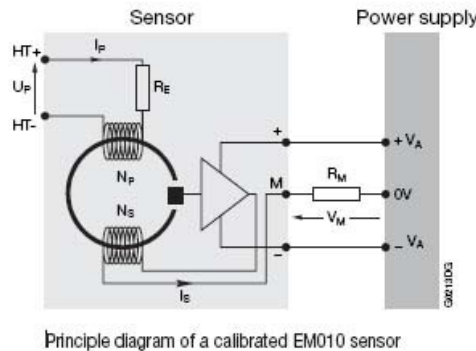
Figura 1-16: Configuración de un sensor de tensión de efecto Hall.



Fuente: <http://www.abb.com/ProductGuide>.

Existen en el mercado sensores que ya traen internamente la resistencia de compensación (Ver Figura 1-17), los cuales se denominan sensores calibrados.

Figura 1-17: Sensor de tensión de efecto Hall Calibrado.



Fuente: <http://www.abb.com/ProductGuide>.

De acuerdo con lo anterior la tensión medida por un sensor de efecto Hall está dada por la ecuación (1.17):

$$V_m = \frac{U_h * q * d}{I_{dc} * \mu_0} * R_E \quad (1.17)$$

Siendo datos conocidos la carga del electrón 'q', la tensión U_h , la corriente de excitación de la sonda Hall I_{dc} , el ancho 'd' del material, la permeabilidad magnética del núcleo de la bobina de medición μ_0 , y la resistencia de compensación R_E .

1.5.4. COMPARATIVO DE LOS SENSORES DE TENSIÓN:

En la Tabla 1-5 se realiza una comparación de los sensores más utilizados para monitorear tensión, resaltando factores como costo, consumo de potencia, desacoplamiento eléctrico y capacidad de medición en un rango de frecuencias variables, que permitan establecer cuál es la opción más viable a la hora de seleccionarlos para una aplicación específica.

Tabla 1-5: Características y efectos de las diversas tecnologías de sensores de tensión.

SENSOR DE TENSIÓN	CARACTERÍSTICAS	EFFECTOS
Divisor de tensión	Bajo costo. Inmune al problema de saturación DC. No proporciona desacoplamiento eléctrico. Buena linealidad. No útil para grandes tensiones.	Alta disipación de potencia en forma de calor.
Transformador de Tensión	Capacidad de medir altas tensiones. Baja disipación comparada con el divisor de tensión. Proporciona desacoplamiento eléctrico. Tiene problemas de saturación DC	Un desfase de 0.1° Produce un error en la facturación. No permite mediciones en un rango de frecuencias variable.
Efecto Hall	Son más caros, linealidad media, pero buenos para altas tensiones. Permiten mediciones en un rango de frecuencias variable. Proporciona desacoplamiento eléctrico.	Consumo medio. Variación alta con la temperatura.

1.6. MEDIOS DE TRANSMISIÓN

En los sistemas de transmisión de datos, el medio de transmisión es el camino físico entre el transmisor y el receptor. Los medios de transmisión se clasifican en guiados y no guiados. En ambos casos, la comunicación se lleva a cabo con ondas electromagnéticas.

1.6.1. MEDIOS DE TRANSMISIÓN NO GUIADOS:

La atmósfera o el espacio exterior son ejemplos de medios no guiados, que proporcionan un camino para la transmisión de las señales pero sin confinarlas; esto se denomina transmisión inalámbrica.

En medios no guiados, tanto la transmisión como la recepción se llevan a cabo mediante antenas, unas que radian energía al medio (generalmente aire) y otras que captan las ondas del medio que la rodean, hay dos tipos de configuraciones para la transmisión, la direccional y omnidireccional. En la primera, la antena transmisora concentra toda la energía en un haz que se emite hasta otra antena perfectamente alineada. En el caso omnidireccional, la energía es radiada en todas las direcciones pudiendo la señal ser recibida por varias antenas.

1.6.2. MEDIOS DE TRANSMISIÓN GUIADOS:

En los medios de transmisión guiados, la capacidad de transmisión, en términos del ancho de banda, depende drásticamente de la distancia y de si el medio se usa para un enlace punto a punto o por el contrario para enlace multipunto.

Hoy día se pueden destacar tres medios guiados o cables, por su uso común y por su proyección.

➤ **Par trenzado:**

Consiste en hilos de cobre aislados por una cubierta plástica y torzonada entre sí. Debido a que puede haber acoples entre pares, estos se trenzan con pasos diferentes. La utilización del trenzado tiende a disminuir la interferencia electromagnética.

Este tipo de medio es el más utilizado debido a su bajo costo (se utiliza mucho en telefonía) pero su inconveniente principal es su corta distancia de alcance.

Hay dos tipos de cables de par trenzado: cable de par trenzado sin apantallar (UTP) y par trenzado apantallado (STP).

➤ **Cable Coaxial:**

Consiste en un cable conductor interno (cilíndrico) separado de otro cable conductor externo por anillos aislantes o por un aislante macizo. Todo esto se recubre por otra capa aislante que es la funda del cable.

Este cable, aunque es más caro que el par trenzado, se puede utilizar a más larga distancia, con velocidades de transmisión superiores, menos interferencias y permite conectar más estaciones. Se suele utilizar para televisión, telefonía a larga distancia, redes de área local, conexión de periféricos a corta distancia, etc. Se utiliza para transmitir señales analógicas o digitales. Sus inconvenientes principales son: atenuación, ruido térmico, ruido de intermodulación.

Para señales analógicas se necesita un amplificador cada pocos kilómetros y para señales digitales un repetidor cada kilómetro.

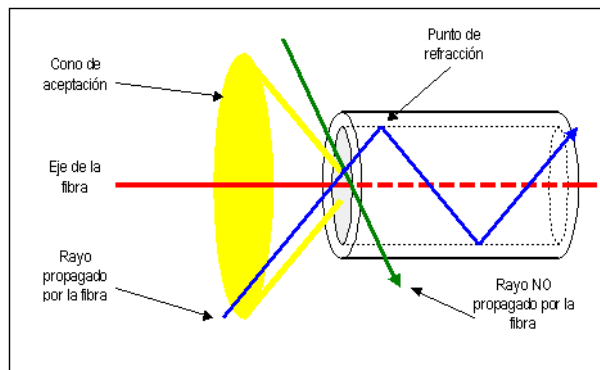
➤ **Fibra Óptica:**

La fibra óptica es un sistema de transmisión de información que se hace a través de un filamento de vidrio o plástico de diámetro aproximadamente igual al de un cabello (entre 50 a 125 micras) al cual se le hace un revestimiento especial, con ciertas características para transmitir señales de luz a través de largas distancias.

Las fibras ópticas funcionan gracias al principio de la reflexión total interna, que se da debido a que la fibra o núcleo tiene un cierto índice de refracción superado por el del revestimiento. Por lo tanto el rayo de luz al desplazarse a través de la fibra choca sucesivamente con la pared de ésta.

Los rayos de luz pueden entrar a la fibra óptica si el rayo se halla contenido dentro de un cierto ángulo denominado cono de aceptación (Ver Figura 1-18). Un rayo de luz puede perfectamente no ser transportado por la fibra óptica si no cumple con el requisito del cono de aceptación. El cono de aceptación está directamente asociado a los materiales con los cuales la fibra óptica ha sido construida.

Figura 1-18: Diagrama del cono de aceptación.

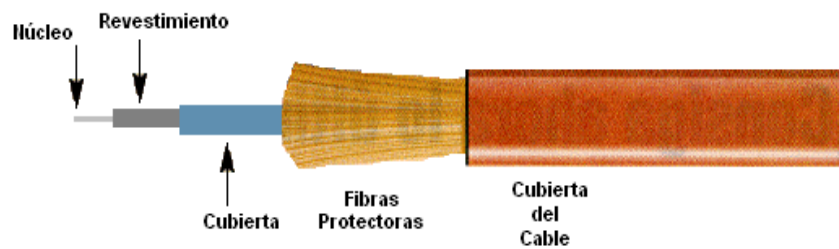


Fuente: <http://www.howstuffworks.com/fiber-optic3.htm>

Para que este filamento de vidrio transporte información se necesitan, en los extremos de este, dispositivos electrónicos que de un lado envíen pulsos en forma

de rayos de luz, y del otro lado haya un interpretador de esta información que reciba y decodifique la señal. En algunos casos es necesario un regenerador óptico cuando la señal se transmite a grandes distancias, adecuado en el punto donde la señal pierde intensidad [9].

Figura 1-19: Partes componentes de la fibra óptica.



Fuente: [26]

Un cable de fibra óptica tiene forma cilíndrica y está formado básicamente por tres secciones concéntricas: el núcleo, el revestimiento y la cubierta. El núcleo es la sección más interna, está constituido por una o varias hebras o fibras muy finas de cristal o plástico y tiene un diámetro entre 8 y 100 micrómetros. Cada fibra está rodeada por su propio revestimiento, que no es sino otro cristal o plástico con propiedades ópticas distintas a las del núcleo. La separación entre el núcleo y el revestimiento actúa como un reflector perfecto confinando el haz de luz que de otra manera escaparía del núcleo. La capa más externa que envuelve a uno o varios revestimientos es la cubierta. La cubierta está hecha de plástico y otros materiales dispuestos en capa para proporcionar protección contra humedad, la absorción, aplastamientos y otros peligros.

1.6.3. COMPARATIVO DE LOS MEDIOS DE TRANSMISIÓN GUIADOS:

Son muchas las ventajas del cable de fibra óptica, en comparación con el par trenzado y el cable coaxial, entre ellas encontramos las siguientes:

- ⤴ **Inmunidad al ruido e interferencias:** Por ser un medio dieléctrico posee una característica muy positiva en muchas aplicaciones, sobre todo cuando el cable debe pasar por zonas donde hay instalaciones de alta tensión.
- ⤴ **Seguridad:** La información que viaja por la fibra no se puede detectar, aunque si interceptar, porque la luz no es sensible a ningún fenómeno de tipo inductivo por la especial configuración que tiene.
- ⤴ **Dimensiones:** La fibra presenta unas dimensiones más reducidas que los medios preexistentes, lo que se traduce en economía de transporte. Un cable de 10 fibras tiene un diámetro aproximado de 8 o 10 mm y proporciona la misma o más información que un coaxial de 10 tubos. Resulta, por tanto, que el número de enlaces por circuito por unidad de volumen ocupado es muy superior en la fibra que en un coaxial.
- ⤴ **Peso:** El peso del cable de fibras ópticas es muy inferior al de los cables metálicos, redundando en facilidad de instalación (aproximadamente 50 a 200 Kg por Km, y las bobinas pueden ser de una longitud que va de 2 a 6 Km, mientras que en el cable coaxial son de unos 300 m).

Por otra parte la materia prima para fabricarla es abundante en la naturaleza, el ancho de banda es elevado, la velocidad de transmisión alta y por último, posee menor atenuación que los otros medios guiados, los cuales están actualmente altamente difundidos gracias a su bajo costo y fácil manipulación.

En la Tabla 1-8 se muestra un cuadro comparativo entre los distintos medios de transmisión guiados.

Tabla 1-6: Cuadro comparativo de los medios de transmisión guiados.

MEDIO DE TRANSMISIÓN	OBSERVACIONES
Par Trenzado	Bajo costo, alta interferencia y ruidos.
Cable Coaxial	Resistente a ruidos e interferencias, alta atenuación
Fibra Óptica	Tamaño y peso pequeño, inmune a ruidos e interferencias, baja atenuación, costosas y de delicada manipulación.

1.7. SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS (SAD)

Un Sistema de Adquisición de Datos (SAD) es un equipo electrónico cuya función es registrar una o varias variables en un proceso determinado. Con los datos entregados por estos sistemas es posible efectuar maniobras de control. Los SAD integran diferentes elementos entre los cuales pueden estar: Transductores, multiplexores, amplificadores, conversores análogos digitales (A/D) y/ó digitales análogos (D/A), microcontroladores, Controladores Lógicos Programables (PLC), Controladores Automatas Programables (PACS), temporizadores, y puertos de comunicación. También pueden hacer uso de memorias y puertos externos creando con todo ello un sistema que se encargue de una aplicación específica.

El SAD debe tener una estructura y organización muy equilibrada que le permita su buen funcionamiento, por ende se debe tener especial cuidado en la selección de cada uno de los elementos que lo componen.

1.7.1. ELEMENTOS DE LOS SISTEMAS DE ADQUISICION DE DATOS:

➤ **Sensores o Transductores:**

Los sensores son los elementos primarios ya que se encuentran en contacto directo con la variable. Tienen la función de convertir la variable física que se desea registrar en una magnitud eléctrica (tensión, corriente, resistencia, capacitancia, inductancia, etc.). Entre las magnitudes físicas de nuestro interés están: temperatura, tensión y corriente. Existen varios tipos de sensores así como varios principios de funcionamiento, dichas características determinan la aplicabilidad de este.

➤ **Transmisores:**

Transmiten la variable desde los sensores hasta el receptor ya sea en forma de señal neumática o eléctrica digital u óptica.

➤ **Receptores:**

Reciben la señal procedente de los transmisores y la indican, registran o controlan.

2. CARACTERÍSTICAS DEL POZO Y ESPECIFICACIONES REQUERIDAS POR EL SICP RELEVANTES PARA EL DISEÑO DEL SADFSP

El monitoreo en fondo y superficie para el control de calentamiento de pozos requiere de sistemas confiables, ya que de éstos depende el correcto registro y procesamiento de las variables de interés. Por esta razón, es necesario conocer las condiciones de trabajo y funciones que el sistema de adquisición debe afrontar. Dichas condiciones y funciones varían acorde a las características del pozo, así como de los requerimientos del sistema de calentamiento.

Para establecer los parámetros de diseños del SADFSP, es necesario conocer tanto las características del pozo de producción, como los requerimientos relevantes del SICP. Por tanto se ha optado por utilizar un pozo de producción modelo, del cual se pueda conocer las características y aprovecharlas para definir conceptualmente los requerimientos del SICP. Tener acceso a dicha información es complicado, pues las empresas la protegen en forma legal limitando el uso de la misma. Por fortuna existe el convenio interadministrativo de cooperación empresarial con fines científicos y tecnológicos Campo Escuela Colorado UIS – ECOPETROL.

En la medida que avanza el capítulo se irá abordando la descripción de las características del pozo modelo, así como los requerimientos del SICP.

2.1. CARACTERIZACIÓN DE POZO MODELO COLOMBIANO PARA DISEÑO DEL (SADFSP):

2.1.1. DESCRIPCIÓN DE CAMPO ESCUELA COLORADO:

Figura 2-1: Campo Escuela Colorado.



Fuente: <http://www.uis.edu.co/campoescuela>

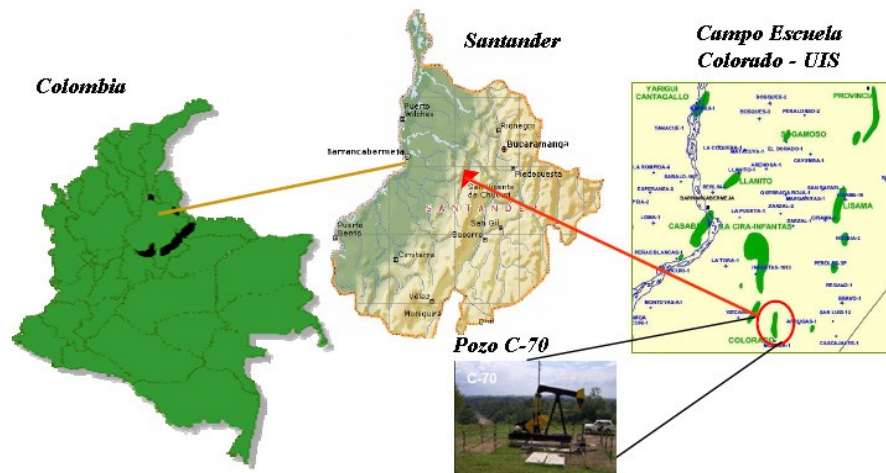
Campo Escuela Colorado es una unidad académico administrativa de carácter científico, tecnológico y de operación de hidrocarburos, creada para poner en funcionamiento el convenio de cooperación empresarial con fines científicos y tecnológicos suscrito entre la Universidad Industrial de Santander y ECOPETROL S.A⁶. El principal objetivo de este convenio es que la universidad incorpore un componente práctico a su oferta académica, y que la industria petrolera nacional

⁶ El convenio fue firmado por las partes en el año 2006, donde se manifestaba que la compañía estatal petrolera hacía entrega a la UIS del Campo Colorado.

disponga de un laboratorio para la experimentación y desarrollo de nuevas tecnologías orientadas a aumentar la producción del país [2].

El Campo Escuela Colorado está localizado geográficamente en la Vereda Los Colorados, Corregimiento de Yarima, en el Municipio de San Vicente de Chucurí, Departamento de Santander (Ver Figura 2-2).

Figura 2-2: Localización del Campo Escuela Colorado.



Fuente: Modificado de <http://www.uis.edu.co/campoescuela>.

El Campo Colorado se desarrollo completamente entre los años de 1953 y 1964 en donde se perforaron la mayoría de los pozos, alrededor de unos 60, con lo cual se aumento a 75 el total de pozos perforados en la estructura. De los 75 pozos perforados, 33 están abandonados, 34 están inactivos y 7 son activos. Actualmente solo dos pozos registran producción (C-38 y C-70). Los 5 restantes se encuentran en cierre temporal [2].

2.1.2. DESCRIPCIÓN DEL POZO C-70:

Figura 2-3: Cabeza de Pozo C-70 Campo Escuela Colorado.



Fuente: <http://www.uis.edu.co/campoescuela>

De los dos pozos que actualmente producen, el que más puede beneficiarse a futuro del SICP y el SADFSP indudablemente es el C-70. En este pozo uno de los mayores problemas operativos desde el inicio de su vida productiva, ha sido la precipitación de parafina en la tubería de producción debido a las características del crudo.

Figura 2-4: Disminución de diámetro en tubing por precipitación de parafinas y asfáltenos.



Fuente: <http://www.ppsa-online.com/papers/2006-Aberdeen-1-Tordal.pdf>

Como se muestra en la Figura 2-4, la precipitación de parafina reduce el diámetro de la tubería de producción. Hecho que se traduce en taponamientos, disminución de la producción y grandes pérdidas económicas.

Este problema puede atacarse con el SICP, ya que al calentar el tubing se consigue una disminución de la viscosidad, a tal punto que la parafina llegue a fluir fácilmente por la tubería de producción para ser extraída del pozo. Tener un SICP implica que exista un SADFSP para monitorear las variables. Por esta razón se ha escogido el C-70 como pozo modelo para realizar el diseño conceptual del SADFSP. Sus características se resumen en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Características del Pozo C-70 / Campo Escuela Colorado.

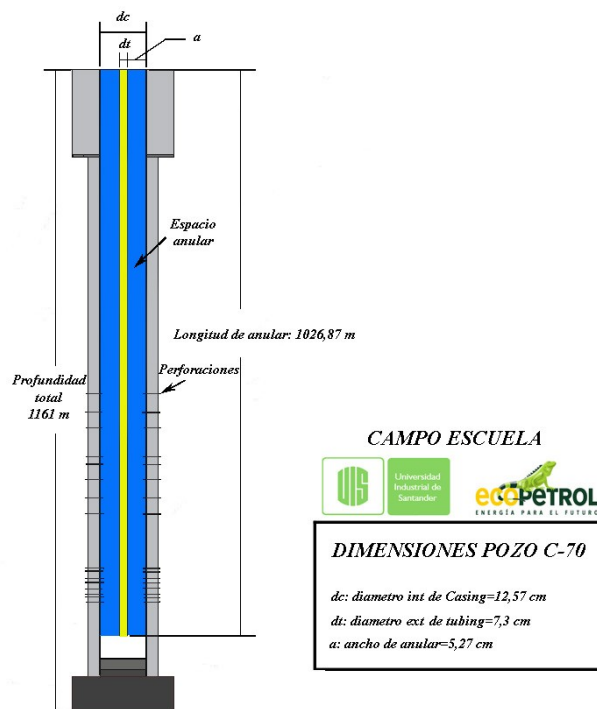
<i>DESCRIPCIÓN DEL POZO C - 70 CAMPO ESCUELA COLORADO</i>	
TEMPERATURA CABEZA DE POZO	37,77 °C
TEMPERATURA FONDO DE POZO	48,88 °C
PROFUNDIDAD TOTAL (aprox)	1051,56 m - (3450 Pies)
LONGITUD DEL TUBING	1026,87 m - (3369 Pies)
PRESIÓN A 1000 PIES	15,8 PSI
PRESIÓN DE FONDO FLUYENDO	280 PSI
DIAMETRO INTERNO TUBING	6,8 cm - (2,675")
DIAMETRO EXTERNO TUBING	7,3 cm -(2,875")
DIAMETRO INTERNO CASING	12,57 cm - (4,950")
DIAMETRO EXTERNO CASING	13,97 cm -(5,5")
ANCHO DE ESPACIO ANULAR (\varnothing int Casing – \varnothing ext tubing)	5,27 cm (2,07")

Fuente: Tomado de Well Files Col-70.

2.1.3. CARACTERÍSTICAS RELEVANTES DEL POZO C-70 PARA DISEÑO DEL SADFSP:

- **DIMENSIONES DEL ESPACIO ANULAR:**

Figura 2-5: Dimensiones pozo C-70.



El espacio anular comprende la zona entre la tubería de producción y el Casing. En la Figura 2-5 se representa por la región sombreada en azul. Sus dimensiones están dadas por la longitud del tubing junto con el ancho comprendido entre el diámetro interno del Casing y el diámetro externo del tubing⁷.

El espacio anular se considera como la zona ideal para la ubicación de los sensores en el fondo del pozo, ya que la cantidad de sustancias con las que entraran en contacto es mucho menor que en el interior de la tubería de

⁷ Las medidas de estas tuberías vienen dadas según la norma API 5 CT 8ª EDICIÓN/ISO 11960 3ª EDICION

producción, donde además se afecta el espacio efectivo de circulación del crudo disminuyendo el volumen de extracción.

Hay que tener en cuenta que las reducidas dimensiones del espacio anular se convierten en un factor altamente restrictivo para el diseño conceptual del SADFSP. Como se puede ver en la Figura 2-5, tan solo se dispone de 5,27 cm (2,07 Pulgadas) para adecuar los dispositivos. Además los 1026,87 m de longitud del tubing representan un desafío para el medio de transmisión en lo que a pérdidas por atenuación respecta. Con las limitaciones de espacio mencionadas es muy complicada la instalación de repetidores, amplificadores o dispositivos electrónicos en general. Por otra parte en el anular hay también presencia de crudo y gas, lo cual asocia una presión.

Teniendo en cuenta lo anterior se define que el medio de transmisión debe entregar registros confiables a 1526 m (incluyendo 500 m para la distancia de la cabeza del pozo al cuarto de control) sin acoples ni repetidores dentro del pozo. El medio de transmisión junto con el sensor de temperatura deben estar en capacidad de soportar la presión de fondo fluyendo de 280 PSI, la cual está asociada a los efectos de succión de la bomba de extracción y corresponde a las características del pozo C-70 tal como se muestra en la Tabla 2-1. Además ninguno de ellos puede superar el ancho del espacio anular.

GRADIENTE DE TEMPERATURA:

La temperatura en el pozo está en función de la profundidad como se muestra en la ecuación (2.1). El gradiente de temperatura generalmente se expresa en 1°C por ciento del intervalo constante de profundidad (ver ecuación (2.2)). Mientras más profundo esté el yacimiento, mayor la temperatura.

$$T_{\text{yacimiento}} = \Delta' \times P + T_{\text{Ambiente}} \quad (2.1)$$

Donde:

Δ' = *Gradiente de temperatura.*

P = *Profundidad del yacimiento.*

$$\Delta' = \frac{10^{\circ}\text{C}}{I_{cp}} \quad (2.2)$$

Donde I_{cp} = Intervalo constante de profundidad.

El conocimiento del gradiente de temperatura es importante para el diseño conceptual del SADFSP, ya que por medio de este se puede conocer teóricamente la temperatura en cualquier punto del tubing. El valor del gradiente de temperatura se puede determinar experimentalmente con la ayuda de dos sensores, uno ubicado en la parte superior del tubing (0m) y otro en la parte inferior del mismo (1026 m):

$$\Delta'_{\text{exp}} = \frac{T_{\text{sup}}}{T_{\text{inf}} \times P_{\text{inf}}} \quad (2.3)$$

Donde:

Δ'_{exp} = *Gradiente de temperatura experimental.*

T_{sup} = *Temperatura registrada por el sensor superior.*

T_{inf} = *Temperatura registrada por el sensor inferior.*

P_{inf} = *Profundidad de ubicación del sensor inferior.*

Se puede decir en teoría que con solo dos sensores se puede conocer la temperatura en cualquier parte del tubing, pero para garantizar un sistema más

confiable es mejor contar con la ayuda de un tercer sensor. Este medidor ubicado en la mitad del tubing (513 m) permitirá comparar el valor teórico de la temperatura en ese punto con el valor real. Gracias a lo anterior se puede hacer una correlación para reajustar el valor experimental del gradiente de temperatura (Δ'_{reajs}). En síntesis se puede conocer el valor de temperatura en un punto dado del tubing mediante la expresión (2,4):

$$T_{pd} = \Delta'_{reajs} \times P_{pd} + T_{sup} \quad (2.4)$$

Donde:

Δ'_{reajs} = *Gradiente de temperatura reajustado.*

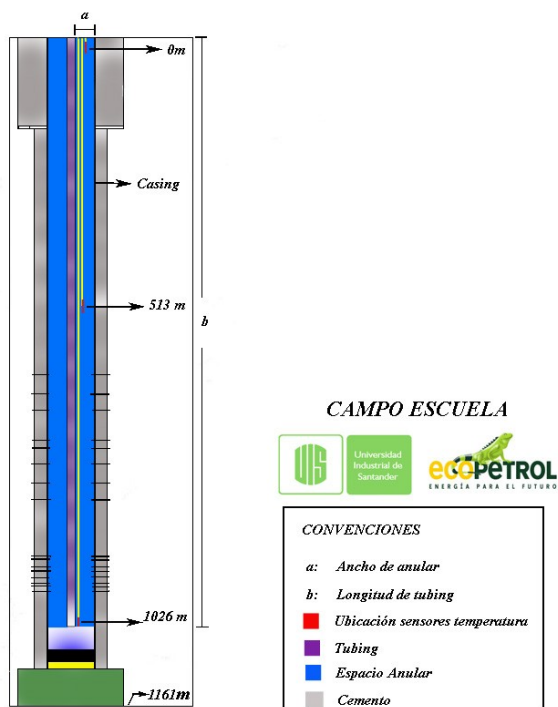
T_{pd} = *Valor de la temperatura en un punto dado del tubing.*

T_{sup} = *Temperatura registrada por el sensor superior.*

P_{pd} = *Profundidad a la que se quiere conocer la temperatura.*

Con base en lo anterior se define que el SADFSP debe tener por lo menos 3 sensores de temperatura ubicados a 0, 513 y 1026 m tal como se muestra en la Figura 2-6.

Figura 2-6: Ubicación de sensores en el espacio anular del pozo C-70.



- **PUNTO DE NUBE:**

En la referencia [30], se enumera que el rango de temperaturas en un sistema de calentamiento por tubing está dado por las propiedades del hidrocarburo. Para el caso del crudo de Campo Escuela Colorado, el problema fundamental radica en la precipitación de parafinas como se ve en la Figura 2-4. Por ello se analiza el punto de nube.

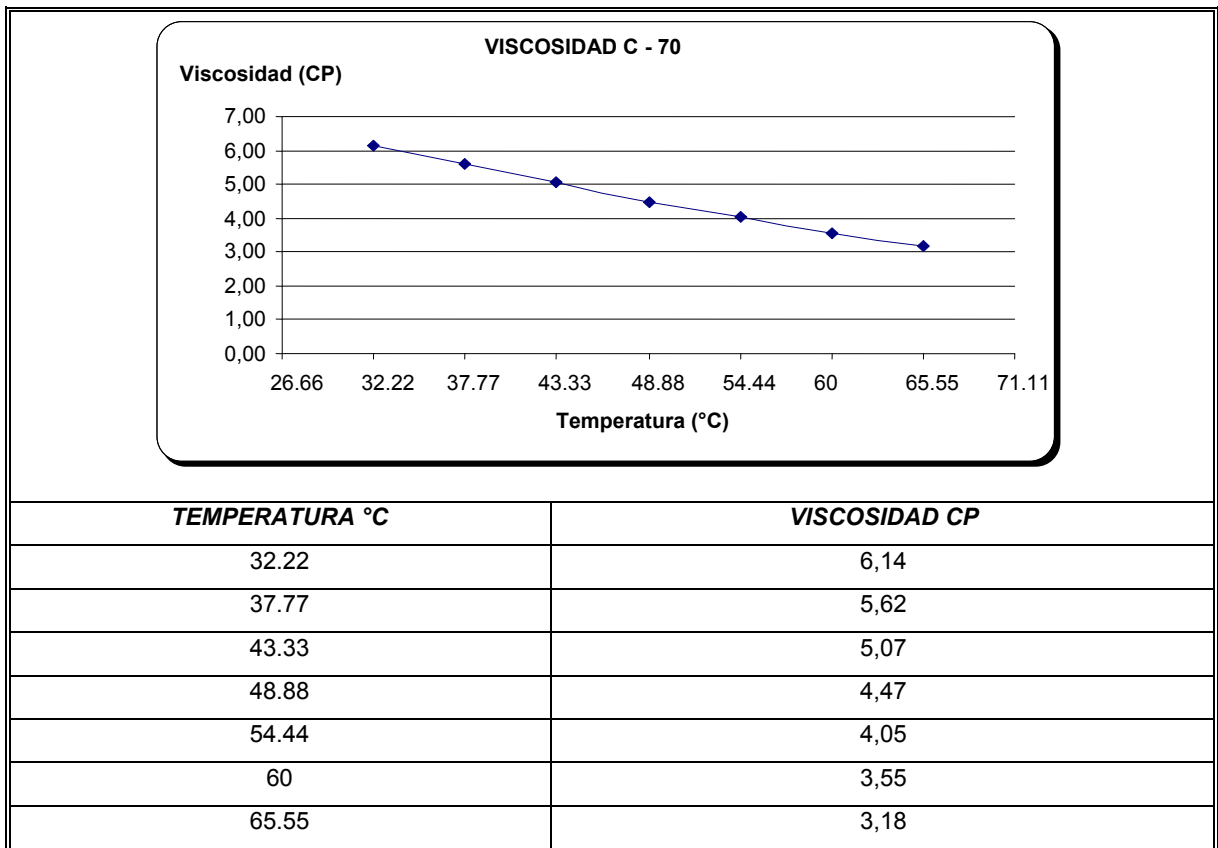
La prueba de punto de nube se realizó por miembros de Campo Escuela UIS-ECOPETROL de acuerdo con la norma (ICP.PTE. 119.012)⁸, para investigar sobre la precipitación de parafinas en el campo Colorado. En ella se concluyó que el

⁸ Informe FIR 70372 Punto de Nube Dinámico laboratorio de reología ICP, Instituto Colombiano del Petróleo, Piedecuesta Santander Octubre 9 de 2007.

primer cristal de parafina precipita a los 30.1 °C, valor bastante alto si se considera que la temperatura en superficie puede descender hasta 20°C. En la prueba también se concluyó que la parafina acaba de derretirse a 54.44 °C. De acuerdo con lo anterior se define que el rango mínimo de temperaturas para el SADFSF es de 20°C a 54.44°C.

- **COMPORTAMIENTO DE LA VISCOSIDAD CON LA TEMPERATURA:**

Tabla 2-2: Curva viscosidad crudo Pozo C-70.



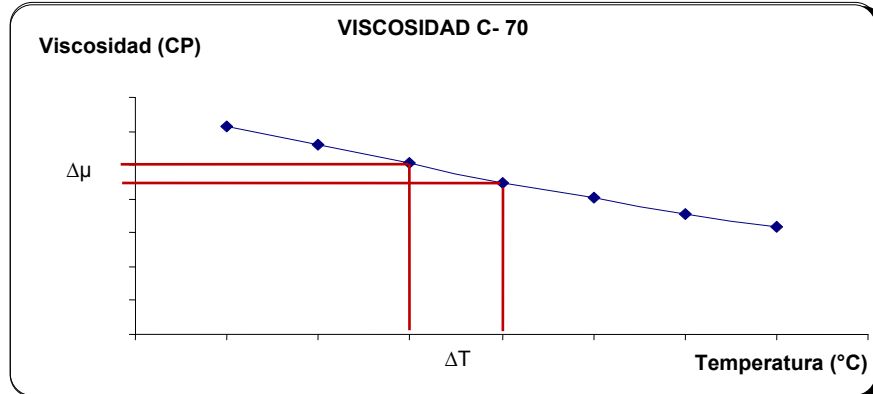
Fuente: [2]

En la Tabla 2-2 se presenta el comportamiento de la viscosidad del crudo en el pozo C-70 respecto a la temperatura⁹. A partir de la relación entre estas dos

⁹ Curva calculada por los autores de [2] de acuerdo con la norma ASTM D 88-94.

variables se puede definir la resolución del sensor de temperatura para el SADFSP.

Figura 2-7: Variación de viscosidad respecto a la temperatura.



Como se observa en la Figura 2.7 por cada incremento en la temperatura ΔT se produce una variación de la viscosidad $\Delta\mu$.

Donde:

$$\Delta T = T_f - T_i$$

T_f = Temperatura final

T_i = Temperatura inicial

$$\Delta\mu = \mu_f - \mu_i$$

μ_f = Viscosidad final

μ_i = Viscosidad inicial

ΔT está directamente relacionado con la resolución del sensor. Para definir el valor adecuado de ΔT , debe tenerse en cuenta que el mismo no represente una variación $\Delta\mu$ tal que produzca un cambio significativo en el comportamiento del crudo.

Realizando una regresión lineal para los valores de la Tabla 2-2, se obtiene la ecuación (2.5) con un coeficiente de correlación de 0,99.

$$\mu = -0,09025 \cdot T + 8.99 \quad (2.5)$$

Donde:

μ = Viscosidad

T = Temperatura

Según miembros de Campo Escuela Colorado-UIS, una variación de 0,01 cp en la viscosidad del crudo no es relevante para el mismo. Por tanto teniendo en cuenta que la pendiente de la recta corresponde a la variación de $\Delta\mu$ respecto a ΔT , se calcula que para que haya la variación de 0,01 cp la temperatura cambia 0,16 °C, con lo que se establece que la resolución del sensor debe ser por lo menos de 0,16 °C.

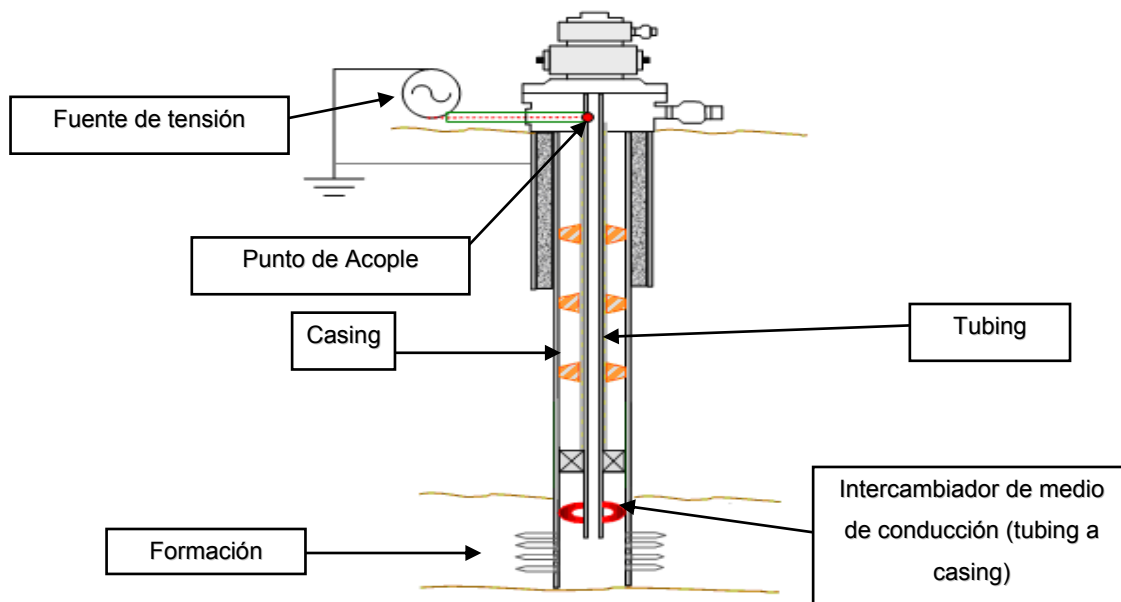
2.2. SISTEMA DE INYECCIÓN DE CORRIENTE (SICP):

El sistema de inyección de corriente en pozos para mejoramiento del factor de levante SICP, es una tecnología que tiene como finalidad elevar la temperatura del tubo de producción para incrementar la movilidad del crudo. Es útil en la extracción crudos densos, pesados y/o con precipitación de parafinas. El diseño conceptual del SICP propone una configuración Tubing- Casing [24]. Esta configuración aprovecha las propiedades del acero al carbón en la tubería de producción, que presenta una resistividad seis veces mayor que la del aluminio.

- **CONFIGURACION TUBING CASING DEL SICP:**

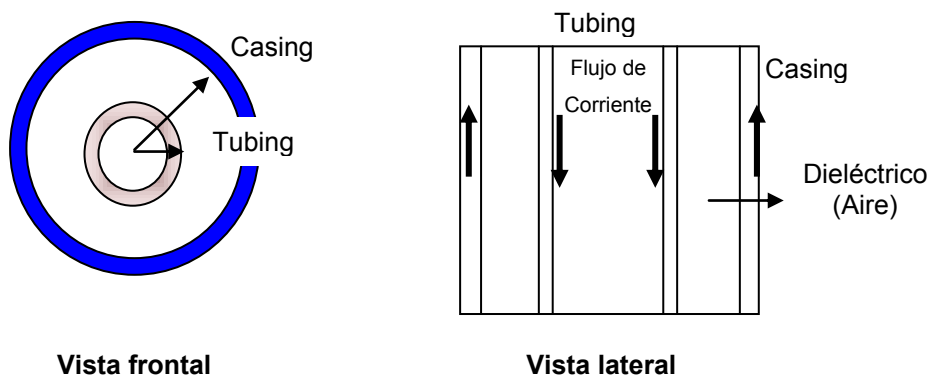
La configuración Tubing Casing consiste en establecer un circuito eléctrico, consta de una fuente de poder eléctrica que por medio de una terminal se conecta al tubing como se muestra en la Figura 2-8.

Figura 2-8: Configuración de pozo para el sistema Tubing-Casing.



El tubing actúa como el elemento inyector de corriente y el casing como elemento de retorno de corriente (Ver Figura 2-9). Con esta configuración se realiza el proceso de calentamiento del crudo en ascenso a través del Tubing. El sistema se comporta eléctricamente como una línea coaxial, debido a que el medio conductor “tubing” se encuentra energizado y rodeado por un medio dieléctrico (aire), que a su vez es confinado en otro conductor externo, el “casing” [24]. Lo cual asocia un campo eléctrico y un campo magnético.

Figura 2-9: Vista del sistema tubo de producción como un cable coaxial.



2.2.1. DEFINICIÓN DE ESPECIFICACIONES REQUERIDAS POR EL SICP PARA LA ADECUADA SELECCIÓN DEL SADFP:

- **DIMENSIONAMIENTO Y ESPECIFICACIÓN DEL MÓDULO DE ACONDICIONAMIENTO DE POTENCIA SICP:**

Para dimensionar el SICP, se debe encontrar el valor de la corriente de inyección y la tensión asociada para lograr derretir la parafina en el tubing del pozo C-70. En el Anexo E, el Ing. Omar Peña autor del SICP deduce que la ecuación que relaciona la transferencia de calor del tubing hacia un crudo pesado ó con precipitación de parafina está dada por la ecuación 2.6:

$$\Delta T = \frac{P}{mc} \quad (2.6)$$

Donde:

ΔT = Diferencial de temperatura ganado por un fluido laminar en ascenso obtenido al aplicar un potencia en un área de un metro de tubing [°K]

P = Potencia que se disipa en calor en un metro de tubería [W/m]

m = Masa contenida en un metro de tubería [kg]

c = Calor específico de la tubería [W/kg*K]

Partiendo de la ecuación 2.6, se considera que la potencia que se disipa en calor en un metro de tubería para generar un incremento de temperatura ΔT corresponde con la ecuación 2.7:

$$P = m * c * \Delta T \quad (2.7)$$

Teniendo en cuenta las características para el crudo del pozo C-70, la parafina precipita a los 30,1 °C y termina de derretirse a los 54,44 °C. Pero en vista que la

temperatura del pozo puede descender hasta 20 °C, se define que el máximo valor Δ que debe alcanzar el SICP es:

$$\Delta = 54,44 \text{ °C} - 20 \text{ °C} = 327,59 \text{ °K} - 293,15 \text{ °K} \quad (2.8)$$

$$\Delta = 34,44 \text{ °K} \quad (2.9)$$

Para encontrar el valor de m y c se hace a partir de la tubería del pozo. El tubing del C-70 cuenta con 108 juntas de acero de 2-7/8". De acuerdo a la norma API 5CT ISO 11960 mostrada en el Anexo D, se obtiene que el valor de m para el tubing en el pozo C-70 es $m=12,8$ Kg/m. De la referencia [33] se consigue que el valor del calor específico del acero al carbón es $c=1.2796 \cdot 10^{-2}$ W/kg*K.

Para obtener el valor de la impedancia eléctrica, los autores del diseño conceptual del SICP, consideran la configuración Tubing – Casing como una línea de transmisión para frecuencias menores de 1 kHz, cuya ecuación característica está dada por (2.10). Cada uno de los parámetros se determinaron a partir de simulaciones numéricas para tubería de producción, teniendo en cuenta la norma API 5CT ISO 11960 [24]. El resultado de este estudio se encuentra registrado en el Anexo C, de donde se obtienen los valores de resistencia, capacitancia, inductancia y conductancia por cada metro de tubería para el pozo C-70.

$$Z = \frac{\Gamma_n}{\sqrt{G+}} \quad (2.10)$$

Tabla 2-3: Parámetros de impedancia en tubería de pozo C-70.

PARÁMETRO	VALOR
R	$1,144 \cdot 10^{-2} \text{ } \Omega/\text{m}$
C	$5,77 \cdot 10^{-11} \text{ F/m}$
G	$7,934 \cdot 10^{-3} \text{ } 1/\Omega \cdot \text{m}$
L	$2,814 \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$

En la Tabla 2.4, se muestra el valor de impedancia para la tubería del pozo C-70 a distintas frecuencias:

Tabla 2-4: Impedancia total de tubería a distintas frecuencias.

F (HZ)	Z (Ω)	COS(Φ)
DC	1,2007	1
10	1,20078 (0,044°)	1
60	1,20079 (0,2656°)	0,999
100	1,2000795 (0,4425°)	0,999
600	1,20336 (2,6482°)	0,998
1000	1,20785 (4,3915°)	0,997

Retomando la ecuación 2.7 se obtiene 2.11:

$$P = 34,44 * 12,8 * 1,2796 * 10^{-2} = 5,6408 \text{ W/m} \quad (2.11)$$

Teniendo en cuenta que la longitud de la tubería es 1026,87 metros, se obtiene finalmente el valor total de potencia para derretir la parafina del pozo C-70:

$$P = 5,6408 * 1026,87 = 5,792 \text{ kW} \quad (2.12)$$

A partir de las ecuaciones (2.13), (2.14) y (2.15), se obtienen finalmente los valores de potencia aparente (S), corriente de inyección (I) y tensión (V) registrados en la Tabla 2.5:

$$S = \frac{P}{\cos(\phi)} \quad (2.13)$$

$$I = \frac{\sqrt{S}}{\sqrt{Z}} \quad (2.14)$$

$$V = \frac{S}{I} \quad (2.15)$$

Tabla 2-5: Valores de Tensión, Corriente, Impedancia y Potencia aparente a diferentes frecuencias.

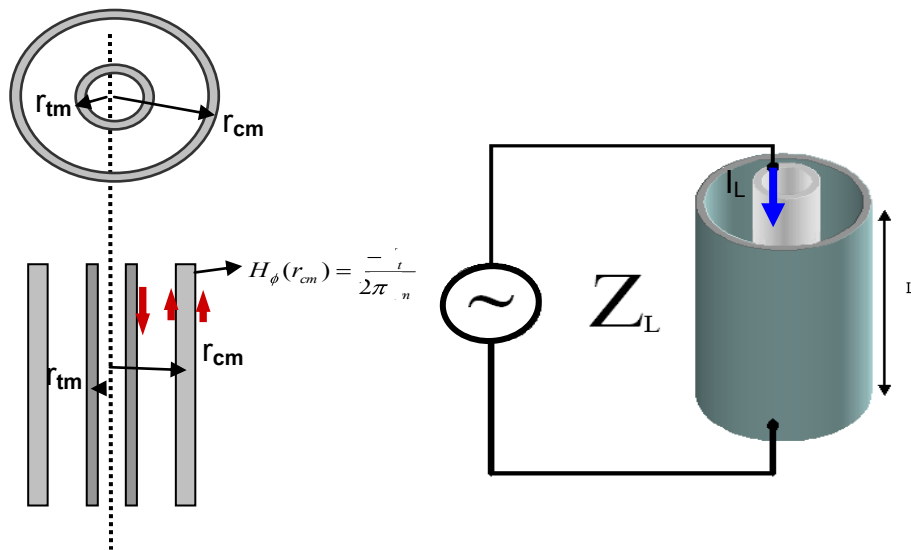
F (HZ)	Z (Ω)	COS(Φ)	S (KVA)	I (A)	V (V)
DC	1,2007	1	5,792	69,455	83,396
10	1,20078 (0,044°)	1	5,792	69,453	83,401
60	1,20079 (0,2656°)	0,999	5,792	69,453	83,412
100	1,200795 (0,4425°)	0,999	5,792	69,452	83,425
600	1,20336 (2,6482°)	0,998	5,798	69,414	83,563
1000	1,20785 (4,3915°)	0,997	5,809	69,352	83,767

Conforme a lo anterior se define que para atacar el problema de precipitación de parafinas del pozo C-70, el SICP requiere entregar a la carga una potencia activa de 5,792 kW en un rango de frecuencias DC-1kHz, una corriente de inyección estimada en 69,455 A y una tensión de 83,7675 V.

- **DEFINICIÓN DE REQUERIMIENTOS DEL SICP PARA EL SISTEMA DE MONITOREO DE TEMPERATURA:**

Como se mencionó anteriormente, debido a la presencia de la corriente de inyección, el SICP origina en el pozo un comportamiento similar al de un cable coaxial. Lo cual asocia campo eléctrico junto con un campo magnético [24].

Figura 2-10: Vista frontal y superior del sistema de tubos.



Estos campos se pueden estimar aproximadamente de acuerdo con las ecuaciones (2.16) y (2.17).

$$H_{\phi}(r_{cm}) = \frac{-i}{2\pi r_{cm}} \quad (\text{A/m}) \quad (2.16)$$

Donde:

$H_{\phi}(r_{cm})$ = Campo magnético en el casing [A/m]

r_{cm} = Radio medio del casing [m]

r_{tm} = Radio medio del tubing [m]

I_t = Corriente de línea [A]

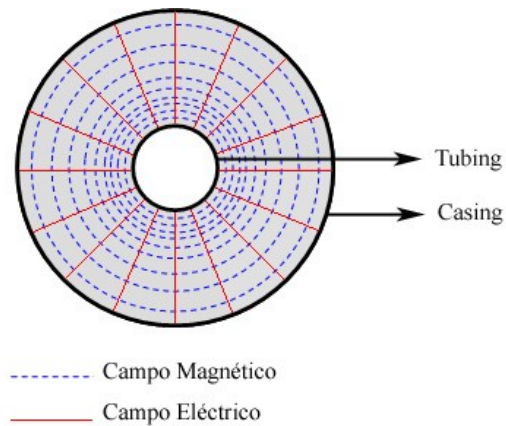
$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2.17)$$

Donde:

$\nabla \cdot \vec{E}$ = Campo Eléctrico

Si se observa el pozo desde la parte superior de acuerdo con el modo transversal electromagnético (MTE¹⁰) para cables coaxiales, el campo eléctrico se propaga en línea recta desde el Tubing hacia el Casing y el campo magnético en forma circular, tal como se muestra en la Figura 2-12.

Figura 2-11: MTE de propagación de campos Eléctrico y Magnético en Pozo.



La presencia de estos campos genera interferencia electromagnética sobre los equipos encargados de monitorear la temperatura en fondo de pozo. Hecho que puede llegar a afectar las mediciones y la transmisión de las mismas. El diseño

¹⁰ Modo Transversal Electromagnético

conceptual del SICP no ha podido cuantificar dichos campos, por lo tanto no es posible establecer condiciones para equipos susceptibles a este fenómeno.

Conforme a lo anterior se define que el SICP requiere de un sistema de monitoreo de temperatura inmune a interferencias electromagnéticas, para poder contar con medidas confiables sin importar la cantidad de IEM presente.

- **ESPECIFICACIÓN DEL DISPOSITIVO DE CAMPO:**

El SICP es un equipo complejo que no solo necesita del SADFSP para operar adecuadamente. Requiere también de un sistema de control que a partir de las señales monitoreadas realice maniobras que mantengan la estabilidad del sistema. Es común encontrar en la industria equipos que efectúan cada función por separado. Esto implica diseñar cada etapa independientemente y luego acoplar las mismas para garantizar la funcionalidad del conjunto.

En la actualidad existen dispositivos de campo capaces de realizar adquisición, análisis de datos, acondicionamiento de señales, control de procesos y comunicación por medio de interfaces. Las ventajas de contar con un equipo de estas características radican en la facilidad de instalación, el bajo consumo de potencia, la gran capacidad de cómputo y la optimización del sistema. Adecuar un equipo con estas características al SICP pone a su disposición todas las ventajas del mismo y simplifica el diseño de la etapa de control, que será efectuado por los autores del SICP [24]. En vista de lo anterior se ha definido que el dispositivo de campo usado para el SADFSP debe integrar las características mencionadas en este aparte.

2.3. RESUMEN DE LOS PARÁMETROS DEFINIDOS PARA EL DISEÑO CONCEPTUAL DEL SADFP A PARTIR DEL POZO C-70 Y EL SICP

Con base en lo discutido en las secciones 2.2 y 2.3 a partir del pozo C-70 y el SICP, en resumen se han definido los siguientes parámetros para el diseño conceptual del SADFP:

- Medición de temperatura al tubing en 3 puntos del espacio anular del pozo, ubicados a 0, 513 y 1026 m, por medio de sensores inmunes a IEM que cuenten con una resolución mínima de 0,16 °C y un rango ideal de 20°C a 53,44°C. Además con capacidad de soportar 280 PSI de presión.
- Medio de transmisión apto para entregar registros confiables a 1526 m sin acoples ni repetidores dentro del pozo, con capacidad de soportar 280 PSI de presión e inmunidad a IEM.
- Medición de corriente de inyección al tubing, estimada en 69,455 A con frecuencia variable de 0 - 1 kHz.
- Medición de tensión de salida del módulo de acondicionamiento de potencia (SICP), estimada en 83,768 V, con frecuencia variable de 0 - 1 kHz.
- Dispositivo de campo capaz de realizar adquisición, análisis de datos, acondicionamiento de señales, control de procesos y comunicación por medio de interfaces.

3. SELECCIÓN SENSORES

Establecidos los parámetros de diseño para el SADFSP, se procede a realizar la selección de los sensores responsables del monitoreo de las variables tensión, corriente y temperatura.

La adquisición de señales de retroalimentación es un factor importante a considerar dentro del sistema de control del SICP. Por consiguiente, de las características de los sensores, así como de la adecuada interpretación de la medida, dependerá en parte el éxito de la maniobra de control.

3.1. SELECCIÓN DEL SENSOR DE TEMPERATURA

En esta sección se realizará la selección del sensor de temperatura basado en los parámetros de diseño definidos para el SADFSP descritos en el capítulo 2 en la sección 2.3 y las características de los métodos expuestos en el capítulo 1 en la sección 1.3.

Los parámetros de diseño considerados asociados a la medición de temperatura son:

- Sensores inmunes a IEM
- Resolución mínima de 0,16 °C
- Rango ideal de 20°C a 53,44°C
- Capacidad de soportar 280 PSI de presión.
- Medición de temperatura al tubing en 3 puntos del espacio anular del pozo, ubicados a 0, 513 y 1026 m

Partiendo de los parámetros de diseño, se procede a seleccionar el medidor

Tabla 3-1: Cuadro comparativo para selección de sensor temperatura.

	<i>RTD</i>	<i>TERMISTOR</i>	<i>SENSOR DE IC</i>	<i>TERMOCUPLAS</i>	<i>SENSOR F.O.</i>
INMUNES A IEM	<i>NO</i>	<i>NO</i>	<i>NO</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>
AUTOALIMENTADO	<i>NO</i>	<i>NO</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>SI</i>
TIEMPO DE RESPUESTA	Alto	Alto	Alto	Bajo	Bajo
AUTOCALENTAMIENTO	<i>SI</i>	<i>SI</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>NO</i>
TAMAÑO	Grande	Mediano	Pequeño	Mediano	Pequeño

Como se ha establecido en la sección 2.2, los sensores de temperatura para el SADFSP deben ser inmunes a IEM ya que deben operar en presencia de la misma. Como se indica en la Tabla 3.1, el funcionamiento de RTD`s, termocuplas, termistores y sensores de CI se ve afectado por campos eléctricos y magnéticos debido a su naturaleza eléctrica. El único medidor que supera este parámetro es el sensor de fibra óptica. Este sensor, aparte de ser completamente inmune a IEM, además posee ventajas como autoalimentación, tamaño pequeño y bajo tiempo de respuesta. Por ende es el medio ideal para la aplicación.

En la industria existen diversos fabricantes dedicados al diseño de los sensores de temperatura de fibra óptica, entre los cuales se destacan Fiso, Capgo, Mesurex, Fosis, Fotemp y Lios. El sensor escogido corresponde a un desarrollo realizado por el fabricante Fiso, pues este sensor cumple con todos los requerimientos del sistema. Por otra parte, los elementos Fiso se han aplicado en la Universidad Industrial de Santander en trabajos de grado anteriores con gran éxito (Ver referencia [4]).

A continuación se exponen las características del sensor seleccionado.

3.1.1. SENSOR DE TEMPERATURA DE FIBRA ÓPTICA FISO FOT-M:

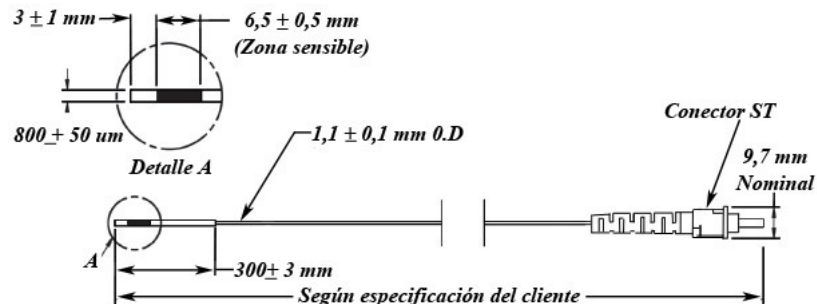
Figura 3-1: Tamaño del sensor de temperatura Fiso FOT-M.



El transductor de temperatura FOT-M¹¹ presenta características de completa inmunidad a interferencias electromagnéticas y radiofrecuencias, además posee, resistencia en ambientes altamente corrosivos, alta confiabilidad y precisión, convirtiéndose en una importante herramienta de medición en ambientes de alta peligrosidad y medios hostiles. Todo lo anterior hace del FOT-M el transductor ideal para el monitoreo en el fondo del pozo de petróleo.

Como se observa en la Figura 3-2, este tipo de sensor posee un tamaño reducido y compacto (con diámetros alrededor de 1,1 mm). El FOT-M está diseñado para soportar temperaturas de hasta 85°C y está revestido con fibra de vidrio.

Figura 3-2: Dimensiones del sensor de temperatura FOT-M.



El funcionamiento del FOT-M, basado en la tecnología de interferómetro Fabry-Pérot¹² se describe detalladamente en el Anexo G. En dicho anexo se muestra

¹¹ Sensores de temperatura de fibra óptica desarrollados por FISO Technologies.

¹² Fabry- Pérot es el principio de funcionamiento del sensor de Temperatura Fiso.

como los cambios de temperatura crean una variación en la longitud de la cavidad de Fabry Pérot. Los acondicionadores de señal para estos sensores pueden medir constantemente la variación en la longitud de la cavidad con alta precisión.

El Sensor está unido a un cable de fibra, el cual es entregado normalmente con 2 metros de longitud, sin embargo de acuerdo los requerimientos de cada proyecto se podrá solicitar al fabricante mayor longitud del mismo, siempre y cuando esté entre su alcance, por lo que es necesario consultar cada necesidad. Para efectos de esta aplicación se otorga la longitud de 1,526 Km garantizando el correcto funcionamiento del mismo. Al otro extremo de la extensión de cable se encuentra un conector ST que sirve de acople con la unidad de acondicionamiento de señal.

Las características del sensor FOT-M se presentan en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2: Características de los sensores de temperatura FOT-M

RANGO DE TEMPERATURA	20 °C A 85 °C
Tiempo de respuesta	Menos de 750 ms
Susceptibilidad a Interferencia electromagnética	Inmunidad intrínseca.
Longitud de cable de Fibra	El estándar es 2 metros, pero el fabricante puede agregar una extensión de acuerdo con la aplicación.
Revestimiento	Fibra de vidrio y Teflón.
Tipo de Conector	Conector ST
Precisión	±0,2 °C a escala completa
Resolución	0,01 °C
Presión Máxima	1000 psi
Costo del Sensor	US \$280 ¹³

En la Tabla 3.2 se aprecia que el FOT-M satisface todos los parámetros de diseño para el SADFSP, ya que tiene un rango de 20°C a 85°C, una resolución de 0,01 °C, soporta presiones hasta de 1000 PSI y es inmune a IEM.

¹³ Valor correspondiente a una sonda de temperatura.

El instrumento encargado de acondicionar la señal proveniente del FOT-M, es el UMI 4-LR (Universal Multichannel Instrument) que se muestra en la Figura 3-3.

Figura 3-3: Acondicionador de señal UMI 4-LR para sensores de fibra óptica.



Fuente: UMI 4-LR Signal Conditioner Datasheet.

El UMI 4-LR es un dispositivo acondicionador de señal multi-canal para transductores de fibra óptica que puede ser utilizado para realizar medidas de fuerza, temperatura, carga, desplazamiento, índice de refracción y presión en ambientes hostiles. El UMI 4-LR es el instrumento encargado de medir la longitud absoluta de la cavidad Fabry-Pérot de los sensores de fibra óptica, con una exactitud y precisión asombrosa por medio de un interferómetro de Fizeau y una combinación de arreglos lineales de dispositivos acopladores de carga (CCD¹⁴) descritos en el Anexo G, proporcionando medidas de temperatura altamente exactas y confiables. El acondicionador de señal tiene una resolución de 0,01% y una precisión de 0,025% a escala completa.

El UMI viene en versiones de 4 y 8 canales, para el caso del SADFSP se escogió el de 4 canales para efectuar las 3 mediciones de temperatura definidas en el capítulo 2 en la sección 2.1.3. El sistema UMI 4-LR de 4 canales puede escanear

¹⁴ CCD = Dispositivos Acopladores de Carga.

todos estos en un tiempo de 0,75 segundos, ó también, puede leer un canal específico con una rata de muestreo de 20 Hz. El acondicionador almacena los datos en una memoria no volátil, con una capacidad de hasta 50000 datos, para ser recuperados posteriormente o pueden ser enviados directamente a un computador o dispositivo de adquisición de señal a través de la salida análoga ajustable de ± 5 V disponible para cada canal en el panel trasero de la unidad.

El modo de operación del UMI 4-LR se puede realizar directamente desde el panel frontal o a través de un dispositivo con conexión RS-232 o USB. En la Tabla 3-3 se resumen las especificaciones del UMI 4-LR.

Tabla 3-3: Especificaciones del UMI 4-LR.

NÚMERO DE CANALES	4
Rata de muestreo	20 Hz
Tiempo de escaneo	150 ms
Promediado	1 a 400 muestras
Precisión	0,025% a escala completa
Resolución	0,01% a escala completa
Rango dinámico	15 000 : 1
Pantalla	4 líneas para 20 caracteres VFD ¹⁵
Registro de datos	50 000 datos
Salidas análogas	± 5 V ajustable
Comunicación	RS-232; USB
Requerimientos de potencia	10 a 20 Volts (5 Watts)
Temperatura de operación	-20° a 40° C (-4° F a 104° F)
Costo	US \$11.000

El UMI 4-LR realiza un muestreo de la señal presente en cada canal activo a una velocidad fija de muestreo de 20 Hz. Consecuentemente el proceso de

¹⁵ Vacuum Fluorescent Display

acondicionamiento de la señal muestreada desde el transductor, genera un dato de lectura cada 0,05 segundos.

Los datos generados a esta frecuencia pueden ser promediados durante un tiempo ajustable por el usuario (Acquisition Average), con el cual se consigue una medición más confiable de los datos.

▲ **FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA:**

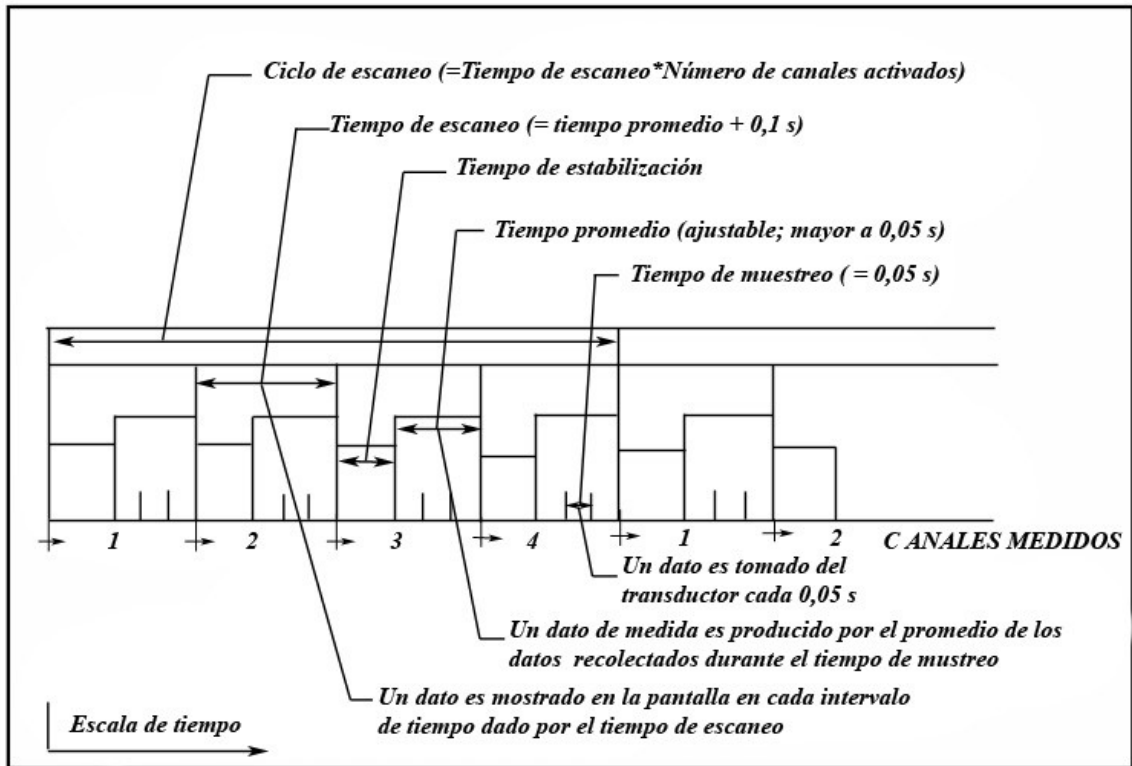
Existen dos formas de medición y escaneo de los datos: Una de forma automática y la otra de forma manual, con las cuales el UMI 4-LR hace la recolección de los datos de medida. Cuando el UMI 4-LR es utilizado en modo manual, los datos son tomados únicamente en un solo canal de medida, pero en vista de que el SADFSP requiere tomar datos en los 4 canales se debe trabajar en modo automático.

Cuando el UMI 4-LR trabaja modo automático, los datos de medida son tomados secuencialmente en cada uno de los canales activados. El acondicionador conmuta de un canal a otro en orden ascendente (ej: canal nº 1, 2, 3, 4), y así sucesivamente se repite el ciclo hasta culminar todo el proceso. El tiempo de escaneo (Scanning Time) se define como el tiempo requerido para conmutar un canal y realizar la adquisición del dato. Este tiempo es igual al tiempo promedio (Acquisition average) más de 100 ms que tarda la estabilización de la señal (stabilisation time); el valor más pequeño de tiempo de escaneo es de 150 ms por canal, que es cuando el tiempo promedio es puesto a su valor mínimo, el cual es de 0,05 segundos.

En el modo de escaneo automático, el intervalo de tiempo entre dos sucesos de medición es igual al tiempo de escaneo. No obstante, el intervalo de tiempo entre dos sucesos de medición de datos para el mismo canal es igual al tiempo de

escaneo multiplicado por el número de canales activos, en la Figura 3-4 se muestra el funcionamiento del UMI 4-LR en el modo de escaneo automático.

Figura 3-4: Diagrama de tiempos de operación del UMI 4-LR en modo automático.



Por otra parte el UMI 4-LR ofrece dos métodos generales de hacer la adquisición de datos: La adquisición directa o la adquisición retrasada. En la adquisición directa cada dato medido es inmediatamente enviado al computador a través del enlace RS-232 del acondicionador, sin almacenarlo en la memoria interna, mientras la adquisición retrasada, todos los datos son almacenados en la memoria buffer del UMI 4-LR y cuando se desee la información puede ser bajado al dispositivo de campo a través del puerto RS-232. Para el caso del SADFSF se trabajará con adquisición directa ya que el dispositivo de campo adaptable a la etapa de control será el encargado de almacenar los datos.

3.2. SELECCIÓN DEL SENSOR DE CORRIENTE

Como se describió en el capítulo 1 en la sección 1.4, existen diversas formas para medir la corriente eléctrica. Según la aplicación, el sensor se debe seleccionar de acuerdo de con los parámetros del sistema. Para el caso del SADFSP, dichos parámetros de diseño se discutieron en el capítulo 2 en la sección 2.2.1 y se enuncian a continuación:

- Medición de corriente de inyección al tubing, estimada en 69,455 A con frecuencia variable de 0 - 1 kHz.

Teniendo en cuenta los parámetros de diseño que asocia la medición de corriente en el SICP se procede a seleccionar el medidor.

Tabla 3-4: Cuadro comparativo para la selección del sensor de corriente.

Tecnología del Sensor	Shunt de corriente	Transformador de Corriente	Sensor de efecto Hall	Bobina Rogowski
Costo	Muy bajo	Medio	Alto	Bajo
Linealidad en el rango de la medición	Muy Buena	Buena	Medio	Muy Buena
Capacidad de medición de alta corriente	Muy pobre	Buena	Buena	Buena
Consumo de Potencia	Alto	Bajo	Medio	Bajo
Variación de la Salida con respecto a la Temperatura	Medio	Bajo	Alto	Muy bajo
Capacidad de medición en un rango de frecuencias	Si	No	Si	Si
Desacoplamiento eléctrico.	No	Si	Si	Si

En la Tabla 3-4 se muestra un resumen de las características de los principales sensores de corriente, en ella se puede observar que el único sensor que no está en capacidad de medir corriente en un rango de frecuencias variables, por

problemas de saturación, es el transformador de corriente. Por esta razón se descarta para esta aplicación en particular.

En vista de que los registros tomados por el sensor de corriente serán entregados a un dispositivo de campo capaz de realizar maniobras de control, se ha decidido aprovechar la característica de desacople eléctrico de algunos de estos transductores, ya que es necesario separar el sistema de inyección de corriente del módulo de control. Por esta razón se descarta al shunt de corriente como opción para el sistema. En la Tabla 3-4 se aprecia que el shunt de corriente no posee esta característica.

Con base a las anteriores consideraciones, las opciones se reducen a los sensores de efecto hall y a la bobina Rogowski. Ambos sensores presentan buenas características de medición, sin embargo se ha decidido seleccionar el sensor de efecto Hall debido a que la bobina Rogowski requiere a la salida un circuito acondicionador de señal y un integrador. Estos últimos se vuelven muy inestables con el tiempo, lo que puede ocasionar el mantenimiento frecuente del sensor y errores en la medida.

El sensor de efecto Hall permite realizar mediciones en rangos de frecuencia variable ya que tiene un gran ancho de banda, razón por la cual puede ser usado para medir señales de corriente alterna 'AC' o corriente continua 'DC'. Por otra parte su señal de salida no necesita integradores ni circuitos externos como en el caso de la bobina Rogowski, además brinda un desacoplamiento eléctrico entre el sistema de adquisición y la fuente. Todo lo anterior hace de esta sonda el medio más adecuado para medir la corriente de inyección del SICP.

Actualmente son varios los fabricantes de sensores de efecto Hall, entre los cuales se destacan LEM, ABB, CUI, TAMURA, AMPLOC, ALLEGRO y CHEN YANG. La sonda seleccionada corresponde a un desarrollo del fabricante Chen Yang, la cual

además de cumplir con los parámetros de diseño posee características útiles para el sistema, teniendo en cuenta que la señal de salida del sensor se puede acoplar directamente al dispositivo de campo¹⁶.

El sensor seleccionado se describe a continuación.

3.2.1. SENSOR DE CORRIENTE DE EFECTO HALL CYHCS-D1-50A:

Figura 3-5: Sensor de corriente de efecto Hall CYHCS-D1-50A.



Fuente: <http://www.hallsensors.de/HallCurrent.htm>

El CYHCS-D1-50A es una sonda de efecto Hall closed loop del fabricante CHEN YANG. Esta sonda entrega señales de salida directamente acoplables al dispositivo de campo Compact Field Point (CFP), el cual se describirá más adelante. La tensión de salida del sensor es de $\pm 4V$. Poder llevar la señal de sensor directamente al dispositivo de campo hace más eficiente el SADFSP, ya que evita realizar acondicionamiento de señal por medio de circuitos electrónicos externos, los cuales generan un costo adicional, un consumo de potencia extra y aumenta el error de la medida.

¹⁶ Ver Capítulo 4 sección 4.2.1 en Dispositivo de campo Compact Field Point.

En la Tabla 3-5 se muestran las características de este sensor.

Tabla 3-5: Características del sensor CYHCS-D1-50A.

Rango corriente de entrada	±100 A
Tensión de Salida	±4 V
Resistencia de carga	> 10 KΩ
Tensión de alimentación	±12V~ ±15 VDC ±5%
Ancho de banda	DC ~ 150 kHz
Tiempo de respuesta	<1.0 μs
Precisión	±0.5%
Temperatura de Operación	-25°C ~ +85°C
Costo	US \$36.5

En la Tabla 3.5 se aprecia que el sensor CYHCS-D1-50A satisface todos los parámetros de diseño para el SADFSP, ya que mide corrientes de entrada hasta de ±100 A y tiene un ancho de banda DC ~ 150 kHz. Por otra parte la sonda brinda desacople eléctrico y su señal de salida (±4 V) se puede acoplar directamente al dispositivo de campo.

3.3. SELECCIÓN DEL SENSOR DE TENSION

En la Tabla 3-6, se muestran en resumen las principales características de los sensores de tensión. En base a ellas y a los requerimientos del sistema definidos en el capítulo 2 en la sección 2.2.1, se realizará la selección del sensor más adecuado para esta aplicación.

Tabla 3-6: Cuadro comparativo para la selección del sensor de tensión.

<i>Tecnología del Sensor</i>	<i>Divisor de Tensión</i>	<i>Transformador de Tensión</i>	<i>Sensor de Efecto Hall</i>
Costo	Muy bajo	Medio	Alto
Linealidad en el rango de la medición	Buena	Buena	Medio
Capacidad de medición en alta tensión.	Muy pobre	Buena	Buena
Consumo de Potencia	Alto	Bajo	Medio
Variación de la Salida con respecto a la Temperatura	Medio	Bajo	Alto
Capacidad de medición en un rango de frecuencias	Si	No	Si
Desacoplamiento eléctrico.	No	Si	Si

Como se expuso en la sección 2.2.1 del capítulo 2, el sistema entregará potencia a la carga en un rango de frecuencia variable de 0 a 1 kHz, por esta razón se descarta el transformador de tensión como posible alternativa, pues como se observa en la Tabla 3-6 no cumple con esta característica.

Al igual que en la parte de corriente, para medir tensión también se debe desacoplar eléctricamente el SICP de la etapa de control. Por esta razón se descarta el uso del divisor de tensión, quedando como última opción el sensor de tensión de efecto Hall.

El sensor de tensión de efecto Hall, sí permite realizar mediciones en rangos de frecuencia variable ya que tiene un gran ancho de banda, razón por la cual puede ser usado para medir señales de tensión en 'AC' o 'DC'. Por otra parte brinda desacoplamiento eléctrico entre el sistema de adquisición y la fuente. Todo esto junto con su capacidad para medir altas tensiones lo convierte en el medio que mejor se ajusta a los requerimientos del SICP, así como a los parámetros definidos para el SADFSP.

Entre los principales fabricantes de sensores de tensión de efecto Hall están LEM, ABB, SCENSOR y CHEN YANG. Del mismo modo que con el sensor de corriente, la sonda seleccionada corresponde a un desarrollo del fabricante Chen Yang, la cual además de cumplir con los parámetros de diseño posee características útiles para el sistema, teniendo en cuenta que la señal de salida del sensor se puede acoplar directamente al dispositivo de campo¹⁷.

El sensor seleccionado se describe a continuación.

3.3.1. SENSOR DE TENSIÓN DE EFECTO HALL CYHVS100T:

Figura 3-6: Sensor de tensión de efecto Hall CYHVS100T



Fuente: <http://www.hallsensors.de/HallVoltage.htm>

El CYHVS100T, es un sensor de efecto Hall tipo closed loop calibrado. Al igual que el sensor de corriente, también entrega señales de salida directamente acoplables al dispositivo de campo. En la tabla 3-7 se observa que dicha tensión de salida es de 4V ó 5V.

¹⁷ Ver Capítulo 4 sección 4.2.1 en Dispositivo de campo Compact Field Point.

Tabla 3-7: Características del sensor CYHVS100T

RANGO DE MEDIDA	0 ~150 V
Tensión nominal de entrada	100 V
Tensión de alimentación	$\pm 12V \sim \pm 15V (\pm 5\%)$
Frecuencias de operación	DC~10 kHz
Temperatura de operación	-10°C ~ +70°C
Tensión de Salida	4V ó 5V DC
Tiempo de respuesta Máx.	$\leq 40 \mu s$
Precisión	$< \pm 1.0\% \text{ EC (Escala Completa)}$
linealidad	$\leq \pm 1.0\% \text{ FS}$
Costo	US \$28

La sonda CYHVS100T, gracias a su naturaleza de funcionamiento, permite realizar sin ningún problema las mediciones en frecuencia variable de 0-1 kHz para el SICP, ya que tiene un ancho de banda DC~10kHz. El rango de 0~150 V, admite los 83,768 V definidos para el SICP en el capítulo 2 en la sección 2.2.1.

De acuerdo con lo anterior, el sensor CYHVS100T satisface todos los parámetros de diseño para el SADFSP.

4. SELECCIÓN DEL MEDIO DE TRANSMISIÓN Y DEL DISPOSITIVO DE CAMPO.

4.1. SELECCIÓN DEL MEDIO DE TRANSMISIÓN

Las mediciones realizadas en el fondo del pozo deben ser transmitidas a la superficie, para su posterior procesamiento en el módulo de control. Para la selección del medio encargado de esta labor se considerarán todas las condiciones a las que éste estará expuesto durante el tiempo de explotación y la puesta en marcha del SICP, las características de los medios existentes y el tipo de sensores seleccionados.

Tal como se expuso en el capítulo 1 en la sección 1.6, existen medios de transmisión guiados y no guiados, estos últimos corresponden al aire, la atmosfera, etc. los cuales son usados como vehículo para el transporte de señales. Las comunicaciones que emplean este tipo de medio son las llamadas comunicaciones inalámbricas, cuyo principal problema se asocia a las interferencias que puedan causar otras señales presentes en el medio. Debido a que la señal que deber ser transmitida se localiza en el fondo del pozo y que dentro del mismo hay presencia de IEM, se descarta la posibilidad de utilizar este tipo de comunicación, dejando como opción únicamente a los medios de transmisión guiados.

De los medios de transmisión guiados expuestos en la sección 1.6.2 del capítulo 1, se descarta la utilización de cable coaxial porque es seriamente afectado por la presencia de campos eléctricos y magnéticos. El cable UTP, aunque es resistente a las interferencias electromagnéticas sus pérdidas por atenuación implicarían la instalación de repetidores por lo menos cada cien metros en una zona tan

reducida como lo es el espacio anular, además sería necesario realizar conversiones optoelectricas y electroópticas para la transmisión e interpretación de las medidas realizadas por los sensores de fibra óptica, dichos elementos se verían afectados una vez más por IEM. Por las anteriores razones no es adecuado para esta aplicación. Este análisis nos deja como última opción el cable de fibra óptica, el cual además de proveer inmunidad a IEM, tiene bajas perdidas por atenuación y por su naturaleza es compatible con los sensores seleccionados, estas características lo convierten en el medio ideal para el SADFSP.

Existen fabricantes de cables ópticos que han diseñado soluciones, asociadas al recubrimiento del cable, para la utilización de estos en fondo de pozo. Sin embargo utilizar este tipo de cables de fibra óptica, implica realizar acoples con los sensores de temperatura y el conector ST, hecho que puede ocasionar problemas en las mediciones del sistema. Por ello, teniendo en cuenta que el fabricante de los sensores de temperatura (Fiso), los provee con la longitud de cable requerida para cada aplicación asegurando su correcto funcionamiento¹⁸, se consulto con el mismo la posibilidad de proporcionar al cable de fibra con características de revestimiento similares a las de cables para fondo de pozo. A lo que respondió afirmativamente.

¹⁸ La longitud máxima consultada al fabricante fue de 2500 metros, para mayores longitudes se debe solicitar asesoría a www.fiso.com

Figura 4-1: Adecuación de cable de fibra óptica en tubing para fondo de pozo.



Fuente: [27].

El revestimiento del cable de fibra óptica especificado al fabricante de los sensores, provee una ruta confiable de alto desempeño para la transmisión de señales en sistemas de medición óptica de temperatura en pozo y está diseñado para un alto desempeño. El diseño de este cable incorpora un sistema de protección que evita que las fibras ópticas se degraden con el tiempo, eliminando así la necesidad de reemplazos periódicos.

Otras de las ventajas de la extensión de cable son:

- ▲ Diseño no-eléctrico que lo hace intrínsecamente seguro.
- ▲ Diseño de tubo holgado que aísla y protege las fibras contra las tensiones del cable.
- ▲ El cable cumple con los estándares de la industria para cable de instrumentación.

- ▲ Diseñado como uno de los cables ópticos más duraderos y resistente de la industria.
- ▲ Transmisión óptima garantizada en los 1,526 Km de distancia para el sensor de temperatura más profundo.

4.1.1. ESPECIFICACIONES DE LA EXTENCIÓN DE CABLE DE FIBRA ÓPTICA FISO:

Este cable óptico tiene una construcción robusta que viene configurada tal como se muestra en la Figura 4-2.

Figura 4-2: Configuración del cable de fibra óptica FISO.



El encapsulado del cable de fibra óptica es Teflón FEP, el cual soporta una capacidad máxima de temperatura de 205 °C. Valor bastante superior teniendo en cuenta que la temperatura máxima en el pozo puede ser de 54,44 °C. Por otra parte soporta hasta 25,000 PSI de presión. En la Tabla 4-1 se muestran detalladamente las características del cable de fibra óptica.

Tabla 4-1: Características del cable de fibra óptica FISO.

CONSTRUCCIÓN	Cable 1/4"	
	Pared 0,035"	
Fibras ópticas	1 multimodo	
Tubo metálico interno	Acero inoxidable 304	
Búfer	Teflón PTFE	
Armadura externa	INCOLOY 825 0,250" OD x 0,035" pared	
Encapsulado	Teflón FEP	
PROPIEDADES MECÁNICAS		
Peso (en aire) (lb/pies)	0,11	
Presión de trabajo (PSI/ bar)	25,000 (1,724)	
Presión de colapso (PSI/ bar)	>35,000 (2,413)	
Presión de rotura (PSI/ bar)	25,000 (1,724)	
Carga de tracción máxima (lb./Kg.)	2,000 (907)	
Longitud máxima libre de empalmes (pies/m)	20,000 (6,096)	
Radio de curvatura mínimo >1 giro (pulg./mm)	4 (101,6)	
Radio de curvatura mínimo <1/2 giro (pulg./mm)	1 (25,4)	
ESPECIFICACIONES AMBIENTALES		
Temperatura máxima operativa	205 °C	
Rango de presión (PSI/bar)	Atmosférica a 20,000 (1,379)	Atmosférica a 25,000 (1,724)

4.2. SELECCIÓN DEL DISPOSITIVO DE CAMPO:

Como se mencionó en el capítulo 2 en la sección 2.2.1, el dispositivo de campo debe estar en capacidad de realizar adquisición de datos, acondicionamiento de señales, control del SICP y permitir comunicación por medio de interfaces. Para esta labor es necesario un equipo multifuncional con gran capacidad de cómputo, fácil programación y robustez estructural para soportar las condiciones de campo.

Hasta el momento se puede decir que el mejor dispositivo que ha salido al

mercado con todas aquellas características es el Controlador de Automatización Programable (PAC). National Instruments es la compañía pionera en el desarrollo de estos equipos y ofrece en el mercado su producto denominado Compact Field-Point, el cual fue finalmente el equipo seleccionado para esta labor tan importante.

4.2.1. DISPOSITIVO DE CAMPO COMPACT FIELD POINT¹⁹ CFP-2020:

Figura 4-3: Controlador de Automatización programable 'PAC' Compact Field Point.



Fuente: <http://www.ni.com>

El Compact Field Point CFP-2020, es un controlador de automatización programable (PAC), que posee entradas/salidas modulares (E/S) de control embebido suministrando la potencia suficiente para aplicaciones de control complejo, análisis de datos, acondicionamiento de señales, medida y adquisición de datos, además que proporciona interfaces de comunicación para conectar a otros dispositivos.

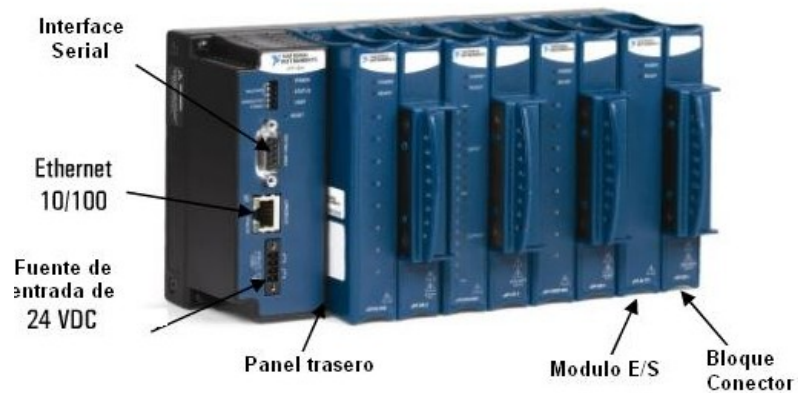
Compact Field Point incluye acondicionamiento de señales con conexión directa a sensores y actuadores. Existen módulos para conectar directamente a termopares, RTDs, galgas extensiométricas, señales de 4-20 mA, fuentes de alta tensión, y muchas otras señales. Este sistema trabaja de manera embebida, ejecutando el software de programación LabVIEW Real-Time en un procesador embebido, lo que facilita su configuración y programación. El diseño del sistema le

¹⁹ Equipo Fabricado por National Instruments disponible en www.ni.com

permite operar en ambientes rudos con ruido electromagnético, amplio rango de temperaturas, vibraciones y choques.

El Compact Field Point está integrado por varios módulos como se muestra en la Figura 4-4, los cuales en conjunto permiten el correcto funcionamiento del sistema.

Figura 4-4: Compact Field Point CFP-2020



Fuente: <http://www.ni.com>

4.2.2. MÓDULOS DEL COMPACT FIELD POINT CFP- 2020:

➤ ***INTERFAZ CONTROLADORA CFP-2020:***

Figura 4-5: Interfaz controladora CFP-2020



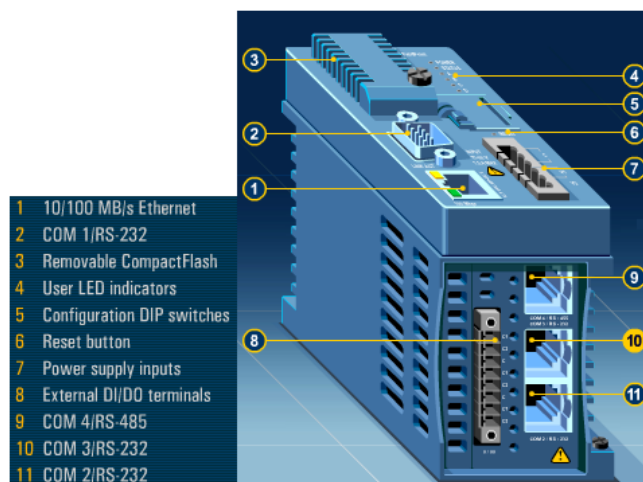
Fuente: <http://www.ni.com>

La interfaz controladora CFP-2020 mostrada en la Figura 4-5, corresponde a la unidad central donde se almacena el software de control y se configura la comunicación de todo el sistema, las características de este módulo son las que se enlistan a continuación.

- 1 puerto serial RS485 y 3 RS232 para conexión a periféricos.
- Hasta 512 MB de almacenamiento CompactFlash desmontable.
- Controladores en tiempo real, autónomos y embebidos con interfaz Ethernet para E/S distribuida basada en PC.
- El controlador embebido ejecuta LabVIEW Real-Time para control, registro de datos y procesamiento de señales.
- 65 MB de almacenamiento CompactFlash no volátil, memoria DRAM de 32 MB.
- Servidores Web de archivos embebidos con interfaz de usuario de panel remoto.

En la Figura 4-6 se enlistan algunas de las características de la estructura física del hardware.

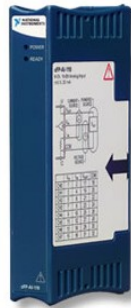
Figura 4-6: Características físicas del CFP-2020.



Fuente: <http://www.ni.com>

➤ **MÓDULO DE ENTRADA ANALÓGICA CFP-AI-110:**

Figura 4-7: Módulo de entrada analógica CFP – AI - 110



Fuente: <http://www.ni.com>

Existe una variedad de entradas analógicas para el Compact Field Point que permite medir con precisión sensores analógicos. Con acondicionamiento de señales integrado que permite conectar directamente a señales de alta tensión, baja tensión, corriente (miliamperios), termopares, RTDs y circuitos de puente (como las galgas extensiométricas). Los módulos de entrada brindan un puente de distribución de potencia para hacer más fácil el trabajar con sensores con 2 cables de lazo de corriente, así como, protección contra sobretensiones transitorias de 2,300 Vrms entre los canales de entrada y el plano trasero. Para facilitar la instalación y el montaje, los módulos Compact Field Point de entrada analógica presentan operación HotPnP (plug-and-play) para ser detectados e identificados automáticamente por el software de configuración²⁰.

Para acoplar las señales de tensión y corriente provenientes de los sensores, se seleccionó el módulo de entrada analógica CFP-AI-110 (ver Figura 4-7), el cual permite realizar el acondicionamiento de las mismas. Las características de este módulo se enlistan a continuación.

²⁰ Tomado de National Instruments. www.ni.com.

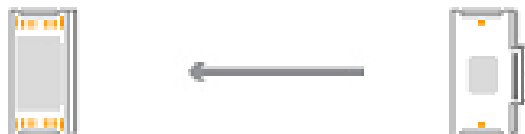
- Operación HotPnP (plug-and-play)
- Acepta señales analógicas de tensión de ± 60 mV, ± 300 mV, ± 1 V, ± 5 V, ± 10 V, 0 a 1 V, 0 a 5 V, 0 a 10 V
- Acepta señales analógicas de corriente de 0 a 20 mA, 4 a 20 mA, ± 20 mA.
- Rango de operación de -40 a 70 °C.
- 8 entradas de tensión o corriente
- Rango de entrada y filtro configurable por software por canal
- Resolución de 16 bits, rechazo de ruido de 50/60 Hz

En este trabajo se hará uso de solo dos entradas de las ochos disponibles, una será para la medida de tensión y la otra se utilizará para monitorear la corriente, las características de este módulo con respecto a la medida de corriente y tensión es como se muestra en la Tabla 4-2. El módulo CFP-AI-110 requiere de un bloque conector como se muestra en la Figura 4-8, y que se describe en la siguiente sección.

Tabla 4-2: Características del módulo de entrada analógica CFP-AI-110

CANALES DE ENTRADA	RESOLUCIÓN	TIPO DE ENTRADA	RANGOS DE ENTRADA	FILTROS DE RUIDO A 50/60 HZ
8	16 bits	Tensión	± 60 mV, ± 300 mV, ± 1 V, ± 5 V, ± 10 V, 0 to 1 V, 0 a 5 V, 0 a 10 V	Configurable por software
		Corriente	0 a 20 mA, 4 a 20 mA, ± 20 mA	

Figura 4-8: Módulo CFP-AI-110 y bloque conector CFP-CB-1.



➤ **BLOQUE CONECTOR CFP-CB-1:**

Figura 4-9: Bloque conector CFP-CB-1.



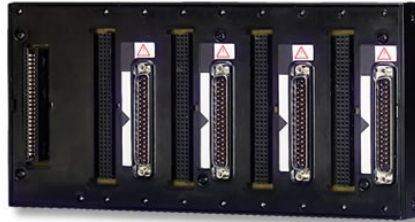
Fuente: <http://www.ni.com>

El CFP-CB-1, se monta al plano trasero entre los módulos de entrada, proporcionando una manera conveniente de conectar sensores y actuadores. El bloque conector viene con dos barras de liberación de tensión. Una para cables individuales y otra para cables más gruesos. El CFP-CB-1 tiene ranuras para ataduras de cables para asegurar mejor a los mismos y tiene terminales con codificación en colores para facilitar el cableado. Las características del bloque conector seleccionado son las que se muestran a continuación.

- Se monta al plano trasero en medio de los módulos de E/S
- Facilidad de cableado con las terminales con codificación en colores para conexiones de tensión y conexiones comunes
- Liberación de tensión y ranuras integradas para ataduras de cables
- Se requiere un CFP-CB-1 para cada módulo de E/S Compact Field Point.

➤ **PLANO TRASERO CFP-BP-4:**

Figura 4-10: Panel trasero CFP-BP- 4



Fuente: <http://www.ni.com>

Los planos traseros son elaborados de metal moldeado con lazos a tierra en un costado y en la base, presentan conexiones de rosca para un módulo controlador, cuatro u ocho módulos de E/S y conectores D-Sub de 37 pines para conexiones de E/S. Los planos traseros tienen una placa de montaje horizontal CFP-PM-H, la cual tiene agujeros de montaje en cada lado del plano trasero para que se pueda montar al panel.

El plano trasero CFP-BP-4 mostrado en la Figura 4-10, provee 4 ranuras para módulos de E/S, 4 para los bloques conectores y 1 para la conexión de la interfaz, permitiendo realizar en forma ordenada y eficiente la conexión y comunicación entre cada uno de estos módulos, la características del panel son las que se enlistan a continuación.

- Montaje de rosca seguro para módulos de E/S y control
- Incluye juego para montaje horizontal del panel
- Plano trasero de metal sólido para instalación robusta
- Montaje en riel DIN y panel
- Bus local para comunicaciones y distribución de potencia a los módulos

➤ **FUENTE DE POTENCIA NI PS-5:**

Figura 4-11: Fuente de potencia NI PS-5



Fuente: www.ni.com

La salida del suministro de potencia se conecta al módulo controlador CFP-2020, el cual regula, filtra y distribuye la potencia al panel trasero. El NI PS-5, Figura 4-11. Es una fuente de poder de 24 V montada en riel DIN que proporciona corriente de 5 A y está estimada para operación desde -25°C hasta 60°C. En la Tabla 4-3 se resumen las características de la fuente de potencia.

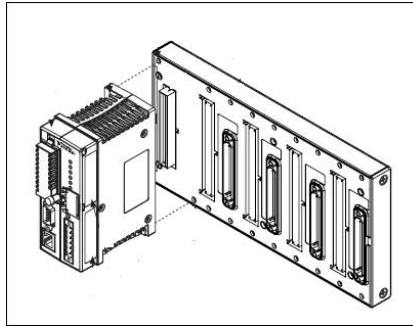
Tabla 4-3: Resumen de las características de la fuente de potencia NI PS-5.

TENSIÓN DE SALIDA (VDC)	CORRIENTE DE SALIDA (A)	TENSIÓN DE ENTRADA
24	5	De 90 -250 VAC 50/60 Hz

4.2.3. CONEXIÓN DE LOS MÓDULOS DEL COMPACT FIELD POINT:

En esta sección se monta toda la conexión de los módulos del equipo encargado del control y la adquisición de señal, para ello a partir de la Figura 4-12 se muestra la secuencia de conexión de todos los módulos.

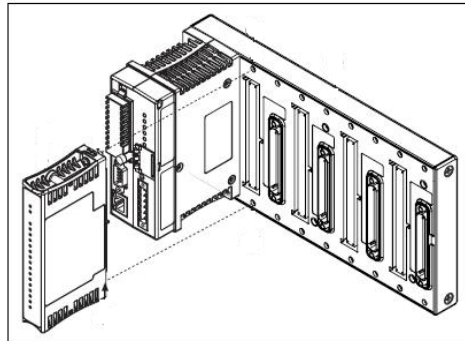
Figura 4-12: Conexión de la interfaz controladora en el panel trasero.



Fuente: <http://www.ni.com>

En la Figura 4-12 se observa cómo debe ser la conexión de la interfaz controladora en el panel trasero, para efectos de este trabajo en el CFP-2020 se monta el software y las directrices del sistema de control y la adquisición de datos. En la Figura 4-13 se observa la conexión del módulo de entrada analógica sobre el panel trasero, la cual se encargará de la adquisición de las señales de tensión y corriente, el módulo específico para esta aplicación es el CFP-AI-110.

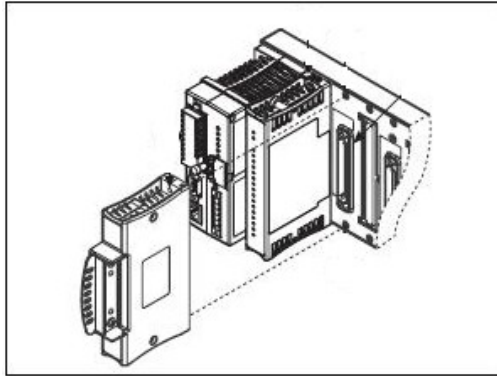
Figura 4-13: Conexión del módulo de entrada analógica en el panel trasero.



Fuente: www.ni.com

A continuación, en la Figura 4-14 se observa el ensamble del bloque conector para el módulo de entrada al panel trasero.

Figura 4-14: Conexión del bloque conector en el panel trasero.



Fuente: www.ni.com

▲ **Costos de los módulos del sistema Compact Field Point:**

Una de las ventajas de este sistema es que permite solo comprar aquellos componentes que la aplicación requiera, En nuestro caso el SADFSP solo requiere de los módulos CFP mostrados en la Tabla 4-4, en la cual se muestran también sus respectivos costos.

Tabla 4-4: Costos de los módulos CFP para el SADFSP:

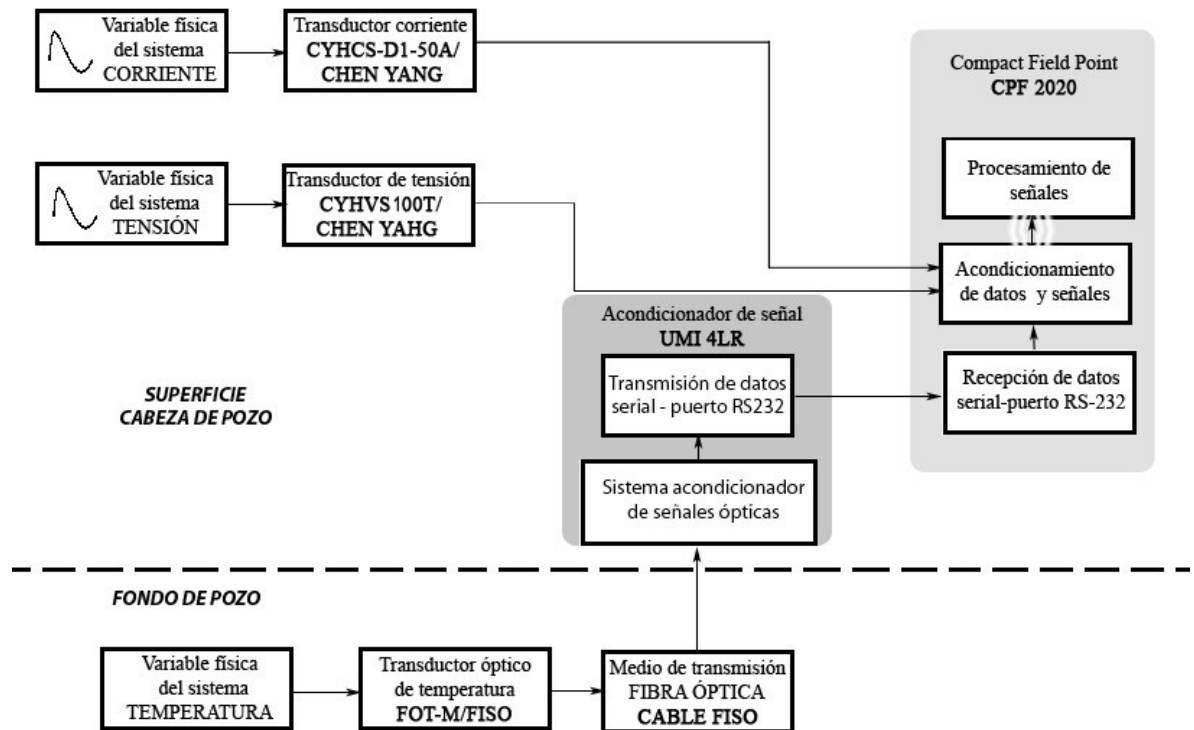
MÓDULO CFP	COSTO
CFP 2020	US \$ 1,587.00
CFP-AI-110	US \$ 463.50
CFP-BP-4	US \$ 387.00
CFP-CB-1	US \$ 148.50
Fuente DC	US \$ 198.00
Cables	US \$ 27.00
Total	US \$ 2.811,00

Fuente: National Instruments Compañy.

5. INTEGRACIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS EN FONDO Y SUPERFICIE DE POZO (SADFSP).

5.1. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SADFSP

Figura 5-1: Diagrama de bloques del SADFSP



Finalmente, luego de realizar la selección de dispositivos y todos los elementos del SADFSP, se hace la integración del sistema. El SADFSP se puede describir por el diagrama de bloques de la Figura 5-1.

El SADFSP consta de 3 Módulos, el módulo de tensión, el módulo de corriente y el módulo de temperatura. El módulo de tensión corresponde a la variable física del sistema (TENSIÓN), el transductor de tensión y el dispositivo de campo. Este módulo tiene una configuración simple gracias a la versatilidad de cada uno de sus

elementos, El sensor de efecto Hall se encarga de medir la variable para luego enviarla al Dispositivo de campo, donde se realizará el acondicionamiento, procesamiento y recepción de la misma, cabe anotar que para que el dispositivo de campo logre lo anteriormente dicho debe ser programado. En el caso del módulo de corriente se sigue un proceso similar al de tensión. El módulo de temperatura tiene un esquema un poco más complejo, consta de la variable física del sistema (TEMPERATURA), el transductor óptico de temperatura, el sistema acondicionador de señales y el dispositivo de campo.

Cada una de las etapas mostradas en el diagrama de bloques de la Figura 5-1, lleva asociado su respectivo dispositivo, lo cual se presenta en la Figura 5-2.

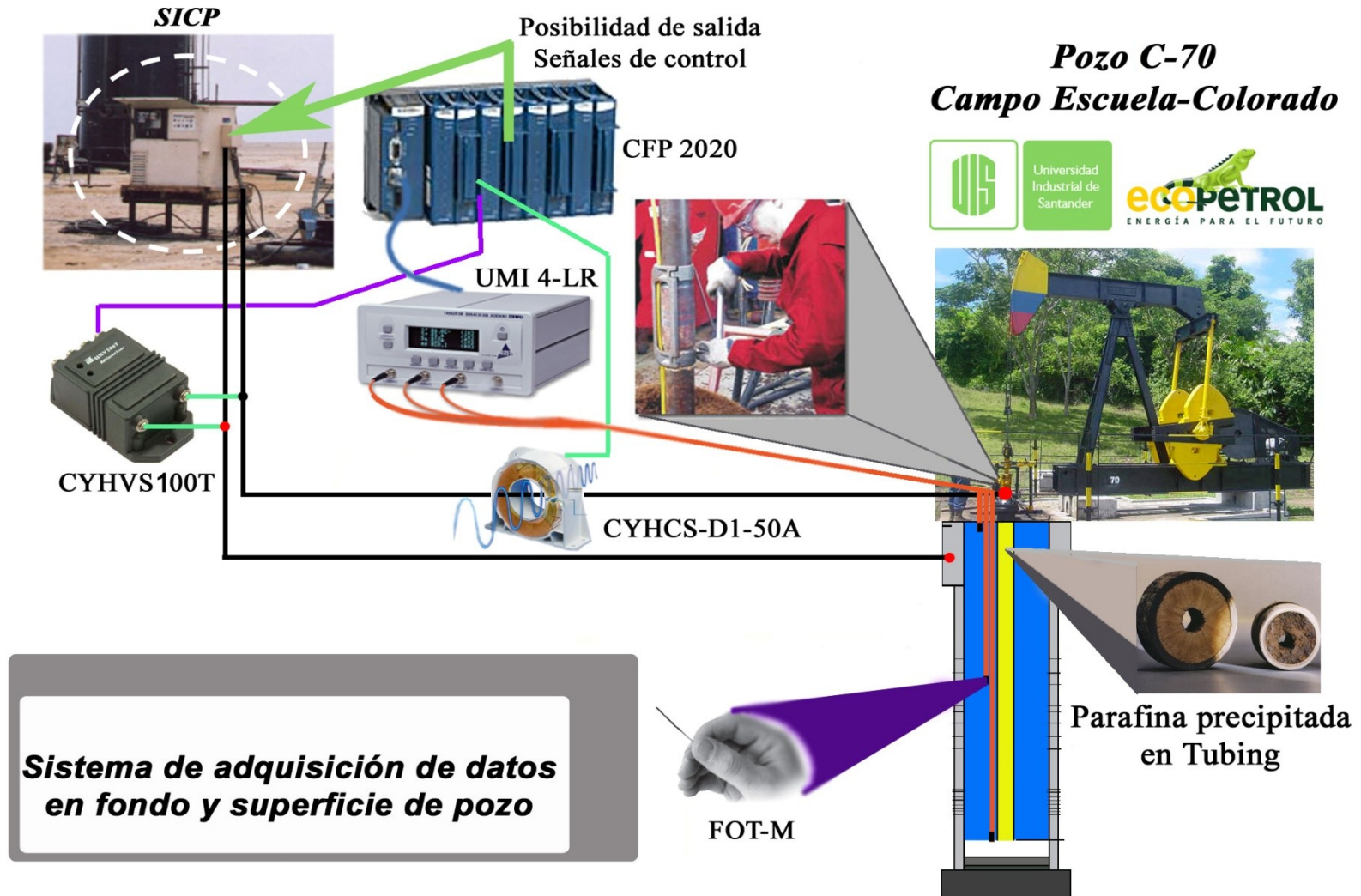
5.2. FUNCIONAMIENTO Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En definitiva el sistema está constituido por las siguientes partes:

- ▲ 3 sensores de Temperatura de fibra óptica FOT-M/ FISO.
- ▲ 3 conectores ST para fibra óptica.
- ▲ 1 acondicionador de Señal para sensores de fibra óptica UMI 4-LR/ FISO.
- ▲ 3052 m de cable de Fibra óptica²¹ multimodo FISO.
- ▲ 1 cable RS-232, para transmisión de datos entre el UMI 4-LR y Compact Field Point CFP-2020.
- ▲ 1 Sensor de Corriente de efecto Hall CYHCS-D1-50A / ChenYang-Technologies.
- ▲ 1 Sensor de Tensión de efecto Hall CYHVS100T / ChenYang-Technologies.
- ▲ Sistema Compact Field Point CFP-2020, con 1 módulo de entradas análogas CFP – AI - 110.

²¹ El cable de fibra óptica es anexado al sensor directamente por el fabricante (FISO)

Figura 5-2: Sistema de adquisición de datos en fondo y superficie de pozo SADFSP.



▲ ***FUNCIONAMIENTO DEL MÓDULO DE CORRIENTE***

Esta variable física del sistema corresponde a una corriente de frecuencia variable de 0-1 kHz, la cual se estima en 69,4555 A. El monitoreo de esta variable se realiza mediante la sonda de efecto Hall CYHCS-D1-50A / CHEN YANG. Dicha sonda entrega una salida de tensión de $\pm 4V$, la cual se acopla directamente al Compact Field Point por medio del módulo de entrada analógico CFP-AI 110 que acepta señales de tensión hasta de $\pm 10 V$. El Compact Field Point CFP 2020 se encarga de adquirir, acondicionar y procesar el valor obtenido de la sonda gracias a la programación que se hace al mismo por medio del Software Labview Real Time.

▲ ***FUNCIONAMIENTO DEL MÓDULO DE TENSIÓN***

Esta variable física del sistema corresponde a una tensión de frecuencia variable de 0-1 kHz, la cual se estima en 83,768 V. el monitoreo de esta variable se realiza mediante la sonda de efecto Hall CYHVS100T / CHEN YANG. Esta sonda permite el registro de tensiones diferenciales, simplemente se debe conectar en el terminal H+ en el valor de tensión más positivo y el H- en el valor de tensión más negativo respectivamente. El CYHVS100T entrega una salida de tensión de ± 4 ó $\pm 5V$, la cual se acopla directamente al Compact Field Point por medio del módulo de entrada analógico CFP-AI 110 que acepta señales de tensión hasta de $\pm 10 V$. El Compact Field Point CFP 2020 se encarga de adquirir, acondicionar y procesar el valor obtenido de la sonda gracias a la programación que se le hace a este por medio del Software Labview Real Time.

▲ **FUNCIONAMIENTO DEL MÓDULO DE TEMPERATURA**

La temperatura del tubing en el pozo C-70 se estima en un rango de 20 - 54.44°C. El valor de dicha variable se mide por medio de 3 sensores ópticos FOT-M/FISO, se transmite a través del cable de fibra óptica FISO y se acondiciona por medio del UMI 4-LR. La unidad UMI 4-LR trabaja en modo secuencial automático en modo de adquisición directa, esto permite que los datos medidos sean transmitidos inmediatamente al dispositivo de campo Compact Field Point por medio de del enlace serial RS 232. Esta comunicación entre los dos dispositivos se establece sincronizando y programando fácilmente cada uno de ellos.

5.3. CARACTERÍSTICAS DEL SADFSP:

El SADFSP cuenta con un diseño tecnológico que brinda todas las características de robustez, inmunidad, adaptabilidad y versatilidad necesarias para su labor. La clave de su confiabilidad está en la cuidadosa selección de cada uno de sus dispositivos. Por otra parte, realizar adquisición, acondicionamiento, procesamiento y control de variables con un mismo dispositivo (Compact Field Point), permite mayor rapidez y eficiencia a las maniobras que deba realizar el SICP, así como un gran ahorro de potencia.

El diseño conceptual del SADFSP se ha realizado cuidadosamente para que cada uno de sus elementos garantice el mejor rendimiento al sistema. En la Tabla 5-1 se muestra un contraste entre los requerimientos para la aplicación del SICP en el pozo C-70 y las características que ofrece el SADFSP.

Tabla 5-1: Contraste entre los requerimientos mínimos y las características del SADFP.

REQUERIMIENTOS DE LA APLICACIÓN	CARACTERÍSTICAS DEL SADFP
Medición de temperatura al tubing en 3 puntos del espacio anular del pozo, ubicados a 0, 513 y 1026 m, por medio de sensores inmunes a IEM que cuenten con una resolución mínima de 0,16 °C y un rango ideal de 20°C a 53,44°C. Además con capacidad de soportar 280 PSI de presión.	Medición de temperatura al tubing por medio de 3 sensores de fibra óptica FISO/FOT-M ubicados a 0, 513 y 1026 m. Los cuales tienen características de inmunidad a IEM, resolución de 0,01 °C, rango de 20 °C a 85 °C y capacidad de soportar hasta 1000 psi de presión.
Medio de transmisión apto para entregar registros confiables a 1526 m sin acoples ni repetidores dentro del pozo, con capacidad de soportar 280 PSI de presión e inmunidad a IEM.	Cable de fibra óptica FISO robusto, enterizo, sin uniones entre los sensores, sin elementos electrónicos, sin repetidores ni acoples dentro del espacio anular del pozo, inmune a IEM, capaz de soportar presiones de hasta 25,000 PSI y capacidad de entregar registros confiables a más de 1526 m.
Medición de corriente de inyección al tubing, estimada en 69,455 A con frecuencia variable de 0 - 1 kHz.	Medición de corriente de inyección al tubing por medio de 1 sensor de efecto Hall CYHCS-D1-50A/CHEN YANG, con ancho de banda DC~150 kHz y corriente de entrada hasta de ±100 A. Con señal de salida de 4 V acoplable directamente el CFP 2020.
Medición de tensión de salida del módulo de acondicionamiento de potencia (SICP), estimada en 83,768 V con frecuencia variable de 0 - 1 kHz.	Medición de tensión del módulo de acondicionamiento de potencia (SICP), por medio de 1 sensor de efecto Hall CYHVS100T/CHEN YANG, con ancho de banda DC~10 kHz y rango de 0 ~300 V. Con señal de salida de 4 V ó 5V acoplable directamente el CFP 2020.
Dispositivo de campo capaz de realizar adquisición, análisis de datos, acondicionamiento de señales, control de procesos y comunicación por medio de interfaces.	Controlador de automatización programable (PAC) Compact Field Point CFP 2020. Con entradas/salidas modulares de control embebido, apto para aplicaciones de control complejo, análisis de datos, acondicionamiento de señales, medida y adquisición de datos. Con 1 puerto serial RS 485, 3 puertos RS 232 y 512 MB de almacenamiento CompactFlash desmontable.

5.4. COSTO TOTAL DEL SADFSP

El SADFSP tiene un costo tal como se describe en la Tabla 5-2:

Tabla 5-2: Costos totales para el SADFSP:

ELEMENTO	PROVEEDOR	REFERENCIA	CANT	VALOR UNIT	VALOR X CANT
Dispositivo de campo y accesorios	National Instruments	CFP 2020	1	US \$ 1,587.00	US \$ 1,587
		CFP-AI-110	1	US \$ 463.50	US \$ 463.50
		CFP-BP-4	1	US \$ 387.00	US \$ 387.00
		CFP-CB-1	1	US \$ 148.50	US \$ 148.50
		Fuente NI PS-5	1	US \$ 198.00	US \$ 198.00
		Cables	1	US \$ 27.00	US \$ 27.00
Sensor de tensión de efecto Hall	Chen Yang	CYHVS100T	1	US \$ 28.00	US \$ 28.00
Sensor de corriente de efecto Hall	Chen Yang	CYHCS-D1-50A	1	US \$ 36.5	US \$ 36.5
Sensor de temperatura óptico	Fiso	FOT-M	3	US \$ 280	US \$ 840
Acondicionador de señales ópticas	Fiso	UMI 4-LR	1	US \$ 11,000	US \$ 11,000
Extensión cable de fibra óptica	Fiso	FISO	3052	US \$ 5.35	US \$ 19,380
Total				US \$ 34,095	

5.5. OBSERVACIONES

- Para conocer la temperatura del tubing del pozo C-70 en cualquier punto, se recomienda la instalación de tres sensores ubicados a 0, 513 y 1026 m. Para determinar el rango de los sensores, se hace a partir del punto de nube del crudo.
- Los sensores de temperatura de fibra óptica son inmunes a interferencias electromagnéticas, pequeños y libres de electrónica interna, siendo además muy robustos para ambientes extremos por su resistencia en medios corrosivos y ásperos, por lo tanto son el método ideal para medir esta variable en el espacio anular de pozos petroleros. Este tipo de sondas por otra parte entregan registros confiables y de gran precisión.
- El acondicionador de señales UMI 4 – LR permite transmisión de datos en modo de adquisición directa por el puerto serial RS 232, mediante el cual se puede conectar a un computador de campo PAC.
- El Sistema de Adquisición de Datos en Fondo y Superficie de Pozo, fue diseñado a partir del pozo modelo C-70 de Campo Escuela Colorado UIS-ECOPETROL por su tendencia a la precipitación de parafinas. Este problema que puede ser atacado por medio de un SICP que a su vez requiere el sistema de adquisición de datos para monitorear las variables. Esto brinda la posibilidad al sistema de adquisición de datos en fondo y superficie de pozo de ser construido e instalado en un futuro.
- Para diseños posteriores, se deben caracterizar las condiciones de trabajo del sistema con el fin de establecer cuáles son las nuevas distancias a las que se requiere hacer las medidas de temperatura. Esto permitirá solicitar al

fabricante FISO la distancia de fibra óptica requerida, teniendo en cuenta que distancias mayores de 4000 metros las fibras requieren de un tratamiento especial por las atenuaciones a las que se pueda ver sometida la señal óptica.

5.6. CONCLUSIONES

- La corriente de inyección del SICP, origina en el pozo un comportamiento similar al de un cable coaxial, lo cual asocia un campo eléctrico junto con un campo magnético. La presencia de estos campos genera interferencia electromagnética sobre los equipos encargados de monitorear la temperatura en fondo de pozo. En vista de que el SICP no ha podido cuantificar dichos campos, se concluye que el sistema de monitoreo de temperatura debe ser inmune a IEM.
- Para atacar eficientemente el problema de precipitación de parafinas del pozo C-70 de campo Escuela Colorado UIS-ECOPETROL, el SICP requiere entregar a la carga una potencia activa de 5,972 kW, una corriente de inyección de 69,455 A y una tensión de 83,768 V.
- Una de las ventajas de los sensores ópticos es que permiten transmitir la señal directamente a través de un cable de fibra óptica de la longitud requerida para cada proyecto, sin involucrar dispositivos electrónicos ni acoples, lo cual asegura al módulo de temperatura inmunidad para ambientes con presencia de IEM.
- El sensor de corriente de efecto Hall CYHCS-D1-50A/CHEN YANG permite la medición de esta variable en un rango dinámico de frecuencias (DC - 150 KHz), lo cual permite que sea utilizado tanto para corriente alterna como para corriente continua, además brinda un desacople eléctrico entre la variable física del sistema y el sistema de adquisición. Este tipo de sonda entrega una señal de tensión que puede ser acoplada directamente al Compact Field Point CFP 2020 por medio de su módulo de entrada CFP – AI – 110.

- Los módulos de entrada analógicas Compact Field Point CFP – AI - 110 permiten conectar directamente las señales de salida de los sensores de tensión y corriente, lo que se traduce en un ahorro de dispositivos electrónicos para acondicionamiento de señales. Esto permite ahorro de potencia junto con una mejor adecuación de las mismas.
- El dispositivo de campo Compact Field Point CFP 2020 adquiere, procesa y efectúa maniobras de control. Por otra parte Compact Field Point proporciona toda la flexibilidad para realizar comunicación ethernet, lo que permite la adecuación de un sistema de monitoreo a distancias remotas.
- El sistema de adquisición de datos en fondo y superficie para control de calentamiento de pozo tiene un costo total de US\$ 34,095, de los cuales el cable de fibra óptica es lo más costoso con un valor de US\$19,380. Pero debido a las condiciones del pozo y a la exposición del IEM, la fibra óptica es el mejor método para garantizar confiabilidad al módulo de temperatura.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] BARBERRI, Efraín. EL POZO ILUSTRADO, Programa de educación petrolera. Fonciéd. Caracas 1998.
- [2] CRISTANCHO, Diana. HOYOS, Jorge. PROCEDIMIENTOS METODOLÓGICOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE FLUIDOS DE CAMPOS MADUROS. APLICACIÓN A LOS FLUIDOS DEL CAMPO COLORADO. Bucaramanga 2008. Trabajo de grado (Ingeniería de petróleos). Universidad Industrial de Santander. Ingenierías Físico Químicas. Ingeniería de Petróleos.
- [3] MARTÍNEZ, Baltasar. INTRODUCCIÓN A LA INGENIERIA DE LA FIBRA ÓPTICA. Editorial Addison-Wesley Iberoamericana. USA 1994.
- [4] GIRALDO, Carlos. GUALDRÓN, Jesús. MENDEZ, Juan. DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA Y DETECCIÓN DE FUGAS DE MICROONDAS PARA EL ESTUDIO DE LA INTERACCION TERMICA MICROONDAS – PAVIMENTO, Bucaramanga 2004. Trabajo de grado (Ingeniería electrónica). Universidad Industrial de Santander. Ingenierías Físico mecánicas. Ingeniería electrónica.
- [5] CREUS, Antonio. INSTRUMENTOS INDUSTRIALES: SU AJUSTE Y CALIBRACIÓN. Editorial Alfaomega. México. 1995.
- [6] FORREST C. Tyson. INDUSTRIAL INSTRUMENTATION. Editorial Prentice-Hall, Inc. USA, 1961.

- [7] ARIAN. TERMOCUPLAS: QUE SON Y COMO FUNCIONAN. NOTA TÉCNICA 2. Disponible en www.arian.cl. Acceso 13 de noviembre 2006
- [8] WALT, Kester. BRYANT, James. WALT, Jung. TEMPERATURE SENSORS. SECTION7. Analog devices. Disponible en www.analog.com
- [9] CRAIG C, Freudenrich. HOW FIBER OPTICS WORK. Disponible en www.howstuffworks.com/fiber-optic1.htm. Acceso el 10 de febrero 2007.
- [10] HANSEN, Henning. NUEVO Y SORPRENDENTE SISTEMA BASADO EN FIBRA ÓPTICA PARA RECOLECCIÓN Y MONITOREO. Disponible en www.ziebel.biz. Acceso 14 de agosto 2007
- [11] NUEVOS DESARROLLOS EN SENSORES DE CORRIENTE EN MEDIDORES DE ESTADO SÓLIDO. Disponible en www.analog.com/UploadedFiles/Technical_Articles. Acceso el 10 de febrero de 2007.
- [12] BROWN, Trevor. ENTREGA DE DATOS A TIEMPO. Disponible en www.slb.com.
- [13] ECK, Joseph. MONITOREO EN EL FONDO DE POZO: SU EVOLUCION. Disponible en www.slb.com.
- [14] HIRSCHTEALDT, Marcelo. INSTALACIÓN DE TUBING CAPILAR E INYECCIÓN DE AGENTE ESPUMANTE EN FONDO DE POZO WEATHERFORD. Disponible en www.oilproduction.net. Acceso el 1 de marzo de 2007.

- [15] FIBRA ÓPTICA. Disponible en www.monografias.com. Acceso 14 de julio de 2006.
- [16] EL EFECTO HALL. Disponible en www.wikipedia.com. Acceso 30 de marzo de 2007.
- [17] BAYONA SANCHEZ, Carlos. OSORIO LESMES, Douglas. ESTUDIO DE LA RUPTURA DE EMULSIONES EN CRUDOS PESADOS POR MÉTODOS CONVENCIONALES Y POR EFECTO DE MICRO-ONDAS. Bucaramanga: Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander, Facultad Físico Químicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos, 1995.
- [18] DA MATTA, W. y CURSINO D. F. S. CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO PARA RECUPERACIÓN DE PETRÓLEO: UN CASO PRÁCTICO. Información Tecnológica, Petrobrás, E&PRNCE-GERET-DECAR. Brasil. Vol. 8 No. 2 – 1997.
- [19] INVIERNO, Pablo. VIABILIDAD DE UTILIZACIÓN DE UN SISTEMA DE CALEFACCIÓN DE POZOS PETROLEROS EN AREAS FRÍAS, DE ALTA VISCOSIDAD Y ALTO CONTENIDO PARAFÍNICO. España: Maestría en dirección de empresas. Universidad Del Cema. 2001.
- [20] ESPINOSA, Jairo. BOHÓRQUEZ, José. PUENTE INVERSOR: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PUENTE INVERSOR TRIFÁSICO DE BAJA TENSIÓN Y PROPOSITO GENERAL. Bucaramanga 2004. Trabajo de grado (Ingeniería electrónica). Universidad Industrial de Santander. Ingenierías Físico mecánicas. Ingeniería Electrónica.

- [21] CASTELLANOS, Henry. GRAJALES, Fernando. MODELO ANALITICO DEL CALENTAMIENTO ELECTROMAGNETICO APLICADO A LA FORMACION EN YACIMIENTOS DE CRUDO PESADO, Bucaramanga. 2003. Trabajo de grado (Ingeniero de petróleos). Universidad Industrial de Santander. Ingenierías Fisicoquímicas. Ingeniería de Petróleos.
- [22] TENARIS, Siderca. MANUAL DE USO DE TUBING Y CASING. Disponible en www.tenaris.com/shared/documents/files/CB195.pdf. Acceso el 6 de octubre 2007
- [23] CUESTA, Alonso. EFECTOS DEL RUIDO EN LAS COMUNICACIONES ELECTRÓNICAS. Disponible en www.ponhocuesta.50megs.com. Acceso el 6 de octubre de 2007.
- [24] PEÑA, Omar. MORANTES, Oscar. SISTEMA DE INYECCIÓN DE CORRIENTE EN POZOS (SICP) PARA ESTIMULACIÓN Y AUMENTO DE FACTOR DE LEVANTE, Bucaramanga 2007. Informe final para el Instituto Colombiano de Petróleos (ICP). Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingenierías eléctrica electrónica y telecomunicaciones.
- [25] LOS SENSORES DE FIBRA ÓPTICA DEL INSITUTO POLITECNICO NACIONAL. Periodismo de ciencia y tecnología noviembre del 2000. Disponible en. www.invdes.com.mx/anteriores/Noviembre2000/htm/ipn.html Acceso 27 de noviembre de 2006.
- [26] MEDIOS DE TRANSMISION. Disponible en www.monografias.com. Acceso 14 de julio de 2006.

- [27]** CABLE ÓPTICO DE FONDO DE POZO WEATHERFORD. Disponible en www.weatherford.com. Acceso 15 de Junio de 2007.
- [28]** CCD SENSOR. Disponible en www.wikipedia.com. Acceso 30 de Octubre de 2007.
- [29]** MERCADO, Diana. GONZALEZ Jesús. ESTUDIO DE SIMULACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL COMPRTAMIENTO DEL SISTEMA ROCA-FLUIDO DE UN YACIMIENTO DE CRUDO PESADO AL SER SOMETIDO A CALENTAMIENTO ELÉCTRICO RESISTIVO. Bucaramanga 2005. Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingeniería de petróleos.
- [30]** MONROY, Manuel. FIGUEROA, Diego. DISEÑO DEL COMPLETAMIENTO DE UN POZO QUE SE SOMETERÁ A ESTIMULACIÓN CON CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO. Bucaramanga 2005. Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingeniería de petróleos.
- [31]** Kreith, Frank. PRINCIPIOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR. Mexico Thomson Learning, 2001.
- [32]** INCROPERA, F., De Witt, D. Fundamentos de Transferencia de Calor, Editorial Prentice-Hall, 1999.
- [33]** GIECK. Manual de fórmulas técnicas - 3 edición. México. Editorial Alfaomega, 2000.

REFERENCIAS DE INTERNET:

- ♣ www.fiso.com
- ♣ www.digital.ni.com
- ♣ www.ni.com
- ♣ www.hallsensors.de/HallVoltage.htm
- ♣ www.festo.com
- ♣ www.automatica-elec.es
- ♣ www.espanol.omron.com
- ♣ www.mesurex.com
- ♣ www.insituh.com
- ♣ www.weatherford.com
- ♣ www.amploc.com
- ♣ www.ziebel.biz
- ♣ www.slb.com
- ♣ www.analog.com
- ♣ www.library.abb.com
- ♣ www.allegromicro.com
- ♣ www.lem.com
- ♣ www.tamuracorp.com
- ♣ www.infineon.com
- ♣ www.cui.com
- ♣ www.amidata.es
- ♣ www.generalcable.es
- ♣ www.ampnetconnect.com
- ♣ www.furukawa.co.jp
- ♣ www.fitel.com
- ♣ www.totoku.com
- ♣ www.capgo.com

- ⤴ www.fosis.com
- ⤴ www.fotemp.com
- ⤴ www.lios-tech.com
- ⤴ www.scensor.com
- ⤴ www.abb.com

ANEXOS

Anexo A:

Viscosidades pozos C/38-70-72-75

Para revisar este anexo, remítase al archivo en versión *portable document format* ubicado en: \Anexos\ANEXO A - Viscosidades pozos 38-70-72-75.XLS

Anexo B:

Modelo de impedancia eléctrica para Tubing

Para revisar este anexo, remítase al archivo en versión *portable document format* ubicado en: \Anexos\ ANEXO B-Modelo de impedancia eléctrica para la Tubería de Producción.PDF.

Anexo C:

Calculo de impedancia Tubing Casing

Para revisar este anexo, remítase al archivo en versión *portable document format* ubicado en: \\Anexos\ ANEXO C-Calculo de impedancia Tubing Casing.XLS

Anexo D:

Norma API 5CT ISO 11960

Para revisar este anexo, remítase al archivo en versión *portable document format* ubicado en: \Anexos\ ANEXO D-Norma API 5CT ISO 11960.PDF

Anexo E:

Proceso de calentamiento en tubería

Para revisar este anexo, remítase al archivo en versión *portable document format* ubicado en: \Anexos\ ANEXO E-Proceso de calentamiento en tubería.PDF

Anexo F:

Descripción del calentamiento del SICP

Para revisar este anexo, remítase al archivo en versión *portable document format* ubicado en: \Anexos\ ANEXO F-Descripción del calentamiento DEL SICP-Oscar Morantes.PDF

Anexo G:

Funcionamiento del sensor de fibra óptica

Para revisar este anexo, remítase al archivo en versión *portable document format* ubicado en: \Anexos\ANEXO G-Funcionamiento del sensor de fibra óptica.PDF

Anexo H:

Datasheet del sensor FOT-M / FISO

Para revisar este anexo, remítase al archivo en versión *portable document format* ubicado en: \Anexos\ ANEXO H-Datasheet de sensor FOT-M.PDF

Anexo I:

Datasheet del acondicionador de señal UMI

4-LR

Para revisar este anexo, remítase al archivo en versión *portable document format* ubicado en: \Anexos\ ANEXO I-Datasheet del acondicionador de señal UMI 4-LR-PDF

Anexo J:

Informe de FISO

Para revisar este anexo, remítase al archivo en versión *portable document format* ubicado en: \Anexos\ ANEXO J-Informe de FISO.PDF

Anexo K:

Datasheet sensor corriente de efecto Hall CYHCS-D1-50A / CHEN YANG

Para revisar este anexo, remítase al archivo en versión *portable document format* ubicado en: \Anexos\ ANEXO K-. Datasheet sensor de corriente de efecto Hall CYHCS-D1-50A.PDF

Anexo L:

Datasheet sensor de tensión de efecto Hall
CYHVS100T / CHEN YANG

Para revisar este anexo, remítase al archivo en versión *portable document format* ubicado en: \Anexos\ ANEXO L- Datasheet sensor de tensión CYHVS100T.PDF

Anexo M:

Datasheet NI CFP 2020 y Labview real-time

Para revisar este anexo, remítase al archivo en versión *portable document format* ubicado en: \Anexos\ANEXO M- Datasheet NI CFP 2020 y Labview real time.PDF

Anexo N:

CFP accesorios de entrada-salida

Para revisar este anexo, remítase al archivo en versión *portable document format* ubicado en: \Anexos\ ANEXO N-CFP Accesorios de entrada salida.PDF

Anexo O:

Módulos CFP para entradas análogas

Para revisar este anexo, remítase al archivo en versión *portable document format* ubicado en: \Anexos\ ANEXO O- Módulos CFP para entradas análogas

Anexo P:

Catálogo de CFP

Para revisar este anexo, remítase al archivo en versión *portable document format* ubicado en: \Anexos\ ANEXO P- Catálogo de CFP

Anexo Q:

Diseño del SICP

Para revisar este anexo, remítase al archivo en versión *portable document format* ubicado en: \Anexos\ ANEXO Q- Diseño del SICP