



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
MAESTRÍA EN INGENIERÍAS ÁREA ELECTRÓNICA
Escuela de Ing. Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones



**SISTEMA DE INYECCIÓN DE CORRIENTE EN POZOS (SICP) PARA
ESTIMULACIÓN Y AUMENTO DE FACTOR DE LEVANTE
(MODELADO DE LA TRANSFERENCIA DE CORRIENTE MEDIANTE TUBO DE
PRODUCCIÓN)**

OMAR LEONARDO PEÑA GALVIS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAICAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍAS ÁREA ELECTRÓNICA
ESCUELA DE ING. ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

BUCARAMANGA, ABRIL DE 2008



CONVENIO DE COOPERACIÓN TECNOLÓGICA N°001 - 2003
EMPRESA COLOMBIANA DE PETRÓLEOS - ECOPETROL
Instituto Colombiano de Petróleo - (ICP) TEL.:(57-7)6740000 Ext. 7312
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN SISTEMAS ELÉCTRICOS (GISEL)
Edif. Laboratorios Pesados TEL.: (57-7) 6344000 Ext. 2364



**SISTEMA DE INYECCIÓN DE CORRIENTE EN POZOS (SICP) PARA
ESTIMULACIÓN Y AUMENTO DE FACTOR DE LEVANTE
(MODELADO DE LA TRANSFERENCIA DE CORRIENTE MEDIANTE TUBO DE
PRODUCCIÓN)**

OMAR LEONARDO PEÑA GALVIS

**Trabajo de Investigación para optar para el título de
Magíster en Ingeniería, Área Electrónica**

Tesis desarrollada dentro del Convenio Cooperación N°001 de 2003

DIRECTOR:

DR. HERMANN RAÚL VARGAS TORES

CODIRECTOR:

FIS. JAIRO HUMBERTO GUZMÁN MEJIA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECHANICAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍAS ÁREA ELECTRÓNICA
ESCUELA DE ING. ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2008

*Este trabajo esta dedicado al Creador de todas las cosas
Arquitecto de este mundo*

A mis padres, a quienes debo todo lo que soy

*A mi hija Maria Paula, por la cual todo sacrificio es recompensado
con una sonrisa y un abrazo*

*A mi esposa Gloria Judith, compañera de mis batallas
Por su amor*

*A mi hermano, familiares, docentes y amigos,
gracias por acompañarme en el camino de la vida*

RESUMEN

TÍTULO: SISTEMA DE INYECCIÓN DE CORRIENTE EN POZOS (SICP) PARA ESTIMULACIÓN Y AUMENTO DE FACTOR DE LEVANTE (Modelado de la Transferencia de Corriente Mediante Tubo de Producción)*

AUTOR: ING. OMAR LEONARDO PEÑA GALVIS**

PALABRAS CLAVES: *Calentamiento electromagnético, Crudos Pesados, Impedancia de tubería, Sistemas de potencia, Control de puente inversor, Sistemas de adquisición de datos.*

CONTENIDO:

El presente trabajo de investigación expone el procedimiento para realizar el diseño conceptual de un Sistema de Inyección de Corriente en Pozo (SICP). Este sistema tiene por objetivo incrementar y controlar el gradiente de temperatura en la tubería de producción (*Tubing-Casing*) de un pozo petrolífero. Como novedad se propone la utilización de la tubería misma como elemento generador de calor por disipación de energía eléctrica. Con lo cual se optimiza el diseño y se aprovecha al máximo los elementos estructurales hacen parte de un pozo de producción, ya que no se requiere introducir herramientas especiales ni instrumentos en el pozo para efectuar su calentamiento. Como efecto, se presenta un calentamiento homogéneo en la tubería como consecuencia de las pérdidas eléctricas (Histéresis y corrientes de Eddy) propias del acero, material ferromagnético con el cual se fabrica la tubería de producción. Este incremento de temperatura facilita la movilidad del crudo en el *tubing* ya que la viscosidad es fuertemente dependiente de la temperatura. En consecuencia, se espera que el trabajo del sistema de levantamiento se optimice notablemente ya que el nivel de producción de un pozo esta limitado por la capacidad de las bombas de extracción y no por la capacidad real del pozo. En general, el SICP opera de la siguiente manera: Al *tubing* se le hará circular corriente eléctrica hasta el fondo del pozo, en donde se interconecta con el *casing* y éste a su vez con la tierra del sistema, cerrando de este modo el circuito.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ing. Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Dr. Hermann R. Vargas T.

ABSTRACT

TITLE: WELLS CURRENTS INJECTION SYSTEM (SICP) STIMULATION AND GETS UP INCREASE FACTOR*

AUTHOR: ING. OMAR LEONARDO PEÑA GALVIS**

KEYWORDS: *Electrical Heating, Heavy oil, pipe impedance, Power System, Inverse bridge Control, Data acquisitions system.*

This present investigation work exposes the procedure for conceptuality design of Well Current Injection System (SICP). With object to increase and control the gradient of temperature in the oil well production pipe (Tubing-Casing). As novelty is proposes the use of pipe whit the same as element generator of heat by dissipation of electric power. With which optimizes the design and is maximizes the structural elements are part of a pit of production, as it is not required to introduce special tools or instruments in the pit to make your heating. As an effect, presents a warming homogeneous in the pipe as a result of loss shock (Hysteretic and flows of Eddy) own steel, ferromagnetic material with which it is manufactured by the pipe production. This rise in temperature facilitates mobility of crude oil in the tubing since the viscosity is heavily dependent on the temperature. Consequently, is expected that the work of the system of lifting are optimized markedly since the level of production of well is limited by the capacity of the bombs of extraction and not the real capacity of well. In general, the SICP operates in the following manner: When tubing it will circulate electric current until the merits of the pit, where it interconnects with the casing and it to turn to the land of the system, closing of this way the circuit.

* Degree Work.

** Physic-mechanic Faculty, Electrical, Electronics and Telecommunications Engineering School. Dr. Hermann R. Vargas T.

TÍTULO

SISTEMA DE INYECCIÓN DE CORRIENTE EN POZOS (SICP) PARA ESTIMULACIÓN Y AUMENTO DE FACTOR DE LEVANTE: Modelado de la transferencia de corriente mediante tubo de producción

DIRECTOR DEL PROYECTO

Dr. HERMANN RAÚL VARGAS TORRES

CODIRECTOR DEL PROYECTO

FIS. JAIRO HUMBERTO GUZMÁN MEJIA

AUTOR

ING. OMAR LEONARDO PEÑA

ENTIDADES INTERESADAS EN EL PROYECTO:

Universidad Industrial de Santander - U.I.S.

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (E3T)

EMPRESA COLOMBIANA DE PETRÓLEOS - ECOPETROL

Instituto Colombiano de Petróleo - (ICP)

Grupo de Investigación en Sistemas Eléctricos (GISEL)

PRESUPUESTO **\$190´695.380**

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.
GRADO API:	Clasificación para petróleo con propósitos particulares en función de su densidad. 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).
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.

Tabla de contenido

Introducción	14
Primera Parte	17
Fundamentos Teóricos del SICP	17
Capítulo I	18
Marco Teórico.....	18
1.1. Crudos Pesados	19
1.2. Proceso de calentamiento en tubería	24
1.3. Modelo Electromagnético de la Tubería de Producción	28
1.4. Modelo de impedancia eléctrica para la Tubería de Producción	29
Capítulo II	31
Estado del Arte.....	31
2.1. Antecedentes Históricos	31
2.3. Métodos de calentamiento electromagnético	34
2.3.1 Calentamiento de Alta Frecuencia.....	35
2.3.2 Calentamiento Electromagnético Inductivo	36
2.3.3 Calentamiento Eléctrico Resistivo.....	37
2.4. Sistemas de calentamiento electromagnético.....	38
2.5. Aplicaciones comerciales.....	44
Segunda Parte	47
Diseño del SICP	47
Capítulo III	48
Metodología de Diseño del SICP	48
3.1. Condiciones Iniciales de Diseño.....	49
3.1.2. Sistema de alimentación.....	51
3.1.3. Unidad de acondicionamiento de potencia.....	52
3.1.4. Sistema de conducción de potencia	53
3.1.5. Sección de aislamiento	53
3.1.6. Contactor y Electrodo.....	54
3.1.7. Sistema de retorno o de tierra	56
3.2. Diseño del módulo de Potencia del SICP	57
3.2.1. Puente rectificador	58
3.2.2. Filtro pasa bajos	60
3.2.3. Puente Inversor o Puente H.....	61
3.2.4. Manejador de puente inversor	63
3.2.5. Bobina de acople	65
3.2.6. Transformador de aislamiento	66
Capítulo IV.....	68
Sistema de control	68
4.1. Hardware de control	70

4.2. Sistema de adquisición de datos.....	71
4.3.1. Sistema de Instrumentación (Sensores).....	73
4.3.2. Sistema de Acondicionamiento de señal.....	76
4.3. Técnicas de control para manejar el puente inversor.....	79
4.4. Programación e Interfaz de usuario.....	80
4.4.1. Algoritmo de control.....	81
4.4.2. Interfaz de usuario.....	83
Capitulo V.....	85
Pruebas y Resultados.....	85
5.1. Simulación del comportamiento eléctrico de la tubería de un pozo de producción.....	85
5.1.1. Simulación del modelo físico-matemático de la tubería de producción...87	
5.1.2. Simulación del modelo de impedancia eléctrica para la tubería de producción.....	89
5.2. Simulación térmica.....	91
5.3. Prueba del prototipo de laboratorio.....	95
5.3.1. Pruebas de señal de salida de la fuente de potencia.....	95
5.3.2. Pruebas del sistema de control.....	97
Conclusiones y Recomendaciones.....	100
BIBLIOGRAFÍA.....	103
ANEXO A.....	107
Modelo electromagnético y proceso de magnetización de la tubería de acero.....	107
ANEXO B:.....	119
Prototipo de un sistema de inyección de corriente para pruebas de impedancia eléctrica y térmica.....	119

Lista de figuras

Figura 1. El petróleo y su composición química	19
Figura 2. Curvas empíricas de Viscosidad del crudo contra temperatura a presión atmosférica	22
Figura 3. Perfil de velocidad de un flujo laminar.....	25
Figura 4. Curvas de nivel para la transferencia de calor en tubería.....	27
Figura 5. Modelo de impedancia eléctrica para la tubería de producción.....	29
Figura 6. Herramientas de calentamiento por radiofrecuencia.	36
Figura 7. Vista lateral del calentador patentado por Pershing suspendido dentro del pozo.	39
Figura 8. Vista lateral del dispositivo de calentamiento patentado por Stegemeier.	40
Figura 9. Sección longitudinal de aparato de calentamiento patentado por McCarthy instalado en el pozo.	41
Figura 10. Diagrama de bloques del sistema de inyección de corriente patentado por Bridges.	42
Figura 11. Circuito esquemático de la fuente de inyección de corriente patentado por Bridges.	43
Figura 12. Vista lateral e interior de la herramienta construida por Lynbrook Heating	44
Figura 13. Vista lateral e interior de la herramienta construida por Lynbrook Heating	45
Figura 14. Esquema general de configuración del Sistema de Inyección de Corriente en Pozo (SICP)	49
Figura 15. Componentes de un sistema de calentamiento eléctrico.	50
Figura 16. Sistema de alimentación - subestación eléctrica.	51
Figura 17. Diagrama de Bloques del SICP.....	52
Figura 18. Conexiones de unidad de acondicionamiento de potencia al <i>tubing</i>	53
Figura 19. Distribución interna de un pozo real, adecuado para calentamiento electromagnético y su equivalente en parámetros circuitales.....	55
Figura 20. Rectificador puente trifásico.....	59
Figura 21. Módulo de medio puente y esquemático de puente completo.....	63
Figura 22. Ejemplo de manejador de medio puente y su correspondiente diagrama de bloques.....	64
Figura 23. Circuito esquemático para el módulo de potencia del SICP	67
Figura 24. Diagrama de bloques esquemático del sistema de control	69
Figura 25. Compact <i>Field Point</i> 2020.....	70
Figura 26. Sensor de corriente y tensión.....	74
Figura 27. Cable y Sensor de temperatura óptico.....	76
Figura 28. Módulo completo Field point con módulo adquisición de señales eléctricas.	77
Figura 29. Sistema de acondicionamiento de señal para los sensores ópticos.....	78
Figura 30. Diagrama de bloques conceptual del sistema de control.....	79

Figura 31. Diagrama de flujo del algoritmo de control del SICP.....	82
Figura 32. Interfaz de usuario para el SICP.....	83
Figura 33. Programación en Labview de la Interfaz de usuario para el SICP.....	84
Figura 34. Configuración del pozo C-70	87
Figura 35. Resultados simulación “Pérdidas eléctricas Vs. Variación de corriente” a frecuencia fija de 60Hz	88
Figura 36. <i>Resultados simulación “Pérdidas eléctricas Vs. Variación de frecuencia” a corriente fija de 100[Arms]</i>	88
Figura 37. Curva de impedancia de la tubería de producción para el pozo C-70.....	90
Figura 38. Comportamiento de la viscosidad del crudo Vs Temperatura para el pozo C-70	93
Figura 39. Grafica de salida para un crudo en ascenso por el tubing.....	94
Figura 40. Prototipo de laboratorio	95
Figura 41. Pruebas de salida del puente inversor a diferentes niveles de frecuencia sin carga.....	96
Figura 42. Pruebas de salida del puente inversor a diferentes niveles de frecuencia con carga.....	96
Figura 43. Prueba de establecimiento de temperatura de referencia a frecuencia de 100Hz.....	97
Figura 44. Prueba de establecimiento de temperatura de referencia a frecuencia de 500Hz.....	98
Figura 45. Prueba de establecimiento de temperatura de referencia a frecuencia de 1000Hz	99

Lista de tablas

Tabla 1. Síntesis de los antecedentes históricos: Consumo promedio de potencia vs. Incremento en la producción de petróleo	34
Tabla 2. Diferencias entre el método inductivo y el método resistivo.	38
Tabla 3. Características técnicas de la malla de tierra	56
Tabla 4. Características de los diodos que conforman el puente rectificador	60
Tabla 5. Valores de diseño para selección del puente inversor basado en IGBT's comerciales	62
Tabla 6. Valores de diseño para selección del manejador de puente inversor basado en IGBT's comerciales	64
Tabla 7. Características técnicas del <i>Field Point</i>	71
Tabla 8. Características de los sensores de tensión y corriente:	74
Tabla 9. Características de los sensores ópticos	75
Tabla 10. Características del módulo analógico-digital	77
Tabla 11. Características del módulo analógico-digital	78
Tabla 12. Tabla de comparación de las diferentes técnicas de control en cuanto a funcionalidad	80
Tabla 13. Características del Pozo C-70 / Campo Escuela Colorado	86
Tabla 14. Parámetros de impedancia calculados para el pozo C-70	89
Tabla 15. Respuesta de tensión corriente de la carga como modelo de impedancia.....	90

Introducción

El sector energético es la pieza clave para el desarrollo económico y social de las naciones. Sin embargo, la necesidad creciente de energía consume grandes cantidades de recursos naturales, los cuales en su mayoría son extraídos de fuentes no renovables. En efecto, según los pronósticos de la EIA¹, la demanda de energía a nivel global crecerá cerca de un 71% entre los años 2003-2030, [1]. Siendo esta demanda en su mayoría asociada al consumo de hidrocarburos. El problema consiste en que las reservas de crudo mundiales se agotarán aproximadamente en 50 años [2] y la demanda mundial de hidrocarburos pronto será mayor que la oferta disponible en las reservas. Además, no existe a la fecha una fuente natural o artificial con suficiente potencial energético y viabilidad técnica-económica para reemplazar al petróleo y cubrir todas las necesidades energéticas globales.

En Colombia la situación no es diferente, ya que se presenta un agotamiento de las reservas de crudo y se pronostica un autoabastecimiento hasta el año 2015 [3]. La situación obliga a la nación a tomar medidas contundentes en la búsqueda de nuevos yacimientos y el aprovechamiento de cualquier fuente de hidrocarburos disponibles, como es el caso de los crudos pesados y extrapesados. En efecto, buena parte de las reservas disponibles en el país y en el mundo son de crudos pesados, los cuales son menos atractivos de explotar debido a su alta viscosidad, la cual dificulta su extracción. Asimismo, los crudos pesados contienen altos contenidos de impurezas, como azufre y metales pesados. En consecuencia, el precio comercial de los crudos pesados es bastante inferior al de referencia WTI. No obstante, la tendencia creciente del precio del crudo hace rentable la explotación de cualquier tipo de yacimiento petrolífero. Por ejemplo, La empresa estatal del petróleo ECOPETROL desarrolla el negocio de la extracción de crudos pesados en varios campos de los llanos orientales, como una de las principales actividades contempladas en su plan estratégico para los próximos cinco años.

Por tanto, desde los años cincuenta, innumerables investigaciones y tecnologías se han desarrollado para mejorar la extracción de crudos pesados, y desde entonces hasta la

¹ EIA (Administración para la Información Energética)

actualidad, se han desarrollado algunas técnicas, que abarcan numerosas áreas de la ciencia, desde procesos químicos, mecánicos, hasta sistemas eléctricos. Una de estas técnicas no convencionales es la de calentamiento electromagnético de pozo por inyección de corriente [4 - 7], la cual, tiene como finalidad elevar la temperatura del crudo en el tubo de producción y en la cara del pozo por acción de las pérdidas eléctricas de los materiales ante el paso de corriente eléctrica. Este proceso conocido como calentamiento resistivo, permite mejorar la movilidad del crudo en el pozo y por ende su producción. Así mismo, los sistemas de calentamiento electromagnético se han utilizado para otras aplicaciones similares, entre las cuales se destacan los sistemas de recobro mejorado, que permiten aumentar los niveles de producción no solo en la tubería del pozo, si no en la formación de la cara del pozo y secciones de yacimiento; además, sirve para acelerar la extracción de vapor de fase en los procesos de descontaminación de hidrocarburos polucionados.

Una de las principales ventajas del calentamiento resistivo es su simplicidad, ya que no es necesario introducir dispositivos en tubería, tales como cables o herramientas especiales para su funcionamiento. Por consiguiente, no sería necesario realizar grandes ajustes para que en un pozo ya existente pueda ser adecuado para esta técnica. Además, su funcionamiento no interrumpe la producción del pozo y alarga considerablemente los tiempos de mantenimiento, bien sea por movilidad del crudo en la tubería, al no permitir la solidificación de parafinas en tramos de tubería donde las condiciones fueran propicias para este fenómeno; o por procesos de mantenimiento de bombas de extracción, las cuales al reducir la viscosidad del crudo, disminuye su trabajo y prolonga su vida útil.

Por consiguiente, el diseño de un Sistema de Inyección de Corriente en Pozo (SICP) representa una alternativa técnica-económica válida para mejorar la extracción de crudos pesados. Por tanto, la siguiente investigación se basa en el diseño conceptual de una herramienta de inyección de corriente en pozo (SICP), la cual esta contemplada en el siguiente documento, distribuido en dos partes o secciones principales. La primera parte, Fundamentos teóricos del SICP, esta comprendido por los capítulos I y II respectivamente, en donde se encuentra toda la fundamentación científica e histórica para entender el proceso de calentamiento resistivo por inyección de corriente y el tipo de características estructurales que un sistema de inyección de corriente debe tener.

En efecto, en el Capítulo I, Marco teórico, se presentan las características térmicas de los crudos pesados y su comportamiento ante un incremento de temperatura en la tubería [8 – 14]; además, se determina la transferencia de potencia al tubing empleando un modelo físico-matemático [15 – 20], con el objetivo de obtener un punto de trabajo apropiado en la relación “consumo de potencia”-“calor generado”. Asimismo, se propone un modelo simple de impedancia eléctrica, con el ánimo de predecir la naturaleza de la impedancia y el factor de potencia, propios de una configuración de tubería de producción a una frecuencia determinada. En el Capítulo II, se plantea el estado del arte, donde se hace un recorrido histórico de los principales desarrollos efectuados en las técnicas de calentamiento electromagnético, además, se presenta dos aplicaciones comerciales que se utilizan actualmente para efectuar calentamiento en tubería.

Con los resultados del modelo y basado en el estado del arte [21 - 28], se plantea la segunda parte del libro, Diseño del SICP, y como su nombre lo indica consiste en el diseño conceptual de un Sistema de Inyección de Corriente o SICP. Asimismo, el diseño del SICP es dividido en dos partes principales: el modulo de potencia y el modulo de control. En el Capítulo III se aborda el diseño del SICP de manera general, y se profundiza en el diseño del módulo de potencia, especificando cada uno de sus componentes estructurales [29 - 37], los cuales están basados en el punto de operación, determinado para este caso en un valor de potencia de 100KVA y rango de frecuencia entre 1-1000Hz. Posteriormente en el Capítulo IV, se ilustra la configuración del sistema de control y el sistema de adquisición de datos, los cuales tienen el trabajo de monitorear y controlar las variables de corriente y de temperatura a lo largo del pozo [38 - 41]. Finalmente, en el Capítulo V se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones con los modelos desarrollados para tal fin.

PRIMERA PARTE

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL SICP

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO

El Sistema de Inyección de Corriente en Pozo (SICP), es un dispositivo basado en electrónica de potencia y tiene como finalidad realizar calentamiento electromagnético (resistivo) en la tubería de producción² por inyección de corriente. Para tal efecto, el SICP opera de la siguiente manera: Al tubing se le hará circular corriente eléctrica hasta el fondo del pozo, en donde se interconecta con el casing y éste a su vez en la superficie con la tierra del sistema, cerrando de este modo el circuito. Este procedimiento genera un incremento de temperatura en la tubería de producción³ como consecuencia de las pérdidas eléctricas (Histéresis y corrientes de Eddy) propias del acero, material ferromagnético con el cual se fabrica la tubería de producción.

En este capítulo se describirán los conceptos teóricos en los cuales está sustentado el diseño del SICP. A continuación, en la sección 1.1, se define de manera general qué es un crudo pesado y cuales son sus características relevantes para esta investigación. En la sección 1.2, se estima por medio de un modelo matemático el comportamiento del crudo en ascenso por la tubería ante un cambio en la temperatura. Luego, en la sección 1.3, se expondrá el modelo físico-matemático de la tubería de producción para el cálculo de las pérdidas eléctricas ante un flujo de corriente eléctrica. Por último, en la sección 1.4, se presentará un modelo lineal de impedancia para la tubería de producción a partir de la geometría del pozo y parámetros de los materiales de construcción de la tubería.

² Tubería de producción comprendida por el conjunto *tubing-casing*, ver glosario.

³ El incremento de temperatura reduce la viscosidad del crudo en ascenso por la tubería.

1.1. Crudos Pesados

Debido a que la finalidad del SICP es calentar los crudos en ascenso por la tubería de producción o *tubing*, es adecuado comenzar por definir qué es un crudo pesado y cuáles son sus características significativas, como gravedad específica o grados API⁴ y viscosidad; las cuales dependen en gran medida de la temperatura y de las propiedades innatas de cada fluido. Sin embargo, es conveniente recordar que el estudio minucioso del comportamiento térmico del crudo dentro de la tubería no es el objetivo principal de esta investigación, si no el diseño del SICP como tal.

En términos generales, los crudos pesados son una mezcla de muchos hidrocarburos que varían en tipo, peso molecular y punto de ebullición; además, contiene otros compuestos tales como: metales, agua y azufre, ver figura 1. También, están caracterizados por tener una viscosidad elevada y una gravedad específica o °API baja, donde los °API denotan la relación correspondiente de peso específico y de fluidez de los crudos con respecto al agua. Según el Instituto Americano del Petróleo, los crudos se clasifican como: Extrapesados (<9,9°API); Pesados (10°API - 21,9°API); Medianos (22,0°API - 29,9°API); Livianos (30°API - 39,9°API) y Condensados (> 40°API) [8]. Del mismo modo, la Viscosidad propiedad física de todo fluido. La cual según el Sistema Cegesimal de Unidades (SGS) se le designa como unidad de medición el centipoise (0,01 poises).

Figura 1. El petróleo y su composición química



Componentes	Composición Química
Parafinas	C_nH_{2n+2}
Olefinas (Naftenos)	$(C_nH_{2n})_x$
Polimetilenos	C_nH_{2n-2}
Acetilenos	C_nH_{2n-4}
Tarpenos	C_nH_{2n-4}
Bencenos	C_nH_{2n-6}

Fuente: [8]

⁴ API es la abreviatura de *American Petroleum Institute*.

Generalmente, en el reservorio no hay problemas de viscosidad ya que en el fondo del pozo las temperaturas son elevadas, cientos de grados, mientras más profundo sea el pozo más caliente se encontrará el crudo. El problema consiste en el transporte desde el fondo del pozo hacia la superficie terrestre, ya que a medida que el crudo asciende a través de la tubería éste comienza a perder temperatura debido al intercambio de calor durante su ascenso hacia las capas superiores llamadas “*overburden*”, efecto natural e imposible de evitar. Esto hace que el fluido en su ascenso aumente su viscosidad hasta niveles que llevan a las electro-bombas a operar en su máxima capacidad de contrapresión. Este aumento significativo de viscosidad implica que la limitante en la tasa de producción de un pozo no sea su capacidad productiva sino la capacidad de bombeo, la cual estaría al máximo. Por tanto, hay una importante pérdida económica en este punto por el efecto de la no producción de la capacidad disponible. Asimismo, por el esfuerzo a la que están sometidas las bombas, es común que estas fallen o se dañen por completo, lo cual conlleva a operaciones de reparación que pueden tomar días, agudizando el problema de baja producción.

En efecto, cuando se desea optimizar un sistema de bombeo se requiere aplicar una fuerza externa al fluido, esta hace que el fluido se mueva y de ahí surge la viscosidad como una "resistencia o fricción interna" que se opone a la fuerza aplicada. La viscosidad de un fluido depende de la temperatura, las fuerzas intermoleculares en el fluido, el tamaño de sus moléculas, su masa molecular y otros factores estructurales [9]. Se supondrá que el crudo en ascenso sigue la ley de Newton para flujos laminares, por tanto, satisface la ecuación (1.1).

$$F = -\eta A \quad (1.1)$$

Donde,

F: Fuerza externa aplicada al fluido

η : Coeficiente de viscosidad

A: Área del tubo donde circula el fluido

dv: diferencial de velocidad concéntrica del fluido

dr: diferencial del radial de las capas del fluido

De (1.1) se obtiene la velocidad de cada componente del fluido como función de la diferencia de presión en los extremos del tubo de producción como:

$$v(r) = \frac{\Delta P}{4l\eta} (R_c^2 - r^2) \quad (1.2)$$

En donde

R_c : Radio del tubo productor

r : Radio variable entre cero y R_c

l : Longitud tubo productor

η : Coeficiente de viscosidad

ΔP : Diferencia de presión en el tubo productor, donde la diferencia de presión es producto de la fuerza externa actuando sobre el fluido. En este caso la diferencia de presión es entre la cara del pozo y superficie.

De la ecuación (1.2) se conoce el volumen de crudo que asciende por unidad de tiempo (el flujo neto), ecuación (1.3).

$$\Phi = \frac{V}{t} = \int_0^{R_c} 2\pi r v(r) dr = \frac{\pi \Delta P}{8 \eta l} \quad (1.3)$$

Donde

V : Volumen que asciende en el instante t

$v(r)$: Velocidad de ascenso, varía entre cero en la pared del tubo y máxima en el centro del mismo.

Los crudos poseen curvas empíricas características de su viscosidad en función de la temperatura, en la figura 2. Internacionalmente un crudo se considera pesados cuando posee un °API menor a 20 [10]. Sin embargo, para un cálculo analítico en [11] se propone la variación del coeficiente de viscosidad con la variación temperatura en fluidos laminares, como muestra la ecuación (1.4). Reemplazando en la ecuación (1.3) se obtiene la ecuación (1.5) como:

$$\eta = k e^{\frac{E_a}{\mathfrak{R} \Delta T}} \quad (1.4)$$

Donde,

k : es constante

E_a : Energía de activación

\mathfrak{R} : Constante de gases ideales

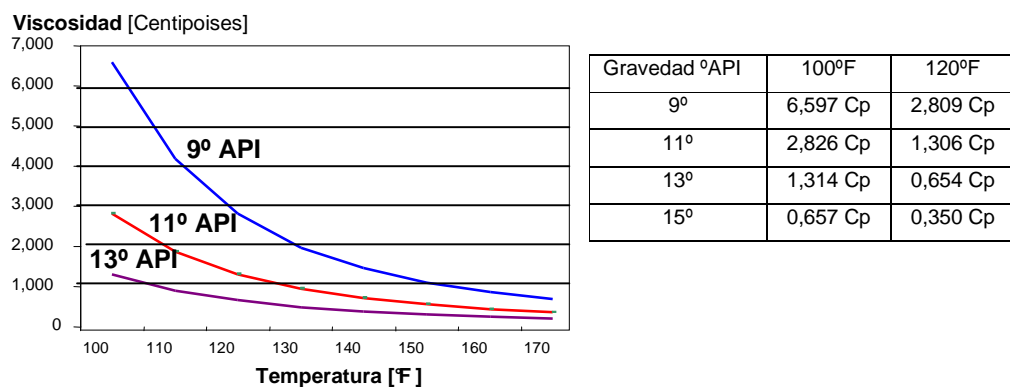
ΔT : Diferencia de Temperatura.

$$\Phi = \left(\frac{\pi R^4}{8lk} \right) \frac{\Delta P}{e E_a / T} \quad (1.5)$$

De la ecuación (1.5) se concluye, que Φ es función exponencial del gradiente de temperatura y tiene una relación directamente proporcional con la variación de presión. Se puede concluir que es notablemente sensible al gradiente de temperatura, ya que los efectos de los sistemas de bombeo que generan diferencias de presión son importantes pero no en el mismo orden pues es una función lineal de la diferencia de presión. Por tanto, un sistema que caliente el fluido mejorará de forma exponencial el flujo, mientras un incremento en la variación en la presión solo se reflejará en un incremento proporcional del flujo neto.

Otra consideración con respecto a la viscosidad, es que no puede ser calculada de manera analítica, ya que no existe una la relación matemática exacta que describa la viscosidad de los crudos en función de la temperatura. Esta relación, solo puede ser determinada a través de curvas empíricas y correlaciones, debido principalmente a la heterogeneidad de los compuestos que conforman la mezcla de crudo en cada yacimiento, ver figura 2. En la cual se puede apreciar como los crudos con gravedades °API bajas presentan una importante disminución en la viscosidad por acción de un pequeño incremento de temperatura. Por consiguiente, se esperarían resultados significativos al aplicar la técnica de calentamiento electromagnético en pozos con crudos extrapesados o muy pesados.

Figura 2. Curvas empíricas de Viscosidad del crudo contra temperatura a presión atmosférica



Fuente: [9]

En general muchos pozos petroleros fluyen naturalmente a superficie en sus primeras etapas de vida. Lo anterior, tiene como pre-requisito básico que la presión de fondo sea suficiente como para superar las pérdidas de presión que ocurren en la trayectoria del crudo a superficie. Cuando no se cumple esto el crudo deja de fluir naturalmente. Hay dos causas principales para esto: la pérdida de presión en fondo cae a nivel no recuperable para superar las pérdidas del sistema o por unas pérdidas de presión muy elevadas. En efecto, reactivar pozos ó incrementar su producción, requiere equipos de levantamiento artificial. Existen actualmente varios tipos, todos tienen como propósito suministrar la energía requerida para el ascenso del crudo desde superficie. Un método básico es disponer una bomba en el fondo, para aumentar la presión, este se denomina bombeo mecánico [11].

El bombeo y en particular el mecánico se encuentra presente en cerca de las dos terceras partes de pozos a nivel mundial, siendo el 80% de las ocasiones empleado en pozos con levantamiento artificial, por tanto, se ha considerado SICP en condiciones de bombeo mecánico.

La energía empleada en el bombeo se define en la ecuación (1.6) como:

$$\frac{dp}{dl} = \frac{\rho}{g_c} \rho \sin \alpha + \frac{\rho v^2}{g_c dl} + \left(\frac{df}{dl} \right) \quad (1.6)$$

Donde

dp/dl : Gradiente de presión

α : Ángulo inclinación tubería

ρ : densidad

g : Gravedad

g_c : Factor de conversión

d : Diámetro tubería

f : Factor de fricción

v : Velocidad del fluido.

Se identifican tres componentes, los gradientes hidrostáticos, de aceleración y de fricción, éstos son debidos a cambios en elevación por energía potencial, en la energía cinética, y pérdidas irreversibles de energía asociadas con la fricción del fluido, respectivamente. El último, se puede expresar como:

$$\left(\frac{dp}{dl}\right)_f = f \frac{\rho v^3}{2g_d} \quad (1.7)$$

Donde f es función del número Reynolds (N_{Re}) y de la aspereza relativa de la tubería. Asimismo, N_{Re} se expresa como:

$$N_{Re} = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (1.8)$$

Para realizar el cálculo de fricción se emplea los diagramas de Moody, en donde en flujos laminares se observa una relación inversa entre f y la temperatura. Para flujos turbulentos se emplean métodos numéricos, aunque se observa una reducción de N_{Re} con la disminución de la temperatura. Se puede evidenciar que la fricción del fluido (pérdida en bombeo) tiene una relación directa con la viscosidad, la cual tiene una relación exponencial decreciente con la temperatura. Por lo tanto; un gradiente de temperatura controlado podría reducir las pérdidas en presión de los sistemas de bombeo.

1.2. Proceso de calentamiento en tubería

El calor es la transferencia de energía de un objeto a otro, este flujo de energía se conoce como transferencia de calor y se define como el proceso por el cual se intercambia energía en forma de calor (de caliente a frío) entre distintos cuerpos, o partes de un mismo cuerpo que están a distinta temperatura. Sin embargo, el calor es algo intangible, no se puede medir directamente, solo se mide los efectos que éste produce, denominados cambios de temperatura. Por lo tanto, se utiliza la temperatura (T), que es una manifestación del promedio de la energía cinética de las moléculas de la materia que están en agitación termal, asimismo, es la medida de la energía termal contenida en un material [12].

Para estimar el proceso del calentamiento del crudo en la tubería de producción, se necesita realizar las siguientes suposiciones:

- El crudo en ascenso por la tubería se define como un fluido laminar, donde la velocidad del fluido es relativamente lenta y no es perturbada por las posibles protuberancias del contorno. Además, la viscosidad es grande en comparación con la

del agua, de manera que si por cualquier circunstancia se iniciase un fenómeno de turbulencia, la viscosidad lo destruiría.

- Otras consideraciones son: asumir que el crudo no cambia de fase durante el proceso, la conductividad térmica del tubo es constante y la capacidad calorífica del fluido no cambia en función de la temperatura. También, para determinar el perfil de velocidad del crudo a través de la tubería se recurre a la ecuación característica de velocidad de flujo laminar (V_z) [12]

$$v_z(r) = V_m \left(1 - \frac{4r^2}{(2r_e)^2}\right) \quad (1.9)$$

Donde:

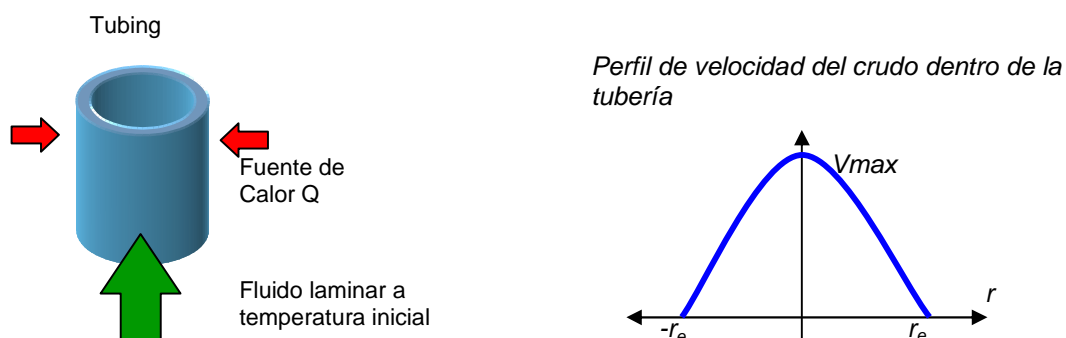
V_m : Velocidad máxima del flujo

r_e : Radio interior del tubing

r : Distancia radial

La formulación que a continuación se desarrolla sirve tanto para tuberías lisas como para tuberías rugosas, suponiendo que las partículas de fluido a lo largo de un tubo, se mueven en capas cilíndricas coaxiales concéntricas. El desplazamiento del fluido se realiza a mayor velocidad en el centro del tubo, mientras que en las paredes permanece en reposo. La distribución de velocidades en una sección transversal cualquiera del tubo obedece a las fuerzas de rozamiento transmitidas de capa en capa. Como resultado obtenemos la siguiente grafica de perfil de velocidad, ver figura 3.

Figura 3. Perfil de velocidad de un flujo laminar



Fuente: El Autor

Debido a que el sistema presenta geometría cilíndrica, las variaciones solamente se tendrán en cuenta para la altura z y el radio r , por consiguiente la ecuación de calor se puede simplificar de la siguiente forma:

$$\frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - C \rho v(r) \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (1.10)$$

Donde:

T = Temperatura [$^{\circ}\text{K}$]

K = Conductividad térmica [$\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{K}$]

C = Calor específico [$\text{J}/\text{Kg}^{\circ}\text{K}$]

ρ = Densidad [Kg/m^3]

$v(r)$ = Velocidad del fluido en función de r [m/s]

La solución del sistema obedece la forma general $T(r, z) = \theta(r) + \alpha_z z + T_o$ y como se mencionó anteriormente se supone que las propiedades del fluido no cambian sustancialmente con la temperatura, suposición que para los crudos pesados se aleja de la realidad. Antes de reemplazar esta solución en (1.10) se puede hallar la constante α de variación de temperatura en dirección vertical mediante un sencillo razonamiento, ya que se sabe que sobre las paredes laterales del tubo existe un flujo constante de energía E por unidad de área hacia el interior. Energía térmica proveniente de las pérdidas eléctricas distribuidas a lo largo de la tubería. Ahora, supóngase que sobre un elemento infinitesimal del tubo en forma de disco con radio R y de altura Δz se hace un balance de energía, en ese caso la energía que entra a través de las paredes sólo puede salir en forma de convección forzada en z por el flujo de crudo en ascenso. Para resolver esta ecuación de forma analítica se utiliza la ley de Fourier, que se enuncia a continuación:

$$\dot{Q} = -kA \frac{\partial T}{\partial z} \quad (1.11)$$

donde:

Q = Calor [w]

A = Área de contacto [m^2]

Solucionado la ecuación diferencial al utilizar la ecuación de Fourier se llega a la siguiente expresión:

$$\Delta T = \frac{P}{\dot{m}c} \quad ; \quad \dot{m} = \pi R^2 \bar{V} \rho$$

$$T(r, z) = \frac{P}{2\pi R^2 k} \left(r^2 - \frac{r^4}{4R^2} \right) + \frac{P}{\pi R^2 \bar{V} \rho C} z + T_0$$
(1.12)

donde:

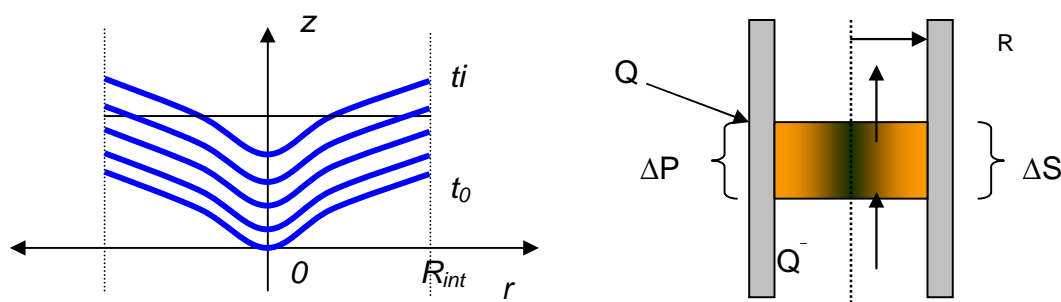
ΔT = Diferencial de temperatura ganado por un fluido laminar en ascenso obtenido al aplicar un potencia en un área de un metro de tubing [°K]

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

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

La solución analítica de la ecuación de transferencia de calor genera unos perfiles de temperatura, como se pueden apreciar en la figura 4. De acuerdo a esta solución, la temperatura del crudo será incrementada proporcionalmente a la longitud del tubo desde el fondo del pozo hasta la superficie, además, el flujo en el interior de la tubería permanecerá casi constante al de temperatura inicial de pozo.

Figura 4. Curvas de nivel para la transferencia de calor en tubería



Fuente: [14]

1.3. Modelo Electromagnético de la Tubería de Producción

Como se mencionó en el inicio de este capítulo, la energía que se disipa en la tubería como pérdidas eléctricas en la operación del SICP genera el calentamiento de la tubería y esta a su vez por el fenómeno de transferencia de calor, calienta el crudo en ascenso. Por tanto, es conveniente conocer la cantidad de la potencia eléctrica disipada por la tubería, ver ecuación (1.13), para determinar cuales son los efectos representativos en la técnica y como se pueden explotar al máximo.

$$\int_{v'} d^3 x' j \cdot \vec{E}^{EMF} = \int_{v'} d^3 x' \left(\frac{j^2}{\sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial t} \int_{v'} d^3 x' \frac{1}{2} (\vec{E} \cdot \vec{D} + \vec{H} \cdot \vec{B}) \cdot \hat{n} + \int_{s'} d^2 x' (\vec{E} \times \vec{H}) \cdot \hat{n} \quad (1.13)$$

donde:

\vec{E} = intensidad del Campo eléctrico [V/m]

\vec{H} = intensidad del Campo magnético [A/m]

\vec{B} = Densidad del flujo magnético o inducción magnética [T ó Wb/m]

\vec{D} = Densidad del flujo eléctrico [V/m²]

dx' = el diferencial unidimensional,

σ = Conductividad del medio,

v' = Volumen,

s' = Superficie de conducción

Como se puede apreciar en la ecuación (1.13) de balance de energía en un objeto infinitesimal, el primer término expresa la potencia total generada por acción del campo eléctrico (\vec{E}^{EMF}). El segundo término, es asociado a la conversión en calor de la energía eléctrica por efecto Joule, es por consiguiente, el efecto principal en la cual se basa la técnica de calentamiento resistivo por inyección de corriente. Asimismo, el tercer término también es importante, y esta relacionado con la propagación del campo dentro del crudo en ascenso e incide en su calentamiento cuando la frecuencia es elevada [7], conocido como calentamiento dieléctrico. Y el último término, asociado a la energía irradiada por el medio, sin embargo, esta magnitud será despreciada debido a las bajas frecuencias que se manejan

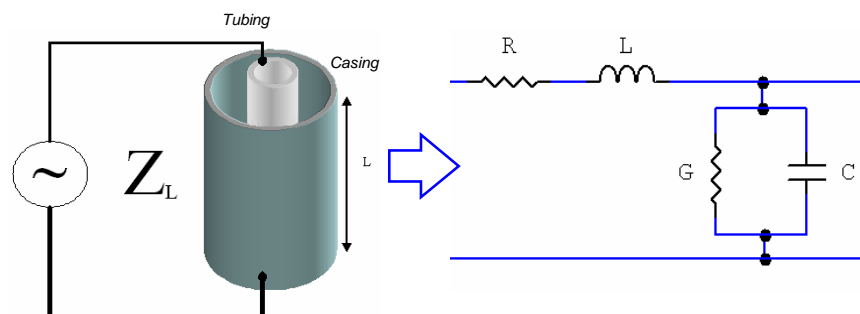
en la señal de corriente, ya que para irradiar energía se requiere frecuencias del orden de los Megahertz.

Para caracterizar las pérdidas eléctricas que se presentan en la armazón de tuberías de un pozo de producción, se requiere del desarrollo de un modelo matemático complejo, que describa el comportamiento eléctrico del sistema ante la presencia de una corriente en términos de potencia disipada por unidad de longitud. Este modelo es formulado utilizando las ecuaciones de Maxwell y esta basado en los trabajos realizados por Bruce C. W. McGee y Fred E. Vermeulen [15], donde se describe con detalle el comportamiento del historial de magnetización o histéresis de la tubería de producción, para ver detalles del planteamiento de las ecuaciones de maxwell y su solución numérica. Así como, el proceso de magnetización de la tubería, remítase el anexo A.

1.4. Modelo de impedancia eléctrica para la Tubería de Producción

Para tener una idea más clara y sencilla del comportamiento eléctrico del sistema se propone modelar la tubería en función de sus parámetros eléctricos por unidad de longitud: Resistencia (R), Inductancia (L), Capacitancia (c) y Admitancia (Y), como se puede observar en la figura 5. Este modelo lineal, es válido para “estimar” el comportamiento de la carga (tubing-casing), ya que se puede encontrar un valor de impedancia en función de la longitud, geometría y tipo de material de la tubería para cada pozo.

Figura 5. Modelo de impedancia eléctrica para la tubería de producción



Fuente: El Autor

En efecto, los parámetros circuitales son calculados por las siguientes expresiones [18]:

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{1}{2\pi\sigma_{rci}} \left(\frac{1}{(r_{tw} - r_{ti})^2} + \frac{1}{(r_{cw} - r_{ci})^2} \right) (\Omega / m) & L &= \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{r_{ci}}{r_{tw}}\right) (H / m) \\
 C &= \frac{2\pi\epsilon}{\ln(r_{ci} / r_{tw})} (F / m); & G &= \frac{2\pi\sigma_o}{\ln(r_{ci} / r_{tw})} (S / m)
 \end{aligned}
 \tag{1.14}$$

Donde:

r_{ci} = radio interior del *casing* [m]

r_{cw} = radio exterior del *casing* [m]

r_{ti} = radio interior del *tubing* [m]

r_{tw} = radio exterior del *tubing* [m]

μ : es la permeabilidad relativa del medio (material ferromagnético, no constante)

ϵ : es la permitividad del medio aislante (aire $\epsilon_o=8.854 \times 10^{-12}$ F/m)

σ_o : es la conductividad del medio entre las tuberías (aire, $\sigma_o \approx 0$)

σ_{rci} : es la conductividad del medio conductor (material ferromagnético)

Del modelo expuesto anteriormente, se puede concluir lo siguiente:

- La tubería representa una carga distribuida conocido como modelo de línea de transmisión a baja frecuencia (<1000 Hz),
- El elemento disipador de potencia en forma calor es la resistencia en serie por unidad de longitud propia del material.
- La impedancia de la línea de transmisión vista por la fuente de potencia del sistema es dada por la ecuación:

$$Z_o = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}
 \tag{1.15}$$

Donde los parámetros de impedancia no dependen de la longitud de la línea si no de las características del material así como de la frecuencia de trabajo. Sin embargo se debe tener en cuenta que el comportamiento real de algunos parámetros, son dependientes de la frecuencia y la intensidad de corriente.

CAPITULO II

ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se exponen los antecedentes históricos y técnicas disponibles para realizar calentamiento electromagnético para la optimización del proceso de extracción de petróleo. Es así, como en la sección 2.1, se describe de manera cronológica los eventos que dieron inicio a la aplicación del campo electromagnético para realizar calentamiento en la industria del petróleo. También, se presentan algunos resultados de pruebas piloto en diferentes campos petrolíferos. Seguido, en la sección 2.2 y 2.3, se enuncia la descripción de las diferentes técnicas de calentamiento electromagnético, incluyendo la de calentamiento resistivo, técnica seleccionada para realizar el proceso de calentamiento en la tubería. Posteriormente, en la sección 2.4, se mencionan dos casos comerciales de calentamiento para tubería. Finalmente, todo lo anterior permite especificar la configuración y los rangos de trabajo para el diseño del SICP.

2.1. Antecedentes Históricos

La utilización de los sistemas eléctricos para optimizar los procesos de producción de crudos en la industria del petróleo se remonta a finales de la década de los cincuenta y principios de la década de los sesenta. Este interés inusitado se debió principalmente al aumento exagerado en los precios del petróleo convencional generado por una crisis energética desatada en esta época. Esta crisis condujo a la necesidad de recurrir a otras fuentes energéticas no convencionales, que en otros tiempos eran consideradas inviables económicamente, como es el caso de la explotación de los yacimientos de crudos pesados. Desde entonces hasta la fecha actual, se han desarrollado dispositivos basados en energía electromagnética, tales como: calentadores resistivos de fondo de pozo, calentadores inductivos, sistemas de calentamiento de alta frecuencia, entre otros. En general, todos los sistemas antes mencionados tienen como finalidad reducir la viscosidad del crudo para facilitar su recuperación.

El desarrollo de dichos dispositivos para estimular pozos de hidrocarburos pesados fueron desarrollados por primera vez en California y en la Unión Soviética [4]. Hacia el año de 1969 el calentamiento eléctrico del yacimiento fue usado para mejorar la producción de crudo en un experimento realizado en Little Tom, el cual se reportó como exitoso. Como consecuencia, el método atrajo la atención de un gran número de investigadores e ingenieros, y otras pruebas de campo fueron reportadas en pocos años.

A comienzos de los años setenta las ondas electromagnéticas comenzaron a tomar cierta importancia en la industria petrolera, pues se empezó a estudiar la influencia que estas tenían sobre el petróleo crudo. Por otra parte, varios investigadores se dedicaron a evaluar el calentamiento eléctrico en la vecindad del pozo usando sistemas de calentamiento dieléctrico y sistemas de calentamiento resistivo, este último trabajando a una frecuencia de 60 Hz [4]. El primer trabajo académico sobre el proceso de calentamiento resistivo fue propuesto por El-Feky en 1977. Este investigador reportó el desarrollo y prueba de un modelo numérico que estuvo basado en una formulación de saturación-explícita, presión-implícita sobre una rejilla rectangular 2D.

El concepto de calentamiento eléctrico posteriormente fue acoplado al proceso de inyección de agua para derivar al método de calentamiento selectivo del yacimiento [5]. Sin embargo, debido a los bajos precios del petróleo después de ser superada la crisis en los 70 y la falta de tecnología disponible, confino a este método a la espera indefinida a que los precios del crudo subieran y sobre todo a que se siguiera apoyando la investigación para encontrar nuevas tecnologías que permitieran la recuperación de crudo de una manera más eficiente.

Al inicio de los ochenta, se utilizaron las ondas electromagnéticas para la recuperación de crudo, calentando el yacimiento por medio de la inducción de ondas en el medio poroso. Entidades como ARCO Y PETROCANADA probaron en forma individual sistemas de calentamiento eléctrico. Asimismo, el departamento de energía de los Estados Unidos y el Instituto de Investigación IIT probaron en forma exitosa el calentamiento con radiofrecuencias para yacimientos de aceite del oeste de Estados Unidos. En 1983 la compañía UENTECH junto con varios operadores condujo numerosos proyectos pilotos de sistemas de calentamiento eléctrico, lo que les permitió desarrollar nuevos equipos y técnicas para la aplicación de dicho método. Mediante los pilotos realizados se concluyó que

los pozos candidatos a ser sometidos a dicho sistema de calentamiento son aquellos que presentan parafina, asfaltenos, sulfuros, hidratos y cualquier otro depósito sensible al calor.

Una prueba de calentamiento resistivo de un solo pozo fue llevada a cabo por EOR International desde el 10 de noviembre de 1989 hasta agosto de 1990 en el pozo SCH-280 del yacimiento Bentheim perteneciente al campo Schoonebeek en los Países Bajos. Antes de la estimulación, la producción de crudo fue de 82 bbl/día con un corte de agua del 35%. Cuando se incrementó el suministro de potencia en superficie a 60 kW, se duplicó la tasa de producción de crudo. La temperatura de fondo de pozo estuvo en el rango de 54 a 60 grados centígrados en el “casing” a lo largo del electrodo.

Igualmente la empresa EOR International realizó pruebas de calentamiento eléctrico en dos pozos de crudo pesado en Lloydminster (A1-11-48-25 W3M: Lashburn y A8-6-51-27: Northminster) para la compañía Canada Northwest Energy Limited en el período 1989 – 1990. Aunque las pruebas fallaron debido a problemas de producción de arena y daños en el sistema de entrega de energía, hubo una respuesta positiva en la producción obtenida a través de la estimulación del calentamiento eléctrico. Los proyectos piloto (Northminster y Lashburn) tuvieron razones de aumento de producción de 1,27 y 3,75 respectivamente. Ambos proyectos indicaron una rápida respuesta al calentamiento aun a bajos niveles de entrada de potencia.

En la actualidad, varias empresas petroleras investigan en el área, no obstante, sus resultados no son publicados debido a que la información es catalogada como confidencial. Sin embargo, Es de esperarse que países como Canadá y Venezuela, lideren proyectos de investigación y desarrollo en técnicas de calentamiento de pozo, pues en estas dos naciones se concentran más del 90% de las reservas de crudos pesados en el mundo. Finalmente, y para terminar con los antecedentes históricos, se plantea la siguiente tabla resumen, tabla 1, donde se muestran las diferentes investigaciones ordenadas cronológicamente con sus respectivos resultados y sitios de prueba.

Tabla 1. Síntesis de los antecedentes históricos: Consumo promedio de potencia vs. Incremento en la producción de petróleo

No.	Fecha	Operador	Sitio de la prueba	Descripción del proyecto	Resultados
1	1985	Uentech Corporation	Ardmore, Oklahoma	Crudo muy viscoso con gravedad API 6 – 15. Se perforaron varios pozos de observación de temperatura dentro de 4 a 15 pies (1,22 a 4,57 m) del pozo de prueba. El electrodo se energizó con una Unidad de potencia de 50 Kw.	Se inició con una temperatura de 18-20 °C (291,15 – 293,15 K). La temperatura a los 3 pies (0,91 m) aumentó a más de 105 °C (378,15 K) en 40 días de calentamiento. En un pozo a 15 pies (4,57 m) se notó una temperatura de 40 °C (313,15 K) luego de 160 días
2	1988	Mazzei	Frog Lake 11D-15-56-3 W4M	Calentamiento resistivo de baja frecuencia usando 30 KW promedio	Incremento en la producción de 2-3 veces
3	1989	CNW	Northminster A8-6-51-27-W3M	Calentamiento resistivo de baja frecuencia usando 40 KW promedio	Relación de estimulación de 1.27
4	1989	NAM-Holland	Schoonebeck 280	Calentamiento resistivo de baja frecuencia usando 60 KW promedio	Incremento en la producción desde 82 hasta 195 bbl/día (31 m ³ /d)
5	91-88	CNW-Canadá	Lashburn A1-11-48-25-W3M	Mezcla de calentamiento resistivo y calentamiento por tubing. Potencia: 30-50 KW	El calentamiento del yacimiento dió una relación pico de estimulación de 3.75, mientras el calentamiento del tubing produjo sólo un incremento marginal
6	91-98	Petrobras	Rio-Panon Field	Calentamiento multipozo del yacimiento. Potencia 100-140 KW	Se reportó una duplicación de la producción promedio.
7	1997	CNRL-Canadá	St. Paul, Alberta	Calentamiento inductivo Potencia: 10 KW	Incremento de producción de 1.5 veces
8	1998-actual	Renaissance	Campo Jenner, Alberta	Calentamiento inductivo Potencia promedio: 30 KW	Disminución marginal en el corte de agua
9	1998-99	AEC-Alberta	Pelican	Calentamiento inductivo del pozo	No exitoso
10	1998	Ranger Oil	Elk Point	Calentamiento inductivo. Potencia promedio: 20 KW	Incremento marginal
11	1998-2001	Bahrain Petroleum Company	Bahrain Oilfield	Calentamiento inductivo. Potencia: 5-8 KW	Se triplicó la producción

Fuente: [4]

2.3. Métodos de calentamiento electromagnético

Los métodos de calentamiento electromagnéticos se pueden clasificar de acuerdo a la forma de generación de calor. Un parámetro que juega un papel importante en la forma en que la energía eléctrica y la electromagnética se convierten en calor, es la frecuencia. Tomando como parámetro de clasificación la frecuencia de la señal empleada, los métodos de calentamiento electromagnético pueden dividirse en tres grupos [6]:

- Calentamiento a alta frecuencia (radiofrecuencia y microondas) 10MHz – 300GHz.
- Calentamiento electromagnético o inductivo 100kHz – 10MHz.

- Calentamiento a baja frecuencia (ohmico o resistivo). También se conoce como calentamiento eléctrico 0Hz – 100KHz.

2.3.1 Calentamiento de Alta Frecuencia

En este tipo de calentamiento se emplean corrientes de rotación presentes en procesos de alta frecuencia. El calentamiento a alta frecuencia trabaja dentro del rango de radiofrecuencia (10-100 MHz) y microondas (300 MHz-300 GHz). El principio de esta forma de calentamiento es el siguiente: Los dipolos de las moléculas se encuentran alineados con el campo eléctrico. Cuando este campo se altera, los dipolos sufren un movimiento rotatorio a una velocidad proporcional a la frecuencia de alteración. Este movimiento molecular abrupto hace que se genere fricción entre las moléculas y por ende se genera calor a una tasa considerable. En la medida que aumenta la frecuencia, crecerá la agitación molecular y por consiguiente, mayor es la transformación de la energía electromagnética en energía térmica por fricción intermolecular. En tal caso, el calentamiento es instantáneo, independiente de las características térmicas del medio. El método es altamente dependiente de la frecuencia utilizada, de la intensidad del campo eléctrico de excitación y de la permisividad compleja del medio. Este fenómeno se conoce también como calentamiento dieléctrico.

La constante dieléctrica es un parámetro que define la propiedad dieléctrica de los materiales y es ampliamente empleado en las investigaciones de calentamiento electromagnético. Ésta describe la habilidad de las moléculas para ser polarizadas por el campo eléctrico. A bajas frecuencias este valor puede alcanzar un máximo, como la máxima cantidad de energía que se puede almacenar en un material. Las pérdidas dieléctricas miden la eficiencia con la cual la energía de radiación electromagnética puede ser convertida en calor [6].

En resumen, las temperaturas alcanzadas por las herramientas utilizadas en este tipo de calentamiento, ver figura 6, son bastante elevadas y dependientes de la frecuencia, pero esto contrasta con su reducido radio de acción, comparadas con las herramientas de calentamiento resistivo.

Figura 6. Herramientas de calentamiento por radiofrecuencia.



Fuente: [7]

2.3.2 Calentamiento Electromagnético Inductivo

Este tipo de calentamiento debe su principio a las corrientes de Eddy y pérdidas por histéresis en la tubería de producción o *tubing* y en el tubo de revestimiento o *casing* o en el revestimiento del pozo conocido como *liner*. Estas corrientes inducidas en la tubería ocasionan pérdidas eléctricas considerables y por consiguiente el incremento de temperatura. Sin embargo, estos sistemas implican la instalación de inductores adheridos al fondo del “*tubing*” o tubo de producción, además, no fluye corriente hacia el yacimiento. El sistema utiliza el “*casing*” de producción como un elemento conductor de calor a la zona de producción que rodea el pozo. Los pozos candidatos para la aplicación de calentamiento por inducción incluyen:

- Pozos con problemas de daño en la cara de la formación (problemas de deposición).
- Yacimientos de crudo pesado inmóvil que necesitan un precalentamiento antes de aplicar otro proceso de recobro mejorado.
- Crudos con viscosidad mayor de 50 Cp.
- Yacimientos con baja saturación de agua connata⁵.
- Pozos horizontales donde hay necesidad de expandir o extender la longitud efectiva del pozo.
- Pozos verticales con bajas tasas de producción.
- Pozos existentes donde solamente se pueden bajar las herramientas de calentamiento.

⁵ Connota: Agua de origen natural presente en el yacimiento y en la mezcla de crudo

2.3.3 Calentamiento Eléctrico Resistivo

Este método consiste en utilizar como medio conductor (línea de transmisión) al tubo de producción o *tubing* para inyectar corriente a baja frecuencia hacia la cara del pozo o directamente hacia la tierra del sistema por medio del *casing*. Como efecto del método, la energía eléctrica se transforma en energía calórica mediante las pérdidas ohmicas asociadas a la tubería de producción y la formación. El efecto global de la generación de calor es la reducción de la caída de presión cerca de la cara del pozo gracias a la disminución de la viscosidad, mejorando la movilidad del crudo. Una lista de condiciones convenientes para que el calentamiento resistivo sea efectivo se muestra a continuación:

- Yacimientos de crudo pesado donde no se puede emplear el vapor debido a varias razones tal como la profundidad del yacimiento o escasa posibilidad de inyectar vapor.
- Yacimientos donde modestas cantidades de calor producirán cambio significativo en la producción.
- Yacimientos con capas de hielo permanente o que tienen fracturas o ranuras de alta permeabilidad.
- Yacimientos de crudo pesado en calizas.
- Crudos con gravedad $^{\circ}\text{API} < 20$ grados.
- Espesor de la zona productora de 2 metros o mayor.
- Producción primaria de crudo sin estimulación de 30 BPD/pozo o mayor
- Resistividad de la formación de 30 ohm-metros o mayor
- Viscosidad de crudo de 100 Cp o mayor

El proceso de inyección de corriente presenta las siguientes características: Es un proceso continuo, el calentamiento eléctrico ocurre simultáneamente con la producción de los fluidos del yacimiento. Además, todo el equipo requerido para calentar la vecindad del pozo puede instalarse dentro del mismo, empleando un equipo convencional de campo. Tampoco, hay necesidad de inyectar fluidos extraños dentro del yacimiento, ya que estos fluidos inyectados dentro del yacimiento pueden reducir la permeabilidad relativa al aceite o pueden causar daño a la formación. Para ilustrar de manera más concreta las diferencias de los dos métodos más utilizados para realizar calentamiento electromagnético (resistivo-inductivo), se presenta la siguiente tabla (tabla 2).

Tabla 2. Diferencias entre el método inductivo y el método resistivo.

Característica	Método inductivo	Método Resistivo
Completamiento del pozo	Requiere la introducción de una herramienta de inducción en un pozo de existente	Es recomendable el uso de un nuevo pozo con un diseño de electrodo.
Fuente del calentamiento eléctrico	Corrientes inducidas en el casing	Calentamiento resistivo en el yacimiento
Requerimientos de potencia	10 a 40 kW	20 a 80 kW
Máxima temperatura	140 a 160 °C	120 a 180 °C
Sistema de suministro de potencia	3 fases, baja corriente, alto voltaje	Una sola fase, alta corriente, bajo voltaje.
Flexibilidad	La herramienta de inducción puede moverse dentro del pozo. Se usa en pozos horizontales y verticales.	Localización permanente. Se aplica solamente en pozos verticales.

Fuente: [4]

2.4. Sistemas de calentamiento electromagnético

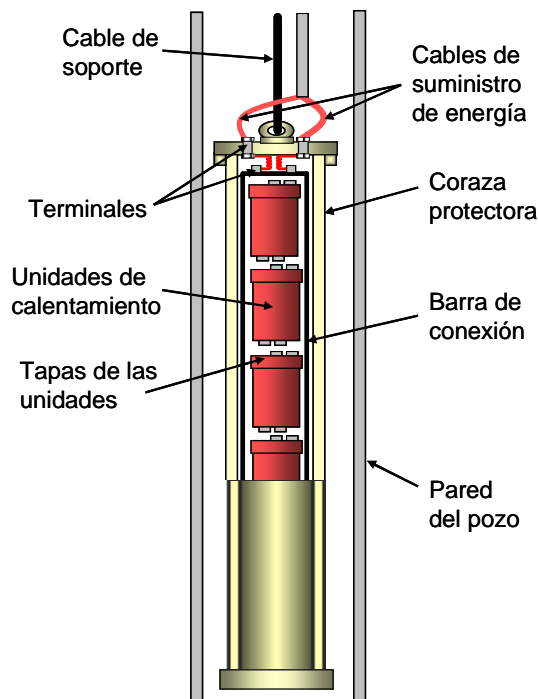
En general, hay una tendencia a desarrollar equipos portátiles con el objeto de cubrir grandes áreas en cortos períodos de tiempo con un único equipo y con esto evitar el gran costo en el que habría que incurrir para montar un sistema de calentamiento de yacimiento permanente. También se destaca la utilización de configuraciones de calentadores inductivos con bastante frecuencia a partir de la acogida del método. A continuación se enunciarán algunos equipos con sus características principales los cuales han sido utilizados en investigaciones basadas en el uso de calentadores de fondo de pozo. Esta revisión de prototipos, confrontará el diseño del SICP para que se encuentre al nivel de los que se han desarrollado en la industria en los últimos años:

- **Calentador eléctrico de fondo de pozo patentado por Pershing**

En la década de los años 20 se patentaron aplicaciones que estaban enfocadas a la remoción de las obstrucciones en la tubería (específicamente de parafinas). El sistema, expuesto por Pershing, se explica claramente en la patente 1464618 de los Estados Unidos, en ella se argumenta el uso de un cable para sostener un dispositivo calentador; tal dispositivo se compone de un número de núcleos o celdas que van dentro de una coraza protectora y todas estas celdas de poder están conectadas a una fuente de corriente en la superficie. En la Figura 7 se muestra un esquema de este dispositivo.

Las celdas o unidades de calentamiento están conectadas unas con otras, pero si una celda falla o se requiere remover algunas de las unidades no se romperá el circuito debido a que cada celda está también conectada independientemente a la fuente de energía a través de la barra de conexión. El receptáculo en el que se depositan las unidades de calentamiento así como sus partes principales generalmente se fabrican en cobre, debido a que éste tiende a entregar la máxima cantidad de calor recibida de la fuente de energía.

Figura 7. Vista lateral del calentador patentado por Pershing suspendido dentro del pozo.

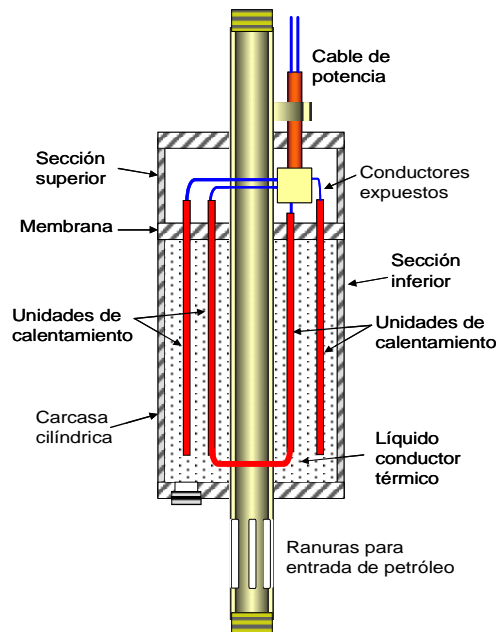


Fuente: [21]

- **Dispositivo de calentamiento patentado por Stegemeier**

En Abril de 1960 Stegemeier presenta, en la patente número 2932352 de la Oficina de Patentes de los Estados Unidos, un aparato calentador de pozos usando un medio de transferencia líquido para conducir calor desde un elemento eléctricamente resistivo hacia las superficies que rodean el aparato. Se compone de un conducto central que en su parte superior esta unido a una sarta de tubería. La parte inferior del conducto esta provista de un número de ranuras por las cuales entraría el petróleo para ser bombeado (ver Figura 8); si se desea, el calentador también se puede colocar en alguna parte intermedia de la sarta de tubería y en este caso la parte inferior del conducto se uniría con la parte inferior de la sarta. El anular del dispositivo calentador se divide por una membrana en una sección superior relativamente corta y una sección inferior de mayor tamaño. La sección inferior se rellena con un fluido. Este fluido puede estar conformado por una mezcla de partículas sólidas refractarias conductoras de calor y un líquido conductor de calor. Las unidades de calentamiento toman la forma de barras en forma de U que se posicionan simétricamente alrededor del “tubing”. Las unidades consisten de un conductor eléctrico recubierto por una capa de oxido de magnesio comprimido u otro mineral aislante el cual a su vez está cubierto por una capa metálica.

Figura 8. Vista lateral del dispositivo de calentamiento patentado por Stegemeier.

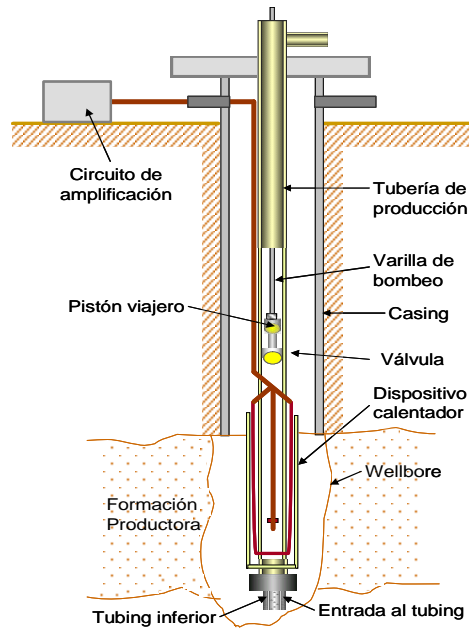


Fuente: [22]

- **Aparato de calentamiento patentado por McCarthy**

En 1963 McCarthy, en la patente número 3114417 de la Oficina de Patentes de los Estados Unidos (Figura 9), se discute el uso de un aparato en fondo de pozo, específicamente de ciertos calentadores de superficie adaptados para instalarse en la cara del pozo con el fin de calentar el fluido producido de esta zona. La corriente se conduce a través de un cable eléctrico dispuesto frente a la cara del pozo; dicho cable no se somete a las altas temperaturas a las que estaría operando el calentador y de esta forma se evita el deterioro del cable y de su aislante evitándose un corto circuito. Este aparato está diseñado para operar en pozos en los cuales se tiene un diseño con revestimiento hasta el tope de la zona de interés. El dispositivo calentador se coloca en posición uniéndolo a una sarta de tubería pasando a ser parte de esta. La tubería puede estar unida a un sistema de levantamiento mecánico con todas las partes que lo componen. Este sistema usa corriente directa. El dispositivo calentador consta de una camisa alrededor del "tubing" de producción de modo que se forma un anular en el cual se colocan las unidades resistivas de calentamiento. Estas unidades constan de un cable resistivo dispuesto dentro de un tubo que generalmente se fabrica en acero inoxidable. La herramienta calentará el aceite en el "wellbore" que rodea la coraza del calentador mediante transmisión del calor desde el cable resistivo del interior de las unidades de calentamiento.

Figura 9. Sección longitudinal de aparato de calentamiento patentado por McCarthy instalado en el pozo.

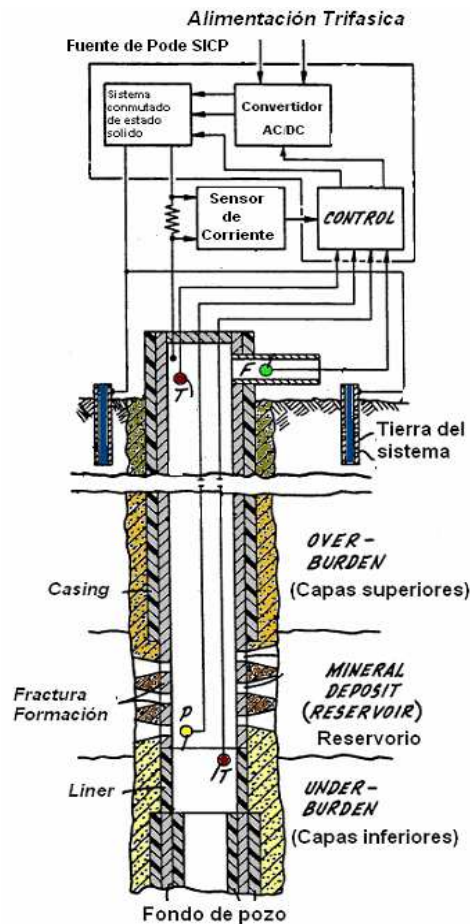


Fuente: [23]

- **Aparato de calentamiento patentado por Bridges**

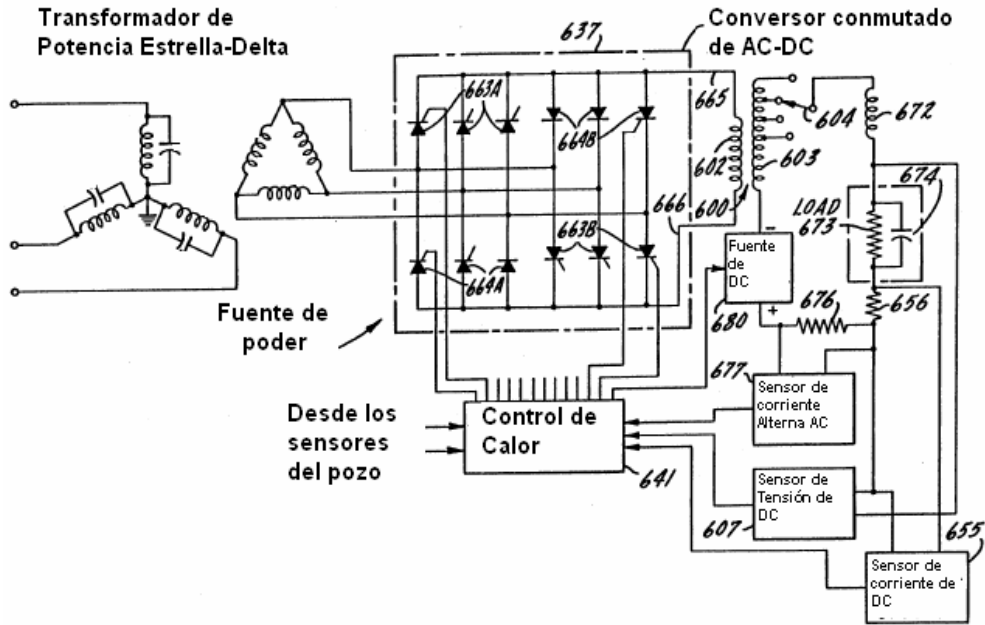
En 1991 Bridges, presenta la patente N° 509918 en la Oficina de Patentes de Canadá (Figura 10). En ésta se presenta el uso de una fuente de poder controlada por corriente para calentar el crudo en la zona de producción. Este sistema conduce la corriente a través del tubo de producción *tubing* o el *casing*, utilizándolos como línea de transmisión. El dispositivo opera inyectado corriente de baja frecuencia en la cara del pozo, y tiene como principio de operación utilizar el agua intersticial de la mezcla de crudo en la formación como medio conductor y generador de calor. Además, en la patente proponen varias configuraciones dependiendo del tipo de alimentación que se tenga y la configuración de pozos que se desean interconectar. Un idea general los circuitos utilizados en el diseño es ilustrado en la figura 11.

Figura 10. Diagrama de bloques del sistema de inyección de corriente patentado por Bridges.

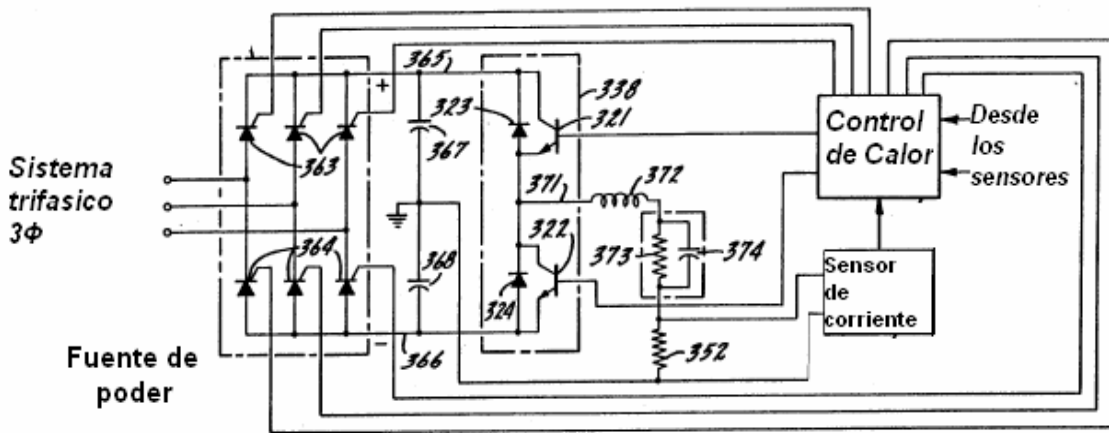


Fuente: [24]

Figura 11. Circuito esquemático de la fuente de inyección de corriente patentado por Bridges.



a) Modelo trifásico con puente de SCRs



b) Modelo trifásico con puente de transistores

Fuente: [24]

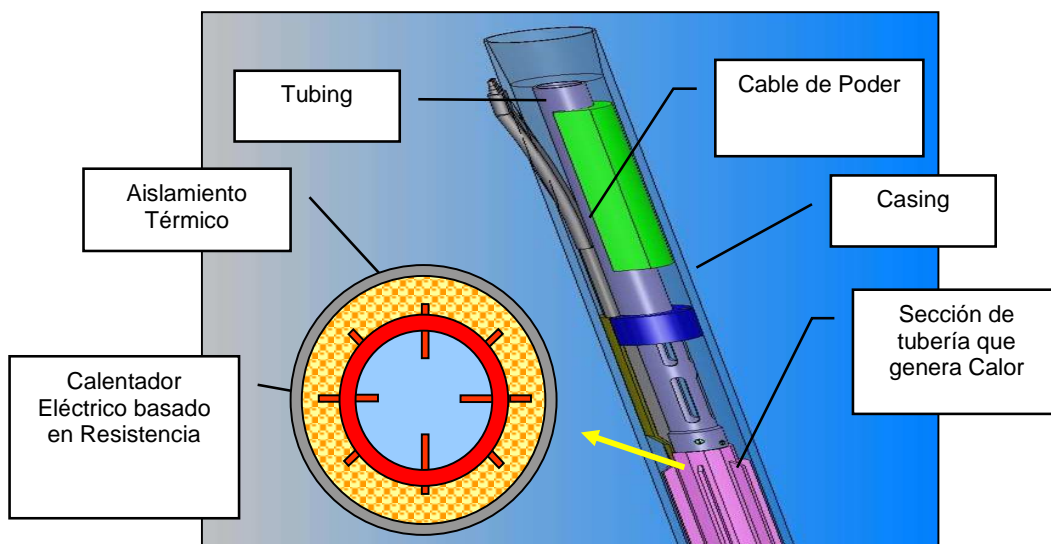
2.5. Aplicaciones comerciales

En esta sección se presentaran dos equipos comerciales de empresas dedicadas al negocio del calentamiento electromagnético, en las cuales se evidencia el desarrollo tecnológico de la técnica hacia el calentamiento de tuberías.

- **Sistema de calentamiento en fondo de pozo desarrollado por Lynbrook Heating Technologies**

La empresa Lynbrook Systems de Houston Texas, construyo una herramienta especializada para realizar calentamiento de tubería en pozo. La cual tiene una capacidad de potencia de 35 KW hasta 75 KW para el tubing de 5-1/2" y para el casing maneja una potencia de 120 KW para el tubing de 7". En general consiste en una sección de tubería con núcleo resistivo de alta disipación térmica acompañado de unas aletas de material metálico de alta conductividad térmica hacia el interior, conectado a un cable de potencia el cual provee la corriente necesaria para que sea efectivo el calentamiento, como se puede apreciar en la figura 12. Una de las ventajas de esta herramienta es que el calentamiento es centralizado en una sección a lo largo de la tubería, parámetro importante si se quiere evitar precipitación de parafinas en la tubería.

Figura 12. Vista lateral e interior de la herramienta construida por Lynbrook Heating

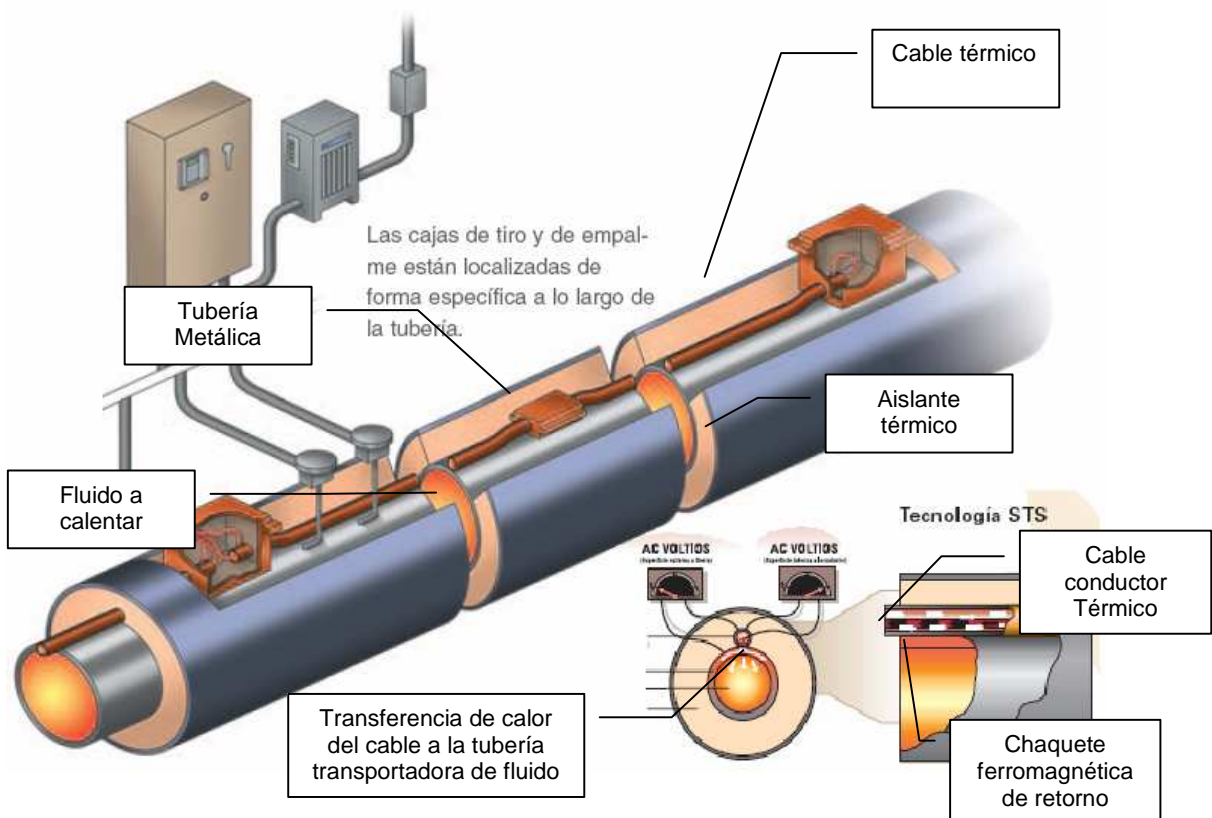


Fuente: Lynbrook Systems S.A.

- El “Tracer STS Skin-effect Sistema de Traceado Eléctrico” de la empresa Tyco Thermal Controls

El sistema “Tracer STS” es un sistema de gestión de calor, configurado para aportar calor en tuberías de media y larga longitud, en la figura 13 se puede apreciar la configuración del sistema. Las aplicaciones a las cuales puede utilizarse son las siguientes: líneas de transferencia de productos, fundición de nieve y hielo, calentamiento de tanques, líneas de transferencia submarina, entre otras. Trabaja a una potencia nominal de hasta 150 W/m, temperaturas de mantenimiento de hasta 200°C, Temperaturas de exposición de hasta 250°C.

Figura 13. Vista lateral e interior de la herramienta construida por Lynbrook Heating



Fuente: Tyco Thermal Controls

En general, el sistema consta de un cable eléctrico aislado instalado dentro de una tubería de calentamiento ferromagnética unida a la tubería de transporte. El cable aislado está conectado a la fuente de tensión y a la tubería de calentamiento. Por tanto, la corriente fluye por el cable regresando por la superficie externa de la tubería. El sistema STS es eléctricamente seguro y produce calor en la tubería ferromagnética gracias al efecto de dos fenómenos eléctricos muy conocidos: Skin Effect (efecto de piel) y Proximity Effect (efecto de proximidad). El calor se genera también debido a la resistencia del tubo calefactor y del cable STS, y a través de corrientes de Eddy y de histéresis en la tubería calefactora. La tubería calefactora está fijada a la tubería de proceso y completamente integrada dentro del aislamiento térmico, el calor generado finalmente se transmite eficientemente a la tubería de proceso.

SEGUNDA PARTE

DISEÑO DEL SICP

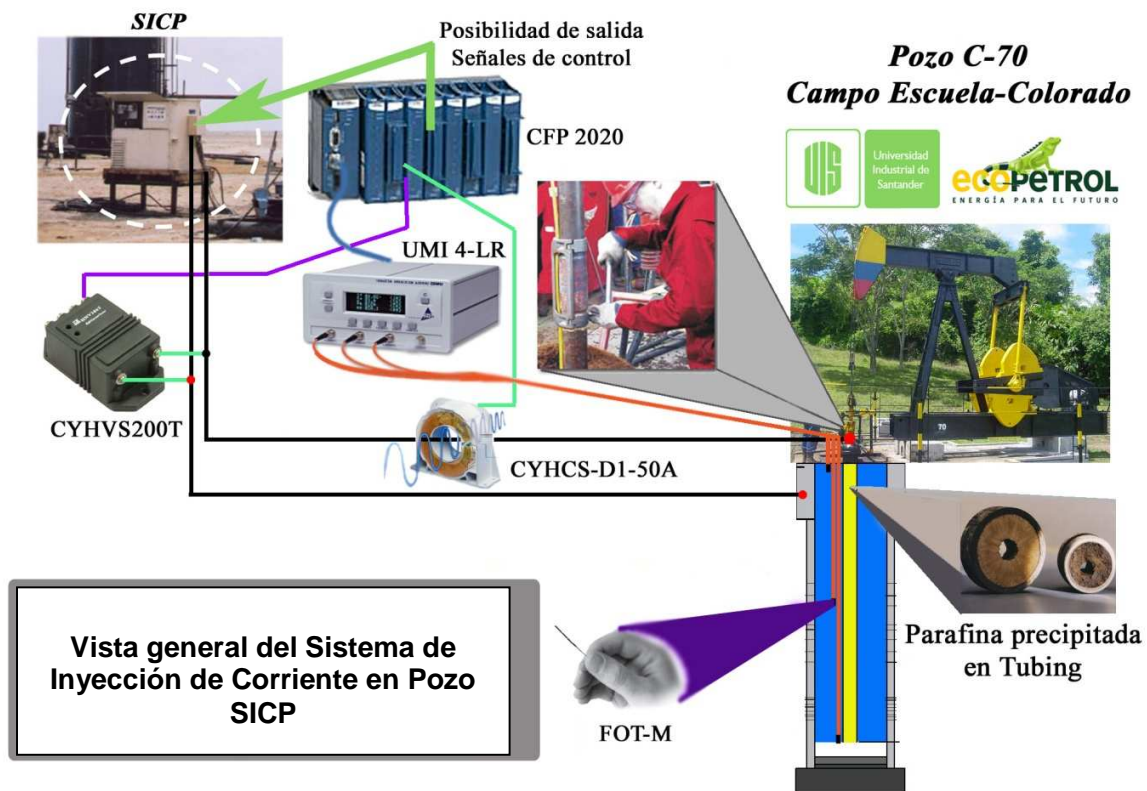
CAPITULO III

METODOLOGÍA DE DISEÑO DEL SICP

En síntesis, el sistema de calentamiento eléctrico consta de un sin numero de elementos clasificados de acuerdo a su funcionalidad, ver figura 14. Entre los cuales tenemos: El sistema de alimentación, el cual surte la energía necesaria a la fuente de poder. De esta forma, para controlar el sistema de potencia se requiere un equipo de control, junto con sus elementos auxiliares como instrumentación y medios de transmisión. Por ultimo, la carga (pozo de producción) requiere una adecuación para que la técnica pueda ser implementada. Como elementos básicos de pozo (conocidos como facilidades de campo) los cuales permiten la extracción natural del crudo en un pozo. Sin embargo, estos elementos no serán examinados en detalle en esta investigación por tratarse de un tema ajeno al tema de estudio.

Para realizar el diseño conceptual del Sistema de Inyección de Corriente en Pozo SICP, se partió del estado del arte y de la consecución del modelo electromagnético de la tubería de producción; fundamentos descritos claramente en la primera parte del libro. A continuación, se propone el diseño del SICP en tres etapas básicas. La primera etapa, consiste en la definición de las condiciones iniciales de operación, la descripción de los sistemas auxiliares del SICP y los elementos esenciales que debe contener el pozo. Consideraciones necesarias para que el proceso de calentamiento electromagnético sea viable técnicamente y exitoso económicamente. La segunda etapa consiste en plantear el diseño del módulo de potencia del SICP y sus componentes estructurales. La última etapa, esta constituida por la definición del módulo de control, componente central del sistema y encargado de manejar el módulo de potencia. A su vez, el modulo de control esta encargado de realizar el monitoreo y supervisión de las variables de temperatura y de corriente de inyección en el pozo. Por consiguiente, debido a la gran variedad de consideraciones estudiadas para su diseño será contemplada en el capítulo IV.

Figura 14. Esquema general de configuración del Sistema de Inyección de Corriente en Pozo (SICP)



Fuente: El Autor

3.1. Condiciones Iniciales de Diseño

Para que el SICP sea viable y efectivo, se recomienda seguir las siguientes indicaciones⁶:

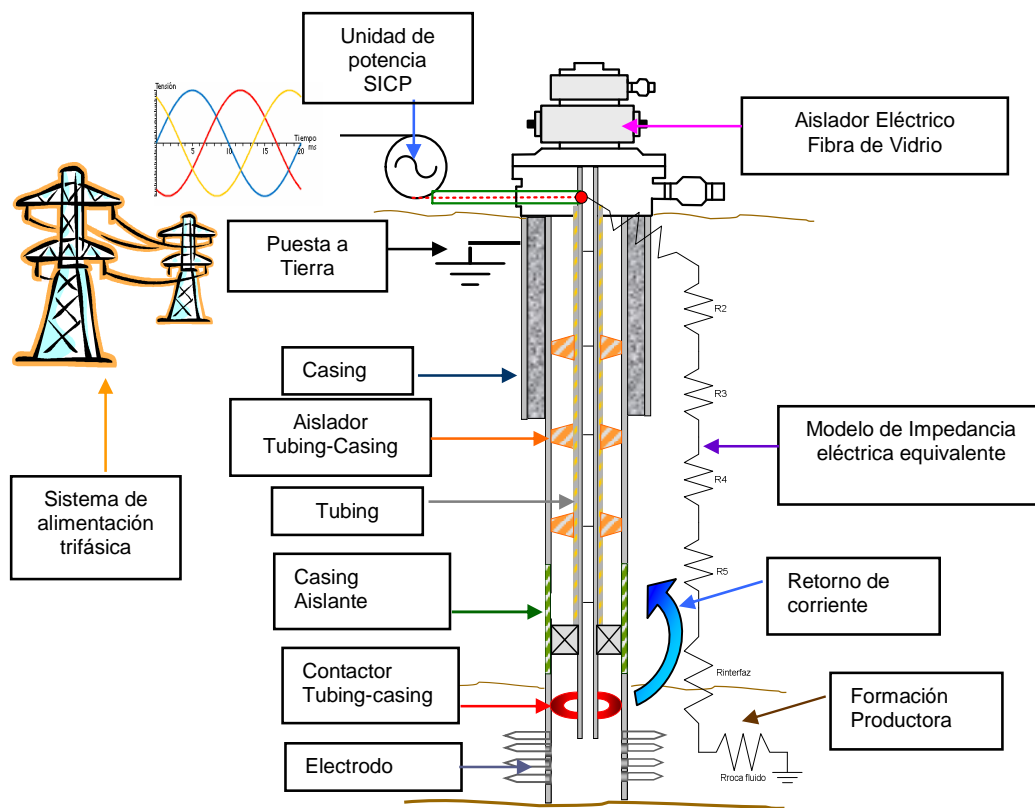
- El sistema debe ser aplicado a pozos de crudos pesados, parafínicos o extrapesados, preferiblemente a pozos con crudos con densidad API menor de 15 °API y viscosidad mayor de 8 Cp, a condiciones de presión y temperatura en fondo de pozo.

⁶ Estas indicaciones son formuladas por el autor basado en el estado del arte y de las simulaciones efectuadas con el modelo electromagnético. Sin embargo, es necesario realizar pruebas de reología en el crudo, para determinar el comportamiento térmico del crudo en la tubería y de esta forma determinar las exigencias de potencia que efectivamente se requieran para cada tipo de crudo en condiciones de pozo.

- Los pozos candidatos deben tener una longitud de tubería inferior a 4000 metros, ya que a mayor profundidad mayor será la carga y los requerimientos de potencia.

Por tanto, como resultado de las consideraciones anteriores, se fija la potencia de trabajo en 100 kVA, valor suficiente para efectuar calentamiento en la tubería, según las simulaciones y el estado del arte [4 - 28]. Igualmente, se parte del hecho que el sistema de alimentación: subestación eléctrica, líneas de transmisión, protecciones eléctricas, sistema de puesta a tierra, entre otros; así como, los elementos de facilidades de pozo tales como: aisladores entre tubing y casing, conectores, sellos y aislamiento en la cabeza del pozo, entre otros; existen y están diseñados para soportar las condiciones de trabajo que impone el SICP, además, de las condiciones ambientales del sitio donde se encuentra ubicado el pozo, tales como: temperatura, humedad y nivel Ph del ambiente. A continuación, se ilustra y se define de manera general las partes esenciales que debe contener el pozo para funcionar con un sistema de calentamiento electromagnético, ver figura 15.

Figura 15. Componentes de un sistema de calentamiento eléctrico.



Fuente: El Autor

De acuerdo a la figura 15, los componentes esenciales que integran un sistema de calentamiento eléctrico basado en inyección de corriente para pozo de producción son los siguientes:

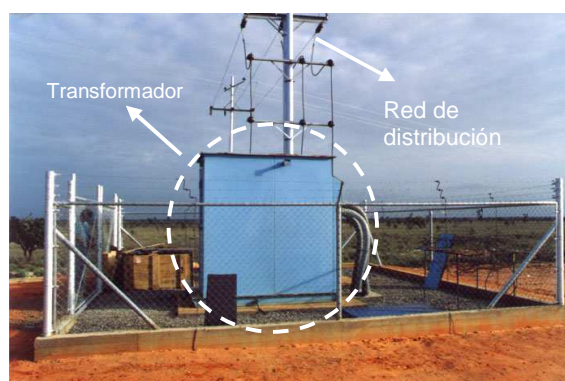
- Sistema de alimentación
- Unidad de acondicionamiento de potencia
- Sistema de conducción de potencia
- Sección de aislamiento
- Contactores y Electrodo
- Sistema de retorno o tierra

A continuación, se presenta una descripción de cada uno de los componentes que constituyen el sistema SICP enunciados anteriormente.

3.1.2. Sistema de alimentación

Es el conjunto de elementos encargados de realizar la interfaz entre el sistema de interconexión eléctrica y el equipo de acondicionamiento de potencia o SICP, de manera que tenga la energía suficiente para su correcto funcionamiento, ver figura 16. En principio, el sistema de alimentación debe entregar al SICP en configuración trifásica con tensión de fase de 400 VRMS. A su vez, la potencia nominal de trabajo es de 150 KVA, 50% de capacidad extra para posibles extensiones futuras. El sistema contempla el diseño de acometida a media tensión, subestación eléctrica, líneas de transmisión de alta y media tensión. Además, debe diseñarse con sus respectivas protecciones eléctricas, como fusibles, interruptores térmicos, y sistemas auxiliares, entre otros.

Figura 16. Sistema de alimentación - subestación eléctrica.



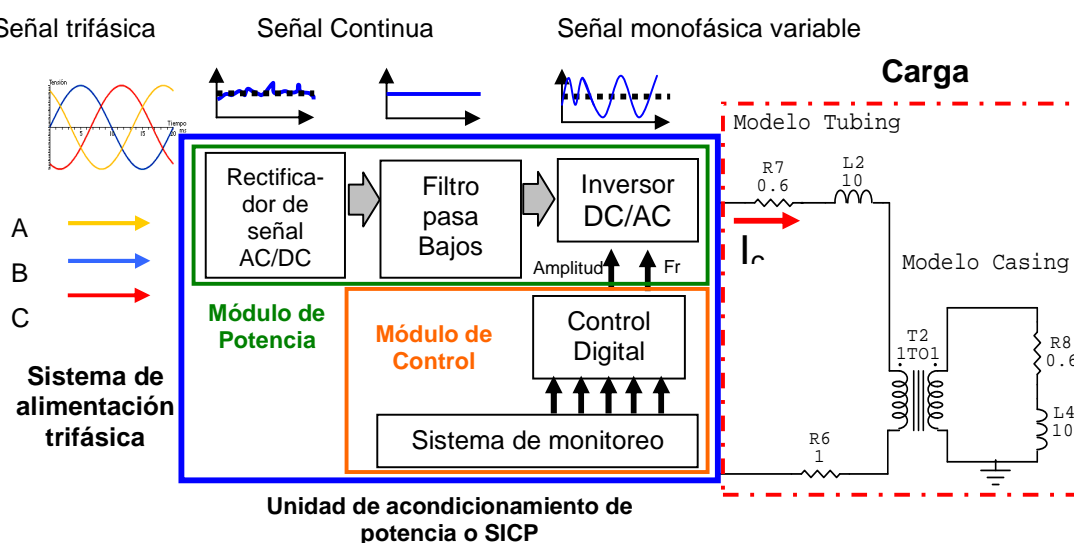
Fuente: [29]

3.1.3. Unidad de acondicionamiento de potencia

Esta unidad es la parte central del proceso de calentamiento y su diseño es el tema principal de estudio de esta investigación. También es conocida como sistema de inyección de corriente en pozo SICP. La unidad de acondicionamiento de potencia es la encargada de regular la energía entregada a la tubería de producción o a la cara del pozo de acuerdo a la exigencia requerida por esta (carga) y limitado por la capacidad máxima de potencia para la cual esta dimensionada. En efecto, como se mencionó anteriormente la máxima potencia de salida es de 100KVA, con salida de tensión entre los 0 - 1000 Voltios, frecuencia variable entre 0 - 1000Hz y corriente de salida entre 0 - 120 Amperios, de acuerdo a las necesidades y requerimientos de la carga.

Asimismo, el SICP es estructuralmente un “variador” de velocidad para motores monofásicos, como se puede apreciar en la figura 17, debido a que su arquitectura y principio de funcionamiento son equivalentes, lo único que cambia es la naturaleza de la carga. Además, en términos generales, el SICP esta compuesto por dos elementos básicos: El módulo de potencia (cuadro verde), músculo del sistema, encargado de manipular directamente la energía eléctrica; y el módulo de control (cuadro naranja), cerebro del sistema, encargado de monitorear las variables de retroalimentación, para luego procesarlas por medio de algoritmos y generar las señales de control apropiadas que el módulo de potencia requiere para generar la corriente deseada.

Figura 17. Diagrama de Bloques del SICP



Fuente: El Autor

3.1.4. Sistema de conducción de potencia

El sistema de conducción de potencia está constituido por el par “*tubing-casing*” y jugara dos papeles importantes dentro del sistema, el primero es el servicio de transporte de corriente (línea de transmisión) para realizar el calentamiento en la cara del pozo. Como se mencionó anteriormente, existe la posibilidad de realizar estimulación de pozo, en el cual el *tubing* se interconectaría con los electrodos ubicados en el fondo de pozo y el *casing* debe estar aislado entre el área de interés o productora y la capa superior, esta sección aislada obliga a la corriente a circular por la formación y buscar el retorno a tierra que es en esencia el mismo tubo de *casing* unos metros arriba. El segundo servicio, es el de calentamiento del crudo en asenso por el *tubing*, debido al gran flujo de corriente que circular por el *tubing*, se generaran pérdidas eléctricas naturales en todo material conductor, que por efecto Joule son disipadas en calor, incrementando la temperatura del tubo y a su vez calentado el crudo por efecto de la convección térmica a medida que este va ascendiendo a lo largo de la tubería, en la figura 18 se aprecia las conexiones que se realizan desde la fuente de poder o SICP al *tubing*.

Figura 18. Conexiones de unidad de acondicionamiento de potencia al *tubing*



Fuente: [4]

3.1.5. Sección de aislamiento

La sección de aislamiento se constituye en un factor clave dentro del funcionamiento total del sistema, si éste falla, falla el proyecto, de ahí que se deban estudiar y escoger cuidadosamente los materiales a utilizar. En efecto, la energía eléctrica puede perderse en secciones del pozo que no son de interés, o puede ocurrir el caso en que el *tubing* haga un

contacto no deseado con el *casing* en algún punto intermedio donde sea insuficiente la estimulación y por ende no se genere el calentamiento necesario. Por consiguiente, el medio que se usa como conductor de energía (*tubing*) debe aislarse, mantenerse centrado dentro del *casing*, por medio de centralizadores de material aislante, ver adelante la figura 19. Además, se requiere un Revestimiento de Fibra de Vidrio (o sus siglas en inglés FRP) como aislamiento exterior en la cabeza del pozo, para proteger al personal que opera el mismo. Como recomendación final, se propone usar cemento de recubrimiento más ligero para reducir la presión externa causante del colapso, permitiendo el uso de grados más ligeros de revestimiento FRP. Alternativamente, el *casing* puede ser recubierto con materiales aislantes tales como polietileno o esmalte de alta densidad para evitar fugas de corriente a las capas superiores del pozo.

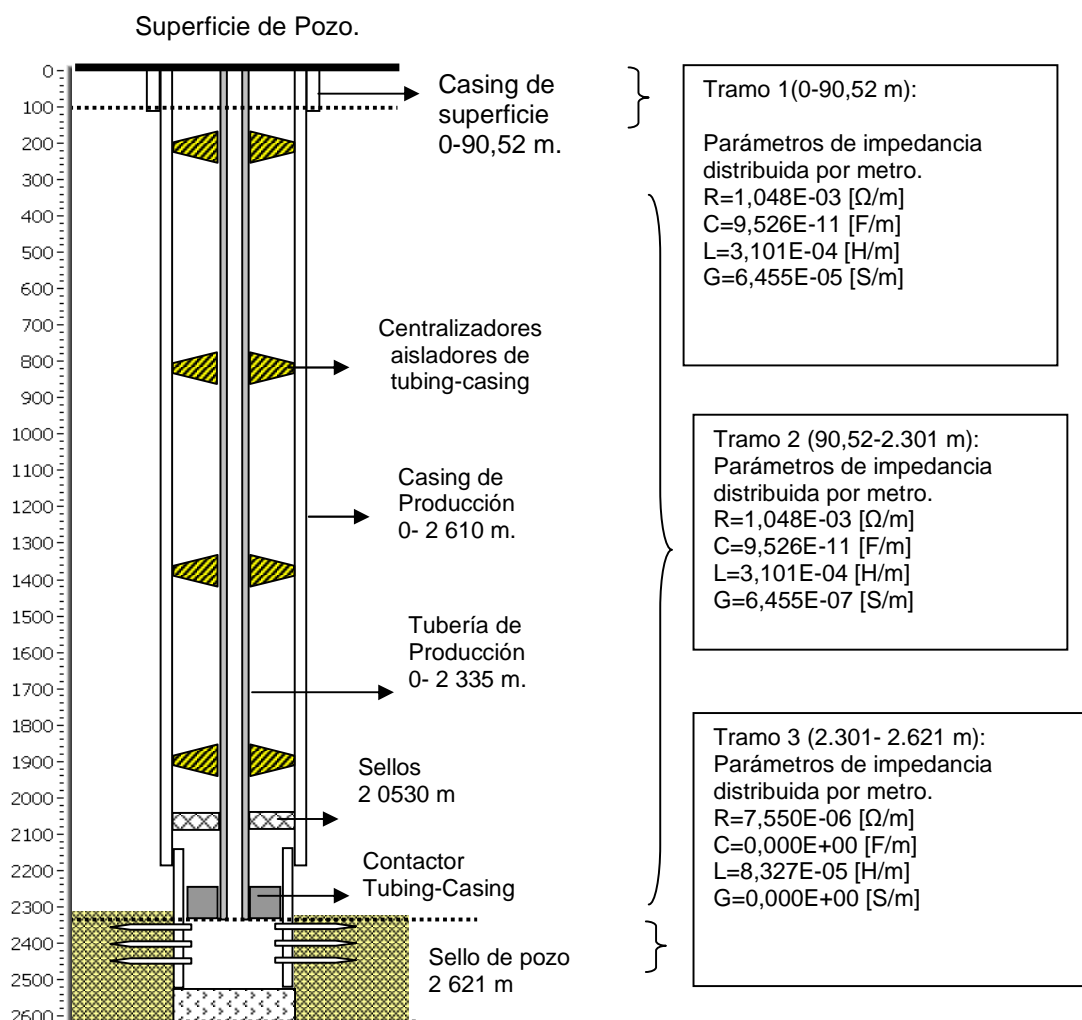
3.1.6. Contactor y Electrodo

El contactor se encuentra ubicado en el fondo del pozo y es la parte donde se une el *tubing* con el *casing*. El contactor es en esencia un *tubing* de mayor diámetro y espesor, el cual garantiza el contacto seguro entre este y el *casing*. Como se puede apreciar en la figura 19, en la cual se ilustra la configuración de un pozo ejemplo, en donde las dimensiones del *casing* cambian a lo largo del pozo, en superficie el diámetro es mayor y disminuye a lo largo del pozo, al final el diámetro del pozo es casi igual al diámetro del *tubing*. A su vez, el *casing* puede ir conectado a la formación por medio de los electrodos o directamente a la tierra del sistema.

Los electrodos son elementos opcionales en la configuración del sistema, en caso tal, los electrodos deben seleccionarse por medio de cálculos de disipación eléctrica en la cara del pozo. Teniendo en cuenta además los cálculos de impedancia eléctrica de la cara del pozo [29]. En general los electrodos son segmentos de "*casing*" y juntas de aislamiento; estas se diseñan usando estudios de potencia-producción basados en las características del yacimiento. Del mismo modo, para el caso de la estimulación de la cara del pozo, el diseño del electrodo es de crucial importancia debido a que el sobrecalentamiento de estos elementos es una de las principales causas para que el sistema falle. La longitud y la colocación adecuada de éstos en el yacimiento es clave para maximizar el área calentada y minimizar las pérdidas térmicas a zonas adyacentes no productoras.

El diagrama de la figura 19, es un caso de un pozo real de 2600 m de profundidad, donde el diámetro del *casing* varía en tres tramos, y el diámetro del *tubing* permanece constante. Sin embargo, puede existir un sin número de configuraciones posibles en donde los diámetros y tipos de la tubería de producción cambie drásticamente debido a las características de la formación. Asimismo, se puede apreciar el cálculo de los parámetros circuitales por tramos, debido a las características homogéneas que pueda presentar el pozo por trayectos de longitud.

Figura 19. Distribución interna de un pozo real, adecuado para calentamiento electromagnético y su equivalente en parámetros circuitales.



Fuente: El Autor

3.1.7. Sistema de retorno o de tierra

Este sistema está diseñado para regular el flujo de energía al pozo, de tal manera que exista un canal que garantice que el circuito eléctrico formado por la carga y la fuente de potencia se mantenga cerrado, la puesta a tierra debe ser diseñada teniendo en cuenta las corrientes de cortocircuito que se puedan presentar. Además, debe cumplir con la reglamentación de la norma IEEE std 80, 2000, para puestas a tierra.

Para el cálculo de la puesta a tierra se toma como referencia la corriente de cortocircuito monofásico en el lado de alta, ya que por la conexión del transformador, las corrientes de falla a tierra en el secundario retornan al sistema por los conductores primarios y no por la tierra. Asimismo, se requieren otros cálculos para determinar el calibre del conductor, el tamaño de la malla y la topología o estructura de la puesta a tierra. En la tabla 3, se aprecia los resultados de los cálculos para dicha malla.

Tabla 3. Características técnicas de la malla de tierra

Diseño	Cuadrícula
Profundidad	0,3 m
Capa de grava	0,1 m
Conductor	2/0 AWG en Cobre
Largo	2,5 m
Ancho	2,5 m
Separación entre conductores	0,5 m
Número de electrodos	5
Tipo de electrodos	Cobre 12,7 mm x 2,4 m
Tensión de malla	34 V
Tensión de paso	3,13 kV
Resistencia de puesta a tierra	10,8 Ω

Fuente: [29]

3.2. Diseño del módulo de Potencia del SICP

El diseño de este módulo está basado en electrónica de potencia. Tecnología, que a lo largo de los últimos años ha cobrado importancia como consecuencia de las características favorables que presentan frente a las soluciones con elementos pasivos. Adicionalmente, el desarrollo de nuevas técnicas en la fabricación de elementos de estado sólido, han disminuido sustancialmente los costos y mejorado las características en capacidad de potencia. Además, una de las ventajas de este tipo de equipos es la capacidad para adaptarse a los cambios en las condiciones de operación. Así, problemas como resonancias con elementos de la red eléctrica o cambios en las características de la carga que se pretenda alimentar⁷ se pueden solventar fácilmente modificando los algoritmos de control. Esto sin la necesidad de realizar cambios significativos en el “hardware” del equipo, siempre y cuando, la carga (Pozo) no requiera más potencia de la máxima dimensionada (100 KVA de potencia a frecuencia de salida entre 0-1000 Hz).

El principio de funcionamiento del módulo de potencia es el siguiente: la señal de alimentación trifásica es rectificadora a una señal de continua o DC. Esta señal es filtrada para eliminar el rizado producido por el rectificador. Seguido, esta señal de DC es utilizada para alimentar un puente inversor, el cual conmuta de forma controlada. Y como resultado final, se obtiene una señal de tensión diferencial, la cual puede tener la forma y frecuencia que se desee, de acuerdo a la secuencia de señales de control con las cuales se opere.

A continuación se describe los elementos que integran el SICP, de acuerdo con la topología mostrada anteriormente en la figura 17 y siguiendo las siguientes especificaciones de diseño:

- Capacidad para soportar corrientes no mayores a 12 A. Se prefiere trabajar con corrientes intermedias⁸, ya que a mayor valor de corriente implica aumentar el calibre de los conductores internos del equipo y mejorar las especificaciones de los dispositivos como diodos y transistores, elevando los costos de fabricación y tamaño del equipo. Además un flujo de corriente elevado ocasiona mayores pérdidas

⁷ Caso esperado, ya que cada pozo es una carga ligera o sustancial diferente, inclusive dentro del mismo campo de producción.

⁸ Intermedias en términos relativos, ya que los equipos de calentamiento para pozo, pueden incluso entregar más de 500 A en algunos casos.

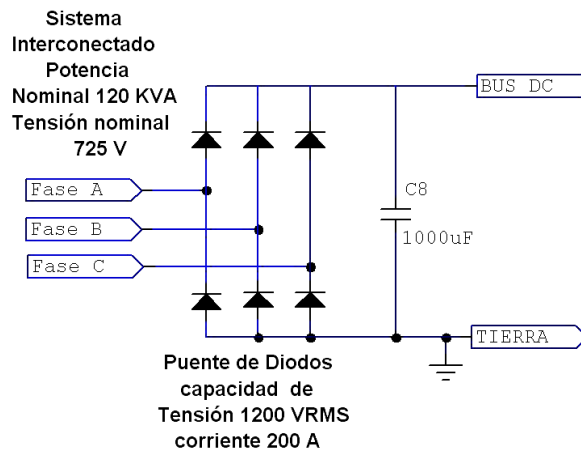
eléctricas convertidas en calor dentro del equipo, situación no deseada debido a que acorta la vida útil de los elementos que constituyen la fuente.

- Tensión de alimentación de 1000 V. Debido a que se selecciono el valor de 120 amperios como corriente máxima y la potencia de salida es 120KVA por razones de diseño, es evidente que el valor de tensión en el bus de continua para obtener la salida máxima potencia es de 1000 V.
- Los dispositivos de estado sólido (Diodos y Transistores) deben ser de conmutación rápida. Esto con el fin de trabajar con dispositivos de control de alta velocidad que permitan la generación de una señal de salida más fiel a la señal de referencia. Además, el hecho de estar en capacidad de soportar señales de control rápidas sugiere menores pérdidas en procesos de conmutación y por tanto mayor eficiencia en la transformación de la energía.
- Diseño modular y simplificado. Se busca diseñar la fuente de potencia lo más parecido a un equipo comercial estándar. Además, como se mencionó anteriormente, el SICP tiene el mismo principio de funcionamiento de los variadores de velocidad. Por tanto, se siguió los diseños de equipos de reconocidas empresas en la industria como *SIEMENS* o *Danfoss* [43 -44], entre otros. Esto implica el uso de la menor cantidad de elementos posibles y el diseño modular, el cual busca agrupar los elementos en función de la tarea que desempeña dentro del equipo, de esta forma el mantenimiento, actualización y modificaciones futuras del equipo, se hará de manera rápida y sencilla para los encargados de operarlo.

3.2.1. Puente rectificador

Los rectificadores de señal son circuitos que se utilizan cuando se requiere proporcionar una tensión de DC o continua a una carga a partir de una tensión de alimentación AC o alterna. A su vez, los circuitos rectificadores se pueden clasificar, en base a los dispositivos utilizados en su diseño, en rectificadores controlados y rectificadores no controlados. Los rectificadores no controlados, se utilizan en aplicaciones de bajo costo, que no son sensibles a la variación de la tensión de salida DC del rectificador y típicamente en sistemas de media y baja potencia [33]. La figura 20 presenta un rectificador trifásico no controlado de onda completa, conocido como puente trifásico. En este circuito, los dispositivos de rectificación son diodos semiconductores de potencia.

Figura 20. Rectificador puente trifásico



Fuente: [33]

Para el circuito rectificador de puente trifásico, la tensión DC de salida se puede calcular [33] mediante la ecuación

$$V_{DC} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_f \quad (3.1)$$

En donde V_f representa la amplitud de la tensión de cada fase. De la ecuación se observa que la tensión DC de salida presenta un valor constante. Por ejemplo, en nuestro caso de estudio, el valor de tensión de fase es de 400VRMS, por lo tanto el valor de $V_{DC} \approx 1000$ V.

Por otra parte, los rectificadores controlados son circuitos utilizados en una amplia escala de aplicaciones, que varían desde sistemas de baja potencia hasta sistemas de muy alta potencia. Un ejemplo de este tipo de rectificadores es el constituido por 6 tiristores (2 por cada fase). Para este tipo rectificadores, la tensión de salida DC se controla en base al ángulo de retraso α para el disparo de los tiristores. Se puede demostrar en (18) que la tensión DC de salida está en función del ángulo α mediante la relación

$$V_{DC} = \frac{3\sqrt{3}V_f}{\pi} \cos \alpha \quad (3.2)$$

En donde V_f representa la amplitud de la tensión de cada fase.

La principal característica de estos circuitos, es la posibilidad de controlar la magnitud de la tensión DC de salida, lo cual es muy deseable en diversas aplicaciones. Sin embargo, para nuestro caso el nivel de DC debe ser fijo y la amplitud de la señal de salida es una tarea

asignada para el puente inversor. Además, debido a la complejidad en el control de estos dispositivos, la red Snubber⁹ que se debe conectar en paralelo por cada tiristor, hacen que esta opción sea costosa e innecesaria; por tanto, se descarta dentro del diseño del SICP. Por consiguiente, la mejor opción es la de puente rectificador sencillo conformado por diodos.

A continuación, en la tabla 4, se definen los valores típicos con los cuales se seleccionan los diodos que conforman el puente rectificador entre los diferentes fabricantes. Asimismo, se pueden optar por dos configuraciones estructurales para el puente, configuración discreta o en configuración monolítica, esta última es la más práctica, por lo compacto del encapsulado y características de disipación de potencia. Sin embargo, es la más costosa y en caso de falla de uno de los diodos del puente, sería necesario cambiar la pieza por completo.

Tabla 4. Características de los diodos que conforman el puente rectificador

Valor	Unidad
Tensión Inversa	3400 V
Corriente Directa	150 A
Disipación de Potencia	200 W
Pulso Unitario de Corriente Directa	1250 A
Máxima Caída de Tensión Directa	1 V
Máxima Corriente Inversa de Fuga	100 μ A

Fuente: El Autor

3.2.2. Filtro pasa bajos

Es utilizado para eliminar el rizado producto de la rectificación y la contaminación de armónicas que produce el SICP en la red eléctrica. Característica importante a tener en cuenta ya que según los estándares mundiales de fabricación de equipos industriales (IEEE 519-1992) [37], los márgenes de ruido y distorsión armónica hacia la red deben estar en valores muy bajos o casi nulos. No obstante, desde el punto de vista de la señal de salida del rectificador (tensión continua o DC) este módulo puede ser opcional, ya que no se requiere generar una señal de salida pura o armónica para la carga, debido a que se busca maximizar

⁹ Red Snubber, circuito de frenado al apagado del tiristor, tiene por objetivo amortiguar el efecto de una variación voltaje / tiempo que en algún momento pudiera ser destructiva.

las pérdidas eléctricas en la tubería de producción y la contaminación de armónicos hacia la carga es una causa importante de ello.

En general, el filtro puede estar basado en dos configuraciones: filtros pasivos y filtros activos; los primeros conformados por elementos pasivos o reactancias (resistencias, condensadores y bobinas) y los filtros activos diseñados con dispositivos de estado sólido (transistores, tiristores, etc) que soportan altos niveles de energía. Estos últimos tienen mejor desempeño y prestaciones, gracias a que pueden ser modificados simplemente por acción de software evitando así modificaciones de hardware costosas cuando las condiciones de carga lo demanden [30], sin embargo esta es una opción costosa y aumentaría en gran medida la complejidad del sistema. Por lo tanto, se descarta del diseño para la fuente de poder.

En definitiva, se selecciono un filtro basado en elementos pasivos, el cual debe cumplir con los siguientes requerimientos, capacidad de manejo de corriente de 120 A o tensión de 1500 V y un valor de impedancia equivalente a la magnitud reactiva de la carga del sistema pero desfasado 90° , para eliminar la componente reactiva y así mejorar el factor de potencia. Por tanto, el elemento seleccionado fue un condensador de $1000\mu\text{F}$, en paralelo con la salida del rectificador a tensión de 1500V, valor comercial y fácil de encontrar en el mercado. No obstante, debido a la naturaleza no lineal de la fuente de potencia, es recomendable el uso de un filtro activo en paralelo a la entrada de la alimentación para eliminar el ruido y las emisiones de armónicas producidas por la fuente hacia la red.

3.2.3. Puente Inversor o Puente H

Es el elemento principal del módulo de potencia, de él depende la capacidad de generar señales variables en tensión-corriente y en frecuencia, a los niveles adecuados para conseguir el objetivo del sistema. Estos dispositivos, llamados en la industria inversores, convierten una señal de tensión continua en una señal de tensión y frecuencia variable mediante la generación de pulsos controlados por un dispositivo de control. Actualmente se emplean "IGBT's" (Isolated Gate Bipolar Transistors o Transistores bipolares de puerta aislada) como elemento estándar de los puentes inversores, debido a que tienen las mejores características en cuanto a velocidad de conmutación, pérdidas eléctricas (eficiencia), tiempo muerto y efecto de cola [31]. Por consiguiente, éste fue el elemento seleccionado para esta

parte del diseño. La señal de salida de los “IGBT” varía en frecuencia desde de los 2Hz hasta 16kHz. Sin embargo una portadora con alta frecuencia genera mayor calor dentro del dispositivo de potencia, lo que representan pérdidas eléctricas en calor no útil.

También, es común encontrar configuraciones con tiristores controlados de puerta aislada (IGCTs, Isolated Gate Controlled Thyristors), para configuraciones de gran potencia (MVA), los cuales tienen mayores pérdidas y no son tan veloces. Sin embargo, son los únicos que pueden soportar estos rigurosos niveles de trabajo. Asimismo, todavía se pueden encontrar puentes inversores con transistores PNP, para baja potencia y MOSFET, en configuraciones de media y alta potencia.

Finalmente, para la selección de los IGBT’s que conforman el puente inversor se recomienda utilizar como guía los valores plasmados en la tabla 5. Además, es preferible que los IGBT’s tengan incluido el diodo antiparalelo, el cual ayuda a prevenir corrientes en contra sentido que pudieran causar la ruptura del transistor. A su vez, al igual que en el puente rectificador existe la posibilidad de encontrar puentes inversores en configuración monolítica de puente completo, sin embargo, este encapsulado no es tan común como los encapsulados de puente trifásico completo (6 IGBT’s) o la de medio puente (2 IGBT’s), como se aprecia en la figura 21.

Tabla 5. Valores de diseño para selección del puente inversor basado en IGBT’s comerciales

Característica	Ic	Vce	Vce(sat)	PD	ETS	Td (on)	Td (off)
Unidades	(A)	(V)	(V)	(W)	(mJ)	(ns)	(ns)
Valor típico deseado	140	1200	2	150	1	50	200

Donde:

Ic : Corriente continua de colector

Vce: Voltaje colector emisor

Vce (sat) : Tensión colector emisor en saturación o conducción

PD : Disipación de potencia

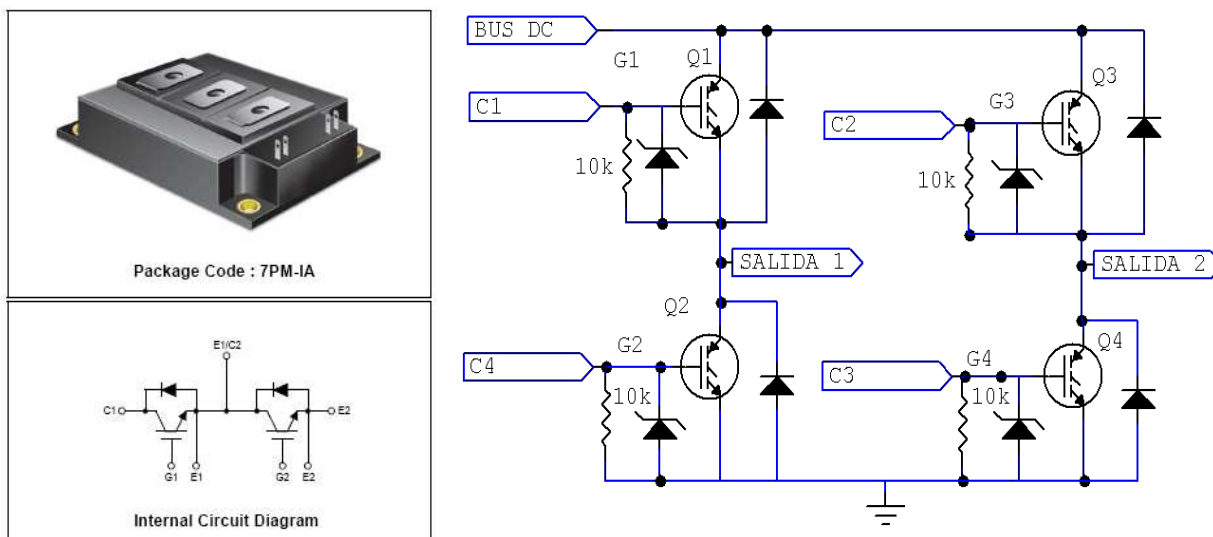
ETS: Pérdidas totales de conmutación

Td (on): Tiempo de encendido

Td (off): Tiempo de apagado

Fuente: Autor

Figura 21. Módulo de medio puente y esquemático de puente completo



Fuente: El autor

3.2.4. Manejador de puente inversor

El manejador de puente inversor es un circuito interfaz entre el módulo de control y el puente inversor, su función es proporcionar los niveles de tensión en las compuertas (*gates*) de cada transistor para su activación en forma efectiva. En especial, la activación de los transistores superiores del puente, ver figura 22, transistor Q1 y Q3, ya que estos requieren una tensión flotante de 10V a 18V para ser activados [32], para lo cual el integrado debe contar con un circuito elevador o circuito *BOOTSTRAP*. Además, el circuito manejador debe aislar las señales de control del puente inversor, a fin de evitar corrientes de fuga que pudieran dañar el módulo de control. A su vez, debe contener un circuito de protección que evite la activación de los IGBT's de la misma columna, situación que generaría un corto en la fuente, destruyendo por completo el módulo de potencia.

Normalmente estos dispositivos están conformados por módulos de múltiples circuitos integrados. Estos tienen por lo general la capacidad de manejar dos transistores por columna o medio puente, como el circuito mostrado en la figura 23, donde se aprecia un módulo manejador y su respectivo diagrama de bloques. Sin embargo, es común encontrar manejadores para puente completo en configuración trifásica, debido a que la mayoría de las aplicaciones de los variadores de velocidad corresponde al manejo de motores de inducción trifásicos. Como ventaja de la selección de este dispositivo, está en que puede manejar una

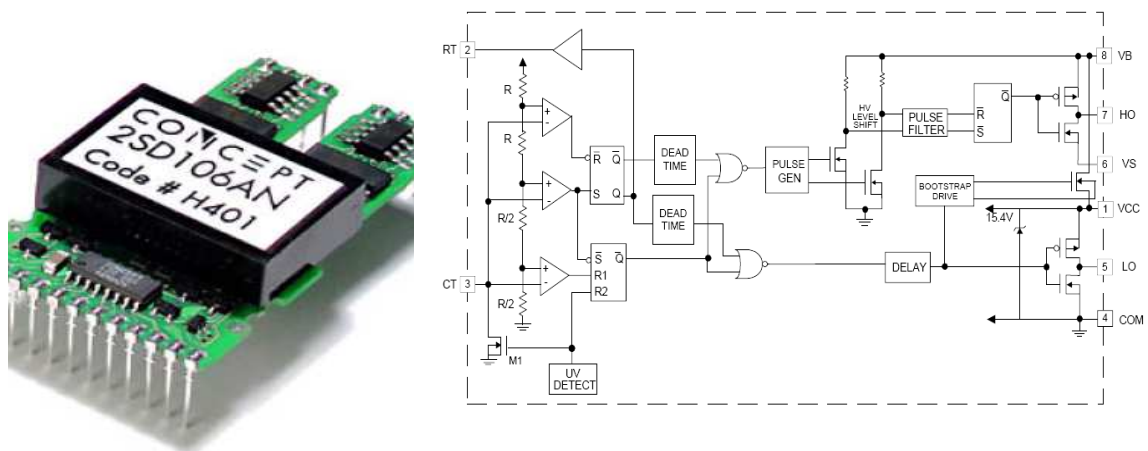
gama amplia de puentes inversores, de menor o mayor potencia, la única condición es que no sobrepase la tensión de alimentación del bus de DC producto del rectificador trifásico. Por consiguiente, este elemento sería común para cualquier modificación futura del equipo de potencia. A continuación, en la tabla 6, se presentan los parámetros de diseño del manejador puente inversor.

Tabla 6. Valores de diseño para selección del manejador de puente inversor basado en IGBT's comerciales

Parámetro	min	tip	max	unidad
Tensión Nominal de Alimentación VDC, VDD	10	15		Vdc
Corriente sin carga IDC + IDD		35		mA
Corriente máxima con carga IDC + IDD			170	mA
Potencia de salida DC/DC (para los dos canales)			2	W
Eficiencia DC/DC de conversión		85		%
Tiempo de retardo de entrada a salida (prendido)		300		ns
Tiempo de retardo de entrada a salida (apagado)		350		ns
Sobre-pico de corriente (corriente de compuerta) IG	-6		+6	A
Tiempo respuesta (flanco ascendente)		100		ns
Tiempo respuesta (flanco descendente)		80		ns
Aislamiento de tensión (Vac/50Hz/1min)			4000	Vac
Tensión de alimentación del bus de DC		>1200		Vpeak
Inmunidad ante sobre-picos de tensión (dv/dt)	100			kV/μs

Fuente: El autor

Figura 22. Ejemplo de manejador de medio puente y su correspondiente diagrama de bloques



Fuente: Fabricante [46]

3.2.5. Bobina de acople

La Bobina de acople, es un elemento fundamental en el diseño del SICP, de ella depende directamente el control de corriente del sistema [33], como se puede observar en el siguiente capítulo. Por tanto, debido a que la salida del puente inversor es una onda de señal cuadrada en tensión, y lo que se busca es una señal de corriente de una forma determinada. Es necesario hacer pasar esta señal de tensión por un elemento que convierta esta señal cuadrada en una señal de corriente suavizada. En efecto, el único elemento que puede realizar dicha tarea es el inductor; ya que su relación tensión-corriente esta gobernada por la ecuación (3.3) y por su naturaleza, la bobina no soporta cambios abruptos de corriente, que genera transitorios de corriente, los cuales a su vez, son aprovechados para controlar el sistema por corriente.

$$v_L(t) = L \frac{di(t)}{dt} \quad (3.3)$$

De acuerdo a técnicas de control de corriente por histéresis, el valor de la bobina es calculado de acuerdo a la ecuación (3.4) [39],

$$L = \frac{V_{dc}}{48 * h * F_s} \quad (3.4)$$

Donde:

- L , es el valor de las inductancias de acople (Henrys)
- F_s , es la frecuencia máxima de conmutación del puente inversor (Hz)
- h , el valor en corriente de la banda de histéresis (amperes)
- V_{dc} , es la tensión de referencia en la barra de continua (volts)

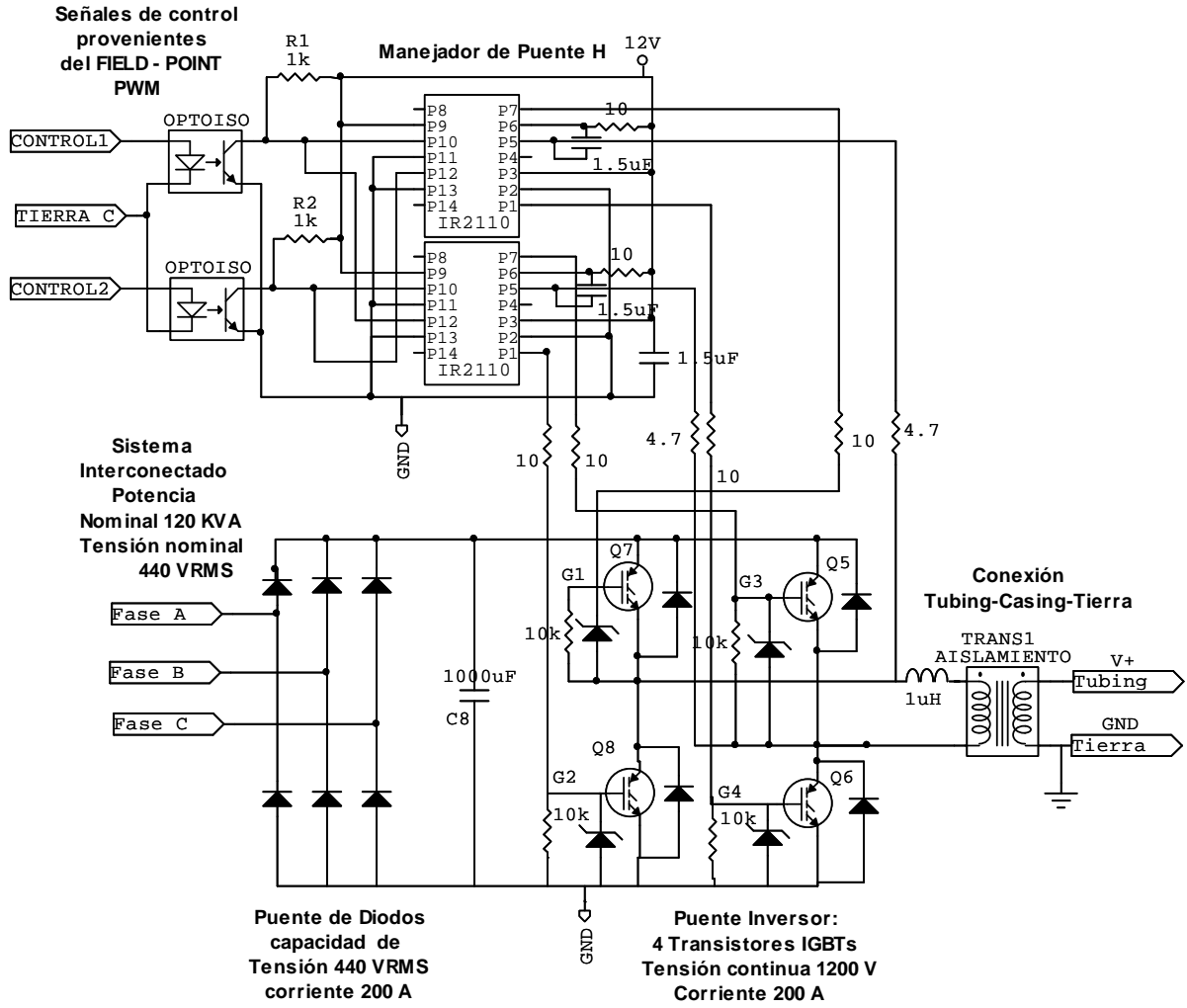
Para nuestro caso el valor resultante de la bobina sería igual a 5 [mH], en la cual la tensión máxima será $V_{dc}=1200$ V, el valor de banda de histéresis $h=0,5$ y la frecuencia máxima de conmutación $F_s= 10$ [kHz]. Asimismo, la bobina tendría que soportar una corriente ligeramente superior a los 100 amperios.

3.2.6. Transformador de aislamiento

El transformador de aislamiento está ubicado entre la salida del SICP y la carga (tubería de producción). Cumple con dos funciones básicas: la primera, proporcionar aislamiento eléctrico entre el SICP y la carga; la segunda, es la de manejar la potencia de manera adecuada entre el puente H y la carga. En efecto, la carga demanda grandes cantidades de corrientes a bajas tensiones, mientras que la mayoría de los IGBTs manejan tensiones medias con corrientes moderadas. Por lo tanto, el valor de transformación puede ser llegar a ser desde 1:1 hasta 100:1. La selección del valor de conversión será variable para cada pozo y dependerá de la impedancia neta de la carga. Por lo tanto se recomienda el uso de transformadores con múltiples salidas de transformación o TAPs, las cuales serán seleccionadas por el operador del equipo o por un sistema de control auxiliar. Sin embargo, el valor de Potencia Nominal permanecerá constante. Por ejemplo, para este caso de diseño, la potencia nominal será igual a 120 KVA. A su vez, el transformador deberá tener un sistema de protecciones eléctricas contra sobrecorrientes como descargadores de Óxido de Zinc instalados en el lado de alta del transformador y fusibles de conmutación rápida, entre otros.

Finalmente, en la figura 23, se presenta un circuito esquemático general del módulo de potencia del SICP, donde se puede distinguir los diferentes elementos del módulo de potencia: puente rectificador, puente H, manejador de puente, bobina y transformador de aislamiento.

Figura 23. Circuito esquemático para el módulo de potencia del SICP



Fuente: El Autor

CAPITULO IV

SISTEMA DE CONTROL

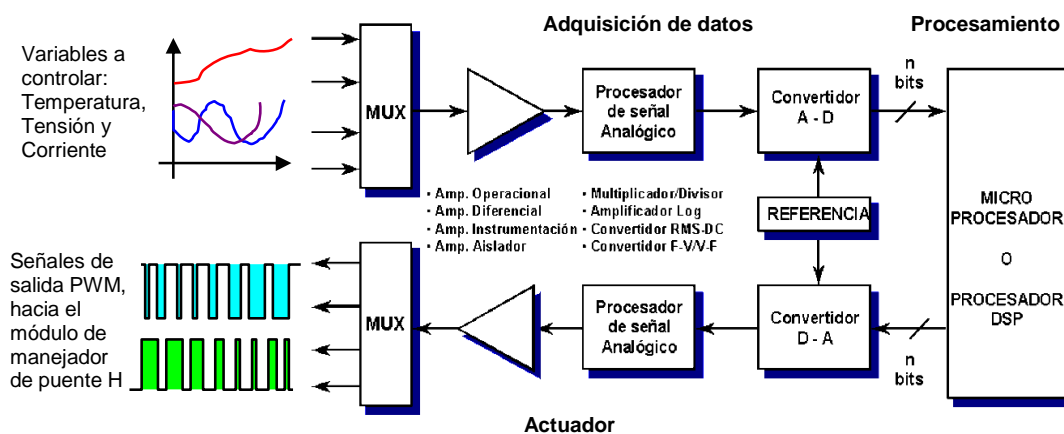
El módulo de Control, es el cerebro del sistema, esta encargado de coordinar la secuencia de señales que activan y desactivan los transistores del puente inversor de acuerdo con el algoritmo de control. El cual se alimenta con las señales de retroalimentación: corriente, tensión y temperatura. En efecto, la consigna de control es obtener una señal de corriente en condiciones seguras para el equipo y el pozo de producción. A fin, de generar un calentamiento relativo en la tubería de producción con la menor cantidad de potencia consumida. Por tanto, para la determinación de este módulo hay que considerar dos factores primordiales relacionados entre si: el factor hardware, comprendido por los elementos físicos que soportan el programa de control (software), para lo cual se requiere de un conjunto de equipos de fácil programación y robustez estructural suficiente para soportar las condiciones de campo. Y el segundo factor, es el software o programa del sistema, en la cual está desarrollado el algoritmo de la ley de control, el algoritmo de adquisición de datos y la interfaz de usuario.

En esencia, el principio de funcionamiento del módulo de control es el siguiente: las señales de control del sistema (temperatura, corriente y tensión, en tubería y fondo de pozo) son retroalimentados al controlador por medio del hardware de adquisición de datos. Estos datos son digitalizados y utilizados para alimentar el algoritmo de control desarrollado sobre el procesador. Seguido, como resultado del procesamiento de datos con el algoritmo de control, se obtiene una respuesta o acción de control “ u ”, la cual es conformada por dos trenes de pulsos o señales de PWM¹⁰. Estas señales son suministradas al “actuador” que en este caso es el mismo manejador de puente inversor, el cual hace disparar los “IGBT’s” en forma correcta y controlada, como se puede apreciar en el diagrama de bloques esquemático del sistema de control en la figura 24. Como resultado del proceso de control, se obtiene del

¹⁰ PWM, Pulse Wide Modulation o Modulación por Ancho de Pulsos

puente inversor una señal de corriente¹¹ con frecuencia y forma variable, a partir de la señal de DC de alimentación de los transistores. Además, el sistema de control esta en capacidad de controlar otros parámetros, como las corrientes de cortocircuito o caídas de tensión, sistemas de alarmas y trasmisión de datos a lugares remotos de monitoreo y control, como los sistema SCADA¹², mediante una interfaz de usuario diseñado a partir de requerimientos anteriormente mencionados.

Figura 24. Diagrama de bloques esquemático del sistema de control



Fuente: El autor

En resumen, en este capítulo se encuentra contenida la información necesaria para diseñar un sistema de control de puente inversor de un sistema de calentamiento electromagnético. En efecto, en la sección 4.1 se presenta la selección del equipo para realizar la tarea de control y sus características. Asimismo, en la sección 4.2, se presenta el sistema de adquisición de datos, con el cual se realiza la retroalimentación de las señales de control. Seguido, en la sección 4.3, se define la ley de control, a partir de la selección de una técnica de control utilizada para manejar puentes inversores, teniendo en cuenta para su selección el desempeño y la sencillez de programación. Finalmente, en la sección 4.4, se presenta la programación de la ley de control y la interfaz de usuario para el control del módulo de potencia del SICP.

¹¹ La señal de corriente es generada en la bobina de acople por el estado transitorio impuesto

¹² SCADA, sigla en inglés de “Supervisory Control And Data Adquisition” o en español: Adquisición de Datos y Control de Supervisión

4.1. Hardware de control

Para determinar el equipo encargado de ejecutar el algoritmo de control y los procesos de adquisición de datos, se procedió a elegir entre un amplio número de posibilidades, entre las cuales tenemos los siguientes dispositivos lógicos programables: súper-microcontroladores, DSPs, FPGAs, PLCs y *Field Points* (Computadores de campo). Todos con posibilidades de satisfacer el propósito de adquirir y procesar datos de acuerdo a un algoritmo de control. Por tanto, para la selección de este dispositivo se evaluaron las siguientes características para cada uno:

- Capacidad de cómputo
- Facilidad para programar
- Robustez física o mecánica para soportar las condiciones que impone el medio
- Posibles expansiones futuras, como integrar el control de múltiples pozos en un solo sistema y la interconexión del control a través de un sistema SCADA.

Como consecuencia, se optó por proponer el *Field Point*, de la empresa *National Instruments*, como dispositivo de control. Ya que presenta, las mejores características, entre estos dispositivos. Sin embargo, su principal desventaja es su elevado costo. El *Field Point* consisten en una serie de módulos intercambiables, entre los cuales están: el controlador, elemento lógico programable, ver figura 25; módulos de entrada/salida (E/S) digitales y analógicos; interfaces Ethernet y seriales. Todo diseñado especialmente para ambientes industriales u hostiles, resistentes mecánicamente y con un alto grado de inmunidad al ruido.

Figura 25. Compact *Field Point* 2020



Fuente: Fabricante [51]

Entre las múltiples ventajas de estos dispositivos, están: el proceso de programación se realiza a través de una interfaz de software basada en la plataforma de Labview. Situación, que facilita la programación y su configuración. Además, es rápido y proporciona la capacidad de cómputo suficiente para desempeñar control complejo, análisis de datos, acondicionamiento de señales, y comunicaciones a través de una red Ethernet. A continuación, se presenta en la tabla 7, un resumen donde se puede observar las características técnicas del *Field Point*.

Tabla 7. Características técnicas del *Field Point*

Memoria DRAM:	32Mb (Se puede expandir)
Almacenamiento Interno:	64Mb
Puertos RS 232:	3
Puertos RS 485:	1
Arquitectura:	Módular
Interfaz de red:	10 Base T y 100 Base TX Ethernet
Compatibilidad:	IEEE 802.3
Rata de comunicación:	10 Mb/s, 100 Mb/s
Máxima distancia de cableado:	100 m/segmento
Máxima potencia de módulos I/O conectados:	9 W
Máximo aislamiento de tensión puerto RS 485:	100Vrms
Máxima sobretensión transitoria puerto RS 485:	740Vrms
Consumo de potencia:	6.1 W + 1.1 (Por cada modulo I/O)
Peso:	326g
Temperatura de operación:	-25 a 60 °C

Fuente: fabricante [51]

4.2. Sistema de adquisición de datos

Los sistemas de adquisición son una pieza fundamental en los procesos de control, de ellos depende la retroalimentación de señales en fondo y superficie de pozo. Estos sistemas están conformados por dos elementos básicos: la instrumentación o dispositivos transductores de señal (sensores) y los sistemas de acondicionamiento de señal. En cuanto a los elementos que conforman la instrumentación, es imprescindible que estos sean confiables y durables.

En efecto, desde el punto de vista de la confiabilidad, los sensores que deben ser instalados en el pozo deben funcionar durante un tiempo considerable en condiciones muy adversas. Además, una vez instalados la tarea de repararlos, substituirlos o recobrarlos es muy dispendiosa, incluso es probable que algunas de sus partes no regresen nunca a la superficie para ser sometidas a un análisis de laboratorio y tratar de averiguar el origen de

la falla. Por tanto, deben ser casi permanentes durante buena parte de la vida útil del pozo, ya que su instalación o desinstalación es bastante onerosa y engorrosa. Frente a estos desafíos, por lo general, se incluyen componentes redundantes con la esperanza de que si una parte falla, su duplicado pueda funcionar. En efecto, los diseños redundantes tienden a incrementar el grado de confiabilidad en forma considerable. No obstante, los sensores de fondo ocupan un espacio valioso que de por sí, resulta limitado y además consumen energía.

Por tanto, realizar mediciones confiables en fondo de pozo es una tarea ardua y requiere de una planificación previa para la correcta operación del sistema de monitoreo. También, es importante anotar que las condiciones y características de los pozos varían entre sí; es decir la profundidad, la temperatura de fondo y la presión son características propias de cada campo. Dichas características son relevantes, pues de ellas depende la adecuada selección de los dispositivos y sensores a utilizar. Asimismo, los sistemas de adquisición deben ser estables, es decir deben entregar mediciones reales bajo cualquier circunstancia de pozo. Por ejemplo, las mediciones obtenidas con sensores inestables o con deriva excesiva pueden causar más problemas a un sistema de control que la falla completa del dispositivo. Es importante saber si la variación gradual de una medida en el transcurso del tiempo indica un cambio real en el yacimiento o simplemente refleja un efecto de la deriva en el sensor de medición.

Por otra parte, también existe una característica trascendente que no es intrínseca en los pozos de producción y es el caso de la interferencia electromagnética. Debido a que el principio de funcionamiento de la generación de calor es la circulación de corriente a través de la tubería de producción. Este flujo de corriente originará un campo electromagnético fuerte que generará ruido e interferencias en las líneas de transmisión de las señales que se están midiendo en fondo de pozo. Por tanto, la instrumentación electrónica debe estar diseñada para soportar estas condiciones. En efecto, la mejor forma de sensar y transmitir señales a largas distancias bajo esta condición se hace a través de sistemas ópticos, como se determina en las siguientes secciones. Sin embargo, los equipos en superficie no requieren tales consideraciones, ya que no están expuestos a las condiciones extremas del interior del pozo.

A continuación, en la sección 4.2.1, se presenta una descripción de los sensores propuestos para realizar la tarea de transducir las variables a controlar de señal física a señal eléctrica. Seguido, en la sección 4.2.2, se presentan los equipos de acondicionamiento de señal, necesarios para adecuar las señales en los valores de tensión o corriente necesarios para realizar la conversión de datos de analógico a digital.

4.3.1. Sistema de Instrumentación (Sensores)

Estos dispositivos son los encargados de transformar las señales físicas de interés para el sistema (corriente, tensión y temperatura) en señales eléctricas manipulables por el sistema de acondicionamiento de señal y posteriormente procesadas por el *Field Point* en la ley de control. A continuación se determinará las características de cada uno de los sensores propuestos de acuerdo a su tipo.

- **Sensor de Tensión-Corriente**

Debido a que el control de la generación de la señal de corriente se hace por retroalimentación de la corriente que es inyectada al tubing, se procedió a seleccionar un dispositivo que cumpliera con las especificaciones del sistema. No obstante, la corriente no es la única señal eléctrica de interés, la tensión de salida es requerida para determinar la relación de impedancia de la carga ($Z=V/I$) y el factor de potencia en las diferentes configuraciones que se puedan conjugar: tubería de producción, tubería + cara del pozo, entre otras. A su vez, estos transductores deben estar ubicados a la salida de la bobina de acople y antes del transformador aislamiento. Además, es recomendable ubicar un segundo grupo de sensores después del transformador para sensar la tensión y la corriente que se le está suministrando efectivamente al pozo.

En el mercado existen muchas opciones y están diferenciadas por su naturaleza o principio físico de medición. En cuanto al principio de funcionamiento, los más comunes son: magnéticos (bobinas, transformadores), efecto Hall, puente diferencial, ópticos, entre otros. Sin embargo, la mejor opción requerida para este caso es la de sensores de efecto Hall, debido a que estos sensores no entran en contacto directo con la señal a medir y trabajan en un amplio rango de frecuencias. Además, no son tan costosos como los sensores ópticos, que serían en varios aspectos los mejores. A continuación, en la tabla 8 se presenta las características que deben cumplir cada elemento y con su respectiva figura.

Tabla 8. Características de los sensores de tensión y corriente:

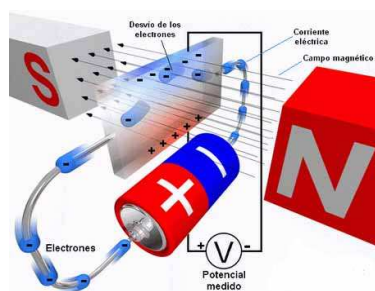
Característica	Sensor Interno de corriente	Sensor externo de corriente	Sensor interno de tensión	Sensor Externo de tensión
Rango de medición	0-120 A	0-400 A	0-1400 V	0-400 V
Linealidad	+/-0.5% FS	+/-0.5% FS	+/-0.5% FS	+/-0.5% FS
Unidad de conversión ¹³	24 A/V	80 A/V	280V/V	80 V/V
Sensibilidad	0.47V/A	1.56V/A	5.5V/V	1.56 V/V
Alimentación	12 V	12V	12V	12V
Rango de Frecuencias	1-2000 HZ	1-2000 HZ	1-2000 HZ	1-2000 HZ
Rango de Temperatura	0°-100° C	0°-100° C	0°-100° C	0°-100° C
Asilamiento de tensión	2.5kV/50Hz/1min	2.5kV/50Hz/1min	2.5kV/50Hz/1min	2.5kV/50Hz/1min

Fuente: El Autor

Figura 26. Sensor de corriente y tensión



a) Sensor de Corriente



"V+" Input +
 "+" Power supply +
 "0" GND
 "V-" Input -
 "-" Power supply -
 "M" Output

b) Sensor de Tensión

Fuente: Fabricante [52]

¹³ Unidad de conversión, salida en voltios, rango máximo 5 V

- **Sensores de Temperatura ópticos**

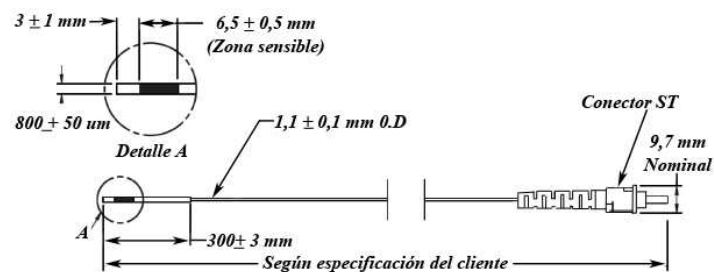
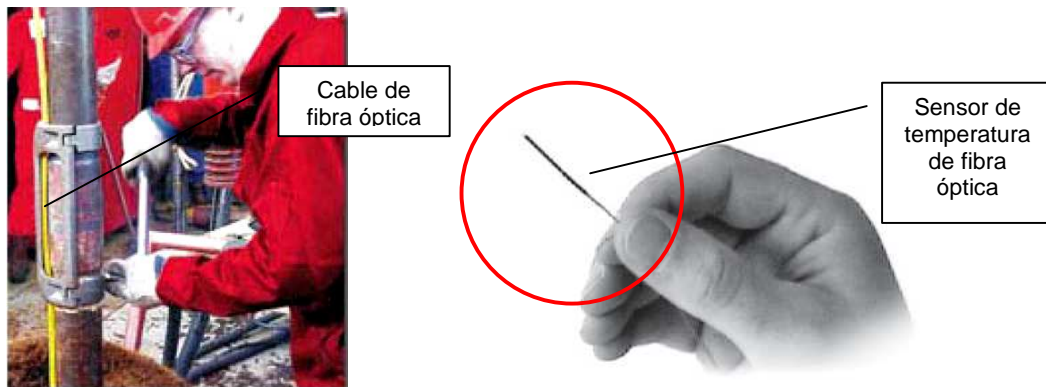
Debido a que el objetivo del sistema es calentar el flujo de crudo en ascenso por el tubing es indispensable sensar el comportamiento térmico de éste. En consecuencia, hay que tener en cuenta dos aspectos fundamentales en esta selección: la primera es que el sistema en el pozo generará gran cantidad de ruido electromagnético debido a la magnitud de la corriente y la clase de material con que esta hecha la tubería. La segunda premisa es la longitud a la cual están ubicados los sensores, ya que generalmente los pozos tienen profundidades del orden de los kilómetros. Lo que requeriría un complejo sistema de repetidores o amplificadores de señal a lo largo del pozo para poder transmitir la señal de los sensores a superficie. Por tal motivo se propone la selección de sensores ópticos. En efecto, este tipo de sensores son inmunes al ruido electromagnético, además presentan ventajas significativas frente a otros sistemas, ya que el medio de alimentación y transmisión de señales también es óptico. Y como se sabe, la fibra es un medio ideal de transmisión por sus propiedades físicas, ya que presenta la menor atenuación y distorsión de señal de todos los medios de transmisión existentes en el mercado. A continuación, se presenta una tabla con los valores requeridos para un sensor basado en este material; además, se presenta en la figura 27 un ejemplo en la cual se aprecia su reducido tamaño, ideal para espacios reducidos como es el caso de los pozos de producción.

Tabla 9. Características de los sensores ópticos

Resolución	0.1°C
Precisión	±1°C
Tiempo de respuesta	≤1.5 s
Tipo de Conector	ST

Fuente: fabricante [53]

Figura 27. Cable y Sensor de temperatura óptico



Fuente: Fabricante [53]

4.3.2. Sistema de Acondicionamiento de señal

Como se mencionó anteriormente, el objetivo del acondicionador de señal es tratar la señal proveniente de los sensores de manera adecuada, de tal forma que se elimine el ruido (filtrado) y se le proporcione la amplitud (amplificación) requerida por el conversor de datos analógico-digital, el cual convertirá la señal en un dato de entrada del algoritmo de control. Por consiguiente, debido a que existen dos formatos de señales diferentes en el sistema, señales eléctricas y ópticas, se requiere el uso de dos equipos que resuelvan esta situación.

Para el primer caso se recomienda utilizar uno de los módulos que integra el sistema *field point*, como el mostrado en la figura 28. A este módulo de entrada análogo se pueden conectar directamente los sensores, con una alta exactitud en las medidas, ya que por medio del software es posible: calibrar, escalar, linealizar y adecuar las señales de los sensores. A continuación, en la tabla 10, se presentan algunas de las características de este dispositivo.

Figura 28. Módulo completo Field ponit con módulo adquisición de señales eléctricas.



Fuente: Fabricante [51]

Tabla 10. Características del módulo analógico-digital

Numero de canales:	8
Resolución:	16 bits
Filtro (Configurable por cada canal)	50, 60 ó 500Hz
Impedancia (entradas de tensión):	100 MΩ
Impedancia (entradas de corriente):	100 Ω
Protección a sobre tensión (Solo entradas tensión):	40 V
Protección a sobre corriente (Solo entradas de corriente):	30 mA

Fuente: fabricante [51]

Para el segundo caso, se recomienda utilizar el sistema de adquisición de señales ópticas del fabricante de las sondas de temperatura. En este caso se propone el “TMI Acondicionador de la Señal de Temperatura”. Este instrumento es un acondicionador de señales de fibra óptica diseñado especialmente para trabajar con sensores de temperatura ópticos. Además, debido a su estructura es adecuado para trabajar en ambientes industriales donde se requieran hacer medidas de temperatura en diversos puntos. En la figura 29 se muestra este equipo y en la tabla 11 sus características.

Figura 29. Sistema de acondicionamiento de señal para los sensores ópticos



Fuente: Fabricante [53]

Tabla 11. Características del módulo analógico-digital

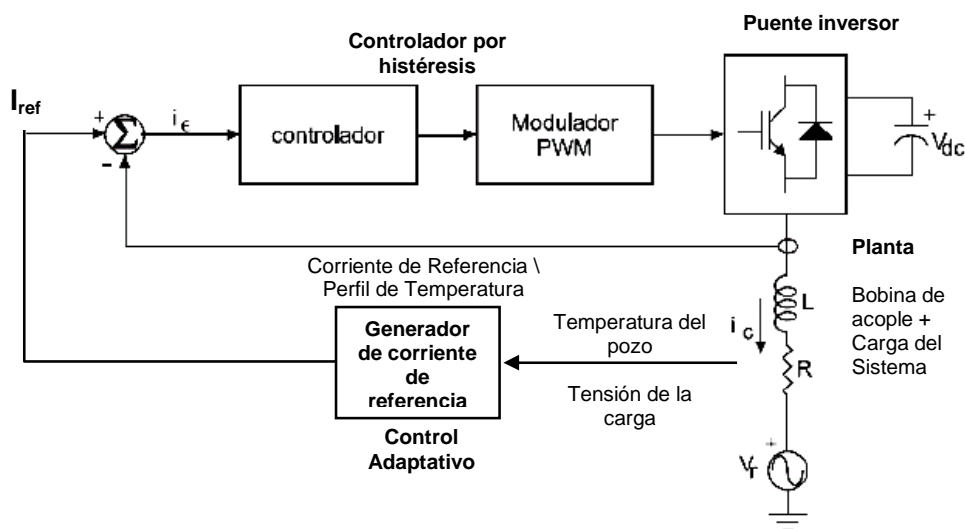
Canales	4
Frecuencia de Muestreo	20 Hz
Promedio de Muestras	1 a 500 muestras
Precisión	0.025% a fondo de escala
Resolución	0.01% a fondo de escala
Rango Dinámico	15 000: 1
Salidas Analógicas	±5 V
Comunicación	RS-232; USB
Vida de la lámpara	40 000 horas de uso continuo
Peso	2.2 kg (4.9 lb)
Requerimientos de Potencia	10 a 20 Volts (5 Watts)
Temperatura de operación	-20°C a 40°C (-4°F a 104°F)

Fuente: Fabricante [53]

4.3. Técnicas de control para manejar el puente inversor

En la teoría [38 - 42], existen múltiples técnicas para el diseño de la ley de control de sistemas conmutados. Como es el caso de los puentes inversores controlados por corriente. Entre las principales técnicas tenemos: Control Deslizante, Control predictivo, Control por Histéresis y Control Adaptativo, entre otros. Siendo la combinación de las dos últimas, las técnicas seleccionadas para realizar el diseño del controlador. Asimismo, para la consecución de todos los casos o técnicas de control, se requiere el uso de la bobina de acople. La cual genera una salida de corriente a partir de una señal cuadrada en tensión, producto del estado transitorio de la bobina que no permite los cambios abruptos de corriente, con lo cual se puede manejar un control simple, bajo la condición que el tiempo de respuesta del controlador sea lo suficientemente rápido con respecto al tiempo transitorio de la carga.

Figura 30. Diagrama de bloques conceptual del sistema de control



Fuente: El autor

El principio de trabajo de esta etapa es generar la señal de control conformada por un par de trenes de pulsos o señales de PWM. Esta salida es función de la señal de error de corriente (i_e) entre la señal de corriente adquirida (i_c) y la señal de corriente de referencia (I_{ref}), generada por un algoritmo a partir del perfil de temperatura deseado como se puede apreciar

en la figura 30. Por consiguiente, el diseño de la ley de control se debe realizar mediante alguna técnica que genere pulsos a la entrada del puente inversor; por lo cual se requiere el uso de salidas digitales del sistema de control y por ende es justificado el uso de dispositivos lógicos programables para ejecutar la tarea de control, sin contar con las ventajas operativas y de programación que los sistemas digitales ofrecen. Para este sistema se propone realizar un control digital mediante un algoritmo implementado en un dispositivo lógico-programable con una plataforma programada para tal fin.

A continuación, se hará una descripción generalizada de estas técnicas mencionadas, en la cual se exponen los principios de funcionamiento y las características relevantes de cada una de ellas como se puede apreciar en la tabla 12:

Tabla 12. Tabla de comparación de las diferentes técnicas de control en cuanto a funcionalidad

Técnica de Control	Requerimiento de procesador	Tiempo de respuesta	Implementación	Robustez ante perturbaciones
Control Deslizante	Alto	Corto	Compleja	Alta
Control Predictivo	Alto	Lento	Compleja	Buena
Control por Histéresis	Bajo	Corto	Sencilla	Buena
Control Adaptativo	Muy Alto	Lento	Compleja	Alta

Fuente: El Autor

4.4. Programación e Interfaz de usuario

En esta sección, se presenta la selección y el planteamiento de la ley de control en forma de algoritmo y se presenta la programación elaborada en Labview, tanto de la ley de control como de la interfaz de usuario. Igualmente, otra parte fundamental en el proceso de control es la generación de la señal de referencia, la cual se determina de acuerdo al proceso adaptativo que presente la carga. En esencia, el sistema buscará la mejor forma de señal para generar la mayor cantidad de pérdidas eléctricas posibles en la tubería, las cuales son disipadas en calor por la misma hacia el crudo en ascenso. Por tal motivo se selecciono un lenguaje de programación que permitiera hacer este proceso simple y sin errores. Además, que permitiera realizar el proceso de control histéresis sin necesidad de requerir hardware

adicional, en otras palabras todo el proceso de control será elaborado por el software de control, gracias a la ventaja operativa que representa el control del puente inversor, el cual requiere señales de PWM, en otras palabras señales digitales. En efecto, se selecciono el lenguaje de programación LABVIEW de la empresa “National Instruments” con el cual se puede programar directamente el “Field Point”, ventaja significativa frente a los demás dispositivos de control.

4.4.1. Algoritmo de control

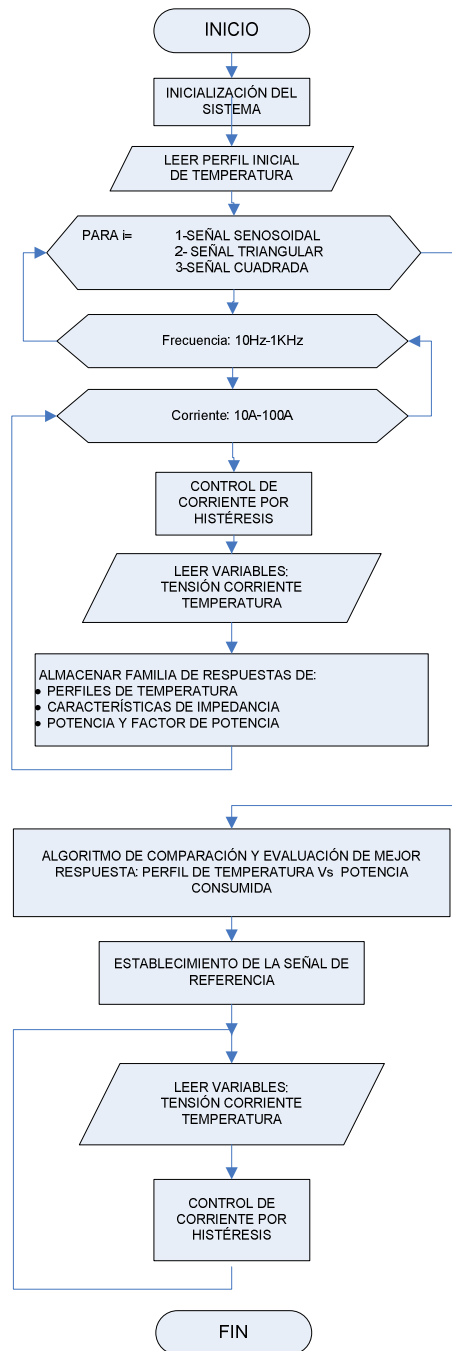
A continuación, se presenta de forma general el algoritmo de control, el cual incluye el establecimiento de la señal de referencia a través de señales de prueba básicas. Las cuales a su vez, estarán determinadas por la capacidad de potencia que puedan disipar en la carga. Sin embargo, para efectos prácticos se propone la utilización de señales cuadradas, ya que estas presentan el mayor número de componentes frecuenciales. Motivo por el cual, se esperaría que estas señales presentaran más pérdidas eléctricas por corrientes inducidas en la tubería.

La consigna de control busca encontrar la señal con la cual se obtenga el mejor perfil de temperatura en función de una señal de costo. La cual se determina por simple comparación y ponderación de los siguientes aspectos:

- Potencia Consumida: 30%
- Temperatura Alcanzada: 40%
- Factor de potencia: 20%
- Pérdidas eléctricas en los elementos de conmutación: 10%

En este proceso de prueba, el sistema ejecuta el proceso de control de corriente de salida por histéresis para cada tipo de forma de onda. Seguido, establece como señal de referencia la forma de onda que mejor ponderación obtuvo y se procede a aumentar los niveles de potencia de salida hasta el nivel de temperatura deseado para la aplicación o hasta los niveles de potencia seguros para el equipo. Este proceso es ilustrado en el siguiente diagrama de flujo mostrado en la figura 31.

Figura 31. Diagrama de flujo del algoritmo de control del SICP.

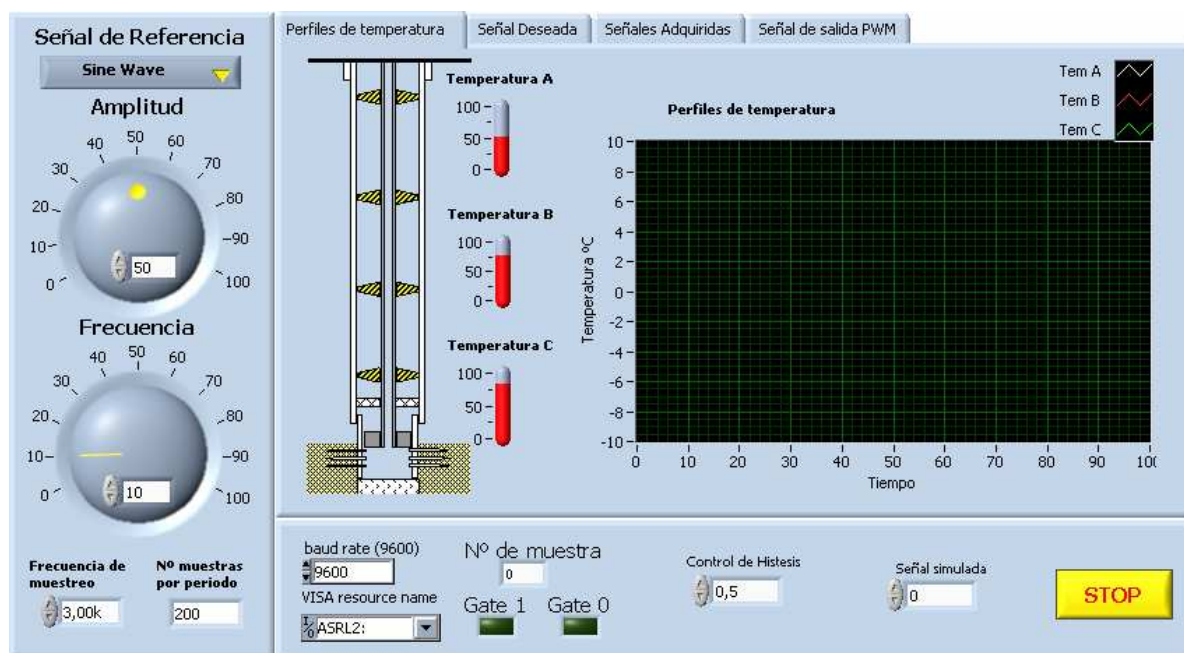


Fuente: El Autor

4.4.2. Interfaz de usuario

Para visualizar las señales de corriente y tensión generadas por el SICP y los perfiles de temperatura adquiridos a lo largo de la tubería de producción. Se procedió a diseñar una interfaz grafica, en la cual el usuario encontrara registro historiales de las señales de control, que servirán para futuros estudios de impedancia de tubería de pozo. En la figura 32, se puede apreciar la interfaz programada para PC, sin embargo, este mismo programa puede ser implementado en el “field point” sin mayores modificaciones.

Figura 32. Interfaz de usuario para el SICP.

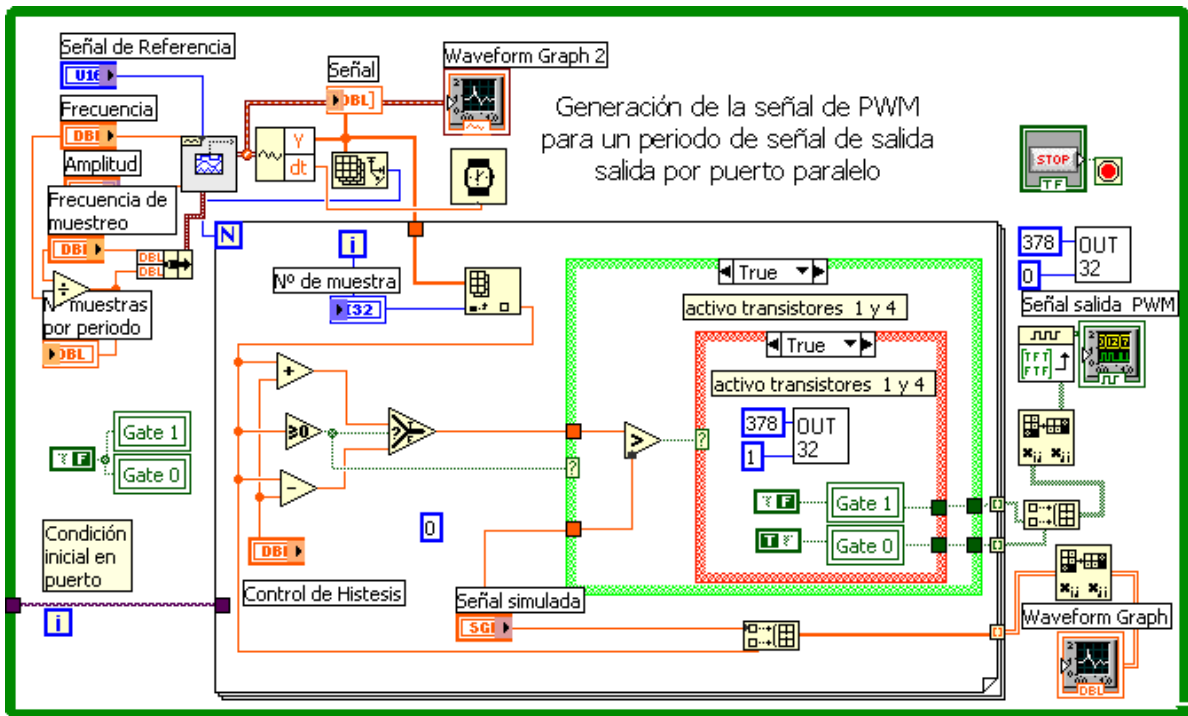


Fuente: El Autor

Para la programación de la interfaz se propuso un modelo simple y eficiente, el cual contuviera la menor cantidad de elementos de programación posibles, a fin de alcanzar un tiempo de respuesta rápido sin sacrificar la frecuencia de muestreo, el cual es el mismo tiempo de reacción del sistema de control. Para el SICP se propone trabajar a 10 KHz debido a que se espera llegar hasta los 1000Hz en generación de la señal de corriente, esto quiere decir que se realizaran acciones de control a 10 veces la máxima frecuencia de las señales de retroalimentación del sistema. Y como se menciono anteriormente no se requiere

hardware externo para generar la señal de PWM, ya que el mismo software las generará en las salidas digitales del procesador, como se puede apreciar en la figura 33.

Figura 33. Programación en Labview de la Interfaz de usuario para el SICP.



Fuente: El Autor

CAPITULO V

PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para un caso de estudio de un pozo de producción del campo escuela Colorado de la UIS. Para empezar, en la sección 5.1, se realizará la simulación del modelo físico-matemático, desarrollado para caracterizar el comportamiento eléctrico de la tubería de producción en términos de potencia disipada. Asimismo, se simulará el comportamiento del modelo de impedancia eléctrica. Seguido, en la sección 5.2, se presenta una simulación del efecto térmico en el cambio de viscosidad del crudo realizado en Matlab para un segmento de tubería en las medianías de la cara del pozo. Por último, en la sección 5.3, se presenta los resultados obtenidos por el prototipo construido para poner a prueba el sistema de control, utilizando como carga del sistema un circuito producto del modelo circuital de un pozo de producción, en la cual se busca llegar a una consigna de temperatura mayor a la temperatura ambiente, probando señales cuadradas con diferente valor de frecuencia.

5.1. Simulación del comportamiento eléctrico de la tubería de un pozo de producción

Como caso de estudio se utilizo un pozo del Campo Escuela Colorado (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.A¹⁴). Además, gracias al convenio de intercambio tecnológico, se facilito el estudio minucioso del pozo, situación conveniente para poner a prueba el sistema, ya que la información en este sentido es catalogada como confidencial y es celosamente guardada al público en general. Por lo tanto, se selecciono el pozo C-70 como pozo modelo para realizar las pruebas de simulación. Este pozo, presenta las siguientes características estructurales resumidas en la

¹⁴ Convenio firmado por las partes en el año 2006, donde se manifestaba que la compañía estatal petrolera hacía entrega a la UIS del Campo Colorado.

Tabla 13 y evidentes en la figura 34. En la cual se puede apreciar su configuración interna y externa. El problema planteado en este pozo consiste básicamente en obstrucción del *tubing* por precipitación de parafinas, más no en crudo pesado como tal. Generalmente, la parafina se solidifica cuando esta alcanza su punto de nube (aproximadamente a los 30° C) y se deposita en la cara interior del tubo obstruyendo el flujo de crudo hacia la superficie. Al calentar el *tubing* por medio de la inyección de corriente 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.

Tabla 13. Características del Pozo C-70 / Campo Escuela Colorado

DESCRIPCIÓN DEL POZO C - 70 CAMPO ESCUELA COLORADO	
TEMPERATURA CABEZA DE POZO	37,77 °C
TEMPERATURA FONDO DE POZO	48,88 °C
PROFUNDIDAD TOTAL (aprox)	1051,56 m - (3450 Pies)
LONGITUD DEL <i>TUBING</i>	1026,87 m - (3369 Pies)
PRESIÓN A 1000 PIES	15,8 PSI
PRESIÓN DE FONDO FLUYENDO	280 PSI
DIAMETRO INTERNO <i>TUBING</i>	6,8 cm - (2,675")
DIAMETRO EXTERNO <i>TUBING</i>	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 <i>tubing</i>)	5,27 cm (2,07")

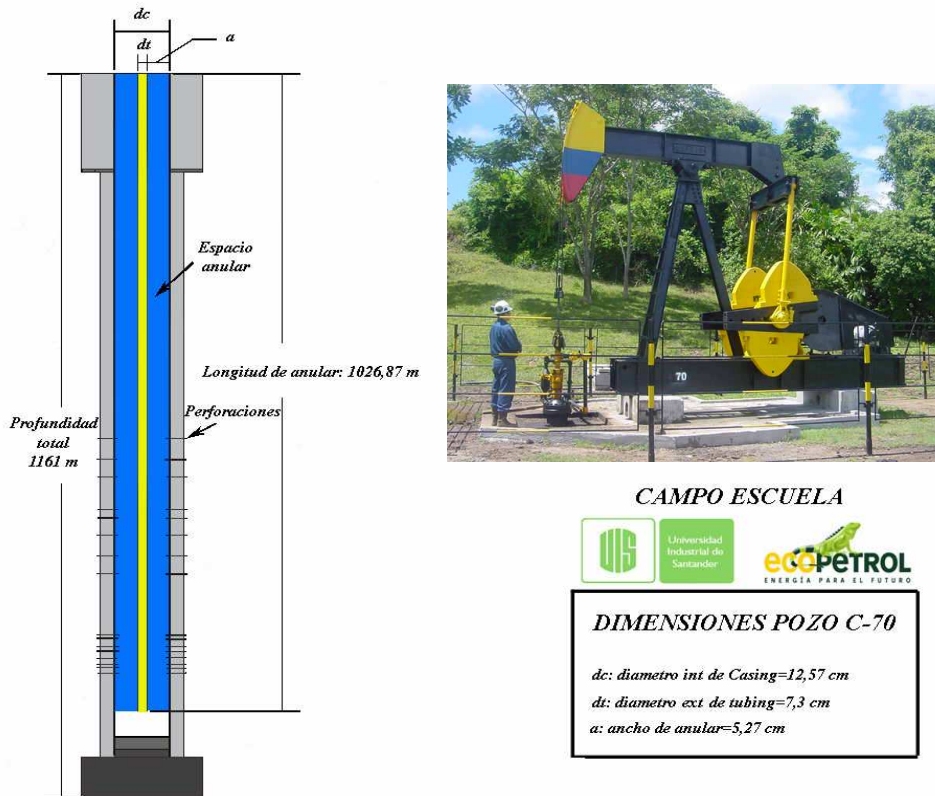
Fuente: Tomado de Well Files Col-70.

Adicionalmente de las dimensiones propias del pozo, se contemplaron otros parámetros, como son las constantes eléctricas propias de los materiales con los cuales son construidas las tuberías de producción y los valores propios del método numérico utilizado, los cuales son:

- permeabilidad relativa del acero: $\mu_r = 269,0$
- conductividad Eléctrica del acero: $\sigma_s = 7,3 \times 10^6$ S/m
- Tamaño del paso de tiempo: $\Delta t = 34,7$ μ sec
- Tamaño de la celda: $\Delta r = 0,2$ mm
- Número de cuadrículas: N° nodos= 31 – 61

- Número de pasos por ciclo de tiempo: $T= 480$

Figura 34. Configuración del pozo C-70



Fuente: El Autor

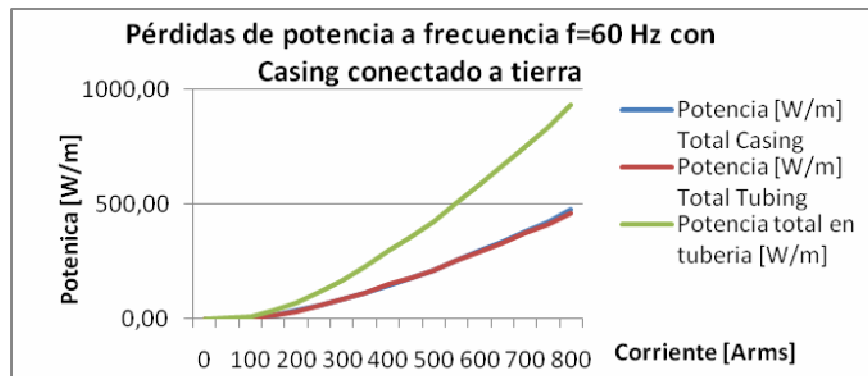
5.1.1. Simulación del modelo físico-matemático de la tubería de producción

Como se menciona anteriormente, el objetivo de elaborar un modelo físico-matemático es realizar procesos de simulación, con los cuales se pueda estimar el comportamiento de la tubería con un número determinado de ondas de corriente, variando entre sus características la forma de onda, frecuencia y amplitudes, a fin de encontrar una entrada que genere la mejor curva de temperatura para así optimizar los procesos de extracción y transporte de crudos pesados y/o parafínicos a superficie, a partir de la configuración y propiedades de los tubos de producción.

Haciendo una primera secuencia de simulaciones, en la cual se ha fijado un valor de frecuencia en 60 hz y variando la corriente de entrada al sistema, se obtuvo la siguiente

grafica de resultados, figura 35. En la cual se puede apreciar claramente que a mayor amplitud de la corriente mayor será el valor de potencia disipada. Como era de esperarse, estas pérdidas eléctricas son debidas principalmente al efecto Joule y a la resistividad del material $P=I^2 \cdot R$.

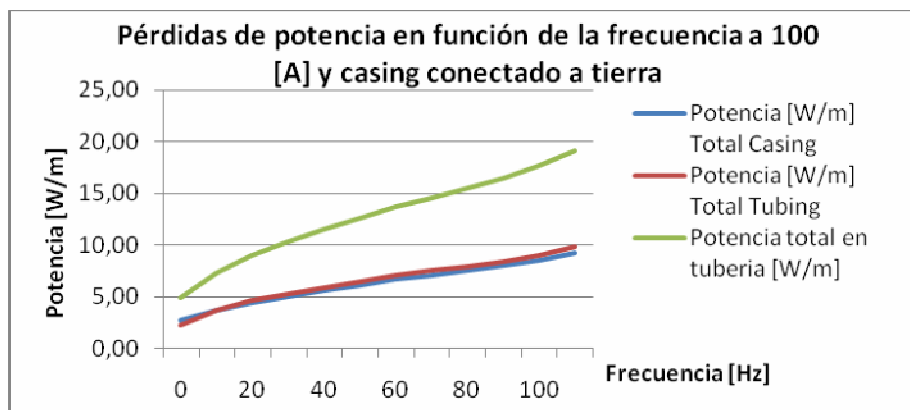
Figura 35. Resultados simulación “Pérdidas eléctricas Vs. Variación de corriente” a frecuencia fija de 60Hz



Fuente: El Autor

En la siguiente grafica, figura 36, se muestra los resultados de la simulación fijando un valor de corriente en 100 Arms y variando la frecuencia desde DC-100 Hz, donde se puede apreciar claramente una fuerte relación de las pérdidas totales del sistema en función de la frecuencia, debido principalmente al aumento considerable de las pérdidas por ciclos de histéresis dentro del material.

Figura 36. Resultados simulación “Pérdidas eléctricas Vs. Variación de frecuencia” a corriente fija de 100[Arms]



Fuente: El Autor

De las anteriores simulaciones se deduce que es más conveniente aumentar la frecuencia de trabajo de la señal de alimentación que el nivel de corriente de entrada a la carga. Ya que se obtienen resultados similares con bajos niveles de energía y frecuencias elevadas. Sin embargo, hay que hacer un análisis más riguroso, ya que a mayor frecuencia mayor sería la impedancia vista por la fuente y menor corriente demandaría, lo que indica un aumento considerable en la tensión de salida. Sin embargo, el aumento de frecuencia exigirá un paso de tiempo más pequeño para el modelo desarrollo, lo implica un mayor número de cálculos.

5.1.2. Simulación del modelo de impedancia eléctrica para la tubería de producción

Para obtener el valor de la impedancia eléctrica de la tubería de producción, esta es considerada una línea de transmisión para frecuencias menores de 100 kHz, cuyas ecuaciones características está dada por (1.18 y 1.19). 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 [18]. Resolviendo las ecuaciones se obtienen los valores de resistencia, capacitancia, inductancia y conductancia por metro de tubería para el pozo C-70. Mostrados en la tabla 14.

Tabla 14. Parámetros de impedancia calculados para el pozo C-70

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

Fuente: El Autor

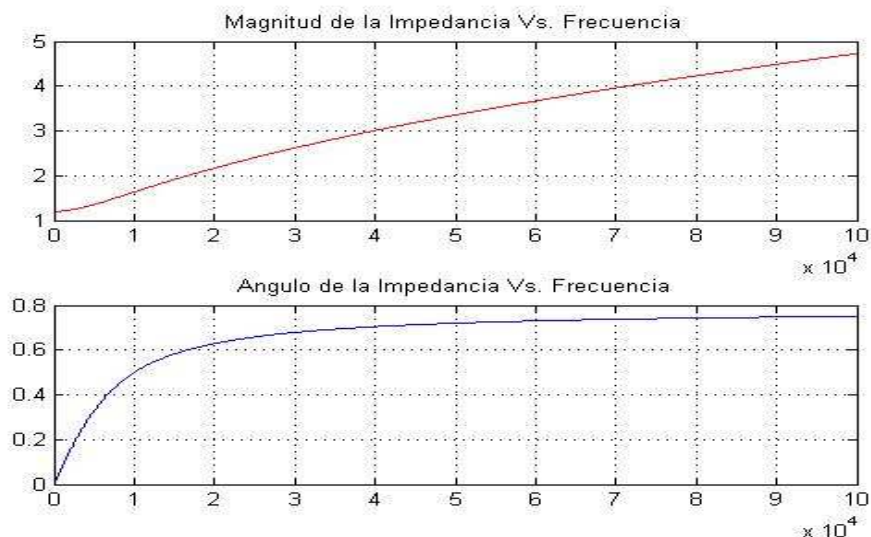
Así mismo, en la tabla 15 se muestran los resultados de los valores de impedancia, factor de potencia, potencia disipada, corriente y tensión, para algunos valores de frecuencia de entrada. En la cual, se aprecia una impedancia baja al igual que el factor de potencia. Además, en la figura 37, se aprecia el comportamiento de la impedancia frente al cambio de frecuencia.

Tabla 15. Respuesta de tensión corriente de la carga como modelo de impedancia

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

Fuente: El Autor

Figura 37. Curva de impedancia de la tubería de producción para el pozo C-70.



Fuente: El Autor

Como se puede apreciar en la figura 37, la impedancia crece monótonamente en función de la frecuencia lo que implica que a bajas frecuencias (DC-100KHz) no existe un pico de resonancia como tal, valor ideal de trabajo en el cual se debería llevar la carga para una máxima transferencia de potencia. Por tanto, solo se podrá llegar hasta la frecuencia máxima permitida por el sistema de control, que en este caso esta en el orden de 1KHz.

5.2. Simulación térmica

El proceso de simulación térmica es fundamental para estimar los niveles de potencia requeridos para producir un aumento de temperatura considerable y útil en un proceso de extracción de crudos pesados y/o parafínicos. En un pozo de producción la temperatura está en función de la profundidad como se muestra en la ecuación (5.1). Asimismo, El gradiente de temperatura generalmente se expresa en 1°C por ciento del intervalo constante de profundidad, ver ecuación (5.2). Mientras más profundo esté el yacimiento, mayor la temperatura.

$$T_{\text{yacimiento}} = \Delta T \times P + T_{\text{Ambiente}} \quad (5.1)$$

Donde:

ΔT = Gradiente de temperatura.

P= Profundidad del yacimiento.

$$\Delta T = \frac{1^\circ \text{C}}{Icp}$$

En la cual el valor ΔT de esta dado por: (5.2)

Donde Icp = Intervalo constante de profundidad.

El conocimiento del gradiente de temperatura es importante para el diseño conceptual del SICP, 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, ecuación (5.3), con la ayuda de dos sensores, uno ubicado en la parte superior del tubing y otro en la parte inferior del mismo (para el pozo C-70 a 0m-1026 m respectivamente)

$$\Delta T_{\text{exp}} = \frac{T_{\text{sup}}}{T_{\text{inf}} \times P_{\text{inf}}} \quad (5.3)$$

Donde:

ΔT_{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.

De igual forma, la ecuación que relaciona la transferencia de calor generado por el tubing hacia un crudo pesado o con precipitación de parafina está dada por la ecuación (5.4):

$$\Delta T = \frac{P}{mc} \quad (5.4)$$

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 (5.4), 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 5.5:

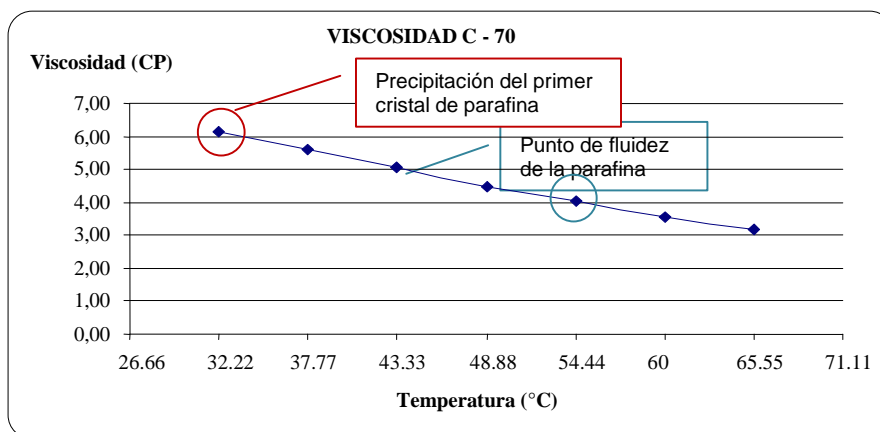
$$P = m * c * \Delta T \quad (5.5)$$

Partiendo de las características del crudo del pozo C-70, en el cual la parafina precipita alrededor de los 30,1 °C y termina de derretirse a los 54,44 °C [45], ver figura 45. Y considerando que la temperatura del pozo puede descender hasta 20 °C, se define que el máximo valor ΔT que debe alcanzar el SICP es:

$$\begin{aligned} \Delta T &= 54,44 \text{ °C} - 20 \text{ °C} = 327,59 \text{ °K} - 293,15 \text{ °K} \\ \Delta T &= 34,44 \text{ °K} \end{aligned} \quad (5.6)$$

Para encontrar el valor de m y c se utiliza 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, se obtiene que el valor de m para el tubing en el pozo C-70 es $m=12,8$ Kg/m. De la referencia [18] se consigue que el valor del calor específico del acero al carbón es $c=1.2796*10^{-2}$ W/kg*K.

Figura 38. Comportamiento de la viscosidad del crudo Vs Temperatura para el pozo C-70



TEMPERATURA °C	VISCOSIDAD °CP
32.22	6,14
37.77	5,62
43.33	5,07
48.88	4,47
54.44	4,05
60	3,55
65.55	3,18

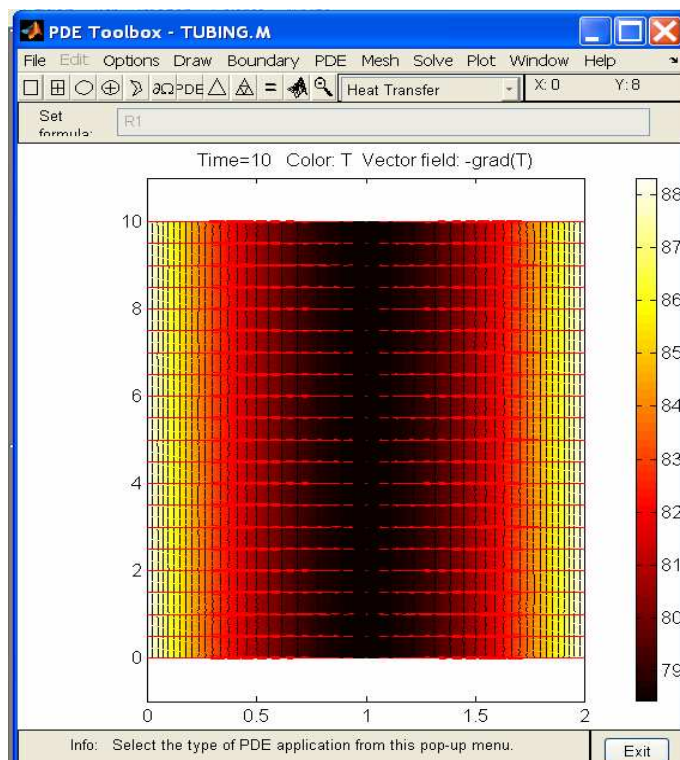
Fuente: [45]

El efecto en la variación de la viscosidad del crudo se evidencia en la figura 38, en la cual se presenta el comportamiento de la viscosidad del crudo en el pozo C-70 respecto a la temperatura¹⁵. Con esta información se procedió a alimentar un modelo elaborado con la PDEtool de Matlab, el cual nos proporciona la siguiente grafica resultado, ver figura 39, a partir de los siguientes datos de entrada:

- Valor de la temperatura de fondo de pozo del fluido en [°C]: 78
- Valor de la conductividad térmica del fluido [W/m^{°K}]: 0.17
- Valor del Calor específico del fluido [J/Kg^{°K}]: 0.5
- Valor de la velocidad promedio del fluido [m³/s]: 0.5
- Valor de la densidad del fluido [Kg/m³]: 0.9
- Valor de resistividad eléctrica por metro del *tubing* [Ω]: 1.048E-03
- Valor de la corriente inyectada en el *tubing* [A]: 30
- Valor del radio interno del *tubing* Ri [m]: 0.02

¹⁵ Curva calculada por el autor de acuerdo con la norma ASTM D 88-94.

Figura 39. Grafica de salida para un crudo en ascenso por el tubing



Fuente: El Autor

Del modelo térmico se puede apreciar, como era de esperarse (ver sección 1.2), que las paredes del tubing alcanzan la temperatura máxima dado por la temperatura inicial del fondo del pozo (78°C) más el ΔT (aproximadamente 10°C) generado por la potencia disipada ante el flujo de corriente (30 A). A diferencia de la cara interna del *tubing*, el crudo en el interior de la tubería no aumenta su temperatura, debido a que el flujo es laminar y fluye con mayor velocidad en el centro de la tubería. En contraste, el crudo en el extremo de la cara del *tubing* cuya velocidad es equivalente a cero. Este efecto es conveniente para el proceso de acumulación de parafinas, ya que no se requiere calentar todo el flujo, si no la cara interna del tubo para evitar la acumulación de parafinas en su interior.

5.3. Prueba del prototipo de laboratorio

Para poner la metodología de diseño del SICP, se procedió a diseñar y construir un prototipo que tuviera las mismas características funcionales del SICP para pruebas de laboratorio, solo que a un nivel escalado de potencia y con un sistema de control basado en computador personal y microcontrolador, ver figura 40. Para ver detalles de diseño y construcción del prototipo remítase al Anexo B. En este anexo se presenta los elementos que hacen parte del prototipo los cuales son equivalentes a los del SICP pero de menor capacidad de potencia. Además, la entrada de alimentación esta diseñada para fuente monofásica.

Figura 40. Prototipo de laboratorio



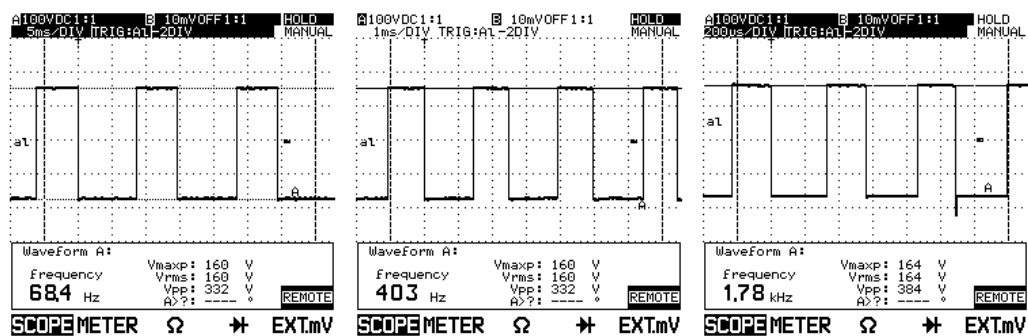
Fuente: El Autor

5.3.1. Pruebas de señal de salida de la fuente de potencia

Las primeras pruebas realizadas fueron las de conmutación del puente inversor. Inicialmente, se generaron señales cuadradas a varias frecuencias para observar el desempeño de cada una de las columnas del inversor. En la figura 41, se aprecia las señales cuadradas

generadas en circuito abierto con tres diferentes frecuencias, donde la amplitud de tensión bipolar se encuentra alrededor de 160V. Asimismo, en la figura 42, se presentan una grafica generada con una carga comprendía por una resistiva más una inductiva en serie (resistencia de potencia de 8 Ω a 2500 W y bobina de 1 mH), en las cuales se percibe el efecto transitorio de la carga para estabilizarse al nivel forzado de señal.

Figura 41. Pruebas de salida del puente inversor a diferentes niveles de frecuencia sin carga



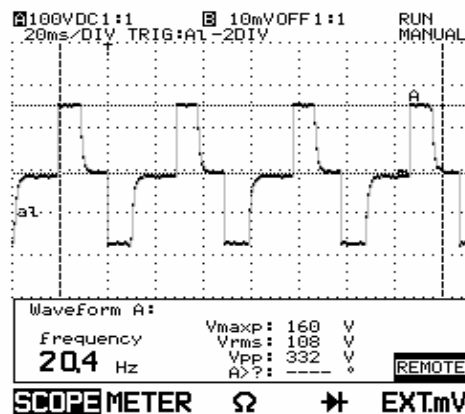
a) Frecuencia 68.4 Hz

b) Frecuencia 403 Hz

c) Frecuencia 1.78 KHz

Fuente: El Autor

Figura 42. Pruebas de salida del puente inversor a diferentes niveles de frecuencia con carga



Fuente: El Autor

5.3.2. Pruebas del sistema de control

A fin de validar la respuesta térmica de un modelo circuital de tubería de producción se procedió a realizar un sistema simple de control retroalimentado, en el cual se pone a prueba señales cuadradas variando la frecuencia de entrada para verificar su efectividad en el proceso de calentamiento. La ley de control se desarrollo teniendo en cuenta que la acción de control no varia la tensión de entrada a la planta (Cargar) si no el ciclo útil de la señal cuadrada dado por un valor de porcentaje desde (0% - 100%). La acción de control es determinada por la siguiente expresión:

$$U=100\%*(T_R- T_s)/(T_R -T_o) \quad (5.7)$$

Donde:

U= Acción de control

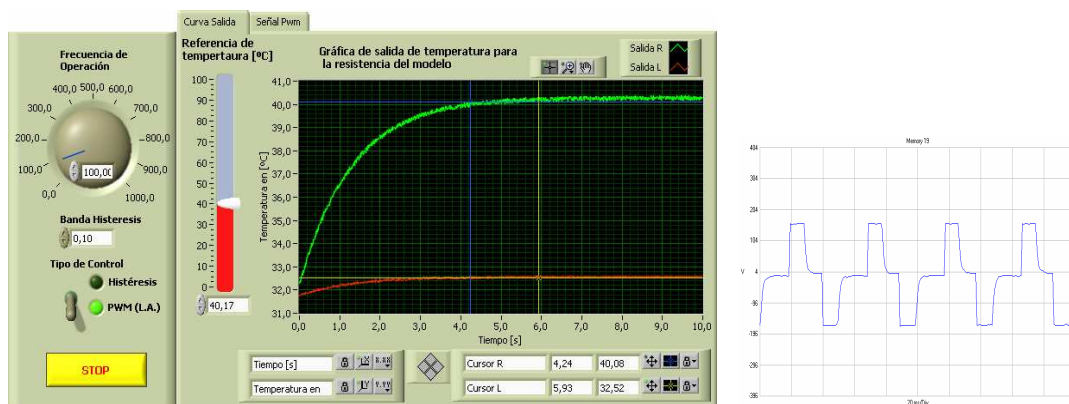
T_R = Temperatura de referencia [°C]

T_s = Temperatura de salida retroalimentada [°C]

T_o = Temperatura inicial del proceso [°C]

En esta expresión la acción de control máxima se toma cuando la temperatura de la señal retroalimentada es igual a la temperatura inicial y a medida que se inyecta corriente a la carga, el ΔT se reduce hasta alcanzar el valor de referencia deseado. Como se puede apreciar en las figuras 43, figura 44 y figura 45.

Figura 43. Prueba de establecimiento de temperatura de referencia a frecuencia de 100Hz

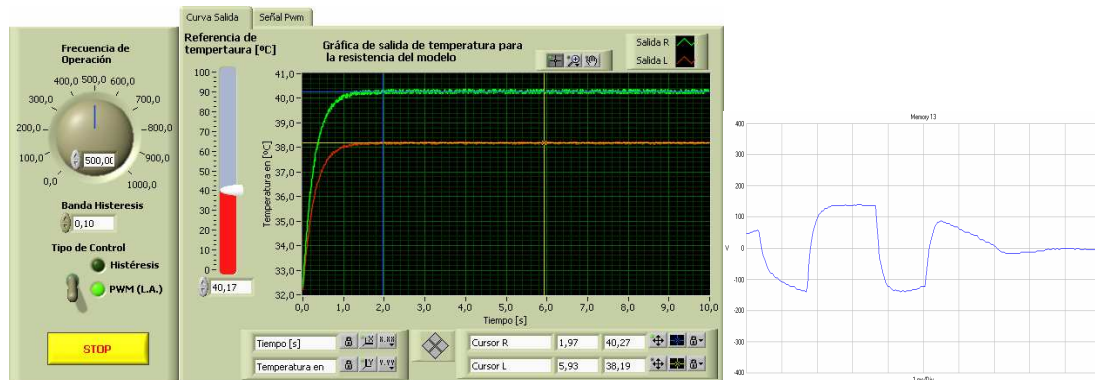


Fuente: El Autor

Para la figura 44, se presenta un caso de referencia de temperatura de 40°C y temperatura inicial en 31 °C aproximadamente, para una frecuencia de trabajo de 100Hz. La consigna de control es determinada exclusivamente para el calor disipado por la resistencia (curva de color verde). Sin embargo, la temperatura en la bobina es monitoreada (curva de color rojo) para ver su respuesta térmica ante el paso de corriente. Como se puede observar el tiempo de establecimiento esta alrededor de los 4 segundos y la temperatura de la bobina no aumento significativamente a bajas frecuencias. Conjuntamente, se muestra parte de la señal de control que excita la carga.

De igual forma, para la figura 45, la acción de control se tomo para una señal se aprecia una reducción significativa en el tiempo de establecimiento y un aumento en la temperatura de la bobina. Además, se observa el ciclo final en que la acción de control (U) alcanza la consigna y su ciclo útil se hace igual a cero.

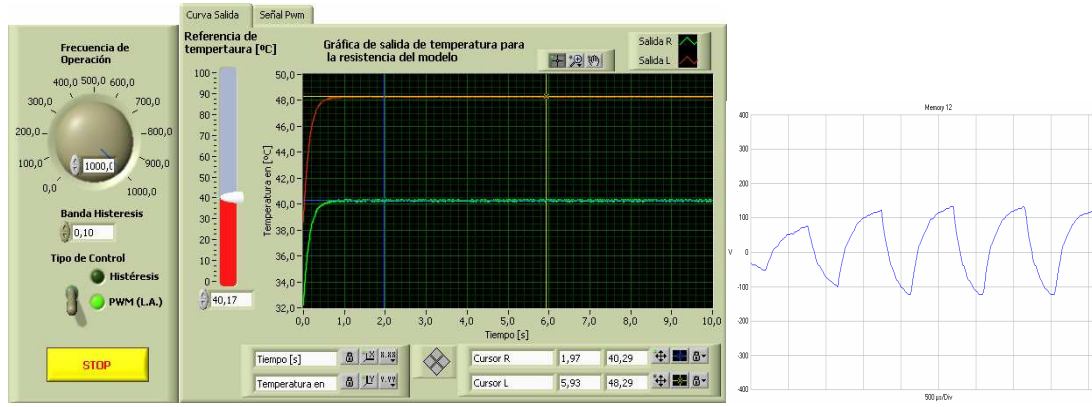
Figura 44. Prueba de establecimiento de temperatura de referencia a frecuencia de 500Hz



Fuente: El Autor

Finalmente, para la figura 45, la señal de temperatura de la bobina alcanza una temperatura superior a la de consigna. Debido a las pérdidas por histéresis y corrientes de Eddy que presenta el entrehierro. Efecto, que es evidente en las pruebas del modelo físico-matemático y térmico de la tubería, en el cual se determino que la tubería alcanza mayores incrementos de temperaturas a frecuencias altas con un mismo nivel de corriente. Además, con respecto a la señal de control, se percibe una distorsión de la señal producto del efecto inductivo de la carga a frecuencias altas.

Figura 45. Prueba de establecimiento de temperatura de referencia a frecuencia de 1000Hz



Fuente: El Autor

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De la investigación y el trabajo realizado se concluye:

El objetivo general de la investigación se ha cumplido ya que se han especificado las características que deben poseer los elementos que intervienen en un sistema inyección de corriente para calentamiento en tubería de producción. Con este sistema se aumenta del factor de levante de un pozo gracias al incremento de la movilidad del crudo en ascenso a superficie. Para conseguirlo, se elaboró el modelo físico-matemático de la tubería de de producción como impedancia eléctrica, con el cual se puede predecir el comportamiento de las pérdidas eléctricas ante el paso de corriente eléctrica. De la misma forma, se desarrolló un análisis del comportamiento de la tubería visto como un elemento térmico, para estimar el comportamiento del crudo ante un incremento de temperatura. También, se realizó un estudio juicioso del estado del arte sobre las investigaciones y equipos desarrollados a lo largo de tiempo para realizar calentamiento de pozo, a fin de desarrollar una herramienta acorde con la realidad y necesidades de la industria del petróleo.

Se logró validar experimentalmente el modelo térmico de la tubería de producción mediante la utilización de un modelo circuital. Debido a la imposibilidad técnica y económica que representaba realizar pruebas de campo en pozo. Sin embargo, los resultados obtenidos con el modelo son satisfactorios y concluyentes en cuanto a la respuesta esperada. Además, con las simulaciones se deduce que es más conveniente aumentar la frecuencia de trabajo de la señal de alimentación que el nivel de corriente de entrada a la carga, ya que se obtienen resultados similares con bajos niveles de energía y frecuencias elevadas.

Se elaboró la ingeniería conceptual de un equipo capaz de incrementar la temperatura en el tubo de producción, para mejorar la movilidad del crudo en ascenso, mejorando de esta manera el factor de levante y régimen de trabajo de las bombas de extracción. Se presentaron todos cálculos y consideraciones necesarios para el diseño de un equipo de inyección de corriente en pozo, con el cual, aparte de realizar calentamiento, se puede realizar caracterizaciones de pozos candidatos a esta tecnología como impedancia eléctrica.

Una ventaja del diseño planteado es su flexibilidad. Pues tiene la capacidad de ser convertido en un sistema de estimulación de pozo, simplemente debe cambiarse la configuración del pozo (*casing* aislado) y aumentar los requerimientos de potencia, si el sistema realmente lo requiere. Esto significa que solamente debe modificarse la etapa de alimentación y de potencia, pues el bloque de control y de instrumentación permanecerá igual.

La inyección de corriente por parte 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. Por tal motivo se requiere que el sistema de monitoreo de temperatura debe ser inmune a IEM, como es el caso de la instrumentación óptica. En efecto, 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 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 o control tipo SCADA. Además, que proporciona la capacidad suficiente para implementar técnicas de control avanzado y el control de sistemas multipozo.

Se diseñó y construyó un prototipo que conserva la filosofía de funcionamiento del SICP. Con el objetivo de realizar pruebas control de temperatura en modelos circuitales o tubería corta con características especiales de alta impedancia. Con una capacidad de potencia de 2400 [VA] de potencia aparente y control basado en PC y microcontrolador para emular el funcionamiento del Field Point.

Como productos de esta investigación se desarrollaron tres proyectos auxiliares, elaborados por estudiantes de pregrado, los cuales consistieron en los siguientes temas: Diseño del sistema de alimentación eléctrica, en el cual se definieron los parámetros de diseño para la instalación de transformadores y líneas de transmisión al sistema SICP. El segundo tema,

Diseño de la fuente de poder del SICP, comprendido por la metodología de construcción de fuentes de poder para procesos de calentamiento eléctrico en tubería. Y el último, Diseño del sistema de instrumentación electrónica para el sistema de control del SICP, el cual abarca los parámetros de diseño de selección de instrumentación asociada al sistema de control del SICP.

Se recomienda:

Iniciar investigaciones posteriores para realizar un estudio detallado de la impedancia de tuberías a frecuencias medias y altas. Para determinar la frecuencia de resonancia del pozo y obtener la mejor respuesta en transferencia de potencia al tubing.

Proponer un proyecto piloto de aplicación de la técnica en uno de los pozos del Campo Escuela Colorado a forma de poner a prueba la metodología de diseño de sistemas reales. Además, teniendo en cuenta el precio actual y la proyección de aumento del valor del crudo, convierte al proyecto en una verdadera alternativa para tener en cuenta en los procesos de optimización de extracción de crudos pesados y parafínicos.

Plantear un proyecto de simulación de producción para pozos en condiciones reales teniendo bajo la utilización de una herramienta como la desarrollada, en la cual se pueda estimar el aumento de producción. De tal forma que se pueda hacer un análisis financiero de viabilidad económica del proyecto.

Estudiar en detalle los procesos de conmutación y pérdidas eléctricas asociadas con este proceso en puentes inversores. Asimismo, se recomienda aplicar la metodología del inversor resonante para mejorar la respuesta del sistema, agregando impedancias (condensadores o bobinas) en serie para alcanzar un valor resonante fácilmente.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **CARUSO G.** Coloquio "Centro para Estudios Estratégicos e Internacionales (CSIS) de Washington", Administración para la Información Energética EIA, EE.UU., junio 2006.
- [2] **AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS**, Perspectivas de nuevas reservas, Julio 2005.
- [3] **ECOPETROL**, Estadísticas Volumétricas de la Industria Petrolera, Colombia 2006.
- [4] **CASTELLANOS, Henry y GRAJALES, Fernando.** Modelo analítico del calentamiento electromagnético aplicado a la formación en yacimientos de crudo pesado trabajo de grado (ingeniero de petróleos). Universidad Industrial de Santander. Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga 2004.
- [5] **VERMEULEN, Fred and McGEE, Bruce.** In Situ Electromagnetic Heating for Hydrocarbon Recovery and Environmental Remediation. JCPT, Volume 39, No. 8, agosto 2000.
- [6] **SIERRA, R.,** Promising progress in field application of reservoir electrical heating methods. Society Engineer of Petroleum. SPE 69708. 2001.
- [7] **SAHNI, A., KUMAR, M. y K.NAPP, R. B.,** Electromagnetic Heating for Heavy Oil Reservoirs. Society Engineer of Petroleum. SPE 62550. Paper presented at SPE/AAPG Western Regional Meeting, Long Beach, California, 19-23 Junio (2000).
- [8] **PDVSA**, Fundamentos de ingeniería de petróleos, Venezuela, 2005.
- [9] **INVIERNO, Pablo,** Viabilidad de utilización de un sistema de calefacción de pozos petroleros en áreas frías, de alta viscosidad y alto contenido parafínico, Tesina Maestría en dirección de empresas, Universidad del CEMA, Argentina, 2001
- [10] **BEAL C.** The viscosity of air, Natural Gas, Crude Oil and its Associated Gases at Oilfield Temperatures and Pressures, Transactions of American Institute of Mining and Metallurgical Engineers Vol. 165, USA 1946.
- [11] **MOODY L.** Friction Factors for Pipe Flow, Transactions of American Society of Mechanical Engineers Vol 66 USA 1964.
- [12] **KREITH, Frank.** Principios De Transferencia De Calor. Mexico Thomson Learning, 2001.
- [13] **PERRY, R., Green, D., Maloney, J.,** Manual del Ingeniero Químico, Editorial Mc Graw-Hill, Tomo 10. 1992.
- [14] **INCROPERA, F., De Witt, D.,** Fundamentos de Transferencia de Calor, Editorial Prentice-Hall, 1999.
- [15] **BRUCE C. W. McGee,** Fred E. Vermeulen, Power Losses in Steel Pipe Delivering Very Large Currents, IEEE transactions on power delivery, Canada 1990.

- [16] **SAROSH N. Talukdar and James R. Bailey**, Hysteresis Models for System Studies, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-95, no. 4, pp. 1429–1434, julio-agosto, 1976.
- [17] **BURDEN Richar, Douglas J**, Análisis Numérico, International Thomson Editores, 1998.
- [18] **NORMA API 5CT ISO 11960**, Norma estandar para la construcción y pruebas mecanicas y quimicas de la tubería de producción.
- [19] **HAYT William**, Teoría electromagnética, quinta edición Mac Graw Hill. 1995.
- [20] **CAROZZI A, Erikson A, Lundborg B y Thidé B**. Electromagnetic Field Theory. Swedish Institute of Space Physics, 2003.
- [21] **PERSHING, R.S.** Electric Heater for oil wells and the like. Patente 1464618. Oficina de Patentes de los Estados Unidos.
- [22] **STEGEMEIER, R.J.** Liquid Filled Well Heater. Patente 2932352. Oficina de Patentes de los Estados Unidos
- [23] **MCCARTHY, P.B.** Electric Oil Well heating Apparatus. Patente 3114417. Oficina de Patentes de los Estados Unidos.
- [24] **BRIDGES, J. Dubiel, G.** Power sources for downhole electrical heating. Patente N° 509918. Oficina de Patentes de Canadá.1991.
- [25] **BRIDGES, J.**Electrical Heating Systems for low cost retrofitting of oil wells. Patent N° 2090629. Oficina de Patentes de Canadá. 1978.
- [26] **KERN, L.R.** Method and Apparatus for electrical heating of hydrocarbonaceous formations. Patente 3862662. Oficina de Patentes de los Estados Unidos.
- [27] **GILL, W.** Patent 3642066. Electrical Method and Apparatus for the recovery of oil. Oficina de Patentes de los Estados Unidos.
- [28] **KERN, R. L. Perkins, T.** Method for reducing power loss associated with electrical heating of a subterranean formation. Patente 4010799. Oficina de Patentes de los Estados Unidos.
- [29] **MORANTES, Oscar**, Sistema de inyección de corriente en fondo de pozo SICP, modelado de la cara del pozo, Tesis de maestría, Universidad Industrial de Santander, 2007.
- [30] **CASTELBLANCO Nelfor**, Filtros Activos: Control por DSP de un Filtro Activo para la Compensación de Corrientes Armónicas, Tesis de maestría, Universidad Industrial de Santander, 2006.
- [31] **Internationar Rectifier IRF**, Aplicación y caracterización de los IGBT's, Application note AN-990.
- [32] **B. Maurice, L. Wuidart**, Circuitos manejadores para transistores de potencia IGBT's y MOSFET, Application note IRF.

- [33] **RODRÍGUEZ A., Matías**, Estimación de posición y control simplificado de corriente para motores bldc, usando tecnología DSP, Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2002.
- [34] **RASHID Muhammad**, Electrónica de Potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones. Pearson 1995.
- [35] **CHAPMAN Stephen**, Máquinas Eléctricas, tercera edición, Mc Graw Hill, 2000
- [36] **IEEE**, IEEE Standard 519-1992 Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.
- [37] **IEEE**, Standard 844-2000, Recommended Practice for Electrical Impedance, Induction, and Skin Effect Heating of Pipelines and Vessels.
- [38] **PERALES E., Manuel Á.**, Aplicación de nuevas técnicas de control para el desarrollo de reguladores activos de potencia, Tesis doctoral Universidad de Sevilla, 2002.
- [39] **Brod David M. y Novotny Donald**. "Current Control of VSI-PWM inverters". IEEE Vol IA-21, No. 4, 1985
- [40] **DORF Richar, Bishop Rober**, Sistemas de Control Moderno, 10ª edición, Pertince Hall, España 2005.
- [41] **SIEW-CHONG Tan; Lai, Y.M.; Tse, C.K.; Cheung, M.K.H.**; A fixed-frequency pulsewidth modulation based quasi-sliding-mode controller for buck converters Power Electronics, IEEE Transactions on Volume 20, Nov. 2005 Page(s):1379 - 1392
- [42] **STEFANUTTI, W. Mattavelli, P.** Fully digital hysteresis modulation with switching-time prediction. IEEE Industry Applications, IEEE Transactions on Volume 42, Page(s):763 – 769, May-June 2006
- [43] **ASTRÖM Karl, Wittenmark Björn**, Computer-Controlled Systems Theory and Desing, Prentice Hall, 1997.
- [44] **LAGUNAS J., José R.**, Sintonización de controladores PID mediante un algoritmo genético multiobjetivo (NSGA-II), Tesis doctoral, Instituto Politécnico Nacional de México, Abril 2004.
- [45] **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.

Referencias en Internet

- [46] <http://www.siemens.com>, Pagina de Web de SIEMENS COMPANY, fabricante de sistemas de potencia.
- [47] <http://www.dafoss.com>, Pagina de Web de Danfoss, fabricante de variadores de velocidad.
- [48] <http://www.fairchildsemi.com>, Pagina de Web de Fairchild semiconductor, fabricante de circuitos integrados.
- [49] <http://www.irf.com>, Pagina de Web de International Rectifier, fabricante de circuitos integrados.
- [50] <http://www.fujisemiconductor.com>, Pagina de Web de Fuji Electric Device Technology America, Inc., fabricante de circuitos integrados.
- [51] <http://www.ni.com>, Pagina de Web de National Instruments, fabricante de sistemas de adquisición de datos y LabVIEW®.
- [52] www.chenyang.com, Pagina de Web de ChenYang Inc, fabricante de sensores

- [53] <http://www.fiso.com>, Pagina de Web de FISO Technologies Inc, fabricante de sensores y sistemas de adquisición de datos basados en fibra óptica.

ANEXO A

MODELO ELECTROMAGNÉTICO Y PROCESO DE MAGNETIZACIÓN DE LA TUBERÍA DE ACERO.

En el presente anexo, se expone el desarrollo del modelo físico-matemático para describir las pérdidas eléctricas en la tubería proceso de magnetización de la tubería y los problemas que este efecto conlleva en el cálculo de las variables eléctricas en un proceso de inyección de corriente eléctrica en un material ferromagnético. Como es el caso de la tubería de producción (*tubing* y *casing*) constituida principalmente por acero al carbón. Asimismo, este anexo está basado en los estudios de Bruce C. W. McGee and Fred E. Vermeulen [15], en el cual se explica claramente los efectos de los ciclos de histéresis y las corrientes de Eddy. Sin embargo, de la sencillez del método existe el inconveniente de adquirir las curvas de histéresis reales de la tubería, ya que pueden existir diferentes tipos de curvas para un mismo material, y pueden variar significativamente debido a las técnicas de fabricación o construcción y componentes.

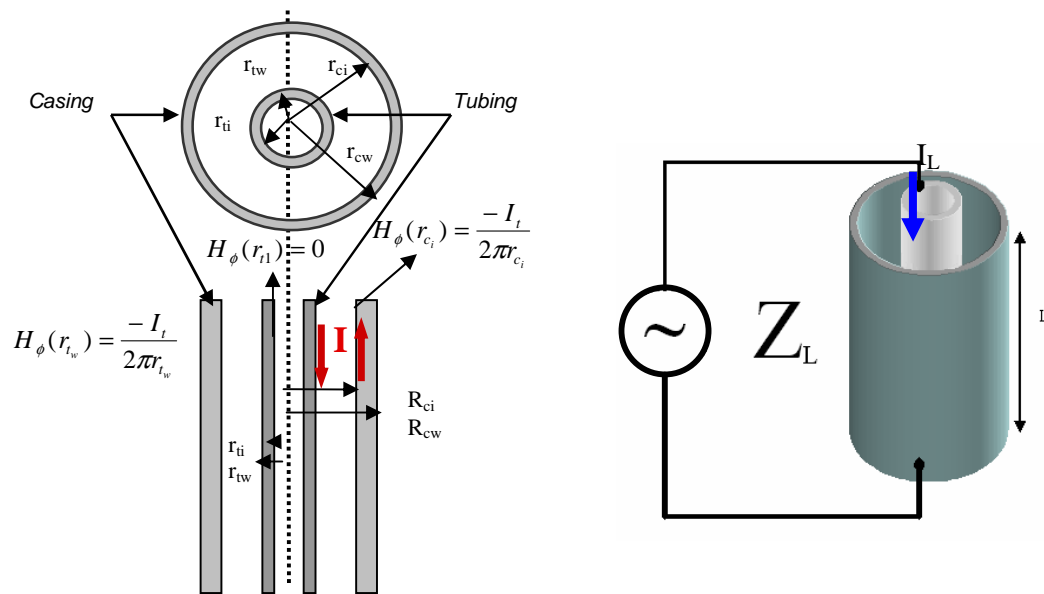
A.1 Modelo físico-matemático para calcular pérdidas eléctricas en tubería

A continuación, se presenta el proceso para obtener una solución numérica a los campos electromagnéticos, contemplando las características no lineales que relacionan el campo magnético H con la inducción magnética B , relacionados por las curvas de histéresis. En efecto, no es posible obtener una solución analítica al problema y se hace necesaria la utilización de métodos numéricos para su solución. Específicamente se utilizó el método de diferencias finitas en el tiempo de Crank-Nicholson [16]. Éste método es capaz de tratar la respuesta transitoria del proceso de magnetización y resuelve el estado estable de magnetización de la tubería altamente dependiente de la histéresis del material.

Para modelar estas no linealidades se recurre a una medición real de un ciclo de histéresis [14]. Con ello se puede deducir la familia de lazos de histéresis que gobierna el comportamiento de la variable magnética a través de la tubería. La necesidad de predecir las

pérdidas de potencia en la tubería es requerida para determinar la capacidad de transporte de corriente. También, es necesaria para diseñar el sistema de control del SICP y predecir la eficiencia con la cual la potencia eléctrica inyectada es convertida en calor. Como se puede apreciar en la figura A1, se muestra la configuración de un pozo vertical equipado para calentamiento eléctrico. En el cual se proponen las condiciones de frontera a partir de la geometría del sistema.

Figura A1. Vista frontal y superior del sistema de tubos



Fuente: El Autor

Donde:

r_{ci} = radio interior del *casing* [m]

r_{cw} = radio exterior del *casing* [m]

r_{ti} = radio interior del *tubing* [m]

r_{tw} = radio exterior del *tubing* [m]

$H\Phi(r_{ci})$ = Campo magnético en el interior del *casing*

$H\Phi(r_{cw})$ = Campo magnético en el exterior del *casing*

$H\Phi(r_{tw})$ = Campo magnético en el exterior del *tubing*

$H\Phi(r_{tr})$ = Campo magnético en el exterior del *tubing*

L = unidad de longitud de tubería [m]

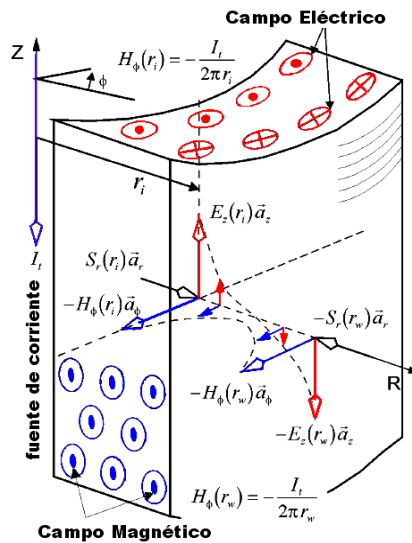
I_t = Corriente de línea [A]

Para realizar el planteamiento de las ecuaciones de Maxwell se realizaron las siguientes suposiciones, ver figura A2:

- La tubería es lo suficientemente “larga”, como para que los efectos en la onda de corriente puedan ser negados o reflejados a lo largo de la tubería
- La frecuencia de excitación es lo suficientemente baja, como para que la longitud de onda tenga efectos negativos tal como la existencia de corrientes de desplazamiento.
- Se considera la no variación del campo magnético a lo largo del eje Z o vertical.
- La corriente (I_t) en el *tubing* tiene simetría cilíndrica, y para calcular la corriente inducida en el *casing*, se remplace la corriente por una línea I_t en el eje a_r con $r=0$.
- La solución del campo es independiente de la dirección angular Φ .

Con respecto a la figura A2, se muestra un fragmento de tubería donde se evidencia las suposiciones anteriores. En efecto, en el interior del acero las únicas componentes de las fuerzas del campo eléctrico (E) y magnético (H) son respectivamente E_z y H_ϕ , ambas varían en amplitud y en fase en la dirección radial. El vector de Poynting S_r esta dirigido hacia el interior y el exterior de las superficies. Asimismo, para obtener una solución de E_z y H_ϕ a partir de los valores de las condiciones de frontera en las superficies interior y exterior, se usa el teorema de Poynting. Las contribuciones relativas por las corrientes de Eddy y los lazos de histéresis deben ser obtenidas por integración local a través del volumen del objeto.

Figura A2. Distribución de los campos eléctricos y magnéticos para una muestra de tubería de acero



Fuente: [14]

La solución del sistema es definida por una ecuación diferencial en términos de $H(r)$ y es producto de las ecuaciones de Maxwell. Además, las condiciones de frontera fueron establecidas en la figura A1, con las cuales se obtiene la solución para el campo magnético en la tubería:

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} - \frac{\partial H_\phi}{\partial z} \right) \vec{a}_r + \left(\frac{\partial H_r}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial r} \right) \vec{a}_\phi + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial(rH_\phi)}{\partial r} - \frac{\partial H_r}{\partial \phi} \right) \vec{a}_z \quad (1)$$

donde:

\vec{E} = intensidad del Campo eléctrico [V/m]

\vec{H} = intensidad del Campo magnético [A/m]

\vec{B} = Densidad del flujo magnético [T ó Wb/m]

ϵ = Permitividad [F/m]

σ = Conductividad eléctrica [Ω/m]

a_r, a_ϕ, a_z = son las direcciones unitarias del sistema de coordenadas cilíndricas

Siendo únicamente H_ϕ y E_z las competentes del campo presente, independientes de la dirección Φ . Por tal motivo, la ecuación (1) nos queda convertida en:

$$\sigma \vec{E}_z = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial(rH_\phi)}{\partial r} \right) \quad (2)$$

Además el rotacional del campo eléctrico queda reducido a la siguiente expresión,

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu(\vec{H}) \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \Rightarrow \frac{\partial \vec{E}_z}{\partial r} = \mu H_\phi \left(\frac{\partial H_\phi}{\partial t} \right) \quad (3)$$

Donde, μ es la permeabilidad del material conductor.

Reemplazando las ecuaciones (1) y (2) en (3), tenemos la siguiente ecuación (4)

$$\frac{\partial^2 H_\phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_\phi}{\partial r} - \frac{H_\phi}{r^2} = \sigma \mu (H_\phi) \left(\frac{\partial H_\phi}{\partial t} \right) \quad (4)$$

La ecuación (4) es una ecuación de tipo difusión y describe la distribución de las fuerzas del campo magnético en la tubería de acero. Esta ecuación es discretizada y resuelta numéricamente. Además, las especificaciones de las fuerzas del campo magnético en la frontera determinan si la solución es para *tubing* o para el *casing*. A su vez, la ley de

Ampere, ecuación (5), es usada para determinar la fuerza del campo eléctrico en la tubería.

$$\oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_s \sigma \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (5)$$

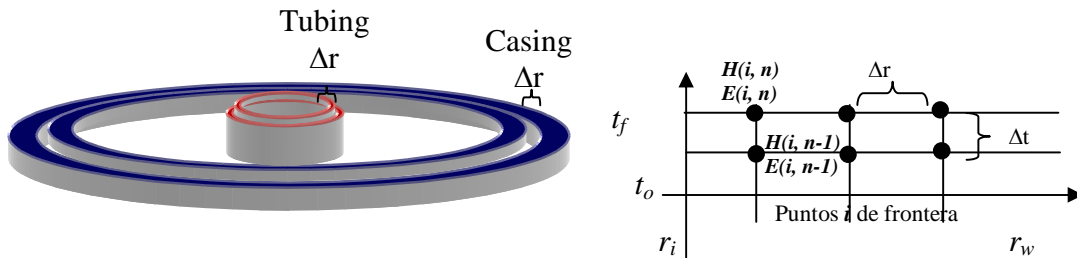
Puesto que la ecuación (4) no tiene solución analítica, debido a la relación no lineal entre el campo magnético H y la densidad del campo B . Se planteo el uso de métodos numéricos para su solución. Discretizando la ecuación (4), en un número finito de nodos se puede dar solución al efecto transitorio del material y tratar el problema de la histéresis de manera adecuada sin recurrir a soluciones complicadas, ver ecuación (6). En efecto, el proceso de discretización se hace en nodos discretos en el tiempo Δt y en volumen discretizando el radio de la tubería Δr , como se puede apreciar en la figura A3.

$$a_i H_{i-1}^{n+1} + (b_i + 2d_i^n) H_i^{n+1} + c_i H_{i+1}^{n+1} = -a_i H_{i-1}^n + (2d_i^n - b_i) H_i^n - c_i H_{i+1}^n \quad (6)$$

Donde el subíndice Φ ha sido borrado, además, los subíndices son denotados en niveles de tiempo, y donde el error de truncamiento es $O(\Delta t^2 + \Delta r^2)$. Aquí

$$a_i = \frac{1}{\Delta r^2} - \frac{1}{2r_i \Delta r^2} \quad b_i = -\frac{1}{r_i^2} - \frac{2}{\Delta r^2} \quad c_i = \frac{1}{\Delta r^2} + \frac{1}{2r_i \Delta r^2} \quad d_i^n = -\frac{\sigma_i \mu_i^n}{\Delta t} \quad (7)$$

Figura A3. Sistema de cuadrícula, consistente de nodos y puntos de cuadrícula, adaptada para los cálculos numéricos de las diferencias finitas en el dominio del tiempo.



Fuente: Autor

La solución obtenida, es estable para H_Φ y depende del historial de magnetización del material, utilizando las condiciones iniciales cuando H_Φ es cero y una permeabilidad magnética μ_{1i} , en cada punto nodal. La matriz de los coeficientes representa un sistema tridiagonal de ecuaciones para la ecuación (6) y es por lo tanto continuamente recalculada a medida que avanza el tiempo, usando el valor de la corriente para el cálculo de H en todos

los puntos nodales del problema y para todos los valores locales de μ_{ni} . En efecto, cada punto o nodo experimenta un historial de histéresis diferente y el estado de estabilidad es alcanzado después de varias iteraciones. También, la ley de ampere es discretizada y se obtiene la siguiente expresión en diferencias para la intensidad del campo eléctrico.

$$E_{i+1/2}^{n+1} = \frac{2(H_{i+1}^{n+1}R_{i+1} - H_i^{n+1}R_i)}{\sigma_i(R_i^2 - R_i^2)} \quad 1 \leq i \leq N-1 \quad (8)$$

Además, las fuerzas del campo eléctrico en el interior y en los límites exteriores de los puntos nodales, son respectivamente lineales por extrapolación de las fuerzas del campo eléctrico cercano a los puntos de rejilla. Asimismo, las pérdidas en la tubería de acero son clasificadas en contribuciones por pérdidas de los lazos de histéresis y por corrientes de Eddy. El tiempo total promedio de disipación de potencia por unidad de longitud en la tubería (tubing y casing) es obtenido por la sumatoria del vector de tiempo promedio de flujo de potencia de Poynting dentro del elemento a través de la superficie $d1=B+D - B+T$. s interior y exterior, y es dada por:

$$P = -\frac{2\pi r_i}{T} \int_0^T E_z(r_i, t) H_\phi(r_i, t) dt + \frac{2\pi r_\omega}{T} \int_0^T E_z(r_\omega, t) H_\phi(r_\omega, t) dt \quad (9)$$

donde

P = es la potencia total del sistema [W]

T= es un periodo de señal de corriente [s]

ri = es el radio interno del elemento tubería [m]

rw = es el radio externo del elemento de tubería [m]

En esta ecuación la primera integral hace referencia al vector de Poynting en el interior de la tubería y la segunda integral al exterior de la tubería.

Las pérdidas por histéresis (P_h) por unidad de longitud, la cual corresponde al área del histeroide que gobierna la relación H-B, es área esta dado por:

$$P_h = -\frac{2\pi r_i}{T} \int_{ri}^{rw} \oint_{B\phi(0)}^{B\phi(T)} H_\phi(r, B_\phi) dB_\phi r dr \quad (10)$$

y las pérdidas por efecto de corrientes de Eddy (P_e), es dada por:

$$P_e = \frac{2\pi}{T} \int_{r_i}^{rw} \int_0^T \sigma E_z^2 r dt dr \quad (11)$$

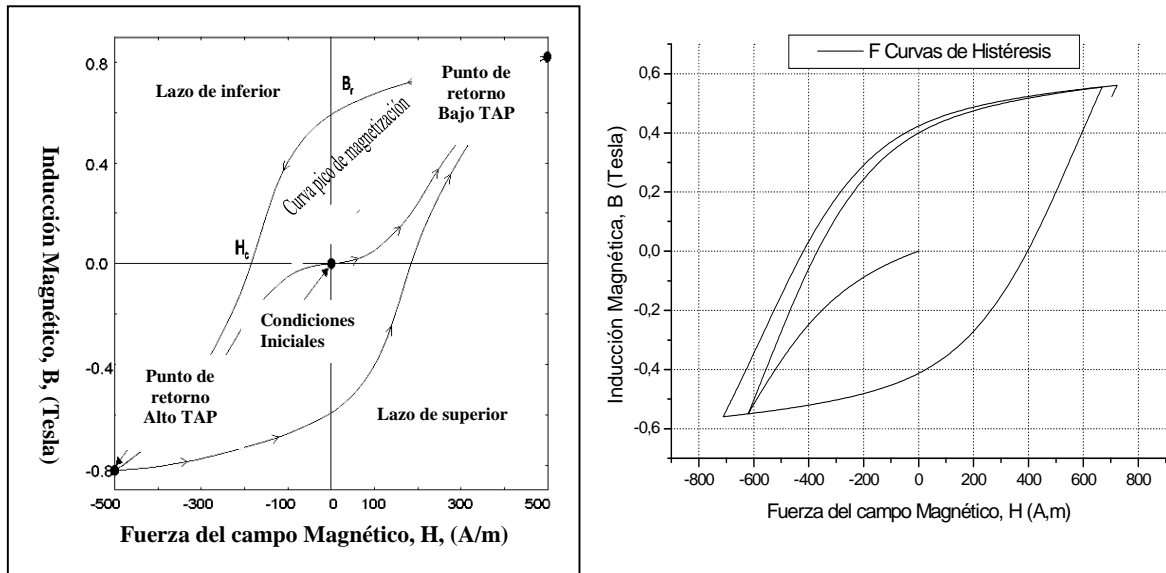
Para el cálculo total de potencias dado para cada uno de los elementos que disipan energía en el sistema (tubing y casing), también se calculo para cada uno de éstos los efectos que disipan energía en calor y se procedió a realizarlas por métodos numéricos.

A.2 Método del factor de distancia para construcción de lasos de histéresis.

Para entender las curvas de magnetización o histéresis, la tubería es asumida inicialmente como desmagnetizada y las condiciones iniciales existentes en toda la curva corresponden con el origen de la figura A4. Cuando las fuerzas del campo magnético comienzan a incrementar con el tiempo, la magnetización inicialmente sigue la “curva pico de magnetización”. Luego, cuando la fuerza de magnetización ha alcanzado su máximo (Punto de retorno Bajo TAP), ocurre la desmagnetización que sigue la trayectoria llamada de “lazo inferior” regresa por debajo del punto inicial, esto se define numéricamente por $H^{n+1}_i < H^n_i$. Igualmente, cuando la fuerza del campo magnético alcanza un mínimo (Punto de retorno Alto TAP) y retorna por arriba del punto inicial ocurre la remagnetización, definido numéricamente por $H^{n+1}_i > H^n_i$ que sigue la trayectoria de la curva denominada “lazo superior”. Durante el periodo de transición, gira alrededor de un ciclo hasta el siguiente, y continuara girando alrededor del punto inicial siguiendo las curvas superior e inferior volviéndose simétrica y estable, obteniéndose como resultado un lazo de histéresis, como se puede apreciar en la figura A4.

Como se explico anteriormente, existe una relación no lineal entre el campo magnético y la inducción magnética, por tal motivo se requiere el uso de métodos numéricos. Por lo tanto, se necesita calcular de manera discreta los puntos de magnetización por cada punto de la cuadrícula para solucionar la ecuación (4) se requiere un método general para generar los lazos de histéresis. Este método se conoce como factor de la distancia.

Figura A4. Caracterización de un proceso de magnetización para una celda de ancho Δr_i durante el periodo de transición.



Fuente: Bruce C. W. McGee and Fred E. Vermeulen [15]

El factor de la distancia aproximada requiere un lazo de histéresis máximo para calcular cualquier valor de la magnetización del material producto de una corriente. Usualmente, este lazo es obtenido experimentalmente¹⁶. El único requerimiento del método es que el extremo máximo del lazo de histéresis sea mayor que el máximo valor aplicado por la fuerza del campo magnético para la solución del problema. La descripción del método se puede apreciar en la siguiente figura.

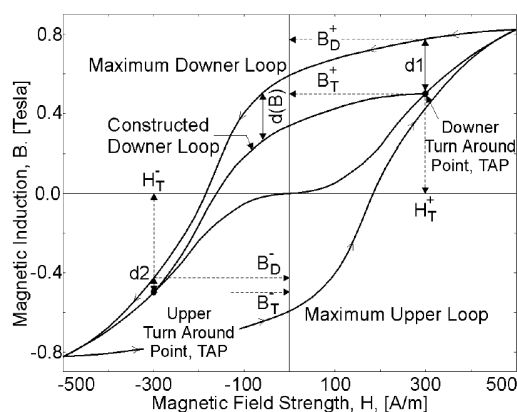
La figura A5, muestra la construcción de un lazo de histéresis para un valor máximo arbitrario de campo electromagnético, la cual se realiza de la siguiente forma:

1. El punto de lazo inferior es definido por las coordenadas, (H^+_T, B^+_T) y es localizado en la curva pico de magnetización. Cuando la fuerza del campo magnético alcance el punto de giro, se determinará la distancia vertical máxima para la curva de lazo inferior alrededor del punto, $d_1 = B^+_D - B^+_T$
2. Se define un giro superior hipotético alrededor del punto como imagen espejo de $(H^-_T, B^-_T) = (-H^+_T, -B^+_T)$, y que es también localizado en la curva pico de magnetización

¹⁶ Principal inconveniente del método, ya que para obtener esta curva "máxima" se requiere de un equipo sofisticado y de gran potencia

3. La construcción del lazo inferior es calculada por decrecimiento de la fuerza del campo magnético de $B_{cd}(H) = B_d(H) - d(B)$, donde $B_{cd}(H)$ es la inducción magnética para la construcción del lazo de bajada y $B_d(H)$ es la inducción magnética correspondiente al máximo valor del lazo de bajada
4. Cuando el punto alto es alcanzado en la curva pico de magnetización en $(H-T, B-T)$, el cual no es localizable durante los 5 primeros ciclos de excitación, se define un punto de giro de bajada hipotético como una imagen espejo del primer cuadrante de el actual punto de giro alto

Figura A5. Método para la construcción del lazo de histéresis.



Fuente: [15]

La construcción del lazo de bajada es ahora calculado por incremento de la fuerza del campo magnético usando un nuevo factor de distancia $d(B)$ definido por una ecuación analógica a la ecuación (12). El método para la construcción de los lazos de subida y bajada son simétricos desde el comienzo, una condición normalmente asociada con las condiciones de estado estable. Además, no esta sujeto a restricciones y puede ser modelado dentro de los procesos de magnetización a través del periodo de transición.

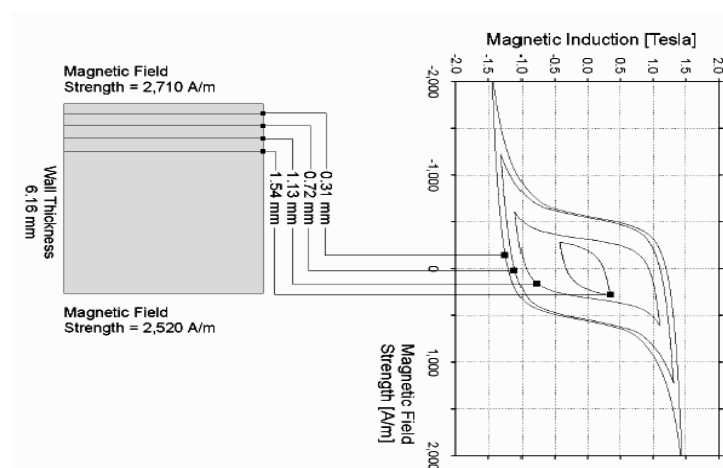
$$d(B) = d_2 + \frac{d_1 - d_2}{B_T^+ - B_T^-} (B - B_T^-) \quad (12)$$

Una ventaja de usar el método del factor de distancia, es que no es necesario obtener el lazo máximo de histéresis de saturación del material. Esto es una consideración experimental importante ya que la saturación en las tuberías de campos petrolíferos requiere grandes fuerzas de campo magnético y las fuerzas magnéticas aplicadas al sistema en sistemas de

calentamiento electromagnético son inferiores a las condiciones de saturación. Desde esta consideración para el uso del lazo ascendente de histéresis mejora la precisión de los cálculos del campo magnético.

En la figura A6, se muestra el proceso del cálculo de la magnetización dentro del casing en condiciones estables usando el método del factor de la distancia. Un efecto importante se presenta en el cálculo de la fuerza del campo magnético en las áreas de frontera de los lazos de histéresis, ya que ésta disminuye con el incremento de la profundidad dentro del material. El estado estable del proceso de magnetización en cada celda es descrito por un único lazo de histéresis.

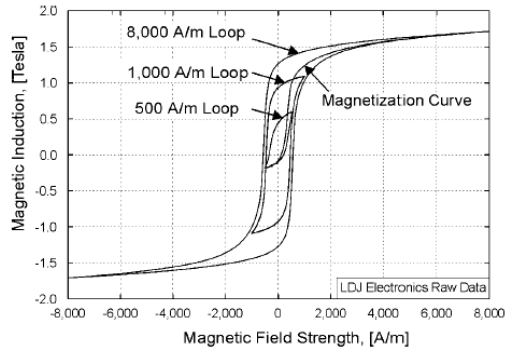
Figura A6. Cálculo de lazos de histéresis para elemento diferencial de tubería.



Fuente: [15]

La figura A5, muestra varias mediciones de lazos de histéresis, registrados para un *casing* tipo k en los laboratorios LDJ de Texas. Para su visualización y posterior procesamiento de estos se requirió un pequeño ajuste a los datos experimentales para garantizar que el lazo de subida y de bajada máximos sean simétricos al origen, así como, hacer coincidir los puntos finales de estos lazos con la curva pico de magnetización, como se aprecia en la figura A6.

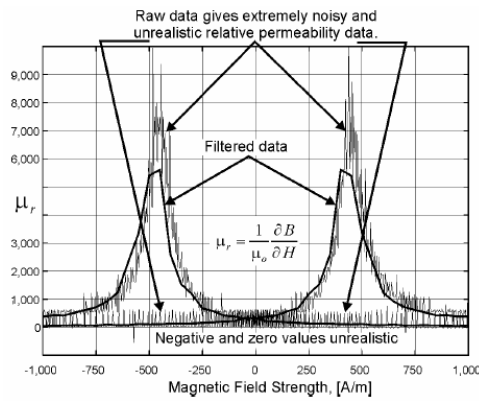
Figura A5. Datos de Histéresis para un casing de 7" usando un Histograma adquiridos por LDJ Electronics Inc.



Fuente: [15]

Los datos experimentales son filtrados para garantizar que la inducción magnética sea continua e incremental para el lazo de subida y decremental para el lazo de bajada, como se muestra en la figura A6. Estos datos son arbitrariamente adaptados usando el método cúbico de spline para generar el filtrado de datos.

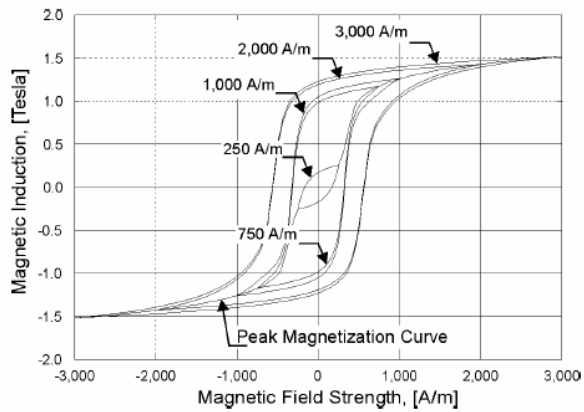
Figura A6. Calculo numéricos de la permeabilidad relativa para datos sin y con filtrado.



Fuente: [15]

Asimismo, en la figura A7, se muestran varios lazos de histéresis para un casing de 7 pulgadas, construido por el método de la distancia.

Figura A7. Lazos de histéresis calculados por el método de la distancia a partir de una medición real de un lazo de histéresis con un campo magnético de 1000A/m



Fuente: [15]

ANEXO B:

PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE INYECCIÓN DE CORRIENTE PARA PRUEBAS DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA Y TÉRMICA

B.1 Introducción

El prototipo de inyección de corriente, ver figura B1, tiene como finalidad realizar las pruebas de impedancia eléctrica y térmica de tubería de producción, para validar el modeló de pérdidas eléctricas en el *tubing*. El prototipo esta constituido por tres elementos fundamentales: modulo de potencia, conformado por los elementos que acondicionan la potencia de entrada a la señal de salida con frecuencia y forma de onda deseada; modulo de adquisición de datos, encargado de acondicionar y digitalizar las señales provenientes de los sensores del sistema; por ultimo tenemos el sistema de control, encargado de generar las señales de control para el modulo de potencia, además, esta basado en control digital desarrollado en Labview con salida por puerto paralelo. A continuación se presenta una tabla resumen donde se describen los rangos en los cuales el prototipo se puede operar.

Figura B1. Prototipo del SICP construido para realizar las pruebas de tubería



Fuente: El Autor

Tabla B1. Resumen de características eléctricas del sistema por modulo

Módulo de potencia				
Parámetro	Valor mínimo	Valor típico	Valor máximo	Unidades
Corriente de salida	-	15	30	A_{rms}
Tensión de salida	-	160	200	V_{rms}
Capacidad de Potencia	-	2400	-	VA
Impedancia mínima permitida a la carga	6	-	-	Ω
Alimentación	-	120	600	V_{rms}

Módulo de adquisición de datos				
Parámetro	Valor mínimo	Valor típico	Valor máximo	Unidades
Canales de conversión	-	5	-	
Resolución por canal	-	8	-	bits

Módulo de Control	
Parámetro	Descripción
Tipo de control	Control digital por Histéresis
Hardware	Computador personal con puerto serial y paralelo, procesador de 500M en adelante, memoria RAM 128
Software	Sistema operativo 98/Xp; software de programación Labview

Fuente: El Autor

B.2 Módulo de Potencia del SICP

El módulo de potencia es el encargado de entregar los niveles de tensión-corriente adecuadas para la carga. Como se mencionó anteriormente el valor de potencia a manipular es de 2400VA. A su vez, está constituido por los siguientes elementos:

- *Puente rectificador*: Compuesto por un puente de diodos, el cual convierte la señal de alimentación alterna en una señal de tensión continua.
- *Filtro pasa bajos*: Utilizado para eliminar el rizado producto de la rectificación y la contaminación de armónicas que produce el SICP en la red eléctrica. Éste módulo puede ser opcional, ya que no se requiere alimentar la carga con una señal pura o armónica.
- *Manejador de puente H*: circuito interfaz entre módulo de control y el puente inversor, su función es proporcionar los niveles de tensión en las compuertas de cada

transistor para su activación en forma controlada.

- *Puente inversor*: Constituido por cuatro transistores IGBTs, este módulo es el encargado de convertir la señal de continua en señal alterna, de acuerdo a las directrices que el sistema de control imponga.
- *Bobina de acople*: Bobina en serie entre el puente inversor y la carga, es utilizada para realizar el control de corriente.
- *Transformador de aislamiento*: Es necesario utilizarlo entre la salida del SICP y la carga (tubería de producción). Cumple con dos funciones básicas: la primera consiste en proporcionar aislamiento eléctrico entre el SICP y la carga, y la segunda es manejar la potencia de manera adecuada entre el puente inversor y la carga. En efecto, la carga demanda grandes cantidades corrientes a bajas tensiones, mientras que la mayoría de los IGBTs manejan tensiones altas y corrientes moderadas. Por lo tanto, el valor de transformación puede ser desde 1:1 hasta 20:1. La selección del valor de conversión será variable para cada pozo de acuerdo a la impedancia neta de la carga.

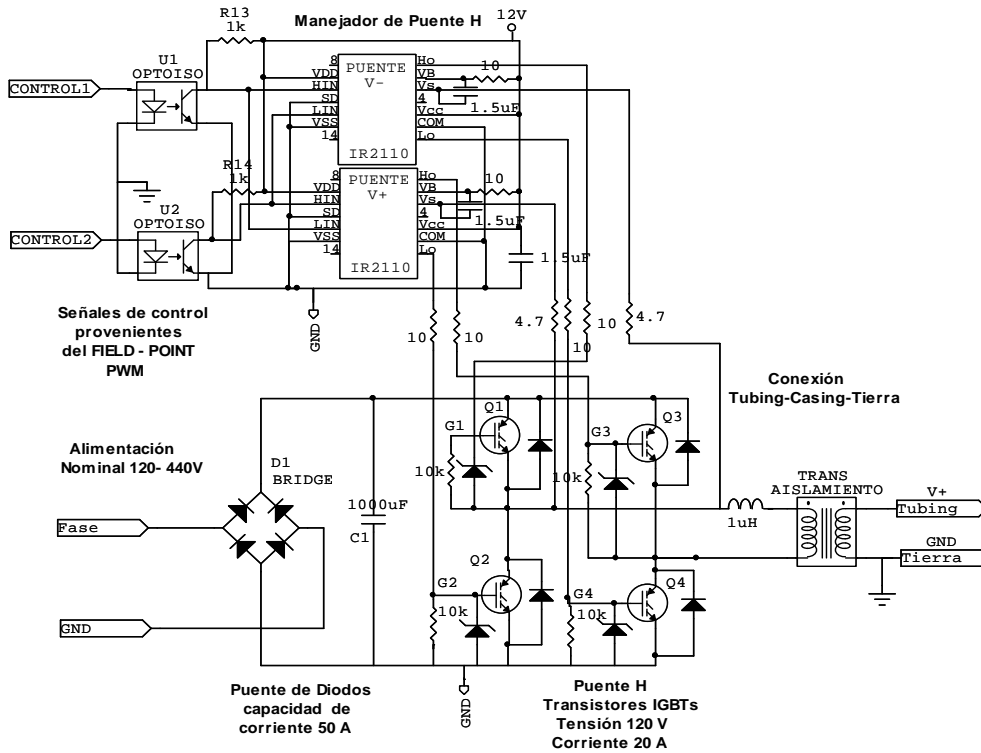
A Continuación, en la tabla B2, se resume las condiciones que debe cumplir cada uno de los componentes del módulo de potencia del SICP. Así mismo, en la figura B2 se aprecia el circuito esquemático resultante del diseño, donde se puede distinguir los diferentes elementos del módulo de potencia: puente rectificador, puente inversor, manejador de puente, bobina y transformador de aislamiento.

Tabla B2. Consideraciones de diseño para el módulo de potencia del SICP para 100kVA de potencia

Componente	Parámetros de selección
Puente rectificador AC/DC	Puente rectificador monofásico conformado por 4 diodos a tensión nominal de 120 - 600 VRMS por fase y corriente 40 A, los diodos deben ser de conmutación rápida y alta eficiencia.
Manejador de puente inversor	Puede estar conformado por un manejador de puente completo o por dos manejadores de medio puente. Debe soportar la tensión de alimentación en este caso es de 120- 600V, y tener alta velocidad de conmutación hasta 10kHz.
Puente Inversor	Puente completo de transistores IGBTs. Los transistores deben tener capacidad para entregar una corriente nominal de 20 [A] a una tensión de 600 [V], frecuencia de conmutación rápida entre 1kHz-10kHz, capacidad de manejar carga inductiva. Alta eficiencia y de conmutación rápida. Cada transistor debe contar con un diodo anti-paralelo. Para el puente se seleccionó los Transistores "IRGP35B60PD" de la empresa Internacional Rectifier por tener una corriente máxima de 60 A a temperatura 25°C, lo cual nos da un margen trabajo en sobrecarga del orden del 100%.
Bobina de Acople	Debe soportar los niveles de corriente impuestos por la carga (corriente máxima 40 A), su valor será determinado por la relación entre rata de cambio de corriente y la tensión de salida del puente H. Para este caso se debe trabajar con una bobina de 1 mH.
Transformador de aislamiento	Potencia Nominal 2400VA, relación de transformación 3:1. Carga o impedancia mínima permitida 0.333 Ω.

Fuente: El Autor

Figura B2. Circuito esquemático para el módulo de potencia del SICP



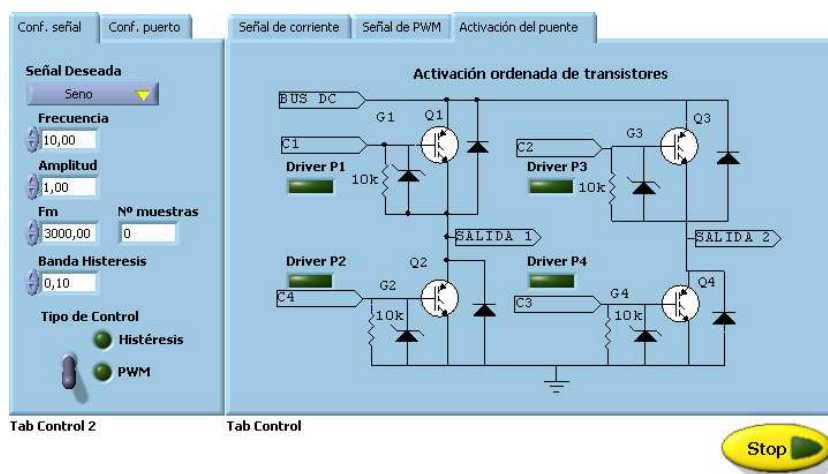
Fuente: El Autor

B.3 Módulo de Control

El módulo de Control es el elemento más importante del sistema, es el cerebro, encargado de la generación de corriente controlada en la tubería de producción. Por consiguiente, la selección de este módulo debe hacerse teniendo en cuenta dos factores: un factor software, basado en el diseño de la ley de control, la cual debe ser desarrollada en la técnica de algoritmos de control por histéresis. Ésta técnica de control consiste en la comparación de la señal de salida con la señal de referencia deseada, dependiendo del signo del error se activa uno u otro brazo del puente por medio de la señal de PWM de salida por el puerto paralelo. La ley de control es implementada en Labview donde se realiza una interfaz de usuario agradable y amigable con los usuarios, en la cual se puede visualizar todas las señales de entrada y las acciones de control, como se puede apreciar en la figura B3.

El segundo factor es el hardware, elemento que soporta el software, para lo cual se requiere de un equipo de gran capacidad de cómputo y fácil programación. Como el prototipo esta pensado para ser operado en laboratorio, un computador convencional puede ser utilizado para adquirir las señales de retroalimentación por puerto serie desde el módulo de adquisición de datos, como se puede ver en la figura B4, en el protocolo de comunicaciones.

Figura B3. Interfaz de usuario en Labview.



Fuente: El Autor

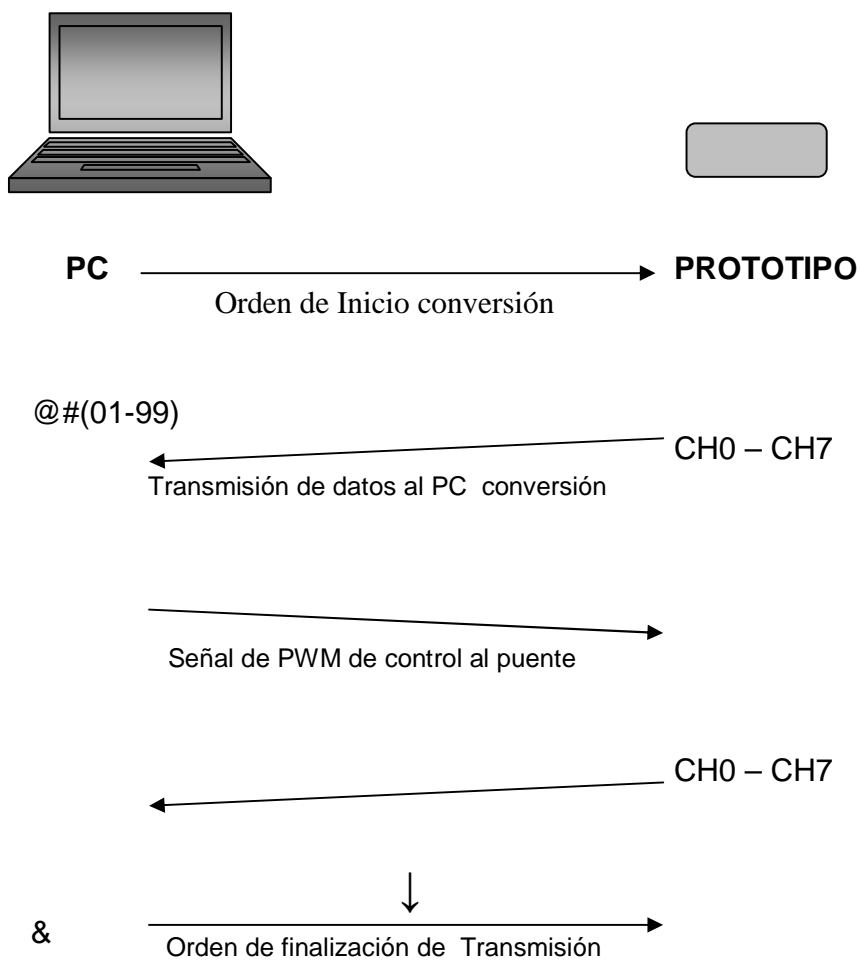
B.4 Módulo de Adquisición de Datos

Otro elemento fundamental a considerar dentro del sistema de control es la adquisición de señales de retroalimentación, las cuales son indispensables para contrastar las acciones de control en el sistema. Por consiguiente, de la precisión y exactitud de las señales adquiridas, depende el desempeño de la ley de control. Por tal motivo, se requiere un sistema auxiliar de equipos que permita sensar las variables de control definidas para el SICP: Temperatura en puntos estratégicos a lo largo del tubo, señales de corriente y tensión en la carga; las cuales que deben ser adquiridas con un alto grado de confiabilidad bajo las condiciones de temperatura e interferencia electromagnética en un proceso de inyección de corriente.

Por lo tanto, para el sistema de adquisición de señales de temperatura se optó por utilizar un sistema basado en un microcontrolador Motorola, el cual tiene 8 canales de entrada analógica, además, se elaboraron filtros pasabajos para eliminar las componentes de ruido. También, para la adquisición de las señales de corriente y de tensión de salida del SICP se

recomienda utilizar sondas de efecto Hall, dimensionadas para adquirir correctamente los niveles de tensión y corriente en la carga (tubería de producción). El sistema de adquisición de datos se comunica con el PC de acuerdo al protocolo mostrado en la figura B4.

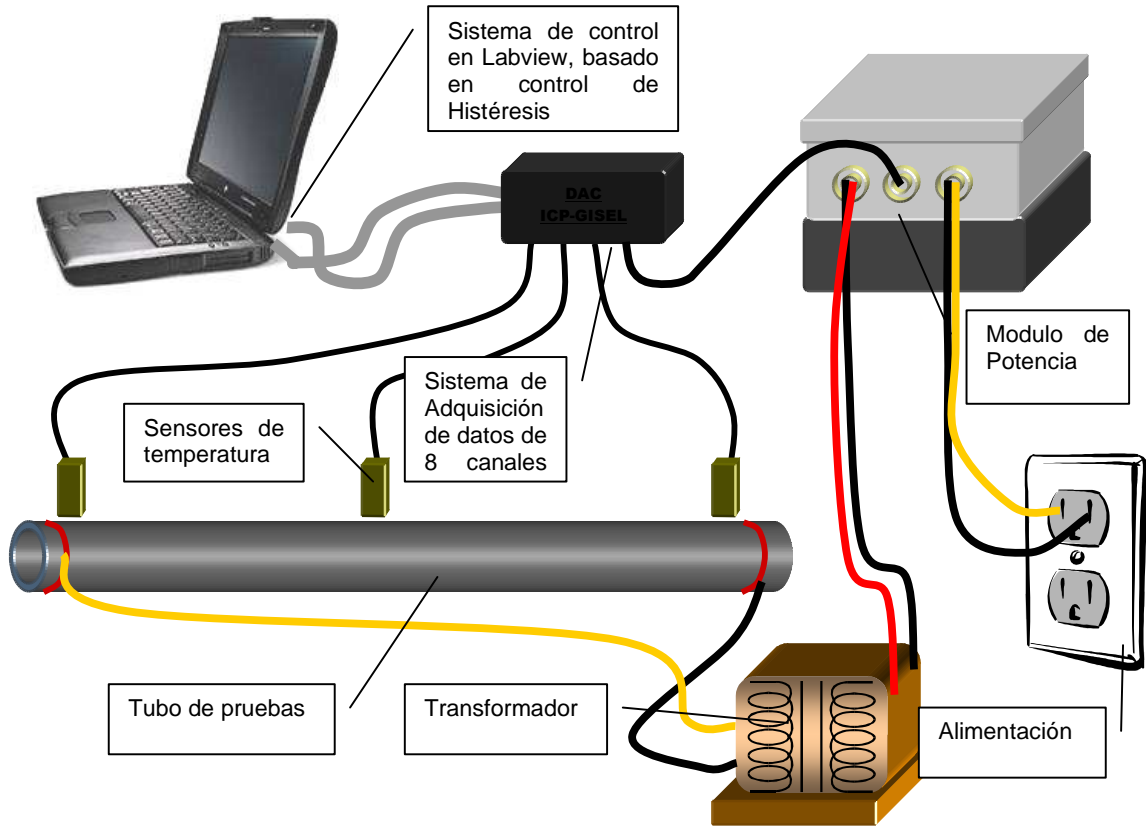
Figura B4. Protocolo de comunicaciones del prototipo con el PC.



Fuente: El Autor

Finalmente, se presenta un esquema general del montaje que se puede presentar en el laboratorio, ver figura B5.

Figura B5. Esquemático del Sistema de Inyección de Corriente para Pruebas en Tubería.



Fuente: El Autor