

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Diseño y construcción de un prototipo de calentador eléctrico a ser utilizado en el proceso de liberación de presión sobre los elementos que componen un motor hidráulico para perforación direccional de pozos petroleros

Jorge Luis Loyola Granda

Tesis de grado presentada como requisito para la
obtención del título en Ingeniería Mecánica

Quito, Junio del 2012.

**Universidad San Francisco de Quito
Colegio Politécnico**

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

Diseño y construcción de un prototipo de calentador eléctrico a ser utilizado en el proceso de liberación de presión sobre los elementos que componen un motor hidráulico para perforación direccional de pozos petroleros

Jorge Luis Loyola Granda

Omar Aguirre, M.Sc.
Director de Tesis y
Miembro del Comité de Tesis

Laurent Sass, Ph.D.
Miembro del Comité de Tesis

Pedro Meneses, M.Sc.
Miembro del Comité de Tesis

Santiago Gangotena G., Ph.D.
Decano del Colegio de Ciencias e Ingeniería

Quito, Junio 2012

© Derechos de autor
Jorge Luis Loyola Granda
2012

A mi papito Dios,

A mis papás, especialmente a mi madrecita santa, Alicia,

quienes me han brindado su incondicional apoyo y quién nunca me ha fallado y ha estado entregada a mí desde incluso mucho antes de darme la vida,

a mi hermana, Luisita María,

quién ha sido la inspiración y la fortaleza de todo lo que emprendo, aunque ya está muy grande siempre la recuerdo como mi churonita chiquita y la llevo a donde voy.

AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis, Omar Aguirre, a Halliburton Ecuador y en especial a todo el personal de Mantenimiento de Sperry Drilling, a mis padres, a mis amigos, quienes colaboraron en cada parte de lo que constituyó el desarrollo de este proyecto.

A mi fiel amigo, Daniel Vera y a su familia, quién me ayudó en la búsqueda de materiales para agilizar el proceso de construcción del prototipo.

Al Señor Napoleón Fiallos, quién me ayudó con la construcción de las resistencias utilizadas, y al sinnúmero de modificaciones que tuvimos que realizar para obtener el diseño final.

RESUMEN

El diseño y construcción de este prototipo de calentador eléctrico tiene la finalidad de transferir calor y por medio del fenómeno físico de la dilatación térmica lograr separar las piezas que componen un motor de perforación direccional de pozos petroleros.

Ésta tesis se basa en la necesidad de aplicar calor evitando la llama de oxígeno y acetileno que se ha venido utilizando por la gente de mantenimiento de Sperry Drilling de Halliburton por lo peligroso que es el manejo de estas fuentes de energía, la contaminación que generan y el costo elevado de su uso. Para ello se ha tomado la iniciativa de reemplazar dicho método de calentamiento de quema de combustibles por uno de calentamiento eléctrico controlable en tiempo y temperatura, ya que como máximo, según las especificaciones del motor; se desea llegar a 300 °C y aplicando este nuevo método se puede llegar a esta temperatura con facilidad. En el desarrollo de este prototipo se centra este proyecto de tesis a realizarse en la base Coca de Halliburton.

El proyecto culmina con las pruebas de funcionamiento y operatividad en el manejo por parte de los especialistas de la máquina con la que se aflojan las piezas del motor llamada *TorqueMaster®*.

ABSTRACT

The design and construction of this electric heater prototype has the aim of transferring heat throughout the physical phenomenon of thermic dilation in order to separate the pieces that compose a directional perforation engine of oil wells.

In this project, there is the necessity of applying heat avoiding the oxygen and acetylene flame that has been used by the maintaining staff of Sperry Drilling of Halliburton, due to the danger in using these sources of energy, the contamination they generate, and the high cost of their use. For this reason, it has been considered to replace the heating method of burning the combustible, for a method of controllable electric heating in time and temperature. According to the engine specifications, as a maximum, it needs to reach 300 C, and in applying this new method, this temperature can be easily reached. The development of this prototype is held in the Coca base of Halliburton.

The project ends with the performance and operation tests for the management of this method performed by the specialists who operate the machine. The machine which is used to loosen the pieces of the engine is called *TorqueMaster®*.

TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I FUNDAMENTOS TEÓRICOS	3
1.1 Calentamiento por resistencia eléctrica	3
1.1.1 Controladores para resistencia eléctrica	5
1.2 Teoría de dilatación y compresión térmica de los metales	7
1.2.1 Dilatación lineal	7
1.2.2 Dilatación superficial	8
1.2.3 Dilatación cúbica	8
1.3 Transferencia de calor	10
1.3.1 Mecanismos de transferencia de calor	10
1.3.1.1 Conducción	10
1.3.1.2 Convección	11
1.3.1.3 Radiación	11
1.3.2 Equilibrio térmico	12
1.3.3 Calor específico y capacidad térmica	13
1.4 Introducción a la perforación direccional de pozos petroleros y máquina de torque TorqueMaster®.	15
1.4.1 Tipos de torres de perforación	15
1.4.1.1 Componentes de una sarta de perforación direccional	17
1.4.2 Máquina TorqueMaster®.	20
CAPÍTULO II DISEÑO Y CONCEPTUALIZACIÓN DEL PROTOTIPO	23
2.1 Proceso tecnológico	23
2.2 Dimensionamiento geométrico del prototipo	24
2.3 Balance de materiales	26
2.4 Balance de energía y parámetros eléctricos.	27
2.4.1 Determinación de la potencia total requerida.	27
2.4.2 Determinación de la pérdida de calor por radiación.	27
2.4.3 Determinación de la pérdida de calor por conducción.	28
2.4.4 Calor necesario para dilatar el componente del motor en cuestión (CV coupling).	29
2.5 Cálculos	32
2.5.1 Temperatura a la cual inicializar el controlador	32
2.5.2 Resistencias	35
2.5.3 Temperatura en las manijas	36
2.6 Simulación por el método de los elementos finitos.	37

CAPÍTULO III	CONSTRUCCIÓN DEL CALENTADOR	40
3.1	Disponibilidad de materiales	40
3.1.1	Resistencia eléctrica	40
3.1.2	Fibra de vidrio aislante	40
3.1.3	Estructura de las manijas o agarraderas.	40
3.1.4	Sistema de control automático	40
3.1.5	Contactores	40
3.1.6	Cable siliconado con fibra de vidrio.	40
3.2	Construcción del prototipo	41
CAPÍTULO IV	CALENTAMIENTO CON EL PROTOTIPO	48
4.1	Operación del prototipo.	48
4.2	Prueba de liberación de presión.	51
4.3	Discusión	52
CAPÍTULO V	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
REFERENCIAS		57
ANEXOS		58
ANEXO A		58
A.1	Manual de uso NEW OHM 2012	58
A.2	Reporte SolidWorks®, Análisis por elementos finitos.	59
ANEXO B		60
B.1	Catálogo Controlador eléctrico.	60
B.2	Catálogo tela aislante de fibra cerámica.	61
B.3	Análisis de riesgo previo al trabajo en Base Coca Halliburton	62

LISTA DE FIGURAS

1.1	Esquema del experimento de Gravesande	9
1.2	Clases de taladros. Perforación en tierra y sobre mar	15
1.3	Cuadro de los diferentes tipos de Rig's	16
1.4	Tipos de brocas de perforación	17
1.5	Partes principales de un motor de perforación direccional	18
1.6	Configuración de estator y rotor dentro de un motor de fondo	19
1.7	Componentes de una sarta direccional básica	20
1.8	Sarta de perforación global	20
1.9	Máquina de torque TorqueMaster® y componentes principales. Vista frontal	21
1.10	Máquina de torque TorqueMaster® y componentes principales. Vista lateral	22
1.11	Motor ensamblado	22
1.12	Componentes con torque aplicado del motor	22
2.1	Esquema general del prototipo	24
2.2	Pared compuesta	28
2.3	Identificación del CV coupling	29
2.4	Medidas del CV coupling	31
2.5	Análisis por elementos finitos. SolidWorks®.	38
2.6	Vista frontal análisis.	39
2.7	Vista lateral análisis.	39
3.1	Alambre resistón	41
3.2	Tubo de acero inoxidable	41
3.3	Cromita aislante	42
3.4	Resistencia blindada en forma de medias lunas	42
3.5	Lámina de acero inoxidable para soporte de las resistencias blindadas	43
3.6	Lámina de acero inoxidable para soporte de las resistencias blindadas armada	43
3.7	Acople de lana de vidrio	44
3.8	Instalación de resistencia blindada de lámina de acero inoxidable	44
3.9	Suelda de cobre en las bisagras	44
3.10	Sistema de resistencia de medias lunas armada	45
3.11	Vista por delante y por detrás del controlador ensamblado en la caja de control	45
3.12	Parte interna de la caja de control, contactores + cable termocupla (gris)	46
3.13	Diseño y construcción de las manijas que sostendrán las resistencias	46
3.14	Esquema global del proyecto	47
4.1	Esquema del funcionamiento del prototipo	49
4.2	Prueba en Base Coca	50
4.3	Prueba 2 en Base Coca	51
4.4	Resultado de uso de New Ohm 2012, CV shaft liberado	52
4.5	Enfriamiento de las resistencias luego del uso	53

LISTA DE TABLAS

1	Tabla de emisividad térmica de las aleaciones	12
2	Tabla de calores específicos de algunos materiales	14
3	Datos teóricos	26
4	Tabla de coeficientes de dilatación lineal	30

INTRODUCCIÓN

La dilatación térmica por medio de calentamiento eléctrico es un proceso de transferencia de calor con el que ocurre un cambio en el arreglo molecular, esto se logra gracias a la ganancia de energía y la agitada vibración de los átomos del material que recibe el calor. Actualmente hay una variedad de métodos de calentamiento de metales, todos manejados por un avanzado sistema de control, esto gracias a la serie de sistemas electrónicos que se han podido incorporar, a tal punto de manejar grandes voltajes, corrientes, frecuencias, entre otras variables para mantener las cosas funcionando de manera precisa. Gran parte de los calentadores habituales emplean la quema de combustibles produciéndose gases de combustión, los mismos que tienen efectos severos sobre el ambiente.

Utilizar la energía eléctrica para generar calor a partir de ella consiste en un proceso en el que no existe emanación de gases, ni suciedad, polvos o ceniza como ocurre durante otros procesos de calentamiento en que utilizan combustibles, o en los que la pieza está expuesta a atmósferas contaminantes.

En base principal de la preservación ambiental, se ha propuesto diseñar y construir un calentador eléctrico dotado de un óptimo sistema de control de temperatura con un nombre comercial NEW OHM 2012 para comprobar que posea la capacidad de transferir la cantidad de calor deseada bajo las condiciones específicas y deducidas a partir de la aplicación de ecuaciones de diseño y transferencia de calor hacia los componentes de un motor de perforación direccional de pozos petroleros, para que por medio de dilatación térmica se logre aflojar y desarmar sus componentes expuestos a ambientes hostiles como grandes sobre-torques, temperaturas altas y lodos de perforación agresivos.

La liberación de presión sobre los elementos que componen los motores para perforación direccional de pozos petroleros en la base Coca de Halliburton es un proceso bastante automatizado, para ello se utiliza una máquina de torque hidráulico llamada *TorqueMaster®* que por medio de pistones activan un actuador, se genera agarre y giro en grandes presiones a las partes que componen un motor. Una vez que el motor regresa haciendo una perforación es necesario darle mantenimiento. En este punto debe ser separado en sus componentes y cada una de ellas se acopla a la siguiente por medio de pines roscados y acoples, en muchos de los casos para “destorquear” es preciso aplicar calor de una fuente de oxígeno y acetileno por medio de una llama sobre la parte ajustada para generar movimiento molecular y lograr que se libere dicho elemento. Con el desarrollo de este proyecto se pretende atacar la utilización de energía calórica por quema de combustibles, transporte y almacenaje de los tanques que los contienen, basándonos en el pilar fundamental que es el de contribuir hacia la seguridad industrial.

En el Ecuador, existe La Ley de Prevención y Control de Contaminación Ambiental que exige un amplio control de emisiones. Identificados con esto, Halliburton Ecuador, haciendo mérito al compromiso de mejora continua de sus procesos e identificados con el desarrollo ambiental sustentable del negocio, da la apertura a esta mejora.

Esta tesis consta de cinco capítulos dentro de los cuales se explican los fundamentos teóricos detrás del principio de calentamiento eléctrico, su aplicación en el proceso de separar los componentes del motor de perforación, el diseño teórico del prototipo propuesto, el método de construcción del mismo, y los resultados y conclusiones pertinentes.

Se espera que este proyecto cumpla con los requerimientos y atraiga a las demás filiales de la multinacional Halliburton a aplicar este principio para reemplazar el existente. Este proyecto de grado abarca no sólo conocimientos de ingeniería mecánica, sino otras ramas de la ingeniería como la eléctrica y electrónica.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 Calentamiento por resistencia eléctrica

En el proceso mediante el cual un material conductor percibe el paso o circulación de corriente eléctrica sobre su cuerpo, se genera un choque intenso de los átomos que lo componen, este choque descontrolado y desordenado se expresa elevando la temperatura del mismo (Ordoñez, 2004). A este material conductor se lo llama resistencia eléctrica. Mientras mayor sea el valor de la resistencia eléctrica que presente un cuerpo al paso de corriente, menor será la ganancia de calor durante el proceso.

Un calentador eléctrico es un dispositivo que produce energía en forma de calor a partir de la energía eléctrica. Para el desarrollo de este proyecto se usa un calentador de tipo “resistivo” y éste utiliza el efecto Joule para generar calor, dicho efecto constituye el fenómeno por el cual el paso de corriente eléctrica a través de un conductor causa aumento en la temperatura de dicho cuerpo conductor debido al choque de los átomos que lo componen. (Energía cinética de los electrones se transforma en calor).¹

George Ohm desarrollo la ecuación [1.1] que describe la igualdad de la intensidad de corriente como:

$$I = \frac{V}{R} \quad [1.1]$$

¹ Tomado del libro: Física 2, Tippens, Pág. 155.

Donde:

$I =$ intensidad de corriente [A],

$V =$ voltaje [V],

$R =$ resistencia eléctrica presentada al paso de corriente I , [Ω]

Un sistema simple de calentamiento por resistencia eléctrica básicamente comprende una fuente de electricidad y una resistencia. En este prototipo se intenta que la fuente de electricidad suministre el poder necesario a la resistencia para que el calentamiento sea por parámetros controlados, en cuanto a tiempo y temperatura.

Resistividad: El mismo Ohm, comprobó que “la resistencia de un conductor a cierta temperatura es directamente proporcional a su longitud e inversa a su área de sección, y depende del material que está hecho” (Tippens, 1992). De tal manera que a determinada temperatura la resistencia de cierto conductor puede calcularse a partir de:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad [1.2]$$

Donde ρ es la resistividad, l es la longitud y A es el área transversal.

Para la mayor parte de los conductores metálicos la resistencia tiende a incrementarse mientras la temperatura aumenta ya que al momento de aumentarse el movimiento atómico se obstaculiza más el paso de corriente. Experimentos demuestran que la variación en la resistencia es proporcional a la resistencia inicial y al cambio en la temperatura. Es la dilatación térmica lineal en términos eléctricos. Se escribe:

$$\Delta R = \alpha R_0 * \Delta t \quad [1.3]$$

Donde α es una característica del material y se la conoce como *coeficiente de temperatura de la resistencia*, y representa el cambio en la resistencia por unidad de resistencia por cada grado que cambia en la temperatura.²

² Tomado del libro: Física 2, Tippens, Pág. 247.

1.1.1 Controladores para sistemas de calentamiento por resistencia. Para poder explicar el mecanismo de control, vamos a referirnos a la aplicación en cuestión de este proyecto de tesis, un calentador eléctrico que usa electricidad para transferir calor hacia componentes externos. En operación manual, la cantidad de calor que se transfiere depende del calor generado en las resistencias. Para controlar la temperatura manualmente, el operador observaría la temperatura indicada con una pistola térmica y la compararía con la temperatura deseada, desconectaría o conectaría el paso de corriente hacia las resistencias para admitir más o menos calor. Bajo el control automático, el controlador de temperatura llevaría exactamente la misma función. La señal de medición desde las resistencias hacia el controlador es medida por un sensor sensible a los cambios de temperatura o termocupla, estos cambios son leídos continuamente y comparados con el valor de consigna (set point) ingresado en el controlador al inicio de la operación.

Basándose en una comparación de señales, el controlador automático puede deducir si la señal de medición está sobre o debajo del valor de set point y ajusta, suspende o enciende el paso de corriente hacia las resistencias hasta que la temperatura medida mantenga un rango de tolerancia de \pm cierto número al valor de consigna. Este rango es variable y depende de las características en la variedad de precisión que traen los diferentes tipos y marcas de controladores.

Se distinguen dos grandes tipos de sistemas de control, uno de lazo abierto y otro de lazo cerrado. Un controlador del de lazo abierto es aquel en el cual la acción de control es independiente de la salida, por otro lado, un sistema de control de lazo cerrado es aquel en el que la acción de control es en cierto modo depende de la salida.³

Los sistemas de control el lazo abierto tienen rasgos relevantes, tienen la habilidad para ejecutar un mando con exactitud y está delimitado por su calibración, no presentan

³ Tomado de la pág. Web: <http://varper-tech.com/articulo.php?idart=5>.

problemas de inestabilidad.⁴ En segundo lugar, tenemos los sistemas de control en lazo cerrado, son comúnmente conocidos como sistemas con retroalimentación y es el sistema a utilizar en el desarrollo de este proyecto.

Un ejemplo de controlador en lazo abierto puede ser una olla arrocera, que está controlado por un regulador de tiempo, este tiempo requerido para cocer el arroz debe ser ingresada por el usuario quien no forma parte del sistema. El control sobre la calidad del arroz cocido no interviene, ya que la cocción está interrumpida por la cantidad de tiempo con la que la olla trabaje, este tiempo constituye tanto la entrada como la acción del control. Contrariamente, un ejemplo de control en lazo cerrado puede ser un mecanismo de navegador automático y el barco que controla, su misión es mantener una fija dirección del barco, a pesar de los cambios atmosféricos. El sistema cumple con su tarea midiendo continuamente la dirección y ajustando automáticamente timón, motores, marchas, entre otras; de tal manera que la dirección instantánea coincida con la especificada dentro de un ligero margen de error.

Actualmente, los lazos de control son un componente fundamental para la manufactura próspera y económicamente estable de casi cualquier tipo de artículo, desde acero hasta productos alimenticios.

⁴ Tomado de la pág. Web: <http://www.tempcomexico.com/>

1.2 Teoría de la dilatación y compresión térmica de los metales.

Todo sólido al ser calentado aumenta de volumen, fenómeno que es conocido con el nombre de dilatación térmica, el cuerpo que lo experimenta se dice que ha sido dilatado. Los distintos incrementos de dilatación dependen de la naturaleza del cuerpo calentado y la temperatura a la que han sido expuestos.⁵

La idea de la temperatura puede explicarse de forma intuitiva por las sensaciones de frío o calor que se experimentan al tocar un cuerpo. Cuando el sentido del tacto indica que un cuerpo está más caliente que otro, tal sensación se expresa diciendo que el primero posee una temperatura mayor que el segundo. Pero la fiabilidad de los sentidos para comparar temperaturas es un poco limitada, ya que se trata de percepciones subjetivas que pueden estar muy condicionadas por diversos factores.

Cuando un cuerpo experimenta un incremento de temperatura se debe a que ha recibido una cantidad de energía y, por el contrario, si su temperatura desciende se debe a que ha cedido energía a otro cuerpo o al medio exterior. Al poner en contacto dos cuerpos de distinta temperatura, el más caliente cede energía en forma de calor al cuerpo de menor temperatura hasta que el valor térmico de ambos se iguala en una situación denominada equilibrio térmico.

1.2.1 Dilatación lineal. La dilatación de los cuerpos siempre se produce en las tres dimensiones del espacio, de forma que lo que aumenta realmente es el volumen. Sin embargo, cuando se trata de alambres o varillas muy finos, se considera que la dilatación solamente se produce en la dimensión longitudinal, despreciando la producida en las otras dos, de magnitud muy inferior.

En intervalos de temperaturas comprendidas entre 0°C y 100°C, la dilatación lineal es proporcional al aumento de temperatura. Así, “puede verse que cuando se duplica o

⁵ Tomado del libro: Física Universitaria 1, Sears-Zemansky, Young. Pág. 646, 647,

triplica la temperatura de una varilla, el alargamiento de este igual se multiplica por dos o por tres” (Sears, Zemansky 2004).

Coeficiente de dilatación líneal (λ): Se denomina coeficiente de dilatación líneal de un sólido al aumento de longitud que experimenta la unidad de longitud.

$$\lambda = \frac{l-l_0}{l_0 t} \quad [1.4]$$

Siendo: l , la longitud a temperatura t a la que se calienta el sólido; l_0 la longitud del sólido a 0°C ; t la temperatura a la que se calienta el cuerpo.

1.2.2. Dilatación superficial. Se puede hablar de dilatación superficial, al igual que ocurría con la líneal, cuando el cuerpo que se calienta (una lámina) posee un grosor despreciable frente a su superficie.

Coeficiente de dilatación superficial (β): Se denomina coeficiente de dilatación superficial al aumento de la superficie que experimenta la unidad de superficie inicial por cada grado de incremento de la temperatura.

$$\beta = \frac{S-S_0}{S_0 t} \quad [1.5]$$

Siendo: S la superficie a los $t^\circ\text{C}$ a los que se calienta el sólido; S_0 la superficie del sólido a 0°C ; t los grados centígrados a los que se calienta.

El coeficiente de dilatación superficial tiene valor de doble magnitud que el coeficiente de dilatación líneal:

$$\beta = 2\lambda \quad [1.6]$$

1.2.3. Dilatación cúbica. En sentido estricto y directamente aplicable a este proyecto de tesis, la dilatación cúbica es la única que de las mencionadas tiene existencia real. Se

puede comprobar mediante la experiencia del anillo de Gravesande⁶ como se ilustra en la figura 1.1.

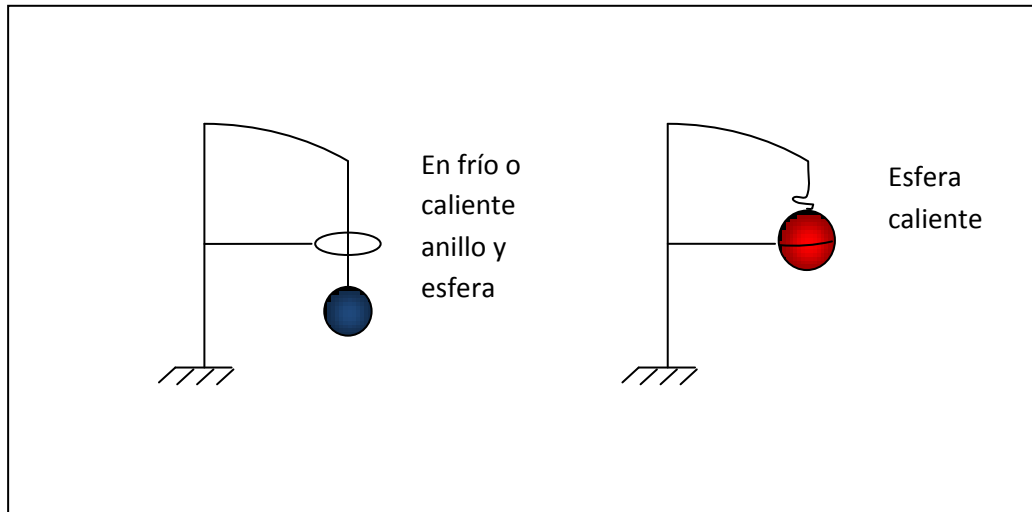


Fig. 1.1 Esquema del experimento de Gravesande.

- Si sólo se calienta la esfera, ésta no pasa por el anillo.
- Si se calienta ambos cuerpos, la esfera pasará por el anillo.
- Es indiferente que la esfera sea maciza o hueca, pues los sólidos huecos se dilatan como si fueran macizos.⁷

De la experiencia se extrae la conclusión de que los sólidos se dilatan al ser calentados y se contraen al enfriarse.

Coeficiente de dilatación cúbica (α): El coeficiente medio de dilatación cúbica de los sólidos es el aumento que experimenta la unidad de volumen inicial por cada grado de incremento en la temperatura. Su fórmula está dada por:

$$\alpha = \frac{V - V_0}{V_0 t} \quad [1.7]$$

Siendo: V el volumen a los t °C a los que se calienta el sólido; V_0 el volumen del sólido a 0 °C; t los grados centígrados a los que se calienta.

⁶ Tomado del libro: Nueva Enciclopedia Autodidáctica, Lexus Editores. Pág. 32.

⁷ Tomado del libro: Nueva Enciclopedia Autodidáctica, Lexus Editores. Pág. 32.

El coeficiente de dilatación cúbica es de valor triple que el de dilatación lineal:

$$\alpha = 3\lambda \quad [1.8]$$

1.3 Transferencia de calor.

El calor es una clase de energía que puede definirse como el intercambio que tiene lugar como resultado de la existencia de una diferencia o gradiente de la temperatura. Los efectos que produce el calor en la materia se pueden clasificar básicamente en:

- Dilataciones y aumentos de volumen, abordados en el sub-capítulo anterior.
- Cambios de estado (no aplicables a este proyecto de tesis).

La cantidad de calor que necesitará un cuerpo para alterar su temperatura dependerá directamente de su naturaleza, su masa y la temperatura que se pretenda elevar.⁸ Es así que la cantidad de calor está gobernada por mecanismos y sus respectivas fórmulas que se van detallando a continuación.

1.3.1. Mecanismos de transferencia de calor. Para que se produzca la transferencia o intercambio de calor entre los cuerpos existen principalmente dos mecanismos: la conducción y la radiación.⁹ Cuando el proceso de conducción va asociado a un movimiento macroscópico de un medio fluido se denomina convección.

1.3.1.1 Conducción

Se llama conducción al intercambio de calor producido de un cuerpo a otro con temperatura más baja y con el que se encuentra en contacto. También se puede producir entre distintas partes de un mismo cuerpo dotadas de temperaturas diferentes, que es el caso aplicable a este proceso, en el que el calor generado hacia las paredes del motor de

⁸ Tomado del libro: Física Universitaria 1, Sears, Zemansky. Pág. 651.

⁹ Tomado del libro: Nueva Enciclopedia Autodidacta, Lexus Editores. Pág. 34.

perforación es conducido de manera directa, es decir, hay una transferencia de energía desde las moléculas más energéticas a las más frías.

Deseamos transferir una cantidad de calor dQ por la resistencia eléctrica en un tiempo dt , la razón de flujo de calor es dQ/dt . Se llama a esto *corriente de calor o pérdida de calor*, denotada por H . Se observa por medio de experimentos que H es proporcional al área transversal A de la resistencia y la diferencia de temperatura ($T_{caliente} - T_{fria}$), e inversamente proporcional a la longitud total de la resistencia L . Anteponiendo una constante de proporcionalidad k llamada *conductividad térmica del material*, tenemos:

$$H = \frac{dQ}{dt} = k * A * \frac{T_c - T_f}{L} \quad [1.9]$$

Donde $\frac{T_c - T_f}{L}$ corresponde a la diferencia de temperatura por unidad de longitud y es llamado *gradiente de temperatura*. El valor de la conductividad térmica k depende exclusivamente del material, mientras mayor es la conductividad térmica son mejores conductores del calor.¹⁰

1.3.1.2 Convección

La convección es un mecanismo de transferencia de calor que se da cuando un fluido de temperatura conocida se pone en contacto con una superficie sólida que posee una temperatura diferente. Dos tipos, natural y forzada. No es el mecanismo aplicable al tema por tal motivo no se entra en más detalle.

1.3.1.3 Radiación

La radiación térmica es un tipo de transferencia de calor por ondas electromagnéticas como luz visible, infrarrojo y radiación ultravioleta. Se basa en el hecho de que todo cuerpo caliente emite una radiación en forma de ondas electromagnéticas. Las propiedades de esta radiación dependen de la temperatura de la superficie, su naturaleza, la longitud de onda y la dirección en que se propague.

¹⁰ Tomado del libro: Fundamentos de Transferencia de calor, Incoprera.

La razón de radiación de energía de una superficie es proporcional a su área A , y aumenta rápidamente con la temperatura. “Este mecanismo también depende de la naturaleza, esta dependencia se describe con una cantidad llamada *emisividad*, un número adimensional entre 0 y 1” (Sears, Zemansky, 2004). De tal manera, la corriente de calor por radiación es:

$$H = \frac{dQ}{dt} = A * e * \sigma * T^4 \quad [1.10]$$

Donde σ es la constante física fundamental llamada *constante de Stefan-Boltzman*. Esta relación se llama ley de Stefan-Boltzman¹¹. Su valor numérico es constante:

$$\sigma = 5.670400 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 * K} \quad [1.11]$$

Como podemos ver en la Tabla 1, la emisividad para la resistencia de cromo – níquel a utilizar en el desarrollo de este proyecto viene dado:

Materiales (Metálicos)	Temperatura °C.	Emisividad
Aleaciones		
20-Ni, 24-CR, 55-FE, Oxid.	200	0.9
20-Ni, 24-CR, 55-FE, Oxid.	500	0.97
60-Ni, 12-CR, 28-FE, Oxid.	270	0.89
60-Ni, 12-CR, 28-FE, Oxid.	560	0.82
80-Ni, 20-CR, Oxidised	100	0.87
80-Ni, 20-CR, Oxidised	600	0.87
80-Ni, 20-CR, Oxidised	1300	0.89

Tabla #1. Tabla de emisividad térmica.¹²

1.3.2 Equilibrio térmico. Esta es una de las partes más importantes sobre las cuales gira este estudio, es el punto térmico adecuado para lograr que la transferencia de calor cumpla el objetivo de aflojar mediante la dilatación los cuerpos en exposición. Cuando estos dos cuerpos dotados de diferentes temperaturas se ponen en contacto, el más

¹¹ Tomado del libro Física Universitaria 1, Sears, Zemansky. Pág., 669.

¹² Tomado de la pág. Web: http://www.zytemp.com.mx/zytemp/contenido/wp-content/uploads/2007/01/tablas_de_emisividad.pdf

energético efectúa un paso de energía al de menor temperatura por medio del mecanismo de conducción, por lo tanto se calentará. La transferencia o intercambio concluirá cuando los dos cuerpos adquieran igual o muy cercana temperatura, condición necesaria para que se establezca el equilibrio térmico.

Para alcanzar este equilibrio la resistencia eléctrica que emite calor por el paso de corriente ha de haber cedido la misma cantidad de calor o una cantidad relativamente igual que la absorbida por las paredes del motor.

1.3.3 Calor específico y capacidad térmica. La cantidad de calor (Q) que ha de aplicarse a un cuerpo cuya masa es m para elevar su temperatura actual t_1 hasta t_2 viene dada por la siguiente expresión:

$$Q = m * c * (t_2 - t_1) \quad [1.12]$$

La constante de proporcionalidad c , “es el calor específico de un cuerpo, un parámetro que depende de su naturaleza y constitución” (Sears, Zemansky, 2004). La cantidad de calor Q representa el calor requerido para aumentar la temperatura de la masa m desde la temperatura t_{fria} hasta la $t_{caliente}$ aplicable en nuestro caso antes y después del fenómeno de la transferencia de calor, es decir, la cantidad de calor en la resistencia, y la cantidad de calor al elemento del motor a calentar.

Como se muestra en la tabla 2, se observa el valor del calor específico para el material que utilizaremos, dicho material es llamado *resiston*, a una composición aproximada de 80Ni -20Cr, por tal motivo, se ubicará la relación exacta para que en esas proporciones obtengamos el valor de c más aproximado para el desarrollo de las ecuaciones de calor del proyecto.

Calor específico (capacidad calorífica específica) (25 °C, 1 atm=101 325 Pa)

Material	J/(kg·K)	Material	J/(kg·K)
Aceite vegetal	2000	Hielo (-10 °C a 0 °C)	2093
Agua (0 °C a 100 °C)	4186	Hierro/Acero	452
Aire	1012	Hormigón	880
Alcohol etílico	2460	Latón	380
Alcohol metílico	2549	Litio	3560
Aluminio	897	Madera	420
Amoniaco (líquido)	4700	Magnesio	1023
Arena	290	Mármol	858
Asfalto	920	Mercurio	138
Azufre	730	Metano (275 K)	2191
Benceno	1750	Níquel	440
Calcio	650	Nitrógeno	1040
Cinc	390	Oro	129
Cobre	387	Oxígeno	918
Diamante	509	Plata	236
Dióxido de carbono (gas)	839	Plomo	128
Estaño	210	Potasio	750
Etilen glicol	2200	Sodio	1230
Gasolina	2220	Tejido humano	3500
Grafito	710	Tierra (típica)	1046
Granito	790	Vapor de agua (100 °C)	2009
Helio (gas)	5300	Vidrio (típico)	837
Hidrógeno (gas)	14267		

Tabla #2. Calores Específicos¹³

¹³ Tomado de la pág. Web: http://www.vaxasoft.com/doc_edu/fis/calorespec.pdf

1.4 Introducción a la perforación direccional de pozos petroleros y máquina de torque *TorqueMaster*®.

Los sistemas de perforación direccional tienen la intención de dar una desviación intencional controlada y medible desde la dirección vertical de un pozo, se lo hace siguiendo una determinada ruta establecida en términos de profundidad, inclinación con respecto a la vertical y el ángulo que existe entre la sarta y el norte de referencia establecido (azimut).

A continuación, una ligera explicación de los elementos que componen el proceso de perforación direccional de pozos, así mismo, de sus componentes.

1.4.1 Tipos de torres de perforación. Se perfora para encontrar petróleo o gas, algunas son grandes o relativamente pequeñas, se perfora sobre tierra y costa afuera, para este fin y condiciones se distinguen varios tipos de taladros.



Figura 1.2. Clases de taladros, perforación en tierra y sobre el mar.

Se distinguen 6 tipos básicos de taladros, que se comentan brevemente en la siguiente figura:

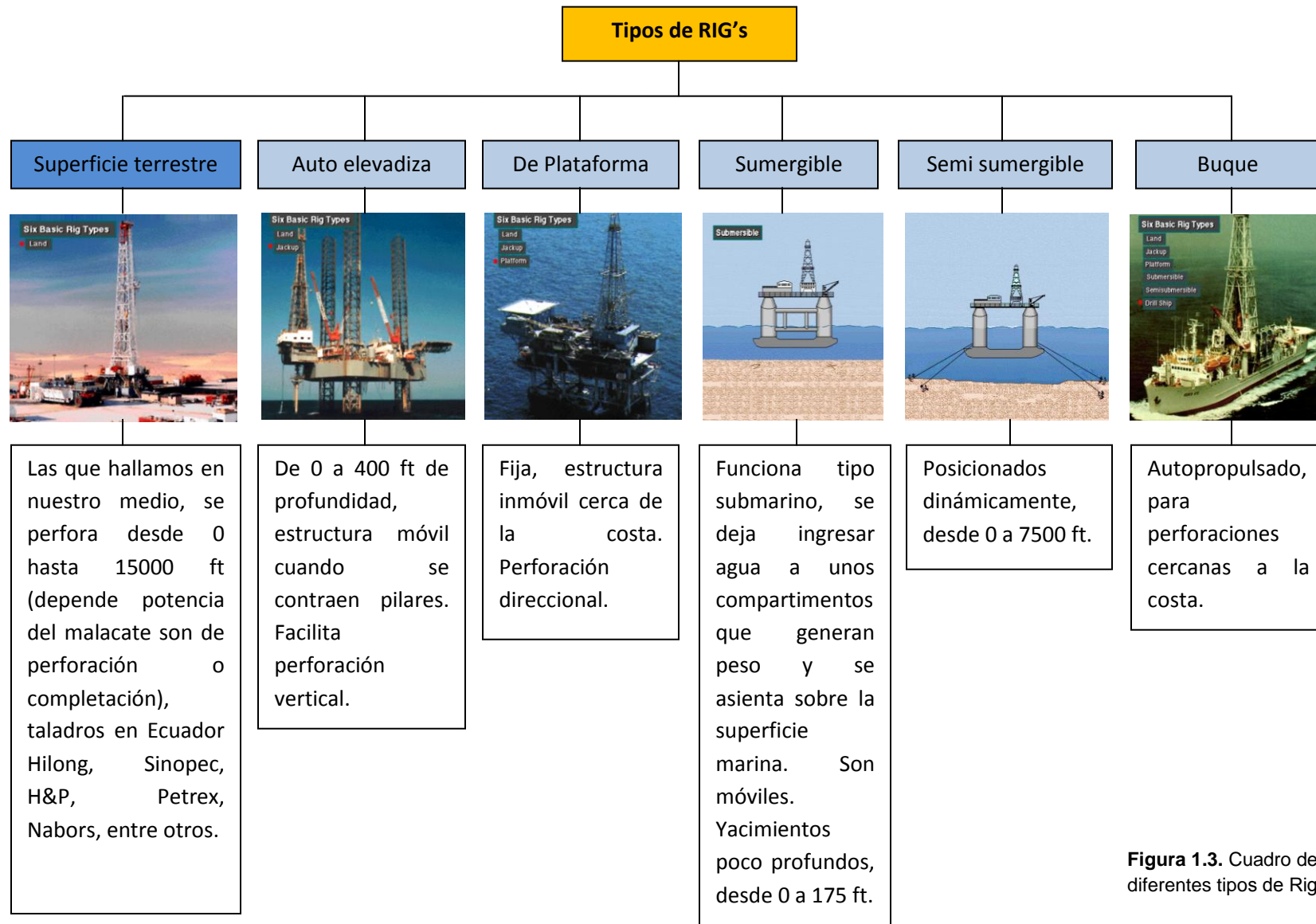


Figura 1.3. Cuadro de los diferentes tipos de Rig's

Dentro de los componentes de un taladro tenemos varios sistemas que contribuyen a la finalidad de perforar el pozo, entre ellos están sistema de potencia, sistema de levantamiento, sistema de rotación, sistema de seguridad y sistema de circulación.

El sistema de potencia junto con el de levantamiento son los encargados de levantar la sarta de perforación, mediante el sistema de rotación se juntan los tubos roscados que componen la sarta, el sistema de circulación es el medio mediante el cual, dicha sarta gana energía eléctrica y mecánica para cumplir con el fin de registrar profundidades y tener la fuerza necesaria para mover la broca respectivamente.

1.4.4.1 Componentes de una sarta de perforación direccional. Básicamente, los componentes de una sarta de perforación direccional se dividen en 3 partes importantes que son: broca, motor, y MWD.

Broca

También conocida como mecha, es uno de los elementos de mayor importancia dentro de la sarta de perforación, se ubica en el fondo y gracias a la acción del fluido de perforación cumple con la principal función que es cortar las formaciones subterráneas.

Existen dos tipos generales como se muestra en la figura 1.4, la brocas tricónicas que son utilizadas para perforar formaciones cercanas a la superficie, por su gran velocidad de giro y velocidad de perforación en suelos poco compactos. Por otro lado están las brocas tipo PDC, compuestas de cortadores de diamante, estos cortadores son materiales muy resistentes pero muy frágiles, sirven para profundidades considerables en donde las formaciones son muy compactas.



Figura 1.4. Tipos de brocas de perforación.

Motor

Es en esta parte donde se centra el foco de estudio de este proyecto de tesis, es aquí donde el prototipo diseñado tendrá uso, el motor de fondo es quien es el encargado de dar dirección a la sarta de perforación y entregar energía mecánica de giro por medio de la hidráulica mediante el fluido o lodo de perforación a la broca. Se centrará el estudio los tipos y configuración de motores de fondo utilizados por Sperry Drilling de Halliburton gracias a la facilidad y apertura al estudio de este proyecto.

Partes principales de un motor

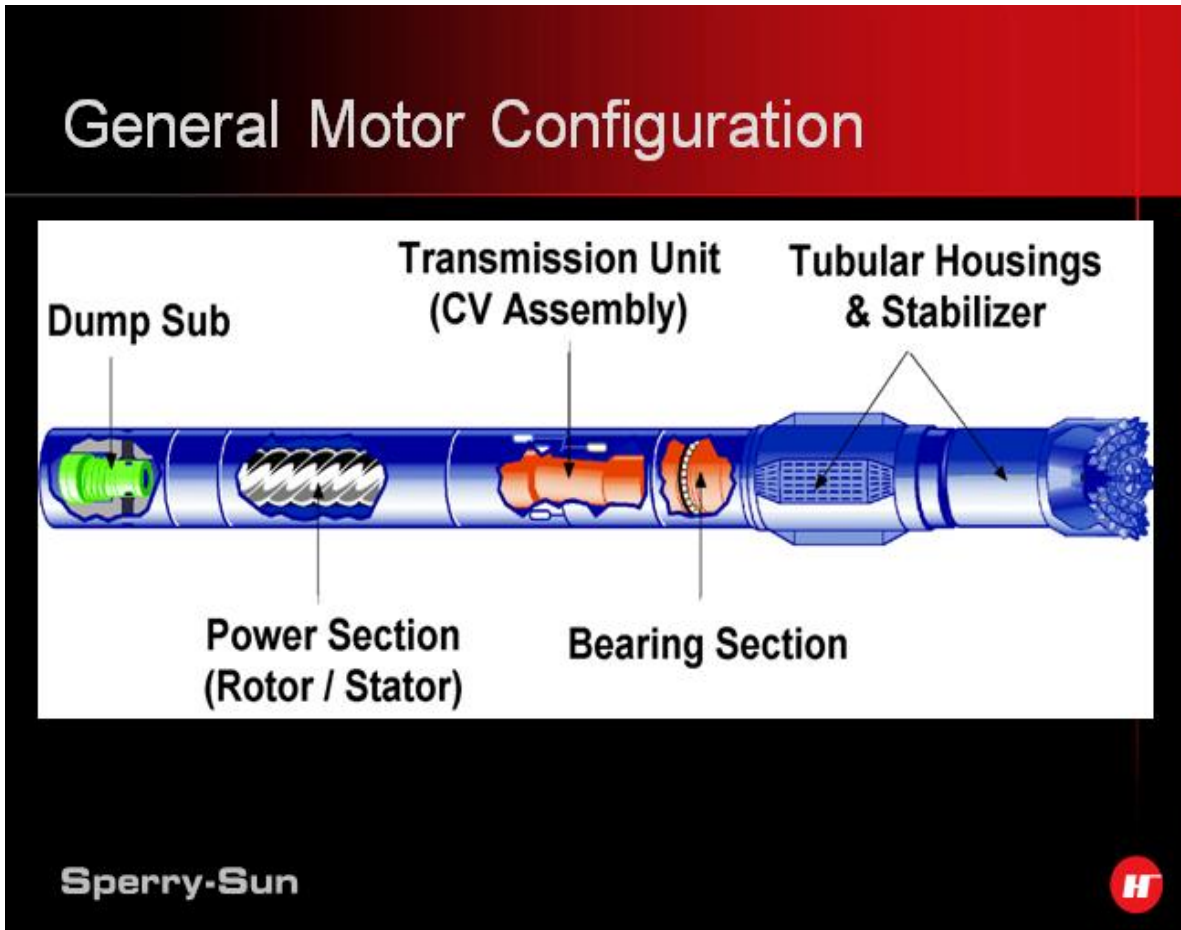


Figura 1.5. Partes principales de un motor de perforación direccional.

El fluido de perforación baja por la tubería de perforación hasta encontrarse con el motor, aquí es donde sufre grandes cambios de presión, el fluido pasa por la *power section*, en esta parte el fluido se comprime para pasar entre las cavidades del *stator* lo que empuja el *rotor* hacia un movimiento rotacional continuo (configuración mostrada en la figura 1.6), esta potencia pasa hacia la unidad de transmisión del motor, en la que se encuentra el *CV Assembly*, este elemento sufre de esfuerzo torsional a gran escala ya que por un lado recibe el torque generado del rotor y por el otro lo transmite hacia la broca (el esfuerzo que realiza para mover la broca se lo conoce como torque reactivo) por medio de la *bearing section*, que no es más que un sistema compuesto por rulimanes para evitar esfuerzos torsionales extremos que pongan en fatiga elementos como el *rotor* y el *CV shaft*. La configuración global se muestra en la figura 1.5.

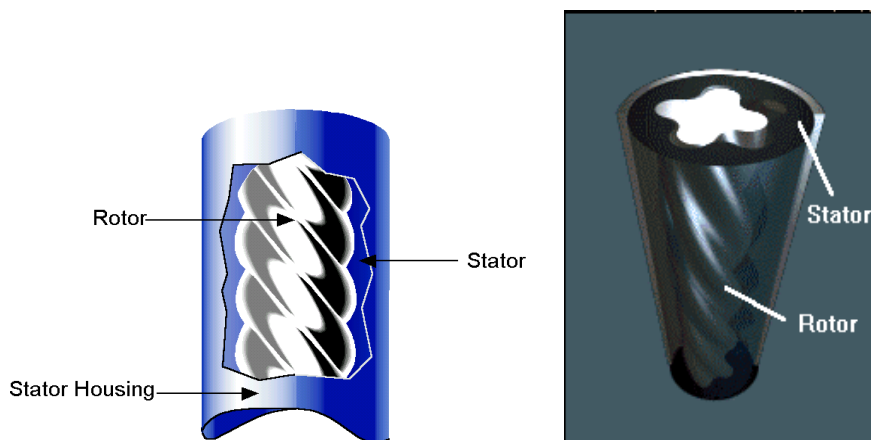


Figura 1.6. Configuración de estator y rotor dentro de un motor de fondo

Sobre *CV assembly* es donde radica el estudio global de este proyecto de tesis, es el elemento que por esfuerzos torsionales extremos sufre ajustes extremos que la máquina de ensamblaje *TorqueMaster®* no los puede separar. Esta presión acumulada generalmente se presenta en la unión con la *power section*. Sobre esa estructura física es donde se pretende aplicar calor con el prototipo de calentador eléctrico.

MWD

El MWD (measurement while drilling) es una herramienta que se compone de 2 partes importantes, la primera que es un dispositivo encargada de transformar la energía hidráulica del paso de lodo por la tubería en energía eléctrica para energizar el otro componente electrónico que es el encargado de dar datos de la ubicación exacta de la sarta de perforación. Como se muestra en la figura 1.7, el MWD compone las partes de color amarillo y azul respectivamente. En la fig. 1.8 la parte de color verde en el ensamblaje total.

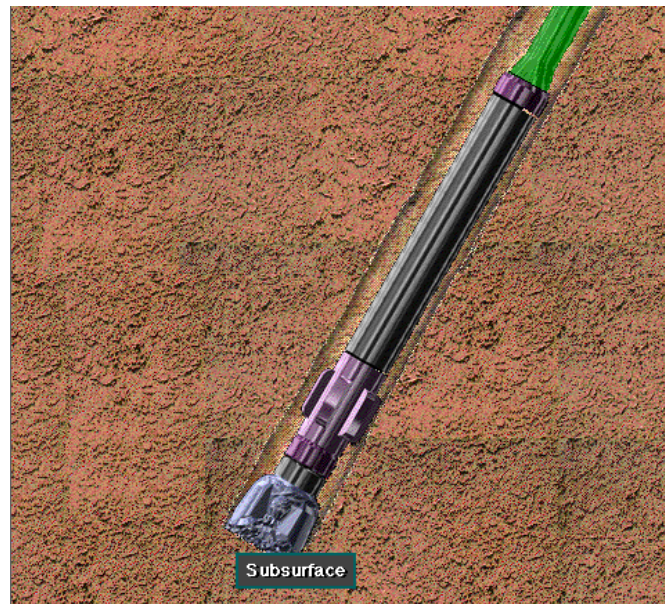
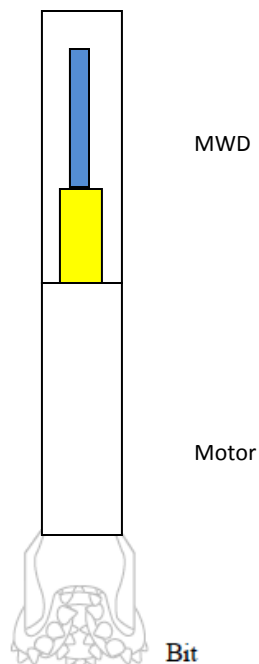


Figura 1.7. Componentes sarta direccional básica

Figura 1.8. Sarta de perforación global

1.4.2 Máquina TorqueMaster®. La máquina de torque, TorqueMaster®, es un prototipo con la firma de la empresa NOV (National Oilwell Varco), el modelo disponible en Base Coca de Halliburton es el 1689.

Es certificado que este producto ha sido diseñado, construido, armado y probado en acuerdo con los requerimientos y procedimientos de un amplio programa de seguridad y calidad respaldados bajo la norma ISO-9001.

Es una máquina (hidráulica en su mayoría) robusta, autónoma, diseñada para torquear o aflojar las conexiones de rotación sobre los componentes tubulares para la perforación de yacimientos de petróleo, gas y equipos similares. La aplicación de torsión sobre la línea central axial de la pieza de trabajo elimina cualquier movimiento de flexión alrededor de la tubería, como se puede ver en la figura 1.8 y 1.9 la rotación es radial ya que el motor se asienta completamente de manera horizontal, se apoya en bases móviles que no limitan el giro y con ello forzar la rosca.¹⁴

Sus partes principales son:



Figura 1.9. Máquina de Torque – TorqueMaster® y sus componentes principales. Vista frontal

¹⁴ Tomado de: NATIONAL OILWELL, Torquemaster® model 1689, Operation, Maintenance and Safety Manual.



Figura 1.10. Máquina de Torque – TorqueMaster®. Vista lateral

Sobre esta máquina, se van ensamblando todos los componentes del motor de la fig 1.10 y sus partes internas, aquí es donde un operador entrenado va dando la cantidad de torque adecuado a cada tipo de rosca, se puede ver un motor con pines roscados en la fig. 1.11.



Figura 1.11 y 1.12. Motor ensamblado y componentes torquados.

CAPÍTULO II

DISEÑO Y CONCEPTUALIZACIÓN DEL PROTOTIPO

2.1 Proceso tecnológico.

Se plantea el diseño y construcción de un prototipo de calentador eléctrico para transferir y producir una dilatación térmica controlada a los componentes de un motor de perforación direccional. El prototipo consta de dos resistencias de 5.15Ω c/u, tela aislante de fibra de vidrio, sistema de control automático y una estructura en forma de pinza sobre la que se abraza el motor. El volumen que abarca las resistencias al momento de abrazar el motor es de aproximadamente 7500 cm^3 , y con una altura de 30 cm y diámetro con placas cerradas de 18 cm. Para los cálculos se asumirá que el espacio que cubren las resistencias es cilíndrico. Las resistencias estarán sostenidas por una estructura en forma de tijeras, cada una con una longitud de 150 cm, para que el operador sienta comodidad en el uso, sobre una de las manijas se encontrará el sistema de control automático. Los parámetros de control serán la temperatura de alcance o el tiempo de acción. El sistema de control está ubicado en una caja metálica aparte, dentro de dicha caja se encuentra el controlador en sí, más dos contactores de 30 amperios cada uno. Las dimensiones de la caja de control son de 30 cm x 30 cm x 20 cm. La caja se encuentra aparte de la acción del prototipo, muy cercana a la fuente de alimentación eléctrica, de la misma salen los cables que conducen energía a las resistencias junto con el cable de la termocupla, dichos cables tienen una longitud aproximada de 5 m para garantizar la movilidad del calentador, el cable se encuentra enrollado junto con el calentador en un lugar seguro y cerca de la caja de control.

2.2 Dimensionamiento geométrico del prototipo.

En la figura 2.1 se presenta un esquema muy general del prototipo, posterior a ello la descripción de sus alturas y diámetros.

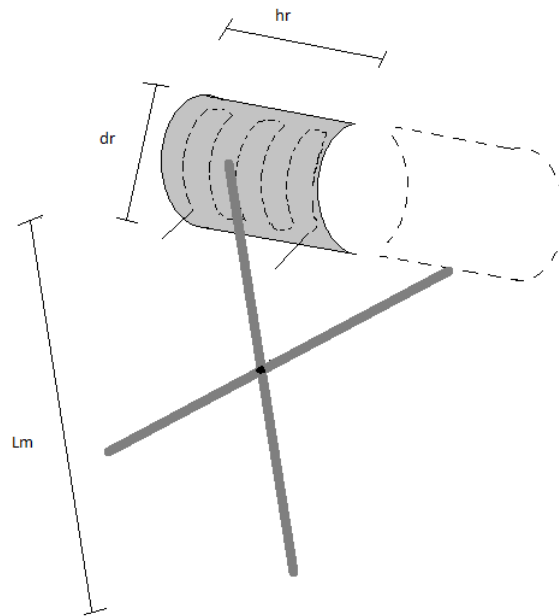


Figura 2.1. Esquema general del prototipo

Donde:

L_m = Longitud total del manubrio o estructura de soporte.

d_r = Diámetro de la media luna que forma cada cuerpo de la resistencia.

h_r = Altura del cuerpo de la resistencia.

V_c = Volumen del cuerpo de trabajo, una vez formado el cilindro al cerrar las medias lunas de las resistencias.

e_m = Espesor x lado del manubrio. Tubo cuadrado.

El punto de partida para el diseño del prototipo es el diámetro de los componentes del motor, con ello se puede determinar el diámetro óptimo de operación del prototipo, se ha tomado en cuenta los diferentes diámetros de motores usados en la perforación direccional y hacer uno general. El volumen a calentar es V_c y se calcula por medio de la ecuación [2.1]

$$V_c = \frac{\pi * (d_r)^2}{4} * h_r \quad [2.1]$$

La segunda consideración importante es la dilatación térmica óptima para conseguir la expansión del material adecuada, para ello se debe suministrar el calor apropiado, las partes que componen el motor de perforación y en especial el *CV assembly* son componentes delicados y hay que ser cuidadoso y conservador al momento de aplicar calor a la zona que lo necesita. Tomando en cuenta esta consideración, se diseña la resistencia eléctrica con alambre *resistón* (Marca registrada de Tempco México) composición de 80Ni – 20Cr con una resistencia de 0.66 Ω /metro.

Por otro lado, tenemos la parte de control, geoméricamente se encuentra el controlador y las conexiones con los contactores dentro de una caja metálica de 30 cm x 30 cm x 20 cm con chapa. Es necesario determinar voltaje, corriente, enclavamientos de contactores y funcionamiento eléctrico que gobernará el controlador.

Otro de los factores importantes para el desarrollo de este prototipo ha sido la seguridad y maniobrabilidad que ofrece el mismo al operador, para ello, como posteriormente se entra en detalle, se hace un análisis de transferencia de calor por el aire y por las manijas del prototipo, tomando en cuenta esto, se ha determinado la longitud y el espesor de dichas manijas. Una vez identificados las necesidades de cálculos, se recurre a las ecuaciones que describen mejor el comportamiento de todo el desarrollo ingenieril de este proyecto.

A continuación, la tabla 3 que resume los datos conocidos para el desarrollo de los cálculos que determinarán el comportamiento matemático de las ecuaciones de diseño.

Datos teóricos conocidos		
<i>Descripción</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidades</i>
Tiempo de acción calentador	4	minutos
Temperatura deseada en el CV-assembly	230-250	centígrados
Temperatura ambiente de la ciudad del Coca	28	centígrados
Resistencia de cable resistón	0,66	ohms/metro
Voltaje de consumo	110	voltios
Altura de las placas resistencia = hr	30	centímetros
Diámetro de las medias lunas resistencias = dr	18	centímetros
Espesor del manubrio = em	2,54	centímetros
Altura de la pieza del motor a calentar	30,48	centímetros
Circunferencia de la pieza del motor a calentar	47,87	centímetros
Diámetro exterior de la pieza del motor a calentar	15,24	centímetros

Tabla #3. Datos teóricos

2.3 Balance de materiales.

El calentador al generar calor y abrazar el componente del motor a utilizar no altera el estado ni la composición de los elementos que está calentando. Se considera que luego de la utilización del prototipo, se obtendría un crecimiento proporcional al coeficiente de dilatación cúbica con respecto a la masa del elemento a calentar. El balance de materiales entonces sería, tomando en cuenta la fórmula 1.7, tenemos:

$$m_{final} = 1 + \alpha * m \quad [2.2]$$

Donde:

m_{final} = Masa final luego de la aplicación de calor.

m = Masa inicial, a temperatura ambiente.

α = Coeficiente de dilatación cúbica.

2.4 Balances de energía y parámetros eléctricos

2.4.1 Determinación de la potencia total requerida. El calor necesario para calentar la masa m que compone el motor de perforación y que deseamos calentar se calcula mediante la ecuación [2.3].

$$Q_T = Q_c + Q_r \quad [2.3]$$

Donde:

Q_T = Calor total necesario para dilatar el componente del motor [J].

Q_c = Pérdidas de calor por conducción en el aire y en las paredes del componente a dilatar [J].

Q_r = Pérdidas de calor por radiación [J].

En términos de potencia, el calor necesario expresado en Joules/segundo, P_T , se determina mediante la ecuación [2.4].

$$P_T = \frac{Q_T}{t} \quad [2.4]$$

Donde:

t = Es el tiempo fijado por el usuario para que se lleve a cabo la operación de uso del calentador, **se plantea un uso de 4 minutos**, que es acordado con la gente de la base.

2.4.2 Determinación de la pérdida de calor por radiación. La razón de radiación de energía de una superficie es proporcional a su área. La luz emitida por las resistencias incandescentes es un ejemplo de radiación, que se produce cuando el calor en movimiento de partículas cargadas dentro de los átomos se convierte en radiación

electromagnética.¹⁵ Como vimos en el capítulo anterior, se puede modificar la ecuación [1.10] de tal manera que tomamos en cuenta la temperatura ambiente, de tal manera la ecuación siguiente [2.5] describe el principio de pérdida por radiación de manera global.

$$H_{\text{net}_a\text{radiacion}} = A_{\text{calentador}} * e * \sigma * T^4 - T_{\text{superficie}}^4 = \frac{Q_r}{t} \quad [2.5]$$

2.4.3 Determinación de la pérdida de calor por conducción. Como el calor se propaga a través de dos capas importantes en nuestro estudio que son el aire y la pared metálica del componente del motor, el análisis de flujo de calor por dichas secciones tiene que ser el mismo. Sin embargo, como se muestra en la figura 2.2 en un sistema de dos capas, los gradientes de temperatura de estos son diferentes.

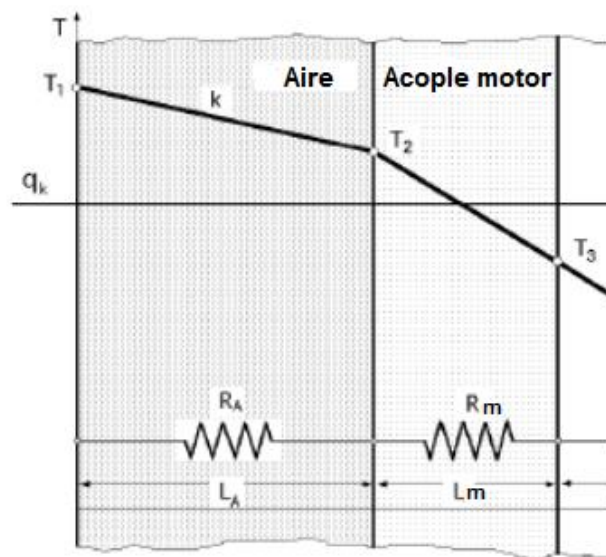


Figura 2.2. Pared compuesta

¹⁵ Tomado de la pág. Web: http://es.wikipedia.org/wiki/Radiaci%C3%B3n_t%C3%A9rmica

Analogía eléctrica de la conducción.

Existe una relación en la que se puede vincular el flujo de calor y su cambio en temperatura a la electricidad para problemas mucho más complejos mediante el uso de conceptos desarrollados en la teoría eléctrica, por lo que la ecuación de transferencia de calor por conducción [1.9] se puede escribir de la siguiente manera, globalmente tenemos la ecuación [2.5] en la forma de la Ley de Ohm.

$$[2.5] \quad H = \frac{\Delta T}{R_c}, \text{ siendo Potencial térmico } \Delta T = T_c - T_f$$

$$\text{Resistencia térmica } R_c = \frac{L}{k \cdot A}$$

De tal manera, relacionando la ecuación [2.5] con la figura 2.2 y el análisis análogo eléctrico, nuestra ecuación global el flujo térmico por conducción estaría dado por la ecuación [2.6] que se describe a continuación.

$$\frac{Q_c}{t} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L}{k \cdot A} \text{ }_A} = \frac{T_2 - T_3}{\frac{L}{k \cdot A} \text{ }_M} = \frac{T_1 - T_3}{\frac{L}{k \cdot A} \text{ }_A + \frac{L}{k \cdot A} \text{ }_M} \quad [2.6]$$

2.4.4 Calor necesario para dilatar el componente del motor en cuestión. (CV coupling). El elemento a dilatar es el componente que se describe en la figura 2.3 y su nombre es CV coupling, sobre este se inserta el CV shaft que es el eje que debe salir gracias a la dilatación térmica del CV coupling. Según el procedimiento *D00155706_1 Section 3.4 – Adjustable Disassembly Procedures* propiedad de Halliburton, se sabe que el calor máximo en grados Celcius al que debe exponerse el CV coupling es de 230 hasta 250 C.



Figura 2.3. Identificación del CV coupling, elemento del motor al que se debe aplicar el calor.

Al sufrir un cambio de temperatura brusco, el CV coupling verá una dilatación volumétrica, como se determinó en el capítulo I, tenemos los coeficientes de dilatación lineal en la tabla 4, a partir de ello se procederá a determinar el coeficiente de dilatación cúbica mediante la fórmula [1.8].

TABLAS Y CONSTANTES

Coeficientes de Dilatación Lineal	
Sustancia	$\alpha(^{\circ}C^{-1})$
Aluminio	2.4×10^{-5}
Latón	1.8×10^{-5}
Concreto	$0.7 - 1.2 \times 10^{-5}$
Cobre	1.7×10^{-5}
Vidrio Pyrex	0.3×10^{-5}
Hierro	1.2×10^{-5}
Plomo	3.0×10^{-5}
Plata	2.0×10^{-5}
Acero	1.2×10^{-5}
Zinc	2.6×10^{-5}
Diamante	9.0×10^{-7}
Tungsteno	4.0×10^{-6}
Vidrio Común ...	9.0×10^{-6}

Tabla #4. Coeficientes de dilatación lineal¹⁶

Según ecuación [1.8] sabemos que el coeficiente de dilatación cúbica es de valor triple que el de dilatación lineal.

$$\alpha = 3\lambda$$

$$\alpha = 3 * 1.2 \times 10^{-5} \frac{1}{^{\circ}C} = 3.6 \times 10^{-5} \frac{1}{^{\circ}C}$$

Con este valor procedemos al calcular el cambio de volumen que sufrirá el cuerpo para un cambio de temperatura que va desde la ambiente en la ciudad del Coca hasta la especificada en la tabla #3. Este cálculo usamos se describe mediante la ecuación [1.7].

¹⁶ Tomado de la pág. Web: http://www.copan.edu.mx/docs/desseccu/TAB_COEF_DILAT.pdf

$$\alpha = \frac{V - V_0}{V_0 t}$$

Se necesita obtener el volumen en estado de relajación, para ello, se procede a obtener las medidas del CV coupling, como se muestra en la figura 2.4, una idea más clara del elemento.



Figura 2.4. Medidas del CV coupling

Ahora se procede al cálculo del volumen total del CV coupling, con el volumen de la esfera de la ecuación [2.7] siguiente:

$$V_0 = \pi r_{ext}^2 * h - \pi r_{int}^2 * h \quad [2.7]$$

$$V_0 = \pi * (7.62cm)^2 * 30.48cm - \pi * (5.08cm)^2 * 30.48cm$$

$$V_0 = 5559.99 cm^3 - 2471.11cm^3 = 3088.87 cm^3$$

A continuación el volumen de la pieza una vez dilatada mediante formula [1.7].

$$\alpha = \frac{V - V_0}{V_0 t}$$

$$V = \alpha * V_0 t + V_0$$

$$V = 3088.87 \text{ cm}^3 \left[3.6 \times 10^{-5} \frac{1}{^\circ\text{C}} * (210 - 28^\circ\text{C}) + 1 \right]$$

$$V = 3109.11 \text{ cm}^3$$

Dicho cálculo implica que gracias a obtener una temperatura de aproximadamente 210 C, el material gana aproximadamente 20.2 cm^3 esto en porcentaje es 0.65% con lo que el CV shaft sale fuera del CV coupling.

2.5 Cálculos.

Ahora, sabiendo la temperatura a la cual el CV coupling cede espacio para que el CV shaft se libere, se procede a hacer el cálculo de pérdida de calor para obtener los siguientes parámetros en estricto orden: temperatura a la cual inicializar el controlador, valores de las resistencias y temperatura en el mango del calentador donde el operador lo sujeta.

2.5.1 Temperatura a la cual inicializar el controlador. Para obtener este valor necesitamos recurrir a las formulas descritas anteriormente e ir analizando la pérdida de calor en el proceso.

Pérdida de calor por conducción, ecuación [2.6]

$$\frac{Q_c}{t} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L}{k * A_A}} = \frac{T_2 - T_3}{\frac{L}{k * A_M}} = \frac{T_1 - T_3}{\frac{L}{k * A_A} + \frac{L}{k * A_M}}$$

$$\frac{Q_c}{t} = \frac{T_1 - T_3}{\frac{L}{k * A_A} + \frac{L}{k * A_M}}$$

$$\frac{Q_c}{t} = \frac{T_1 - (240^\circ\text{C} + 273.15)}{\frac{d_r - d_{CV \text{ coupling}}}{0.024 \frac{W}{m.K} * (2 * \pi * \frac{d_r}{2} * h_r)_{\text{Aire}}} + \frac{\text{espesor CV coupling}}{50.2 \frac{W}{M.K} * (2 * \pi * \frac{d_{CV \text{ coupling}}}{2} * h_{CV \text{ coupling}})_{CV c}}$$

$$\frac{Q_c}{t} = \frac{T_1 - 483.15K}{\frac{0.18m - 0.1524m}{0.024 \frac{W}{m.K} * (2 * \pi * \frac{0.18m}{2} * 0.3m)_{\text{Aire}}} + \frac{0.0254m}{50.2 \frac{W}{M.K} * (2 * \pi * \frac{0.1524m}{2} * 0.3048m)_{CV c}}$$

$$\frac{Q_c}{t} = \frac{T_1 - 483.15K}{21.3 \frac{K}{W}_{\text{Aire}} + 0.011 \frac{K}{W}_{CV c}}$$

$$\frac{Q_c}{t} = \frac{T_1 - 483.15K}{21.31 \frac{K}{W}} \quad [2.8]$$

Pérdida de calor por radiación, ecuación [2.5]

$$H_{\text{neta radiacion}} = A_{\text{calentador}} * e * \sigma * T_1^4 - T_{\text{superficie}}^4 = \frac{Q_r}{t}$$

Emisividad de resistencias ≈ 0.60 ¹⁷

$$\frac{Q_r}{t} = (2 * \pi * \frac{d_r}{2} * h_r) * 0.66 * 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} * T_1^4 - (28 + 273.15K)^4$$

$$\frac{Q_r}{t} = (2 * \pi * \frac{0.18m}{2} * 0.3m) * 0.66 * 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} * T_1^4 - 8224.91K^4$$

$$\frac{Q_r}{t} = 6.35 \times 10^{-9} \frac{W}{K^4} * T_1^4 - 8224.91K^4 \quad [2.8]$$

¹⁷ Tomado del libro Física Universita 1, Sears, Zemansky, Young. Pág., 669.

Tomando en cuenta el consumo eléctrico por línea, podemos tener un consumo máximo de 3 KWh, es un consumo relativamente alto para una sola línea, por tal motivo se busca una línea en Base Coca de Halliburton que tenga escasas cargas eléctricas sobre ella, de tal manera que nuestra potencia eléctrica de funcionamiento será de 3000 Watts.

Volviendo a la ecuación [2.4] tenemos que el flujo total de calor debe ser:

$$P_T = \frac{Q_T}{t}$$

$$P_T * t = Q_T$$

$$Q_T = 3000 \frac{J}{s} * 4 \text{ mins.} \frac{60s}{1 \text{ min}} = 18x10^4 J \quad [2.9]$$

Aplicando la fórmula [2.3] tenemos la temperatura de inicialización del controlador, reemplazando en ella los resultados [2.9] y [2.8].

$$Q_T = Q_c + Q_r$$

$$18x10^4 J = t * \frac{T_1 - 483.15K}{21.31 \frac{K}{W}} + 6.35x10^{-9} \frac{W}{K^4} * T_1^4 - 8224.91K^4$$

$$18x10^4 J = t * \left[\frac{T_1 - 483.15K}{21.31 \frac{K}{W}} + 6.35x10^{-9} \frac{W}{K^4} * T_1^4 - 8224.91K^4 \right]$$

Se considera que hay una transferencia de calor ideal de 40% por conducción y 60% por radiación, esta conclusión debido a la superficie de contacto, de tal manera que las ecuaciones [2.9] y [2.8] se multiplican por $\frac{1}{4}$ y para $\frac{3}{4}$ respectivamente, resolviendo el sistema de ecuaciones de 4to orden con *Scientific Notebook*® tenemos los siguientes resultados.

$$x_1 = 2.64 + 608i$$

$$x_2 = 2.64 - 608i$$

$$x_3 = 595$$

$$x_4 = -601$$

Tomamos como válida la respuesta positiva y real, es decir x_3 es así que debemos inicializar el controlador, que muestra grados Celcius a una temperatura de:

$$T_1 = 595 - 273.15$$

$$T_1 = 321.85 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2.5.2 Resistencias. Como sabemos el voltaje al que vamos a trabajar y del cual disponemos, recurrimos a la ecuación de la potencia eléctrica a continuación [2.10] reemplazada con la ecuación [1.1] de la ley de Ohm, de tal manera que podemos saber la resistencia.

$$P_e = I^2 R \quad [2.10]$$

Reemplazando con la ley de Ohm dejando en términos de voltaje y resistencia, tenemos el siguiente valor de resistencia.

$$P_e = \frac{V^2}{R}$$

$$R = \frac{V^2}{P_e}$$

$$R = \frac{(110)^2}{3000} = 4.03\Omega$$

Como se va a trabajar con 2 resistencias y por motivos de consumo eléctrico y riesgo de quema de componentes electrónicos como el controlador y los contactores, se decide trabajar con las resistencias en serie, de tal manera que 4.03Ω es el valor total, es por ello, que se determina el cálculo individual de la longitud de cable resistón.

Sabemos cable resiston $0.66\Omega/m$

$$\text{Necesitamos } 2.015\Omega \cdot \frac{m}{0.66\Omega} = 3.05 \text{ m de de cable resiston para cada resistencia}$$

Se considera una ganancia de resistencia mientras aumenta la temperatura muy poco significativa, por lo que no se la toma en cuenta.

5.2.3 Temperatura en las manijas. Claramente se puede observar una transferencia de calor por conducción a lo largo de las manijas, para ello se aplica el mismo principio de la ley de Fourier de la analogía con las resistencias eléctricas, tenemos la pared de la lamina de acero inoxidable, una pequeña capa de fibra de vidrio, otra capa de acero inoxidable y las manijas en sí, de tal modo que nuestra nueva ecuación [2.11] de calor sería la siguientes, tomando como referencia la [2.6], tenemos:

$$\frac{Q_c}{t} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L}{k \cdot A}_{Inox}} = \frac{T_2 - T_3}{\frac{L}{k \cdot A}_{lana}} = \frac{T_3 - T_4}{\frac{L}{k \cdot A}_{Inox}} = \frac{T_4 - T_5}{\frac{L}{k \cdot A}_{Manijas}} = \frac{T_1 - T_5}{\frac{2L}{k \cdot A}_{inox} + \frac{L}{k \cdot A}_{lana} + \frac{L}{k \cdot A}_{manijas}} \quad [2.11]$$

Tomando en cuenta, que la temperatura a la que las manijas estén a 50°C , procedemos a despejar $L_{manijas}$,

$$\frac{2L}{k \cdot A}_{inox} + \frac{L}{k \cdot A}_{lana} + \frac{L}{k \cdot A}_{manijas} = \frac{t \cdot (T_1 - T_5)}{Q_c}$$

$$L_{manijas} = k_{manijas} \cdot A_{manijas} \frac{t \cdot (T_1 - T_5)}{Q_c} - \frac{2L}{k \cdot A}_{inox} - \frac{L}{k \cdot A}_{lana}$$

$$\begin{aligned}
L_{manijas} = 109 \frac{W}{m.K} * (& 0.0254 * 0.0254 \\
& - 0.0249 * 0.0249) \frac{240s * (573.15K - 323.15K)}{123.88J} \\
& - \frac{2(0.001m)}{50.2 \frac{W}{mK} * (2 * \pi * \frac{0.18m}{2} * 0.3m)}_{inox} \\
& - \frac{0.002}{0.04 \frac{W}{mK} * (2 * \pi * \frac{0.18m}{2} * 0.3m)}_{lana}
\end{aligned}$$

$$L_{manijas} = 109 \frac{W}{m.K} * (2.5 \times 10^{-5}) 484.34 - 0.74_{inox} - 0.92_{lana}$$

$$L_{manijas} = 1.32m$$

2.6 Simulación por el Método de los Elementos Finitos.

Para poder realizar este análisis, se toma las mismas consideraciones descritas en la tabla #3, las mismas que han sido ingresadas para simulación computacional en el programa SolidWorks®. Se asume la resistencia abrazando al motor en forma de resorte, y que el espacio entre la camisa del motor y la resistencia es libre de contacto, cosa que no es real, ya que efectivamente el prototipo de asienta sobre una ligera superficie del motor y luego encierra el mismo dejando un espacio pequeño de aire. Se dibuja de igual manera la camisa del motor como un tubo de 6 ¼", 17.1 cm de diámetro exterior, dentro de él es donde se aloja la parte de interés de la aplicación de calor como muestra la fig. 2.6. Como condiciones de frontera se coloca que la temperatura de los extremos inmediatos del motor no varía, es decir, en cierto modo, solo nos interesa la temperatura en el centro de la resistencia sobre la pared interna del motor, la temperatura inicial de la

resistencia de 321 °C que fue la calculada y el resto de piezas a temperatura ambiente de la ciudad del Coca que es de 28 °C.

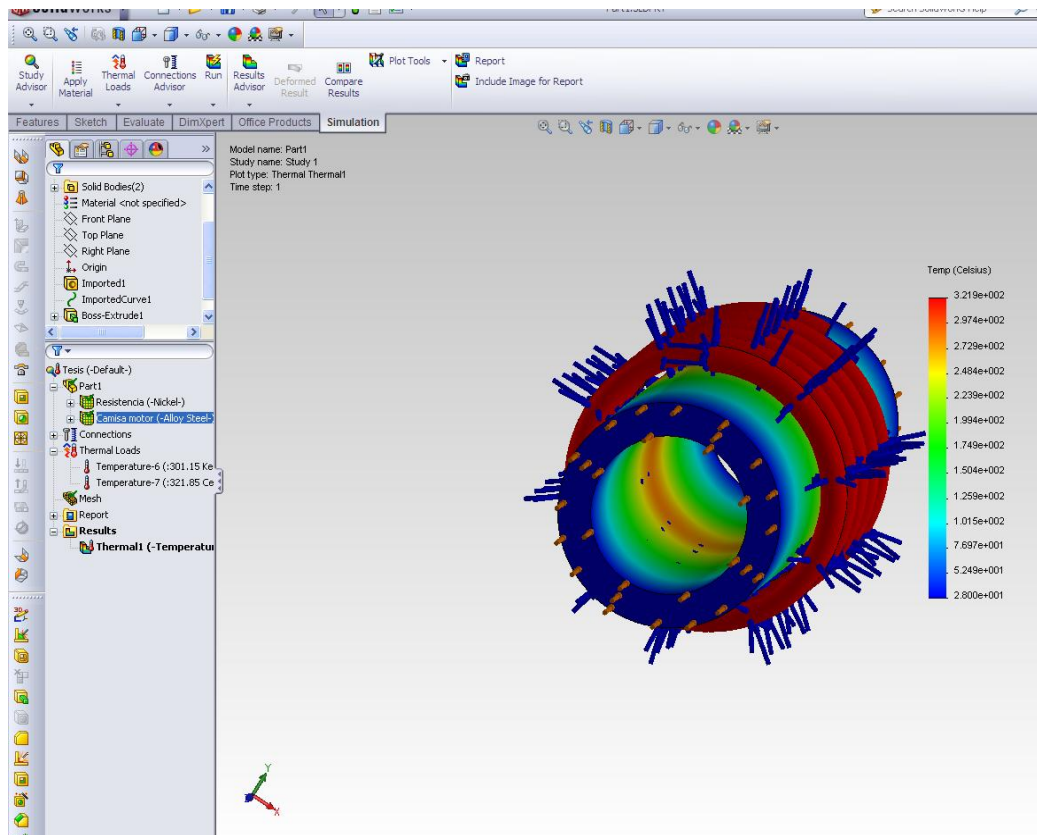


Figura 2.5. Análisis por elementos finitos. SolidWorks.

En la fig. 2.5., se puede observar que efectivamente la temperatura interna de la camisa del motor está en color naranja, según este análisis es aproximadamente 250 °C, con lo que sabemos que se va a tener una dilatación térmica favorable. Un reporte global de éste análisis se presenta en el Anexo A.2.

Para los cálculos ingenieriles se partió de la temperatura en fondo para por medio de transferencia de calor poder saber la temperatura de trabajo de la resistencia, por este método computacional vamos de sentido contrario, sabemos que inicializamos la resistencia a cierta temperatura y vamos a ver el resultado del análisis en el interior del motor, de este modo el % de error entre el valor calculado y el simulado es:

$$\%error = \frac{\text{calculado} - \text{simulado}}{\text{calculado}} * 100 = \frac{240 - 250}{240} * 100 = 4.17\%$$

Las figuras 2.6 y 2.7 nos muestran diferentes perspectivas del análisis.

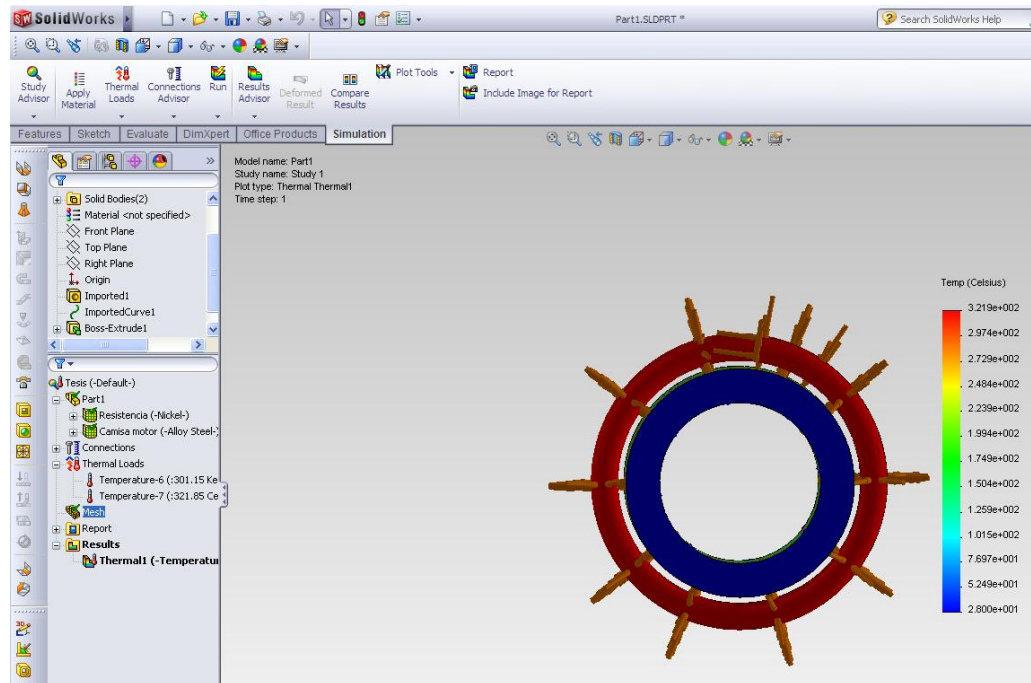


Figura 2.6. Vista frontal.

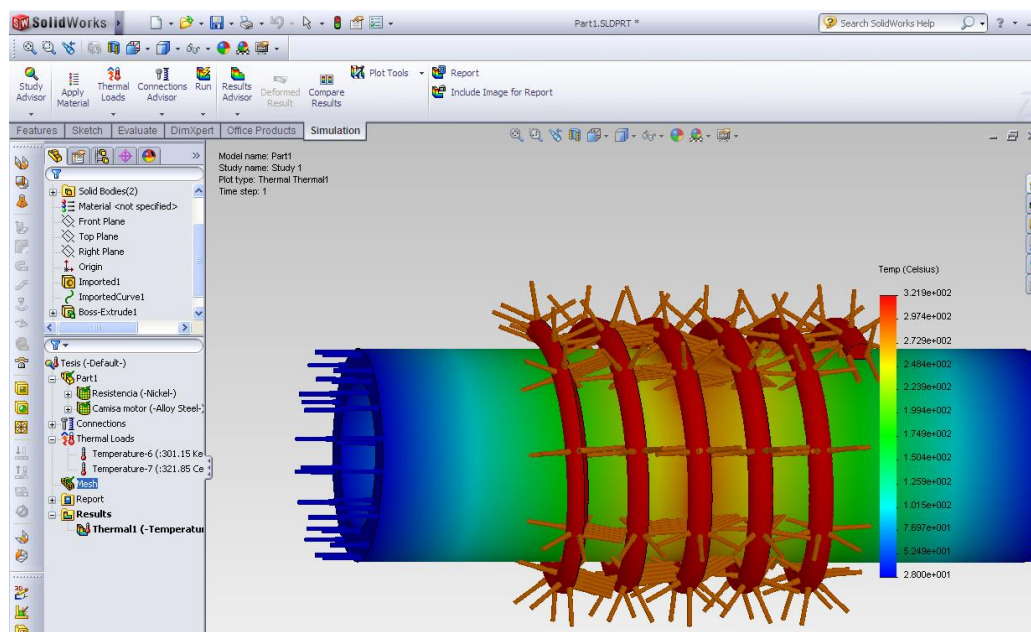


Figura 2.7. Vista lateral.

CAPITULO III

CONSTRUCCIÓN DEL CALENTADOR

3.1 Disponibilidad de materiales.

3.1.1 Resistencia eléctrica. La resistencia fue diseñada y realizada con la ayuda del Sr. Napoleon Fiallos, en su taller eléctrico OHMIO. El costo de las dos resistencias eléctricas blindadas es de US\$300.00, junto con su respectivo soporte, es decir la plancha de acero inoxidable que las sostiene.

3.1.2 Fibra de vidrio aislante. Existen algunos tipos de elementos para no conducir el calor, entre ellos está la lana o fibra de vidrio, son óptimas para trabajos a temperaturas que van hasta los 500°C, sabiendo esto, se procede a conseguir dicha fibra en el almacén La Llave. S.A., en el que con la ayuda de uno de sus trabajadores nos facilitan vender una mínima cantidad a un costo de US\$15.00.

3.1.3 Estructura de las manijas o agarraderas. Se utiliza un mecanismo simple tipo tijera con un punto de giro ubicado en la mitad de las mismas para asegurar un buen manejo. Dicha estructura se la logra hacer a partir de una viga de acero cuadrada de 1" de lado en el taller ALFISA, un taller de estructuras metálicas y procesos metalmecánicos.

3.1.4 Sistema de control automático. Se consigue un controlador Chino, de serie TC-96N en el Centro Comercial Mejía, Material Eléctrico e Industrial. El costo es de US\$66.3.

3.1.5 Contactores. En Comercial Mejía, de igual manera se consigue los contactores de 30 A, a un costo de USD\$13.30 c/u.

3.1.6 Cable siliconado con fibra. En Comercial Mejía, a un costo de USD\$3.30/m.

3.2 Construcción del prototipo.

En primer lugar se recurrió al diseño óptimo de las resistencias eléctricas para que al momento de su trabajo abarquen toda la superficie posible de la parte que se desea calentar. Como se determinó en el capítulo II, la longitud del cable resistón de Cromo – Níquel es de 3.05m para cada resistencia, como se ve en la imagen 3.1. Dicho cable se enrolla en una máquina de torno para tener una especie de cuerda telefónica, la misma que es introducida en el tubo de acero inoxidable de 1/2" de la figura 3.2, es obvio que existiría un corto circuito si la resistencia resistón entraría en contacto con dicho tubo superficial, por tal motivo, se coloca por aislante un mineral ligero llamado cromita ($\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-FeO}$) de la figura 3.3 por sus características refractarias. Una vez que esta el alambre resistón dentro del tubo de acero inoxidable de 1/2" y perfectamente aislado con la cromita, toma el nombre de resistencia tubular blindada, con la que mediante un cilindro matriz, se va dando la forma de tal matriz aplicando presión para alcanzar el límite plástico de la resistencia y lograr la deformación circular deseada teniendo mucho cuidado que la cromita no cambie de posición y permita realizar un corto circuito como se muestra en la figura 3.4.



Figura 3.1. Alambre resistón



Figura 3.2. Tubo de acero inoxidable



Figura 3.3. Cromita aislante

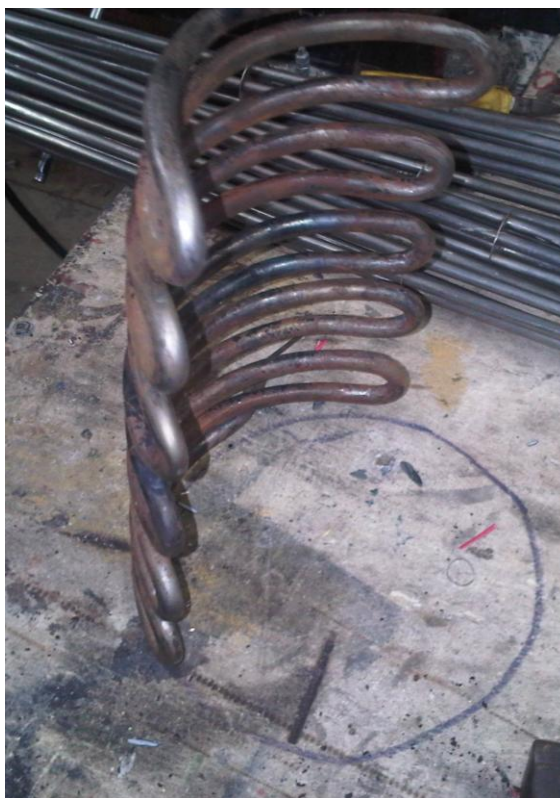


Figura 3.4. Resistencia blindada en forma de media luna

Ya realizado este trabajo, se procede a darle la misma forma a la lámina de acero (figura 3.5) inoxidable que sostiene a las resistencias por la parte de atrás, para ello se utiliza la misma matriz cilíndrica que se utilizó para las resistencias. Dicha capa como se muestra en la figura 3.6 está compuesta por dos láminas, el objetivo de esto fue primeramente de tener más estabilidad en el soporte y por otro lado se pensó en colocar fibra de vidrio entre dichas láminas como se ve en la figura 3.7 para evitar el excesivo paso del calor hacia la parte exterior del prototipo que eventualmente está en contacto con el operador, la instalación de bisagras con suelda de cobre y armado completo del elemento a calentar se muestra en la figura 3.8, 3.9 y 3.10.



Figura 3.5. Lámina de acero inoxidable para soporte de las resistencias blindadas



Figura 3.6. Lámina de acero inoxidable para soporte de las resistencias blindadas armada.



Figura 3.7. Acople de lana de vidrio



Figura 3.8. Instalación de resistencia blindada al soporte de lámina de acero inoxidable.



Figura 3.9. Suelda de cobre en las bisagras.



Figura 3.10. Sistema de resistencias de medias lunas armado

Una vez que se trabajó esta parte se pudo iniciar con los cálculos ingenieriles tanto eléctricos como mecánicos expuestos el alambre resistencia resistón. Se pasó a la parte del control y se pensó en un sistema de fácil interacción con el usuario, es decir, debe tener los comandos estrictamente necesarios de manera visible, por tal motivo se pensó en el diseño de una caja metálica donde estén dichos elementos, primeramente el controlador en la figura 3.11, posterior a ello contactores y termocupla en la figura 3.12.



Figura 3.11. Vista por delante y por atrás del controlador ensamblado en la caja de control.



Figura 3.12. Parte interna de la caja de control, contactores + cable de termocupla (gris)

Consecuentemente se piensa en la manera de maniobrar el prototipo, se cree que la mejor forma de evitar riesgos relacionados al trabajo es tener la suficiente pérdida de calor sobre las manijas para que el usuario, a pesar de que sería estricto el uso de equipo de protección personal, sienta la menor cantidad de calor transmitida a sus manos, según el análisis térmico del capítulo II. De tal manera se hace el diseño de las manijas como se muestra en la figura 3.12.



Figura 3.13. Diseño y construcción de las manijas que sostendrán las resistencias.

Finalmente, el diseño completo, la caja del controlador aislada junto a la fuente de energía, el cable de las resistencias y el cable medidor de temperatura con una longitud considerable prestan facilidades de manejo, el cable se desenrolla al momento de necesitarse. En este momento el operador recurre hacia el lugar de ubicación del prototipo y enciende permitiendo el paso de energía hacia las resistencias mediante la actuación de un botón para inicializar la temperatura de trabajo deseado junto con el botón de encendido, un esquema culminado se muestra en la figura 3.13.



Figura 3.14. Esquema global del proyecto

CAPÍTULO IV

CALENTAMIENTO CON EL PROTOTIPO

4.1 Operación del prototipo.

El prototipo de calentador por medio de resistencia eléctrica, como se lo llamó para fines comerciales **NEW OHM 2012**, se utilizará única y exclusivamente en las instalaciones de Halliburton Ecuador, en la ciudad del Coca, para el proceso de desarmado de las piezas de motores de perforación direccional de pozos petroleros. Para ello se ha realizado un Manual de Manejo, el mismo que consta en el Anexo A.1

La cadena de procesos a utilizar se describe en la figura 4.1 donde esquemáticamente tenemos una ubicación de todos los elementos que intervienen en este proceso de calentamiento.

En primer lugar tenemos el sistema de control y arranque, mediante este componente damos paso a que la energía cree un choque atómico grande sobre las resistencias y posteriormente se expresará en forma de calor. En este paso lo primero es ingresar la temperatura de trabajo deseada y posterior a ello el botón encender. En segundo lugar está el manejo de la resistencia, el usuario debe buscar la forma en que de forma segura y responsable el prototipo abrace la parte del motor a calentar, es importante recalcar que la seguridad industrial es un tema muy personal y todo depende de la atención y disciplina que se le ponga al proceso para evitar accidentes. Finalmente, la parte de apagado, en la que el usuario retira cuidadosamente el prototipo del contacto con el motor y lo ubica en el lugar correcto teniendo en cuenta la longitud de los cables y la alta temperatura a la que estamos expuestos.

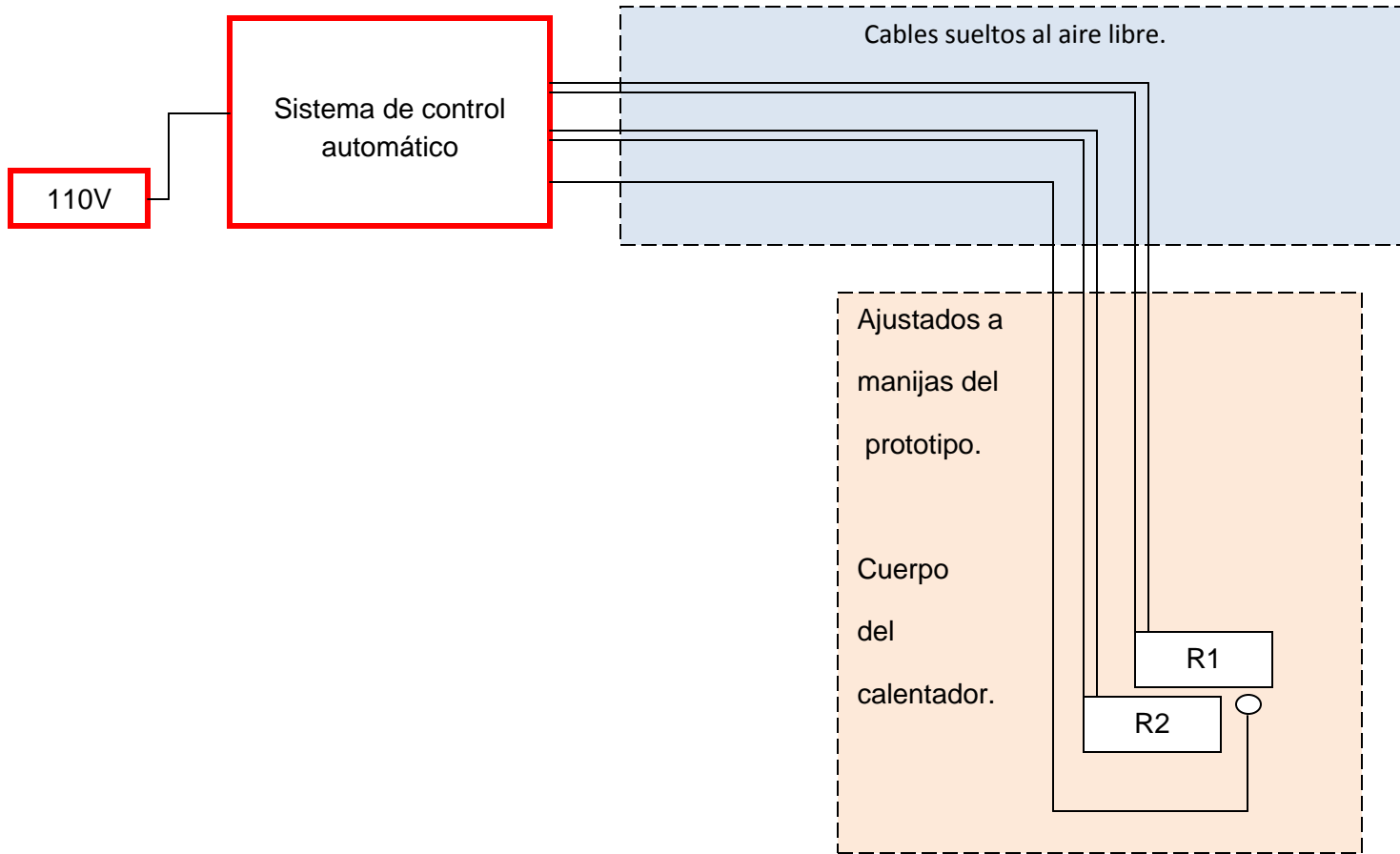


Figura 4.1. Esquema de funcionamiento del prototipo.

Se procede a poner en funcionamiento el prototipo, se sigue las instrucciones del manual, en la primera prueba resultó bastante complicado poder concentrar el calor sobre la superficie deseada, a tal punto que el calor se expandió mucho y se corrió el riesgo de afectar otros componentes en los que sería completamente indeseable la dilatación térmica, como se puede ver en las figuras 4.2 y 4.3. Por tal motivo, se procedió a redimensionar el prototipo a un volumen mucho menor y con el objetivo de concentrar el calor a un área más pequeña, se reducen las distancias entre las resistencias, consecuentemente se obtuvieron mejores resultados. Se toma en cuenta la seguridad y manejo del mismo para este re-dimensionamiento, a partir de esto, se decide colocar la caja de control aislada y alargar los cables de comunicación del prototipo con el control. Ahora, la caja de control se ubica cercana al interruptor de corriente y junto a ella un sistema sencillo para enredar el cable y colocar el prototipo luego de haber entrado en funcionamiento.



Figura 4.2. Prueba en Base Coca



Figura 4.3. Prueba 2 en Base Coca

4.2 Prueba de liberación de presión.

Se procede a poner en funcionamiento el prototipo siguiendo los lineamientos descritos en el manual de operación. El prototipo empieza a funcionar de la manera esperada, se presentan algunos inconvenientes por el paso de calor a las manijas por lo que es estrictamente necesario el uso de guantes de aislamiento térmico. Luego de aproximadamente cuatro minutos se decide apagar para hacer el primer intento de aflojamiento del componente CV assembly del motor, al que se lo encuentra un poco resistente, consecuentemente se decide aplicar calor con el mismo método por dos minutos más, al final de este tiempo el torque de liberación es menor pero aún es alto, fig. 4.4, debido a un análisis de riesgo realizado antes de proceder con el trabajo (Anexo B.3) se decide que si en el segundo intento no funciona se deberá realizar otras modificaciones. Se asume que el primer funcionamiento es el más crítico, ya que hubo piezas que trabajan por primera vez, como son el control y termocupla.



Figura 4.4. Resultado de uso de New Ohm 2012, CV shaft liberado.

4.3 Discusiones.

Luego de haber realizado las pruebas en dos ocasiones distintas, bajo distintos parámetros, como fueron seguridad de ubicación, área de contacto, se puede deducir que es un sistema eficiente, a tal punto que se logra cumplir con el objetivo principal que es el de liberar de la presión encerrada en el componente del motor. No obstante, se evidencia la salida de líquidos inflamables del motor y reaccionan con las resistencias, convirtiéndose en una práctica un poco insegura. Lo que pude observar es que el calor se distribuye de mejor manera, se inicializó el calentador a una temperatura de 300 C, y ese fue el último experimento, se puede prever un mejor funcionamiento a una temperatura mayor, ya que existe una gran pérdida de calor por los espacios que quedan entre las resistencias y las paredes del motor, ya que las resistencias no son perfectamente circulares al haber sido construidas artesanalmente.

Se puede ver una ventaja significativa en cuanto al avance a la utilización de quema de combustibles, es posible utilizar otras fuentes de energía mucho más saludables para el medio ambiente y técnicamente más controlables, la disipación de calor luego de su uso es importante, se realiza de la manera esperada, en alrededor de 5 minutos en reposo la máquina marco una temperatura de aproximadamente 70 C como se ve en la figura 4.5.



Figura 4.5. Enfriamiento de las resistencias luego del uso.

Este proyecto da lugar a un amplio número de ideas para ser llevadas a cabo por próximos investigadores y estudiantes de ingeniería. Como continuación de este proyecto, se invita a que un grupo de estudiantes implementen un sistema de control computarizado mucho más avanzado que sea apropiado para el calentador y que permita controlar otras variables como tiempo de calentamiento, seguridades en caso de picos de corriente, alarmas de encendido y apagado, o por qué no mejor pensar en un sistema de calentamiento por inducción electromagnética en que se reducirían más los riesgos expuestos al calor que no sea propio de la pieza estrictamente necesaria a ser calentada.

Por motivos de que debe ser un prototipo patentado por Halliburton para usarlo en inmediaciones y con equipos de la misma empresa, resultó un poco difícil tener más fotografías, actualmente el prototipo New Ohm 2012 inició su proceso de certificación.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como se ha podido observar, el calentamiento por resistencia eléctrica tiene muchas aplicaciones que a veces por tan simple que parezcan resultan de gran impacto. Esto se ha comprobado mediante el diseño y construcción del prototipo de calentador llamado **NEW OHM 2012** de un volumen de calentamiento de aproximadamente 2500 cm^3 de capacidad, mediante una fuente de corriente de 110 Voltios un controlador automático permite o restringe el paso de voltaje hacia resistencias eléctricas para mantenerlas a una temperatura estable ingresada por el usuario en el proceso de aflojar una de las partes principales de un motor de perforación direccional de pozos petroleros. Adicionalmente se llevaron a cabo dos prácticas en la base Coca de Halliburton, las mismas que permitieron conocer de mejor forma el funcionamiento, ventajas y desventajas del calentador.

Por medio de ecuaciones de diseño, balance de energía, transferencia de calor, expansión o dilatación térmica, se permitió establecer el parámetro de control principal que es la temperatura de trabajo. Para un valor de resistencia y longitud determinada, el paso de corriente es distinto, a medida que menor es el valor de la resistencia la potencia eléctrica es mayor, esto puede ser peligroso al momento que se vuelva incontrolable y genere cortos circuitos por el excesivo paso de corriente sobre el alambre Kanthal.

La construcción del prototipo no tuvo mayor complicación y se considera que la secuencia de pasos con la que se desarrolló este proyecto es una manera muy eficiente de cumplir con los objetivos en cuanto a tiempo. Sin embargo, las pruebas de funcionamiento fueron un poco complejas por la lejanía a la ciudad del Coca y la falta de

disponibilidad de materiales allá, por lo que se tenía que hacer adecuaciones en Quito para luego viajar al Coca.

Se esperaba comprobar el funcionamiento del prototipo **NEW OHM 2012** en el proceso de aflojar una de las partes de motor de perforación a pesar de que se vio limitado en cuanto a normas de seguridad para que sea un elemento de trabajo confiable, en muchas de las pruebas hubo que ajustar las manijas, ajustar la termocupla, ajustar las bisagras, entre otros, con ello se logró liberar el componente con mucha dificultad. No obstante, con la ayuda de un criterio más experimentado se podría modificar su configuración para realizar más pruebas y poder establecer este método como el procedimiento oficial para la operación y reemplazar por completo el uso de la llama de oxígeno y acetileno que es una norma en todas las filiales de Halliburton de todo el mundo. De todos modos, se esperaba que exista un margen de error entre lo planeado, lo calculado y lo real por las razones que se describe a continuación.

Como primer punto, las ecuaciones de diseño toman en cuenta volúmenes, valores de resistencia, pérdidas de calor y dilataciones térmicas exactas. En segundo lugar, el lugar de funcionamiento del prototipo, la ciudad del Coca no está conectada al sistema nacional de energía, es decir, funciona por medio de generadores de diesel y obviamente lo hace un poco inestable al servicio eléctrico. Finalmente un ligero error podría introducirse por la diferencia de diámetros entre las piezas de los motores, ya que el prototipo tiene un diámetro de trabajo estándar.

Se sugiere que éste proyecto sea complementado con una siguiente parte en la que se pueda ver un sistema de control más digitalizado, integrado y confiable, en medio de una industria tan grande debe cumplir con normas muy altas de seguridad y confiabilidad. Esto representa una ayuda muy grande para la gente del Shop de área de Sperry Drilling de Halliburton, estamos identificados con la mejora continua y estamos aportando con un granito de arena a la preservación ambiental.

En lo que respecta al diseño teórico y construcción del prototipo, sería mejor aplicar ecuaciones de diseño mucho más exactas, es decir controlando parámetros de una manera distinta, el método de los elementos finitos nos da una buena idea de las cosas y la forma de expansión del calor pero no es completamente exacto ya que las medidas reales guardan su margen de error por el proceso de construcción.

Este proyecto será entregado en base Coca de Halliburton, se continuará trabajando con la gente de la locación para mejorar el sistema propuesto, ha sido un proceso bastante interesante a tal punto que la gente de Base Surinam de Halliburton han estado pendientes y están a la espera de contar con un sistema parecido ya que por motivos de auditorías y certificaciones hay que ir llevando métodos amigables con el medio ambiente.

El método de calentamiento por resistencia ha ofrecido bastantes ventajas sobre el de quema de combustibles, pues permite un mejor control y reduce significativamente el riesgo de almacenamiento y transporte de esas costosas fuentes como son el oxígeno y acetileno. Por otro lado, mejora las condiciones de trabajo y se reduce el riesgo asociado a la actividad.

Próximos estudios pueden profundizar este proceso, investigando formas de calentamiento más limpias como es la inducción electromagnética, y que abarquen factores de seguridad muy amplios y confiables.

REFERENCIAS

- Tempco México S.A., *Especificaciones técnica CONTROLADOR*, <http://www.tempcomexico.com/>, última visita: 01 Mayo 2012.
- Erecos S.A., 2007, *Especificaciones técnicas CORAL 80*, 2 pp.
- Hammond P., 1978, *Electromagnetism for Engineers - An Introductory Course*, United Pergamon, Oxford, London, UK.
- Incropera, Frank., 1996. *Fundamentos de Transferencia de Calor*, 4° ed., México: Prentice Hall, 912 pp.
- Lexus Editores., 1998. *Nueva Enciclopedia Autodidacta FÍSICA*. México: Lexus, 898 pp.
- National Oilwell, *TorqueMaster model 1689 – Maintenance and Safety Manual*.
- Nacobre S.A, 2007, *Tubería de inoxidable flexible*, http://www.nacobre.com.mx/HT_Inox_Flexible%20Tipo%20L.asp, revisado Febrero 2012.
- Ordoñez Stella, 2004, *Técnicas Experimentales en Metalurgia*. <http://www.metalurgiausach.cl/TECNICAS%20EXPERIMENTALES/UNID8.pdf>, Última visita: 22 de mayo 2012, 34 pp.
- Serway Raymond A., 1990, *Physics for Scientists & Engineers with Modern Physics*, 3° ed., Philadelphia: Saunders College Publishing, 1169 pp.
- Sers, Zemansky., 2004, *Física Universitaria*, Pearson: Texas.
- Tippens, Paul., 2005, *Física, conceptos y aplicaciones*, México: McGraw Hill, 782 pp.
- Unifrax, 2001, *Fiberfrax®-Copos de fibra cerámica*, revisado Junio 2007.
- Van, Kate. *A Primer of Oilwell Service*. Petroleum Extension Service: Austin, Texas. 1997.
- Vargas, Édison, *Sistemas de control automático*, <http://varper-tech.com/wp/sistemas-de-control-automatico/>, última visita: 9 de mayo 2012.

ANEXO A

Anexo A.1: Manual de uso *New Ohm 2012*



Manual de manejo calentador eléctrico NEW OHM 2012, Destorque de motores

El sistema de calentador eléctrico *NEW OHM 2012* es un elemento a utilizarse en reemplazo de la común llama de oxígeno y acetileno para aflojar el *CV shaft* dentro del *CV assembly* para destorquear motores. En un inicio se utilizará para motores de 6 3/4", el procedimiento aún no es aplicable sin el consentimiento del Local Manager y del inventor. Se crea este manual con la finalidad de dar una explicación al nuevo proceso en desarrollo.

1. Análisis de riesgo.
2. Verificar conexión de la caja de control a un voltaje de 110 V.
3. Uso de EPP.
4. Tomar el calentador por las manijas de agarre.
5. Inicializar la temperatura de trabajo deseado. (Pérdida por transferencia de calor de aproximadamente 25 C entre indicador y pieza de motor).
6. Verificar que el cable no sea un riesgo de caída por amarre.
7. Encender la caja de control, colocar en posición ON.
8. Inmediatamente comenzará a calentarse las resistencias por lo que se debe abrazar el borde inferior del *CV shaft* en la conexión.
9. Tomar en cuenta que la temperatura está estable en donde la inicializamos, mantener de 3, 5 a 4 minutos en contacto.
10. Separar calentador del motor.
11. Asentar el calentador en su lugar.
12. Inmediatamente apagar la caja de control, colocar en posición OFF.
13. Verificar que ningún cable haya quedado en contacto con las resistencias.
14. Etiquetar las cercanías al calentador con los indicativos de superficie caliente.
15. Proceder con el desacople del *CV shaft* desde la TorqueMaster®.

El modelo aún está **fuera de uso**, se comunicará debidamente el momento en que sea completamente seguro su uso.

En caso de encontrarse algún problema, observación o idea de mejoras, no duden en comunicarse con Jorge Luis Loyola Granda, Tlf. 084532790.

Anexo A.2: Reporte SolidWorks®, Análisis por elementos finitos.

9 hojas, reporte generado por el programa impreso en la hoja siguiente.

ANEXO B

Anexo B.1: Datasheet del controlador.

Temperature Controllers



Models TEC-905 & TEC-900 1/16 DIN

Model TEC-905 1/16 DIN Controller & Model TEC-900 1/16 DIN Indicator Only



List Prices Starting at \$180.00
Quantity Discounts Available!

Simple Setpoint and Display!



Display only!

List Prices Starting at \$155.00
Quantity Discounts Available!

Design Features

- * 1/16 DIN size – 48 mm x 48 mm
- * Short panel depth – only 3-3/8" (86 mm) required
- * Laser trimmed ASIC components
- * On-off or time proportional selections
- * Wide selection of output options
- * Universal power input, 90-264 VAC
- * Sensor break protection
- * Good performance at a very low price
- * Model TEC-905 control with pushwheel setpoint
- * Model TEC-900 indicator only
- * Agency Approvals:



Ordering Code:

Temperature Controller TEC-905-

Temperature Indicator Only TEC-900-

Power Input BOX 1
 4 = 90-264 VAC 50/60 Hz
 5 = 20-32 VAC 50/60 Hz, 20 - 32 VDC
 9 = Other

Control Mode BOX 4 (TEC-905 only)
 1 = On - Off
 2 = Proportional

Output 1 (TEC-905 only) BOX 5
 1 = Relay: 5A / 240 VAC
 2 = Pulse dc for SSR drive: 24 VDC (20 mA max)
 3 = 4-20 mA, linear (max load 500 ohms)
 4 = 0-20 mA, linear (max load 500 ohms)
 5 = 0-10 VDC, linear (min. impedance 500K ohms)
 6 = Triac-SSR output 1A / 240 VAC
 9 = Other

Signal Input BOX 2
 1 = Thermocouple: Type J
 2 = Thermocouple: Type K
 3 = RTD: 100 ohm PT, DIN 0.00385
 4 = RTD: 100 ohm PT, JIS 0.00392
 9 = Other

Output 2 BOX 6
Alarm BOX 7
Communication BOX 8
 0 = Not Available

Range code (TEC-905 only) BOX 3
 X = 0 to 499°F C = 0 to 299°C
 V = 0 to 999°F E = 0 to 499°C
 W = 0 to 1999°F H = 0 to 999°C
Other ranges are available for large volume orders. Consult Tempco for more information.

Range code (TEC-900 only) BOX 3
Thermocouple
 A = 0 to 1200°F – Type J
 B = 0 to 600°C – Type J
 C = 0 to 2000°F – Type K
 D = 0 to 1100°C – Type K
RTD
 E = -32 to 752°F
 F = 0 to 400°C

Ordering Information

Models TEC-905 and TEC-900 are offered with the options listed in the worksheet above. Create an ordering code by filling in the boxes with the appropriate number and/or letter designation for your requirements and a part number will be assigned, or choose from one of the part numbers listed.

Standard lead time is stock to 4 weeks.

Anexo B.2: Catálogo de tela aislante de fibra cerámica.



Copos de Fibra Cerámica

Los Copos de Fibra Cerámica Fiberfrax son el material base para la constitución de todos los productos de la familia Fiberfrax.

Se trata de un aislante térmico de muy bajo peso obtenido a partir de la fusión de una composición de Alúmina y Sílice de extrema pureza. Los mismos pueden ser usados en ciclos continuos de hasta 1260°C y por cortos períodos de tiempo a temperatura más elevadas. Los copos Fiberfrax son de color blanco y esponjoso, se empaquetan, ajustan y conforman muy fácilmente, proporcionando una rápida instalación y un rendimiento óptimo.

Debido a su alta pureza y excelentes características térmicas los productos Carbolane poseen las siguientes propiedades:

- Estabilidad a altas temperaturas.
- Baja conductividad térmica.
- Bajo peso.
- Bajo calor almacenado.
- Excelente resistencia al choque térmico.
- Alta resistencia a la corrosión.
- Excelente absorción acústica.

Propiedades Químicas

Los Copos de Fibra Fiberfrax exhiben excelente resistencia al ataque de la mayoría de los ácidos y agentes corrosivos. Las excepciones son los ácidos hidrofúorídricos, fosfóricos y los álcalis concentrados. Los Copos Fiberfrax son también resistentes a atmósferas reductoras y oxidantes. Mojadas con agua, vapor, aceites y/o combustibles sus propiedades térmicas y físicas no son alteradas, restableciéndose después del secado. Estos copos no contienen agua de cristalización y están libres de asbestos.



Disponibilidad

Los Copos de Fibra Fiberfrax se presentan en bolsas de polietileno de 25 kg.

Análisis Químico Típico

Al ₂ O ₃	47 a 53%
SiO ₂	46 a 53%
Fe ₂ O ₃	0,1%
TiO ₂	0,1%
Na ₂ O	0,1 a 1,3%
Otros	0,5%

Propiedades Físicas Típicas

Cólor	Blanca
Límite de uso continuo *	1260°C
Punto de Fusión	1760°C
Densidad normal de compactación	50 a 200 kg/m ³
Densidad de empaque	96 kg/m ³
Díámetro de fibra (medio)	2 a 3 micrones
Longitud de fibra	hasta 100 mm
Densidad específica	2,73 g/cm ³
Calor específico a 1100°C	1130 J/kg K

* El límite de uso continuo de los productos Fiberfrax está determinado por el criterio del cambio al ser irreversible y no por el punto de fusión.

Anexo B.3: Análisis de Riesgo previo al trabajo en Base Coca Halliburton

HALLIBURTON				ANÁLISIS DE RIESGOS - Prueba prototipo calentador eléctrico		TICKET #	SAP JOB #	FECHA DEL ANÁLISIS
PROYECTO	COCA	121277	JORGE LOYOLA	PROYECTO	OIELLENIA			12-May-12
CLIENTE	PETROMAZONAS EP	OSO B PAD	OSO 0021	REGISTRANTE DEL CLIENTE	SPORTY SING			
PROYECTO DEL PAIS	N/A	SPEERIV	MVID	PROYECTO DEL PROYECTO	Prueba			
COMENTARIOS:				ANÁLISIS DE RIESGOS DEL PROCESO PRUEBA DE CALENTADOR ELÉCTRICO				
DESCRIPCIÓN DEL PELIGRO (Actividad)	CAUSA (aspecto)	EFFECTOS (Impacto)	EVALUACION DEL RIESGO EXISTENTE		EXISTEN CONTROLES Y CONTRAMEDIDAS Y/O RECOMENDACIONES PARA DIMINUIR EL RIESGO (INCLUIR LA ESTIMADA DE TERMINACION (DATOS IMPORTANTES DE RECOMENDACIONES))		EVALUACION DEL RIESGO DESPUES DEL CONTROL Y/O RECOMENDACION	
			L	P			S	P
			A	II			R	D
			N	D			E	III
			C	3			P	D
			O	D			R	2
			V	3			O	
<p>Como se obtiene un CPR de 2, se requiere aprobación gerencial, a lo que se permite como máximo dos pruebas de funcionamiento y luego envío a certificación.</p>								
<p>Participantes:</p>								
<p>Jorge Loyola NOMBRE</p>			<p>PROBA</p>			<p>NOMBRE</p>		
<p>Raul Canaga NOMBRE</p>			<p>PROBA</p>			<p>PROBA</p>		
<p>Manuel Llorquinga NOMBRE</p>			<p>PROBA</p>			<p>Fausto Salinas NOMBRE REP DEL CLIENTE</p>		
<p>BLANCO</p>			<p>P Personal</p>			<p>E Equipo</p>		
<p>DT Tiempo Perdido</p>			<p>DC Datos</p>			<p>ENV Medio Ambiente</p>		
<p>I Entlace</p>								