



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 2

Neiva, 6 de abril de 2018

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

Johan Sebastián Claros Puentes, con C.C. No. 1075284970,

Fabian David Obando Bravo, con C.C. No. 1082777439,

autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado “Incidencia de la transferencia térmica de los perfiles de temperatura de los fluidos con flujo monofásico presentes en el pozo sobre la tubería de completamiento”, presentado y aprobado en el año 2018 como requisito para optar al título de Ingeniero de Petróleos;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

Vigilada Mineducación



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 2

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores” , los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Fabian David Obando Bravo

Fabian Obando

Firma: cc.1082777439

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Johan Sebastián Claros Puentes

Johan Claros P.

Firma: C.C. 1075284970



**TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO:** Incidencia de la transferencia térmica de los perfiles de temperatura de los fluidos con flujo monofásico presentes en el pozo sobre la tubería de completamiento.

**AUTOR O AUTORES:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Claros Puentes	Johan Sebastián
Obando Bravo	Fabian David

**DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Hernández Cortés	Claudia Marcela

**ASESOR (ES):**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
----------------------------	--------------------------

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE:** Ingeniero de Petróleos

**FACULTAD:** Ingeniería

**PROGRAMA O POSGRADO:** Petróleos

**CIUDAD:** Neiva

**AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2018

**NÚMERO DE PÁGINAS:** 104

**TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):**

Diagramas\_\_\_ Fotografías\_\_\_ Grabaciones en discos\_\_\_ Ilustraciones en general X Grabados\_\_\_  
Láminas\_\_\_ Litografías\_\_\_ Mapas\_\_\_ Música impresa\_\_\_ Planos\_\_\_ Retratos\_\_\_ Sin ilustraciones\_\_\_  
Tablas o Cuadros X

Vigilada mieducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional [www.usco.edu.co](http://www.usco.edu.co), link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



**SOFTWARE** requerido y/o especializado para la lectura del documento: PDF

**MATERIAL ANEXO:**

**PREMIO O DISTINCIÓN** (*En caso de ser LAUREADAS o Meritoria*):

**PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:**

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. Temperatura	Temperature	6. Convección	Convection
2. Algoritmo	Algorithm	7. Conducción	Conduction
3. Inyección	Injection	8. Transferencia de calor	Heat transfer
4. Producción	Production		
5. Balance de energía	Energy balance		

**RESUMEN DEL CONTENIDO:** (Máximo 250 palabras)

El completamiento es una configuración de tubería y equipos que se ubican en fondo de pozo y se ven sometidos a diferentes condiciones de altas presiones y temperaturas.

De acuerdo a lo anterior, se desarrolla un algoritmo el cual consiste en una solución analítica y numérica que permite la predicción de la temperatura en función de la profundidad y el tiempo, fundamentado en los procesos de transferencia de calor que ocurren en los diferentes servicios de inyección y producción en flujo monofásico.

Para solucionar el problema, se plantea un balance de energía que gobierna en un sistema pozo-formación teniendo en cuenta la presencia de flujo monofásico, el cual se utiliza para modelar el comportamiento térmico del pozo.

Primero se evalúan las propiedades térmicas del sistema pozo formación, que está en función de las propiedades del fluido, del flujo, material de la tubería de completamiento, entre otras. Para posteriormente estimar el coeficiente de transferencia de calor de convección y correlacionarlo con la conducción transitoria de calor en función del tiempo para la tierra.

Finalmente, se desarrolla un perfil de temperatura a un tiempo determinado.

**ABSTRACT:** (Máximo 250 palabras)



The completion is a configuration of equipment and pipes that is located in a bottom of the well and that is sold in some conditions of high pressure and temperature.

According with the last, it develops an algorithm, which consists in an analytical and numerical solution that allows the prediction of temperature in function of time an depht, based on the heat transfer processes that has been presented in the different injection and production services in monophasic flow.

To solve the problem, It proposes a energy balance that govern a well formation system, taking in account the presence of single phase flow, which it has been used to model the thermal behavior of the well.

In first instance the thermal properties the thermal properties of the well formation system are evaluated, which are in function of the properties of the fluid, the flow and the material of the tubing and casing, among other. To estimate the over-all heat-transfer coefficient and to correlate it with the transient heat-conduction time function for earth.

Finally, the temperature profile is generated at a determined time.

#### APROBACION DE LA TESIS

Nombre Jurado: Freddy Humberto Escobar Macualo

Firma:

Nombre Jurado: Claudia Milena Amorocho Cruz

Firma:

**INCIDENCIA DE LA TRANSFERENCIA TÉRMICA DE LOS PERFILES DE  
TEMPERATURA DE LOS FLUIDOS CON FLUJO MONOFÁSICO PRESENTES EN EL  
POZO SOBRE LA TUBERÍA DE COMPLETAMIENTO**

**PRESENTADO POR:**

**JOHAN SEBASTIAN CLAROS PUENTES Código: 20112104978**

**FABIAN DAVID OBANDO BRAVO Código: 20112104212**



**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE PETRÓLEOS**

**NEIVA – HUILA**

**2018**

**INCIDENCIA DE LA TRANSFERENCIA TÉRMICA DE LOS PERFILES DE  
TEMPERATURA DE LOS FLUIDOS CON FLUJO MONOFÁSICO PRESENTES EN EL  
POZO SOBRE LA TUBERÍA DE COMPLETAMIENTO**

**ÁREA DE INVESTIGACIÓN: COMPLETAMIENTO DE POZOS**

**JOHAN SEBASTIAN CLAROS PUENTES Código: 20112104978**

**FABIAN DAVID OBANDO BRAVO Código: 20112104212**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de INGENIERO DE  
PETRÓLEOS**

**DIRECTOR:**

**CLAUDIA MARCELA HERNÁNDEZ**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE PETRÓLEOS**

**NIEVA – HUILA**

**2018**

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Neiva, 4 de Abril.

## Dedicatoria

*A mis padres Luz Marina Bravo y Edgar Obando, que me han ofrecido su apoyo incondicional*

*Y a quienes considero son mis primeros maestros.*

*A mis hermanos, que a pesar de ser una familia numerosa, han logrado todos ser profesionales y  
me han brindado un soporte.*

*A todos mis familiares que han creído en mí.*

*A mis compañeros con quienes compartí mi vida universitaria.*

FABIAN DAVID OBANDO BRAVO.

## Dedicatoria

*A mis padres Hector Claros y Lucedy Puentes, quienes fueron siempre mi apoyo emocional, económico, moral y espiritual, antes y durante mi etapa como universitario.*

*A mis hermanas Valentina y Ana Lucía por ser una de las razones de culminar este logro.*

*A mi familia por ser de una u otra manera un apoyo incondicional.*

*A todos mis compañeros de estudio y amigos.*

*Por último pero no menos importante, a Dios por brindarme las capacidades necesarias para el desarrollo de mi vida y de mi carrera universitaria.*

JOHAN SEBASTIAN CLAROS PUENTES.

## **Agradecimientos**

*Deseamos expresar nuestro más sincero agradecimiento a nuestra directora, la profesora Marcela Hernández, que nos brindó una idea y su tiempo para guiarnos en el desarrollo del tema.*

*A la profesora Claudia Milena Amorocho y al profesor Néstor Enrique Cerquera, quienes nos ayudaron en nuestra investigación, ofreciendo sus conocimientos a cerca del tema.*

*A todos los profesores de la Universidad Surcolombiana por darnos las bases para ser profesionales y recalcar nos la importancia de además de tener conocimientos técnicos, ser profesionales y personas con ética.*

*Y a todas las personas que de una u otra manera nos ayudaron a desarrollar este trabajo de grado.*

## Resumen

El completamiento es una configuración de equipos y tuberías que se ubican en fondo de pozo y que se ven sometidos a diferentes condiciones de altas presiones y temperaturas, las cuales deben soportar. La temperatura que presente la tubería es una de las más críticas y es determinante para lograr un óptimo diseño.

De acuerdo a lo anterior, se desarrolla un algoritmo, el cual consiste en una solución analítica y numérica que permite la predicción de la temperatura en función del tiempo y la profundidad, fundamentado en los procesos de transferencia de calor que se presentan en los diferentes servicios de inyección y producción en flujo monofásico.

Para solucionar el problema, se plantean las ecuaciones de transferencia de calor que gobiernan un sistema pozo formación teniendo en cuenta la presencia de flujo monofásico, las cuales se utilizan para modelar el comportamiento térmico del pozo.

En primera instancia son evaluadas las propiedades térmicas del sistema pozo formación, que están en función de las propiedades del fluido, del flujo, del material de la tubería de completamiento, entre otras. Para posteriormente estimar el coeficiente total de transferencia de calor y correlacionarlo con la conducción transitoria de calor en función del tiempo para la tierra.

Se realizó una validación del programa TEMPRO comparando con un software comercial, para ellos se usó exclusivamente los casos de una línea, corroborando que el programa se desempeña muy bien, dentro de las consideraciones que se tendrán en cuenta mas adelante.

Para desarrollar el caso de dos líneas de manera simultanea se desarrollaron diferentes ejemplos que los cuales genera el programa TEMPRO, por último se realiza una comparación de perfiles de temperatura de la tubería de completamiento para el mismo pozo realizandolo para una

línea y dos líneas, determinando que el proceso del cálculo de perfil para ambos casos es bastante preciso como dato de entrada para el diseño del perfil axial y por ende el diseño de completamiento de pozos.

## Abstract

The completion is a configuration of equipment and pipes that is located in a bottom of the well and that is sold in some conditions of high pressure and temperature, which must support. The temperature presented by the pipeline is one of the most critical and determinant to achieve the potential of the disease.

According with the last, it develops an algorithm, which consists in an analytical and numerical solution that allows the prediction of temperature in function of time and depth, based on the heat transfer processes that are presented in the different injection and production services in monophasic flow.

To solve the problem, it proposes the heat transfer equations that govern a well formation system, taking into account the presence of single phase flow, which are used to model the thermal behavior of the well.

In first instance the thermal properties the thermal properties of the well formation system are evaluated, which are in function of the properties of the fluid, the flow and the material of the tubería and revestimiento, among other. To estimate the over-all heat-transfer coefficient and to correlate it with the transient heat-conduction time function for earth.

A validation of the TEMPRO program was carried out, comparing with commercial software, for which only one line cases were used, corroborating that the program performs very well, within the considerations that will be taken into account later on.

To develop the case of two lines simultaneously, different examples were developed which generate the TEMPRO program.

Finally, a comparison of the temperature profiles of the completion pipe for the same well is made, performing it for one line and two lines, determining that the profile calculation process for both cases is quite accurate as input data for the axial profile design and therefore the well completion design.

## Introducción

La temperatura del fluido desempeña un papel importante en las operaciones petroleras de producción, incluyendo perforación y completamiento, diseño de facilidades, control de deposición de sólidos, y análisis de data de presión.

En la industria del petróleo es importante generar los análisis de esfuerzos para tener un diseño preciso en el completamiento, para ello es indispensable contar con estimaciones confiables de temperaturas presente en el sistema de tuberías debido al flujo de fluidos tanto en el interior de la tubería como en el revestimiento que se presentan durante un servicio u operación, y así comprender la técnica de éstas, como es el caso de los cambios de temperatura en procesos combinados de transferencia de calor por conducción y convección.

Generalmente los simuladores representan el comportamiento térmico del fluido interno de manera aislada. Actualmente los completamientos de pozo han evolucionado para desempeñarse de manera más óptima de acuerdo a los diferentes servicios que pueden presentarse en él (dos o más), y esto conlleva a la estimación de un perfil de temperatura para cada línea de flujo.

En esencia, este documento expone un modelamiento de procesos de transferencia de calor acertados para diferentes situaciones de flujo monofásico, tales como, procesos de contraflujo (inyección en revestimiento – producción por tubería / inyección en tubería – producción por revestimiento), flujo paralelo (inyección en revestimiento y tubería – producción en revestimiento y tubería). Para ello se trabaja el sistema como un intercambiador de calor ya que existe la interferencia de dos o más corrientes de proceso, unas actúan como fuentes de calor y las otras actúan como receptores de calor, el cual se transfiere a través de las paredes de la tubería concéntrica que conforman el pozo; cuando existe una diferencia de temperatura entre un tubo y

el fluido presente circundante por él, se transfiere calor entre la pared del tubo y el fluido, esto se conoce como flujo de calor intercambiado por unidad de tiempo.

## Contenido

MARCO TEÓRICO.....	1
1. Conceptos básicos de la termodinámica y energía.....	1
1.1. Relación entre transferencia de calor y termodinámica .....	2
1.2. La primera ley de la termodinámica. ....	3
1.3. Balance de energía.....	4
1.4. Incremento de la energía de un sistema.....	4
1.5. Mecanismos de transferencia de energía.....	5
2. Análisis de energía en sistemas cerrados.....	8
2.1. Calores específicos.....	8
2.2. Flujos másico y volumétrico.....	9
3. Mecanismos de transferencia de calor .....	11
3.1 Conducción .....	11
3.1.1 Ecuación general de la conducción .....	11
3.1.2 Coordenadas cilíndricas y esféricas .....	13
3.1.4 Conducción de calor transitoria .....	16
3.1.4.1 Función de tiempo adimensional .....	18
3.2 Convección .....	19
3.2.1 Convección natural .....	21
3.2.2 Convección forzada.....	22
3.3 Radiación .....	26
4. Procesos de transferencia de calor en el pozo .....	28
METODOLOGÍA .....	32
5. Modelamientos matemáticos de transferencia de calor en el pozo.....	32
5.1. Modelamiento de Ramey .....	32
5.1.1. Derivación de la solución del modelo de Ramey.....	33
5.2. Modelamiento de Hasan – Kabir.....	38
5.2.1. Inyección a través del revestimiento – producción a través de la tubería (Gas Lift – Bombeo hidráulico).....	38
5.3. Modelamiento Propuesto .....	43
5.3.1. Inyección a través de la tubería – Producción a través del revestimiento .....	43
5.3.2. Inyección a través del revestimiento – Inyección a través de la tubería .....	43
5.3.3. Producción a través del revestimiento – Producción a través de la tubería .....	44

5.3.4. Inyección a través del Revestimiento – Producción a través de la tubería .....	45
6. Proceso de determinación del perfil de temperatura .....	46
6.1. Parámetros estadísticos para la evaluación .....	49
7. Desarrollo del programa computacional TEMPRO .....	51
7.1. Lenguaje de programación .....	51
7.1.1. Python .....	51
7.1.2. Interfaz gráfica (GUI) .....	52
7.2. Descripción de la herramienta computacional TEMPRO .....	53
7.2.1. Datos generales del pozo .....	54
7.2.2. Selección del modelo .....	55
7.2.3. Datos del pozo (Data) .....	56
7.2.4. Diagrama .....	57
7.2.5. Tabla de resultados .....	58
7.2.6. Gráfica .....	60
8. Resultados .....	61
8.1. Validación de resultados .....	62
8.1.1. Datos de pozos .....	62
8.1.2. Comparación de perfiles .....	64
8.1.4. Resultados estadísticos del error .....	68
8.2. Consideraciones .....	70
CONCLUSIONES .....	71
RECOMENDACIONES .....	72
Bibliografía .....	73

**Lista de tablas**

Tabla 1.....	19
Tabla 2.....	62
Tabla 3.....	63
Tabla 4.....	63
Tabla 5.....	68
Tabla 6.....	78
Tabla 7.....	80
Tabla 8.....	82
Tabla 9.....	84

## Lista de figuras

Figura 1. Cambio de energía respecto al flujo de masa.....	6
Figura 2. Capacidad de almacenamiento de energía. ....	8
Figura 3. Velocidad promedio. Cengel Y., Boles M.....	10
Figura 4. Convención de signos para el flujo de calor por conducción. ....	12
Figura 5. Conducción de calor radial.....	14
Figura 6. Distribución de temperaturas con sus respectivas resistencias.....	15
Figura 7. Distribución de temperatura y la velocidad sobre una placa plana.....	21
Figura 8. Diagrama esquemático de la radiación entre el cuerpo 1 y el recinto 2.....	27
Figura 9. Completamientos superiores. Bellarby J. (2009).....	29
Figura 10. Mecanismos de transferencia de calor en un pozo costa fuera.....	33
Figura 11. Esquema del problema de transferencia de calor.....	34
Figura 12. Balance de energía para dos fluidos.....	39
Figura 13. Diagrama de flujo para modelamiento de contraflujo (doble línea), TEMPRO.....	47
Figura 14. Diagrama de flujo para modelamiento de flujo paralelo (doble línea), TEMPRO.....	48
Figura 15. Vista principal de inicio de la herramienta computacional TEMPRO.....	53
Figura 16. Vista datos generales del pozo.....	54
Figura 17. Vista datos generales del pozo.....	55
Figura 18. Vista data general del modelo.....	56
Figura 19. Vista del diagrama correspondiente al modelo escogido.....	57
Figura 20.. Vista de la tabla de resultados.....	58
Figura 21. Vista tabla de resultados para modelo de flujo de dos líneas.....	59
Figura 22. Vista del perfil de temperatura de manera gráfica.....	60
Figura 23. Perfil de temperatura para inyección de agua en una línea.....	64
Figura 24. Perfil de temperatura para producción en una línea.....	65
Figura 25. Perfil de temperatura para inyección de nitrógeno en una línea.....	66
Figura 26. Perfil de temperatura para inyección de agua dual – flujo paralelo, tubería.....	79
Figura 27. Perfil de temperatura para inyección de agua dual – flujo paralelo, revestimiento.....	79
Figura 28. Perfil de temperatura para producción de aceite dual – flujo paralelo, tubería.....	81
Figura 29. Perfil de temperatura para producción de aceite dual – flujo paralelo, revestimiento.....	81
Figura 30. Perfil de temperatura para inyección de agua en tubería, producción de aceite en revestimiento – contraflujo, tubería.....	83
Figura 31. Perfil de temperatura para inyección de agua en tubería, producción de aceite en revestimiento – contraflujo, revestimiento.....	83
Figura 32. Perfil de temperatura para inyección de agua en revestimiento, producción de aceite en tubería – contraflujo, tubería.....	85
Figura 33. Perfil de temperatura para inyección de agua en revestimiento, producción de aceite en tubería – contraflujo, revestimiento.....	85
Figura 34. Perfil de temperatura comparativo entre modelo de una línea vs modelo simultáneo - TEMPRO.....	86

**Lista de anexos**

<b>Anexo 1:</b> Propiedades térmicas de los fluidos .....	76
<b>Anexo 2:</b> Ejemplos de aplicación.....	77

## MARCO TEÓRICO

### 1. Conceptos básicos de la termodinámica y energía

La termodinámica se puede definir como la ciencia de la energía. La energía se puede considerar como la capacidad para causar un determinado cambio. Actualmente, el concepto de termodinámica se interpreta de manera amplia para incluir los aspectos de energía y sus transformaciones, incluida la generación de potencia, la refrigeración y las relaciones entre las propiedades de la materia.

Una de las más importantes y fundamentales leyes de la naturaleza a tener en cuenta es el principio de conservación de la energía. Ésta manifiesta que, durante una interacción, la energía puede cambiar de una forma a otra, pero su cantidad neta total permanece constante. Es decir, la energía no se crea ni se destruye, se transforma. El cambio en el contenido energético de un cuerpo o de cualquier otro tipo de sistema es igual a la diferencia entre la entrada y la salida de energía, y el balance se expresa como

$$E_{entrada} - E_{salida} = \Delta E \quad (1 - 1)$$

La primera ley de la termodinámica a pequeños rasgos es una expresión sobre el principio de conservación de la energía, la cual sostiene que la energía es una propiedad termodinámica. La segunda ley de la termodinámica afirma que la energía tiene *calidad*, así como *cantidad*, y los procesos ocurren hacia donde disminuye la calidad de la energía. En pocas palabras, la energía de un cuerpo de alta temperatura se degrada en un ambiente de menor temperatura (se transforma en una forma menos útil a otra con menor temperatura) una vez que se transfiere hacia el medio circundante.

### **1.1.Relación entre transferencia de calor y termodinámica**

Cuando existe contacto de dos sistemas con temperaturas diferentes, aparece el gradiente de temperatura el cual indica la transferencia de energía de ese sistema. El proceso mediante el cual tiene lugar el transporte de energía se conoce como *transferencia de calor*. El calor transportado no se puede observar o medir de manera directa. Sin embargo, sus efectos se pueden identificar y cuantificar mediante mediciones y análisis. El flujo de calor, es un proceso a través del cual se cambia la energía interna de un sistema, de manera similar a la realización de trabajo.

*La termodinámica*, es la rama de la ciencia que emplea la relación entre el calor y otras formas de energía, incluyendo el trabajo mecánico en particular. Sus principios, como todas las leyes de la naturaleza, se argumentan en observaciones y se han generado leyes que se consideran válidas para todos los procesos que ocurren en la naturaleza, debido a que no se han encontrado anomalías (Cengel & Boles, 2012).

Todos los procesos de transferencia de calor comprenden el intercambio y/o la conversión de energía. Por tanto, deben obedecer la primera ley de la termodinámica, así como la segunda. Por consiguiente, aparentemente se podría suponer que los principios de la transferencia de calor solo obedecen a las leyes básicas de la termodinámica, pero esta conclusión es errónea debido a que la termodinámica clásica está restringida principalmente al estudio de los estados de equilibrio, correspondiente a la cuantificación de las transformaciones que ocurren por la falta de equilibrio en procesos de ingeniería. Debido a que el flujo de calor es el resultado de un desequilibrio de temperatura, su método de cuantificación se debe apoyar en otras ramas de la ciencia, dando como primicia los balances de energía.

## 1.2. La primera ley de la termodinámica.

La primera ley de la termodinámica, conocida también como el principio de conservación de la energía, brinda una base sólida para estudiar las relaciones entre las diferentes formas de interacción de energía. A partir de observaciones experimentales, la primera ley de la termodinámica establece que la energía no se puede crear ni destruir durante un proceso; solo puede cambiar de forma. Por ende, cada cantidad de energía por pequeña que sea, debe justificarse durante un proceso (Cengel & Boles, 2012).

Una consecuencia importante de la primera ley es la existencia y definición de la propiedad *energía total E*. Considerando que el trabajo neto es el mismo para todos los procesos adiabáticos de un sistema cerrado entre dos estados determinados, el valor del trabajo neto debe depender únicamente de los estados iniciales y finales del sistema y por lo tanto debe corresponder al cambio en una propiedad del sistema; esta propiedad es la *energía total*.

La primera ley no hace referencia al valor de la energía total de un sistema cerrado en un estado, esta establece que el cambio de energía total durante un proceso adiabático debe ser igual al trabajo neto realizado. Aunque la esencia de la primera ley es la existencia de la propiedad *energía total*, con frecuencia se considera a la primera ley como un enunciado del principio de *la conservación de la energía* (Cengel & Boles, 2012).

### 1.3. Balance de energía.

De acuerdo con el análisis anterior, el principio de conservación de la energía se expresa como: el cambio neto (aumento o disminución) de la energía total del sistema durante un proceso es igual a la diferencia entre la energía total que entra y la energía total que sale del sistema durante el proceso. Es decir,

$$E_{entrada} - E_{salida} = \Delta E \quad (1 - 2)$$

Esta relación es más conocida como balance de energía y es aplicable a cualquier tipo de sistema que experimenta cualquier clase de proceso. El uso exitoso de esta relación para resolver problemas de ingeniería depende de la comprensión de las distintas formas de energía y de reconocer los modos como ésta se transfiere (Cengel & Boles, 2012, p. 72).

### 1.4. Incremento de la energía de un sistema.

Para determinar el cambio de energía de un sistema durante un proceso se requiere evaluar la energía del sistema al principio y al final del proceso y encontrar su diferencia. Es decir,

$$\Delta E_{sistema} = E_{final} - E_{inicial} = E_2 - E_1 \quad (1 - 3)$$

Observe que la energía es una propiedad y el valor de una propiedad no cambia a menos que cambie el estado del sistema. Por lo tanto, el cambio de energía de un sistema es cero si el estado no se modifica durante el proceso. También, es posible que exista energía en numerosas formas: interna (energía cinética de las moléculas, latente, química y nuclear), cinética, potencial, eléctrica y magnética, por lo que la suma de ellas constituye la energía total  $E$  de un sistema. En ausencia de efectos eléctrico, magnéticos y de tensión superficial, el cambio en la energía total del sistema durante un proceso es la suma de los cambios de sus energías interna, cinética y potencial, lo cual se expresa como:

$$\Delta E = \Delta U + \Delta EC + \Delta EP \quad (1 - 4)$$

Donde

$$\Delta U = m(u_2 - u_1) \quad (1 - 5)$$

$$\Delta EC = \frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2) \quad (1 - 6)$$

$$\Delta EP = mg(z_2 - z_1) \quad (1 - 7)$$

Cuando se especifican los estados iniciales y finales, los valores de las energías internas específicas  $u_1$  y  $u_2$  se determinan directamente de las tablas de propiedades termodinámicas o de las relaciones de éstas.

La mayor parte de los sistemas presentes en la práctica son estacionarios, es decir, no presentan cambios en su velocidad o elevación durante un proceso. Así, para sistemas estacionarios, los cambios en las energías cinética y potencial son cero ( $\Delta EC = \Delta EP = 0$ ), y la relación del cambio de energía total se reduce a  $\Delta E = \Delta U$  para estos sistemas. También, la energía de un sistema durante un proceso cambiará incluso si únicamente una forma de su energía cambia mientras que las otras permanecen sin alteración (Cengel & Boles, 2012, p. 72).

### **1.5. Mecanismos de transferencia de energía.**

La energía se puede transferir hacia o desde un sistema de tres maneras: calor, trabajo y flujo másico. Las interacciones de energía se reconocen en las fronteras del sistema cuando lo cruzan, y representan la energía de gana o pierde un sistema durante un proceso. Las únicas dos formas de interacción con una masa fija o sistema cerrado son las transferencias de calor y de trabajo.

- a. **Transferencia de calor,  $Q$**  La transferencia de calor hacia un sistema (ganancia de calor) incrementa la energía de las moléculas y por lo tanto la del sistema; asimismo, la transferencia de calor desde un sistema (pérdida de calor) la disminuye, ya que la energía transferida como calor viene de la energía de las moléculas del sistema.
- b. **Transferencia de trabajo,  $W$**  Una interacción de energía que no es causada por una diferencia de temperatura entre un sistema y el exterior es trabajo. La transferencia de trabajo a un sistema (trabajo realizado sobre un sistema) incrementa la energía de éste, mientras que la transferencia de trabajo desde un sistema (trabajo realizado por un sistema) la disminuye, puesto que la energía transferida como trabajo viene de la energía contenida en el sistema.
- c. **Flujo másico,  $m$**  El flujo másico que entra y sale del sistema funciona como un mecanismo adicional de transferencia de energía. Cuando entra masa a un sistema, la energía de esta aumenta debido a que la masa lleva consigo energía (de hecho, la masa es energía). De igual modo, cuando una cantidad de masa sale del sistema, la energía de éste disminuye porque la masa que sale retira algo de energía consigo (Fig. 1).

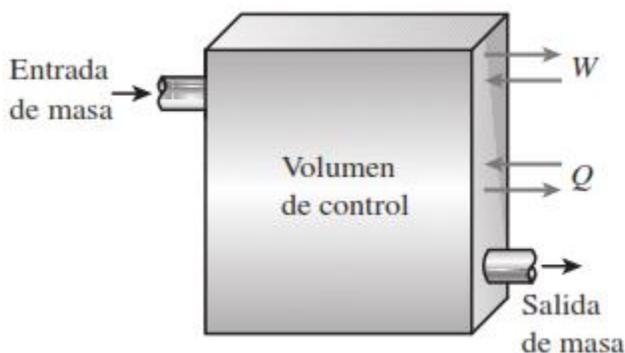


Figura 1. Cambio de energía respecto al flujo de masa.

Cengel Y., Boles M. (2012). [Figura].

Recuperado de: Termodinámica.

Como la energía puede ser transferida en las formas de calor, trabajo y masa, y su transferencia neta es igual a la diferencia entre las cantidades transferidas hacia dentro y hacia fuera, el balance de energía se expresa de modo más explícito como (Cengel & Boles, 2012, p. 73).

$$\begin{aligned}
 E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}} & \\
 &= (Q_{\text{entrada}} - Q_{\text{salida}}) + (W_{\text{entrada}} - W_{\text{salida}}) \quad (1 - 8) \\
 &+ (E_{\text{masa,entra}} - E_{\text{masa,sale}}) = \Delta E_{\text{entrada}}
 \end{aligned}$$

La transferencia de calor  $Q$  es cero para sistemas adiabáticos, la transferencia de trabajo  $W$  es cero para sistemas en los que no intervienen interacciones de trabajo, y el transporte de energía  $E_{\text{masa}}$  es cero para sistemas sin flujo másico a través de su frontera (es decir, sistemas cerrados).

El balance de energía para un sistema que experimenta cualquier clase de proceso se expresa de manera compacta como:

$$E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}} = \Delta E_{\text{sistema}} \quad (1 - 9)$$

O, en la forma de tasa, como

$$\dot{E}_{\text{entrada}} - \dot{E}_{\text{salida}} = dE_{\text{sistema}}/dt \quad (1 - 10)$$

Para tasas constantes, las cantidades totales durante un intervalo de tiempo  $\Delta t$  se relacionan con las cantidades por unidad de tiempo mediante (Cengel & Boles, 2012, p. 74).

$$Q = \dot{Q}\Delta t, \quad \dot{W} = \dot{W}\Delta t \quad (1 - 11)$$

$$\Delta E = \left(\frac{dE}{dt}\right)\Delta t \quad (1 - 12)$$

## 2. Análisis de energía en sistemas cerrados

En este capítulo se definen los calores específicos, se obtienen las relaciones para la energía interna y la entalpía de gases ideales en términos de calores específicos y cambios de temperatura, y se llevan a cabo balances de energía en varios sistemas en los que intervienen gases ideales. De igual manera para sistemas relacionados con sólidos y líquidos, que se aproximan como sustancias incompresibles.

### 2.1. Calores específicos.

Por experiencia se conoce que se requieren distintas cantidades de energía para elevar en un grado la temperatura de masas idénticas pertenecientes a sustancias diferentes. Por ende, es deseable tener una propiedad que permita comparar la capacidad de almacenamiento de energía de varias sustancias. Esta propiedad se define como el calor específico.

El calor específico es la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia (Fig. 6). En general, esta energía depende de cómo se ejecute el proceso. (Cengel & Boles, 2012, p. 178).

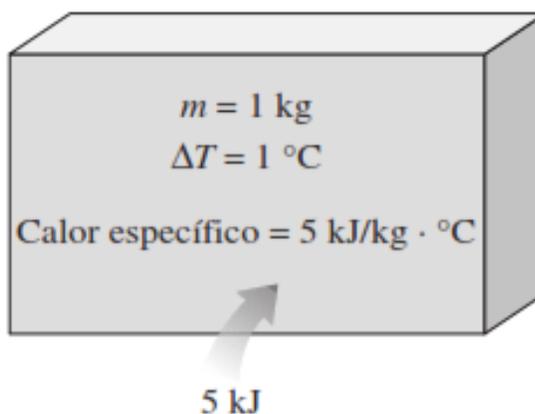


Figura 2. Capacidad de almacenamiento de energía.

Cengel Y., Boles M. (2012). [Figura].

Recuperado de: Termodinámica.

## 2.2. Flujos másico y volumétrico.

La cantidad de masa que pasa por una sección transversal por unidad de tiempo se llama flujo másico y se denota mediante  $\dot{m}$ . El punto sobre un símbolo es usado para indicar la rapidez de cambio respecto al tiempo.

Un fluido entra o sale comúnmente de un volumen de control a través de tuberías o ductos. El flujo másico diferencial del fluido que pasa por un pequeño elemento de área  $dA_t$  en una sección transversal de flujo es proporcional a  $dA_t$ , la densidad del fluido  $\rho$  y la componente de la velocidad de flujo normal a  $dA_t$ , que se denota como  $V_n$ , y se expresa como

$$\delta \dot{m} = \rho V_n dA_t \quad (2 - 1)$$

Tanto  $\delta$  como  $d$  se usan para indicar un diferencial, pero  $\delta$  se emplea por lo regular para cantidades que están en función de la trayectoria y tienen diferenciales inexactas, mientras que  $d$  se utiliza para cantidades en función de un punto y tienen diferenciales exactas Cengel & Boles, 2012, p. 220).

El flujo másico a través del área de la sección transversal de un tubo o un ducto se obtiene mediante integración

$$\dot{m} = \int_{A_t} \delta \dot{m} = \int_{A_t} \rho V_n dA_t \quad (2 - 2)$$

La ecuación 2-2 es válida todo el tiempo, no siempre es práctica para análisis de ingeniería como resultado de la integral. En cambio, sería bueno contar con una expresión en términos de valores promedio de flujo másico a través de la sección transversal del tubo. En un flujo general compresible, tanto  $\rho$  como  $V_n$  varían a lo largo del tubo. Sin embargo, en muchas aplicaciones prácticas, la densidad es en esencia uniforme sobre la sección transversal del tubo, de manera que  $\rho$  se puede dejar fuera de la integral de la ecuación 2-2. Por su parte, la velocidad

nunca es uniforme en una sección transversal de tubería debido a que el fluido se adhiere a la superficie y, por lo tanto, tiene velocidad cero en la pared. Además, la velocidad varía desde cero en las paredes hasta algún valor máximo cercano o sobre la línea central de la tubería. Se define la velocidad promedio  $V_{prom}$  como el valor promedio de  $V_n$  en toda la sección transversal (Fig.3) (Cengel & Boles, 2012, p. 221).

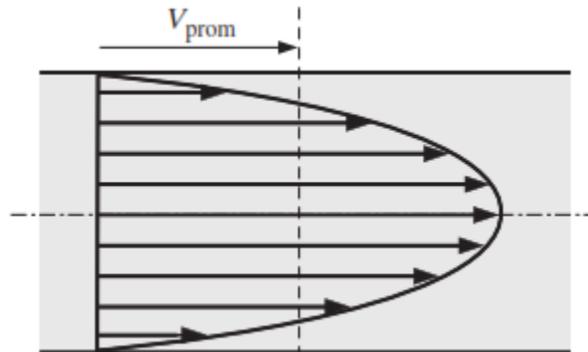


Figura 3. Velocidad promedio. Cengel Y., Boles M.

(2012). [Figura]. Recuperado de: Termodinámica.

Velocidad promedio:

$$V_{prom} = \frac{1}{A} \int_{A_t} V_n dA_t \quad (2 - 3)$$

Donde  $A_t$  es el área de la sección transversal normal a la dirección del flujo.

### 3. Mecanismos de transferencia de calor

El calor en esencia se transporta mediante un gradiente de temperatura, y fluye de una región de alta temperatura con respecto a otra de menor temperatura. La comprensión de este proceso y sus diferentes mecanismos requiere entrelazar los principios de la termodinámica y los flujos de fluidos con la transferencia de calor (Kreith, Manglik & Bohn, 2012, p.2).

Los diferentes mecanismos por los cuales puede ocurrir la transferencia de calor son conducción, convección, radiación o la combinación de dos o más de ellos.

#### 3.1 Conducción

La transferencia de calor por conducción es un proceso de difusión. El calor se transfiere mediante un mecanismo microscópico complejo en el que los átomos interactúan por choques elásticos e inelásticos para propagar la energía de un extremo caliente de un medio (usualmente sólido) a su extremo frío. El modelamiento del proceso de conducción requiere que se aplique la termodinámica de la conservación de la energía junto con la ley de la conducción de calor de Fourier (Kreith, et al., 2012).

##### 3.1.1 Ecuación general de la conducción

Una solución de la ecuación, sujeta a condiciones iniciales y de fronteras dadas, produce la distribución de temperatura en un sistema sólido.

Como se mencionó anteriormente siempre que exista un gradiente de temperatura (una diferencia de temperatura en un medio), el calor fluirá de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura. La tasa de flujo en la que el calor se transfiere,  $qk$ , es proporcional al gradiente de temperatura  $dT/dx$  por el área  $A$ , a través de la que se transfiere el calor:

$$q_k \propto A_t \frac{dT}{dx} \quad (3 - 1)$$

La velocidad real del flujo de calor depende además de la conductividad térmica, que es una propiedad física del medio; entonces teniendo en cuenta lo anterior la tasa de transferencia de calor está dada por:

$$q_k = -kA_t \frac{dT}{dx} \quad (3 - 2)$$

La ecuación de la conducción (3 - 1) es una expresión matemática de la conservación de energía en una sustancia sólida; se define la conductividad térmica, que es conocida como la *ley de Fourier*. El signo negativo es consecuencia de la segunda ley de la termodinámica, que requiere que el flujo de calor se dé desde los puntos de mayor temperatura a los puntos de menor temperatura; el flujo de calor será positivo cuando el gradiente de temperatura sea negativo. Esto se ve representado en la figura que se muestra a continuación:

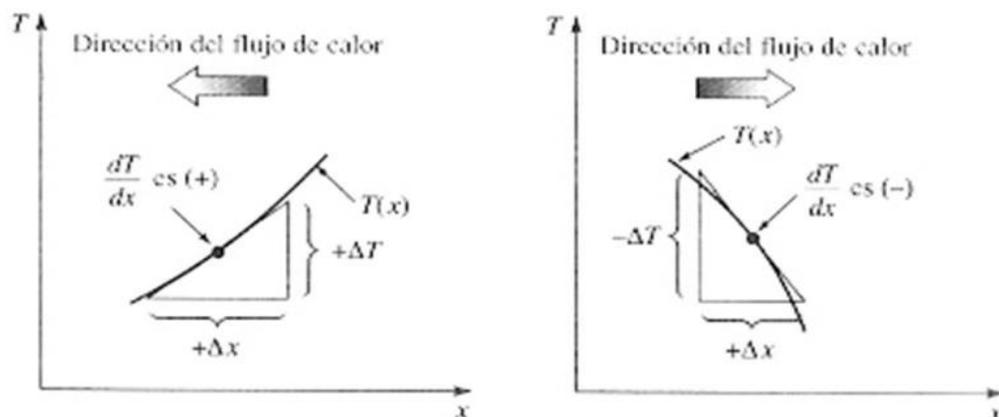


Figura 4. Convención de signos para el flujo de calor por conducción.

Kreith F., Manglik R., Bohn Mark. (2012). [Figura]. Recuperado de:  
*Principios de Transferencia de Calor.*

El equilibrio de energía incluye la posibilidad que en el material se pueda generar calor. Esto se puede dar ya sea por reacciones químicas o por reacciones nucleares. En forma general la ecuación considera el almacenamiento de energía interna, el cual se ha demostrado que es proporcional al aumento de la temperatura.

Los problemas de transferencia de calor se clasifican de acuerdo con las variables que influyen en la temperatura. Si la temperatura no está en función del tiempo, se denomina problema de estado estable, pero si es dependiente del tiempo es denominado transitorio o inestable. También de acuerdo a si está en función de una, dos o tres coordenadas se puede clasificar como unidimensional, bidimensional o tridimensional respectivamente.

### 3.1.2 Coordenadas cilíndricas y esféricas

Los términos de conducción de calor dependen de la geometría y por tanto del sistema coordenadas. Cuando no hay generación interna de energía y la temperatura es una función solo del radio, la ecuación de conducción en estado estable para coordenadas cilíndricas es:

$$\frac{d}{dr} \left( r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (3 - 3)$$

Para encontrar la solución cuando hay un fluido fluyendo a través de tubería, el sistema se puede idealizar como se muestra en la figura 5, mediante un flujo radial a través de una coraza cilíndrica. Entonces el problema sería hallar la distribución de las temperaturas y el flujo de calor en un cilindro hueco de longitud L (para el caso de profundidad es Z) si las temperaturas de las superficies interior y exterior son  $T_i$  y  $T_o$  respectivamente y no hay generación de calor (Kreith, et al., 2012, p.82).

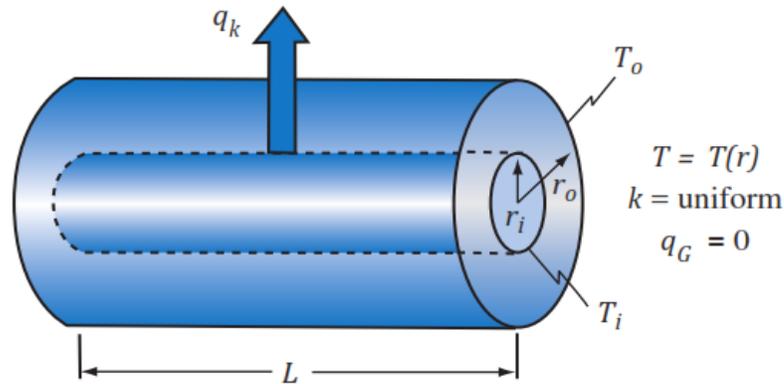


Figura 5. *Conducción de calor radial.*

Kreith F., Manglik R., Bohn Mark. (2012). [Figura].

Recuperado de: Principios de Transferencia de Calor.

Integrando la ecuación 3-2 y aplicando las respectivas condiciones de frontera se puede determinar la distribución de temperatura de forma adimensional.

$$\frac{T(r) - T_i}{T_o - T_i} = \frac{\ln\left(\frac{r}{r_i}\right)}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \quad (3 - 4)$$

La tasa de transferencia de calor por conducción es

$$q_k = -kA_t \frac{dT}{dx} = 2\pi kL \frac{T_i - T_o}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \quad (3 - 5)$$

Dejando en términos de resistencia.

$$q_k = \frac{T_i - T_o}{R_{th}} \quad (3 - 6)$$

“Los principios desarrollados para una pared plana con conducción y convección aplican para el caso del cilindro largo como un tubo o un conducto” (Kreith et al., 2012, p.83). Por ejemplo, el caso de un fluido caliente fluyendo a través de una tubería y perdiendo calor hacia el aire circundante.

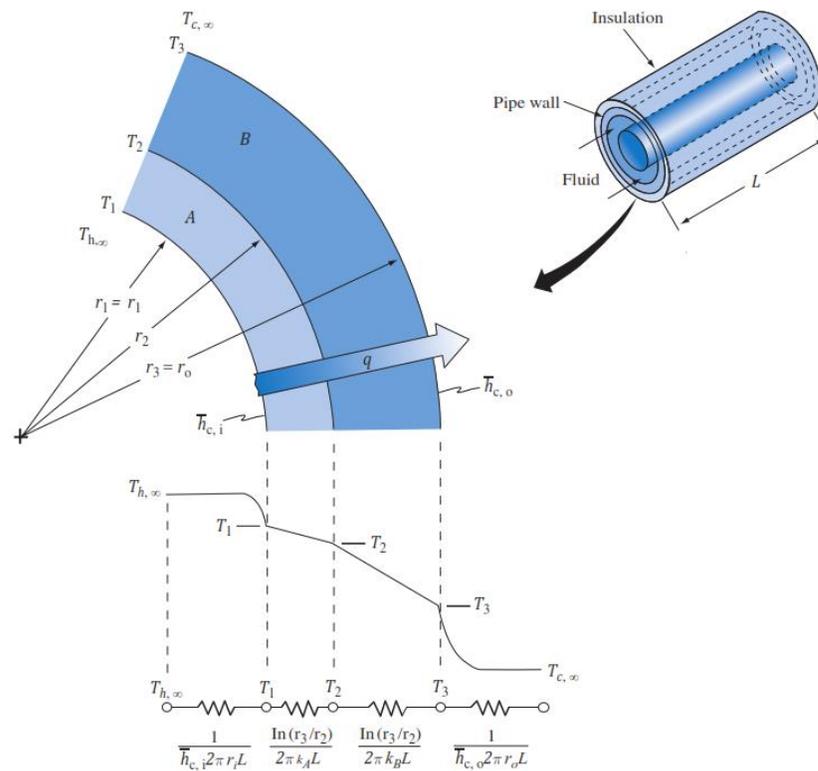


Figura 6. Distribución de temperaturas con sus respectivas resistencias.

Kreith F., Manglik R., Bohn Mark. (2012). [Figura]. Recuperado de:

*Principios de Transferencia de Calor.*

Utilizando la ecuación 3-5 y teniendo en cuenta la resistencia térmica por convección se muestra el sistema físico de la figura 6.

$$q = \frac{\Delta T}{\Sigma R_{th}} = \frac{T_h - T_c}{\frac{1}{h_{c,i} 2\pi r_1 L} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_a L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_b L} + \frac{1}{h_{c,o} 2\pi r_3 L}} \quad (3 - 7)$$

Donde los subíndices h y c representa el sistema caliente y frío respectivamente; h es el coeficiente de película del fluido.

### 3.1.3 Coeficiente global de transferencia de calor

Un problema común de la transferencia de calor es determinar la tasa de flujo de calor entre dos fluidos, separados por una pared.

Si hay una pared plana y se transfiere calor solamente por convección en ambos lados, la tasa de transferencia de calor está dada por.

$$q = \frac{T_{caliente} - T_{frío}}{\left(\frac{1}{h_c A_{caliente}}\right)_{caliente} + \frac{L}{kA} + \left(\frac{1}{h_c A}\right)_{fría}} = \frac{\Delta T}{R1 + R2 + R3} \quad (3 - 8)$$

A partir de esta ecuación se demuestra la importancia cuantitativa que representa cada una de las resistencias en la trayectoria.

A menudo es sencillo representar el coeficiente global de transferencia de calor mediante la ecuación.

$$q = U A (T_{caliente} - T_{fría}) \quad (3 - 9)$$

Comparando las ecuaciones 3-6 y 3-7

$$UA = \frac{1}{\Sigma R_{th}} = \frac{1}{\frac{1}{h_{c,i} A_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi K_a L} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi K_b L} + \frac{1}{h_{c,o} A_o}} \quad (3 - 10)$$

El coeficiente global U se puede apoyar en cualquier área elegida. El área seleccionada se convierte particularmente importante en la transferencia de calor a través de las paredes de tubos en un intercambiador de calor y para evitar confusiones se establece área base de un coeficiente global.

Para hallar el coeficiente global U en un pozo petrolero, se presentan una serie de resistencias (tubería, revestimiento, anular, cemento, formación). (Paul Willhite, 1967).

### 3.1.4 Conducción de calor transitoria

Durante el periodo transitorio la temperatura cambia y en el análisis se deben tomar en cuenta los cambios en la energía interna.

Muchos problemas de flujo de calor transitorio pueden ser resueltos si se tiene una resistencia térmica infinita, aunque en la naturaleza no se encuentre un material así. Suponiendo que la resistencia conductiva interna del sistema es tan pequeña que la temperatura dentro del sistema es sustancialmente uniforme en cualquier instante (Kreith et al., 2012).

Una relación que muestra la importancia de la resistencia térmica dentro de un sólido es el número de Biot (Bi), que es la relación de la resistencia interna a la externa y se puede expresar mediante la ecuación.

$$Bi = \frac{R_{interna}}{R_{externa}} = \frac{hL}{Ks} \quad (3 - 11)$$

Donde h es el coeficiente promedio de transferencia de calor, L es una dimensión de longitud significativa, obtenida dividiendo el volumen del cuerpo por su área y Ks es la conductividad térmica del sólido.

Como un ejemplo común de este tipo, considere el enfriamiento de un pequeño trozo de metal fundido después de sacarse de un horno caliente. Se supone que el lingote se extrae a una temperatura  $T_0$ . Se designa el tiempo en que inicia el enfriamiento  $t = 0$ , se asume que  $h =$  constante durante el proceso y la temperatura del baño  $T_\alpha$  no varía con el tiempo. El balance energético será:

*Cambio de energía interna del lingote durante  $d\varphi =$  flujo neto de calor del lingote al baño durante  $d\varphi$*

$$c\rho VdT = hA_s(T - T_\alpha)dt \quad (3 - 12)$$

Donde c es el calor específico del lingote,  $\rho$  es su densidad, V volumen, T temperatura promedio del lingote  $A_s$  área superficial. Desarrollando la ecuación 3-11, se tiene.

$$\frac{T - T_\alpha}{T_0 - T_\alpha} = e^{-\left(\frac{hA_s}{c\rho V}\right)t} \quad (3 - 13)$$

La combinación de variables en este exponente de hecho se puede expresar como el producto de dos grupos adimensionales:

$$\left(\frac{hA_s}{c\rho V}\right)t = \left(\frac{hL}{Ks}\right)\left(\frac{\alpha t}{L^2}\right) = BiFo \quad (3 - 14)$$

Donde se encuentra el nuevo termino de Fourier.

#### **3.1.4.1 Función de tiempo adimensional**

Para flujo transitorio se puede estimar una función  $f(t)$  o  $T_D$  para conducción de calor radial desde un cilindro infinitamente largo. Tales soluciones se presentan en variedad de textos de transferencia de calor y son análogos al flujo de calor transitorio. Para efectos de ingeniería se presentan diferentes modelos de forma algebraica con gran aproximación. A continuación, se muestra la Tabla 1 con los modelos de Ramey, el de Hasan y Kabir comparados con el resultado presentado por Carslaw y Jaeger.

Tabla 1.

*Comparación de diferentes modelamientos para el tiempo adimensional*

Dimensionless Time	Dimensionless Temperature, $T_D$			Ramey's Log Linear Solution	Difference (%)
	Rigorous Solution	Approximate Solution	Difference (%)		
$1.0 \times 10^{-10}$	$1.102 \times 10^{-5}$	$1.1 \times 10^{-5}$	0.0228		
$1.0 \times 10^{-6}$	$1.128 \times 10^{-3}$	$1.127 \times 10^{-3}$	0.0525		
$1.0 \times 10^{-5}$	$3.563 \times 10^{-3}$	$3.563 \times 10^{-3}$	0.0004		
$1.0 \times 10^{-4}$	$1.123 \times 10^{-2}$	$1.124 \times 10^{-2}$	-0.093		
$1.0 \times 10^{-3}$	$3.519 \times 10^{-2}$	$3.532 \times 10^{-2}$	-0.358		
0.01000	0.1081	0.1094	-1.200		
0.10	0.3142	0.3228	-2.731	-0.745	337.0
0.5	0.6168	0.6283	-1.858	0.060	90.32
1.00	0.8021	0.7895	1.577	0.406	49.36
1.50	0.9267	0.8738	5.712	0.609	34.30
2.00	1.022	0.9784	4.283	0.753	26.37
5.00	1.362	1.356	0.4703	1.211	11.13
10.0	1.651	1.651	0.0096	1.557	5.669
100	2.723	2.724	-0.058	2.708	0.5377
1,000	3.860	3.861	-0.026	3.859	0.0329
$1 \times 10^5$	6.161	6.161	-0.000	6.1616	0.0000
$1 \times 10^6$	7.312	7.312	0.0000	7.312	0.0000

Nota. Tomado de Hasan y Kabir (1994).  $T_D$  es la misma función  $f(t)$

Se observa que, a mayores tiempos, existe una mayor aproximación. Para efectos de desarrollo del problema se toma el modelo de Hasan y Kabir representado por la ecuación.

$$f(t) = (0.4063 + 0.5 \ln t_D) \left(1 + \frac{0.6}{t_D}\right) \quad (3 - 15)$$

Donde

$$t_D = \frac{\sqrt{\alpha t}}{r_{wb}} \quad (3 - 16)$$

Y  $\alpha$  es la difusividad térmica de la tierra,  $t$  el tiempo y  $r_{wb}$  el radio del pozo.

### 3.2 Convección

El modo de transferencia de calor por convección consiste en la combinación de dos mecanismos que operan de manera simultánea; el primero es la conducción y superpuesto a éste, el transporte de masa. El movimiento de fluido es un resultado de fracciones de fluido, donde cada una consiste en una gran cantidad de moléculas, que se mueven por la acción de una fuerza externa. Esta fuerza puede darse por el cambio de densidad, en convección natural, o por una diferencia de

presión generada por una bomba, un ventilador u otro objeto en convección forzada (Kreith et al., 2012, p.17).

Los procesos de transferencia de calor en los que hay un cambio de fase de un fluido también se consideran como convección debido al movimiento del fluido durante el proceso; por ejemplo, el descenso de gotas de líquido durante la condensación.

El mecanismo de convección depende de diferentes propiedades físicas del fluido como la densidad, viscosidad; la velocidad del fluido (Uno de los aspectos más importantes del análisis hidrodinámico es establecer si hay flujo turbulento o laminar), así como de las propiedades térmicas (conductividad térmica y calor específico).

La relación que permite calcular la transferencia de calor entre una superficie y un fluido es:

$$q_c = hA_t\Delta T \quad (3 - 17)$$

Donde  $q_c$  es la transferencia de calor por convección,  $A$  el área de transferencia de calor,  $h$  el coeficiente de película del fluido y  $\Delta T$  la diferencia de la temperatura superficial y la temperatura del fluido en una ubicación especificada.

Antes de intentar calcular un coeficiente de transferencia de calor, se debe analizar relacionar la transmisión de calor desde o hacia el fluido en movimiento. En la figura 7 se muestra como una corriente de aire enfría una placa plana; también se muestran las distribuciones de temperatura y velocidad que hay en ese mecanismo de transferencia de calor. Lo primero que se debe observar es como la corriente disminuye la velocidad a medida que se acerca a la superficie como resultado de las fuerzas viscosas que actúan sobre el fluido. Como la velocidad adyacente a la capa debe ser cero, la transferencia de calor entre la superficie y la capa del fluido se da por conducción (Kreith et al., 2012, p.231).

$$q_c = -k \left. \frac{dT}{dy} \right|_{y=0} = h_c(T_s - T_\infty) \quad (3 - 18)$$

Si bien esta ecuación sugiere que el mecanismo de transferencia de calor es por conducción en el proceso, el gradiente que se da en la superficie está regido por la tasa a la que el fluido alejado de la pared pueda transportar la energía hacia la corriente principal.

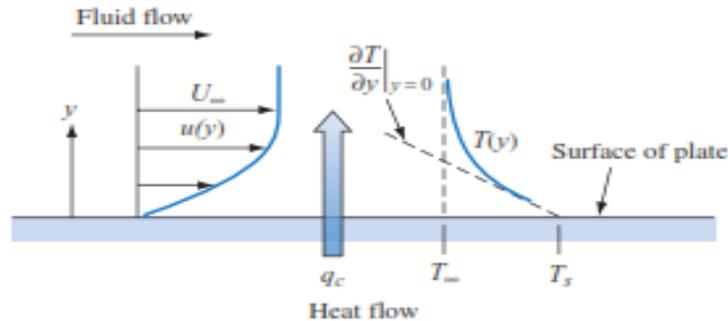


Figura 7. Distribución de temperatura y la velocidad sobre una placa plana.

Kreith F., Manglik R., Bohn Mark. (2012). [Figura]. Recuperado de:  
Principios de Transferencia de Calor.

Por lo tanto, el gradiente de temperatura en la pared depende del campo de flujo donde las velocidades mayores pueden producir gradientes de temperaturas mayores y tasas de transferencia de calor más altas; es decir que la convección para un flujo turbulento por lo general será mayor que para un flujo laminar. Sin embargo, también tiene que tenerse en cuenta la conductividad, pues para un fluido con esta propiedad más alta, su coeficiente de transferencia será mayor que para un fluido con baja conductividad.

### 3.2.1 Convección natural

La convección natural ocurre cuando un cuerpo es introducido a un fluido que está a mayor o menor temperatura que él. El diferencial de temperatura genera un cambio en la densidad del fluido en la vecindad de la superficie. La diferencia de densidad conduce a un flujo hacia abajo del fluido más pesado y a un flujo hacia arriba del fluido más liviano. Si el movimiento del fluido se

ocasiona simplemente por el cambio de densidades debido a la diferencia de temperatura a esto se le denomina convección natural. Las corrientes de convección natural transfieren energía interna, esencialmente de la misma manera que las corrientes de convección forzada, pero con una menor intensidad, lo que produce coeficientes de transferencia de calor menores (Kreith et al., 2012).

En la convección natural las velocidades de los fluidos son bajas, pero las características del flujo en la vecindad de la superficie son análogas a las de la convección forzada mostradas en la figura 7, donde se forma una capa límite en la superficie y la velocidad del fluido en el interfaz es cero.

El campo de temperatura en convección natural para aplicaciones prácticas suele emplearse la ecuación de Newton.

$$dq = h_c dA(T_s - T_\infty) \quad (3 - 19)$$

Donde el área está escrita en forma de diferencial, debido a que el coeficiente de transferencia de calor no es uniforme sobre una superficie. La  $T_\infty$  se refiere a un lugar donde la temperatura del fluido está lo suficientemente alejada, para no verse afectada por la temperatura del cuerpo.

### **3.2.2 Convección forzada.**

Cuando el movimiento del fluido es impulsado por un gradiente de presión aplicado se le refiere como convección forzada. La ecuación que permite determinar la tasa de flujo de calor esta expresada por:

$$q_c = h_c A(T_{superficie} - T_{fluido}) \quad (3 - 20)$$

Cuando el calor se transfiere a un fluido dentro de un conducto, la temperatura varía a lo largo del conducto y en cualquier sección transversal, por lo tanto, la temperatura se debe definir cuidadosamente y con precisión.

El coeficiente de transferencia de calor se puede calcular a partir del número de Nusselt

$$Nu = \frac{h_c D_H}{k} \quad (3 - 21)$$

La longitud significativa en el número de Nusselt para conductos largos es el diámetro hidráulico,  $D_H$  definido

$$D_H = 4 \frac{\text{área de sección transversal del flujo}}{\text{Perímetro mojado}} \quad (3 - 22)$$

El diámetro hidráulico para una región revestimiento entre dos tubos concéntricos se tiene

$$D_H = D_2 - D_1 \quad (3 - 23)$$

El número de Nusselt para aplicaciones de ingeniería se calcula a partir de ecuaciones empíricas. La transferencia de calor por convección forzada en tubos se puede correlacionar mediante la ecuación

$$Nu = \psi(Re)\Phi(Pr) \quad (3 - 24)$$

Donde los símbolos  $\psi$  y  $\Phi$  denotan que se está en función del número de Reynolds y del número de Prandtl respectivamente.

La correlación empírica de gran aplicabilidad en convección forzada y turbulenta para fluidos en conductos y tubos es:

$$Nu_D = \frac{h_c D}{k} = 0.023 Re_D^{0.8} Pr^n \quad (3 - 25)$$

$n = 0.4$  para calentamiento

$n = 0.3$  para enfriamiento

Para un fluido dado, el número de Nusselt depende principalmente del número de Reynolds, que sirve para estandarizar el tipo de flujo. Para valores menores a 2100 se le considera flujo laminar, en los intervalos de 2100 y 10000 se encuentra el flujo transicional y mayores a 10000 son flujos turbulentos. Se ha demostrado que Nusselt es proporcional a Reynolds elevado a la potencia 0.8.

$$N_{Re} = \frac{DW}{\mu} \quad (3 - 26)$$

Donde D es el diámetro interno de la tubería, W el flujo másico y  $\mu$  la viscosidad en Cp.

El número de Nusselt, también está en función de Prandalt, Pr, que depende de las propiedades del fluido y está definido como:

$$Pr = \frac{C\mu}{k} \quad (3 - 27)$$

El número de Prandalt relaciona la distribución de la temperatura con la distribución de la velocidad. Cuando la relación de Prandalt es cercano a la unidad el gradiente de temperatura es similar al gradiente de velocidad, cuando es menor a la unidad el gradiente de temperatura es menos pronunciado que el de la velocidad, así como cuando es mayor a la unidad es más marcado.

Además del número de Reynolds y Prandalt, otros factores que pueden afectar la transferencia de calor son los efectos de entrada principalmente en conductos cortos; los límites de precisión den los valores estimados de los coeficientes de transferencia de calor, la variación de las propiedades físicas con la temperatura. Para líquidos, la propiedad que variara considerablemente por la temperatura es la viscosidad, por otro lado, el caso de los gases es más complicado, pues además de la viscosidad, también cambia la densidad, la conductividad térmica. En cualquier caso, el número de Reynolds depende de la ubicación en la que se evalúen las propiedades.

### 3.2.3 Intercambiadores de Calor

Son dispositivos en donde dos corrientes de fluido en movimiento intercambian calor sin mezclarse. Los intercambiadores más comunes son los intercambiadores de doble tubo que se compone de dos tubos concéntricos de diámetros distintos. El calor se transfiere del fluido caliente hacia al frío a través de la pared que los separa.

En los intercambiadores generalmente no hay interacciones de trabajo, los cambios de energía potencial y cinética son insignificantes.

El análisis de diseño térmico de un intercambiador térmico se basa en la aplicación de la primera ley de la termodinámica en conjunto con los principios de la transferencia de calor. Se debe plantear un balance considerando el fluido caliente y frío por separado, con sus respectivos flujos másicos y entalpías de entrada y salida (en términos de temperatura y calores específicos)

$$q = (mc_p)_c(T_{c,sal} - T_{c,ent}) = (mc_p)_h(T_{h,sal} - T_{h,ent}) \quad (3 - 28)$$

Así la transferencia de calor dada por la ecuación se puede igualar al coeficiente de transferencia de calor global entre los fluidos caliente y frío.

El coeficiente global de transferencia debe ser definido entre un fluido caliente a temperatura  $T_h$  y para un fluido frío a temperatura  $T_c$  separados por una pared plana se determina mediante

$$q = UA(T_h - T_c) \quad (3 - 29)$$

Donde

$$UA = \frac{1}{\sum_{n=1}^{n=3} R_n} = \frac{1}{(1/h_1A_1) + (L/kA_k) + (1/h_2A_2)} \quad (3 - 30)$$

Para un intercambiador de tubo concéntrico, basándose en las áreas  $A_o$  y  $A_i$  se tiene:

$$U_o = \frac{1}{(A_o/h_i A_i) + \frac{A_o \ln(r_o/r_i)}{2\pi k L} + (1/h_o)} \quad (3 - 31)$$

Y

$$U_i = \frac{1}{(1/h_i) + \frac{A_i \ln(r_o/r_i)}{2\pi k L} + (A_i/A_o h_o)} \quad (3 - 32)$$

### 3.3 Radiación

La cantidad de energía que sale de una superficie en forma de calor radiante, está en función de la temperatura absoluta y la naturaleza de la superficie. A diferencia de la conducción y la convección, ella no necesita un medio interventor; es la más rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre atenuación en un vacío. Por estos motivos, la integración de la transferencia de calor por radiación en un análisis térmico global presenta retos considerables, incluyendo la necesidad de establecer condiciones de frontera y suposiciones indispensables para agregar al circuito térmico de un sistema (Kreith et al., 2012).

La radiación máxima que se puede transmitir desde una superficie a una temperatura absoluta está expresada por la ley de Steffan- Boltzman como:

$$q_r = \sigma A T_c^4 \quad (3 - 33)$$

Esta ecuación se da en radiadores perfectos, al cual se le refiere como cuerpo negro; la temperatura es dada en temperatura absoluta (K o R) y  $\sigma$  es una constante adimensional. Al evaluar la ecuación se observa que cualquier superficie de un cuerpo negro con una temperatura mayor al cero absoluto irradia calor a una tasa proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta.

Si el cuerpo negro irradia en un recinto que también es negro (es decir, que absorbe toda la energía radiante que incide en él), la tasa neta de transferencia de calor radiante está dada por

$$q_r = A_s \sigma (T_{c1}^4 - T_{c2}^4) \quad (3-34)$$

Los cuerpos reales no cumplen con las especificaciones de un radiador ideal, sino que emiten radiación a una tasa menor que los cuerpos negros.

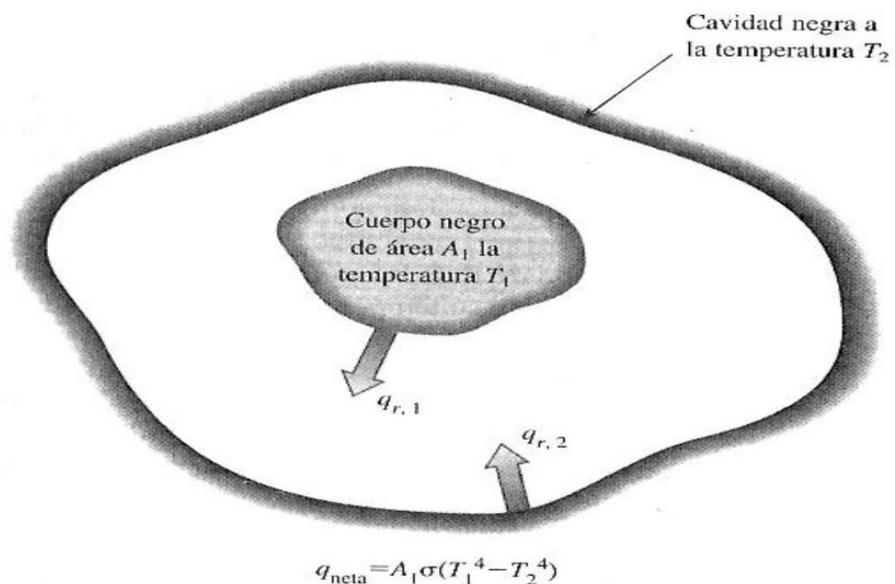


Figura 8. Diagrama esquemático de la radiación entre el cuerpo 1 y el recinto 2.

Kreith F., Manglik R., Bohn Mark. (2012). [Figura]. Recuperado de:  
Principios de Transferencia de Calor.

#### 4. Procesos de transferencia de calor en el pozo

El completamiento de pozos, se define como todas aquellas operaciones que se realizan desde el acondicionamiento de la zona productora o después de la perforación hasta colocar el pozo en servicio (producción y/o inyección). Lo anterior conlleva a diseñar, seleccionar e instalar todos aquellos equipos necesarios para llegar a la función final que cumplirá el pozo.

La ingeniería de completamiento se divide en dos grandes ramas: El completamiento inferior (lower completion) y completamiento superior (upper completion). El primero consiste en alinear o contactar los fluidos del yacimiento al pozo, aquí interfieren grandes áreas como, corrida del liner o revestimiento de producción, cementación de éste, cañoneo, control de arena, entre otros. El segundo consiste en todos aquellos equipos y configuraciones para conectar los fluidos de fondo de pozo a superficie, en este intervienen todos los equipos de levantamiento artificial, otros como empaques, válvulas de seguridad, entre otros y uno de los más importantes de estos es la tubería de completamiento.

La tubería de completamiento son los principales componentes en la construcción de un pozo, estas son un elemento cilíndrico hueco, compuesto generalmente de acero, con una geometría definida por el diámetro y el espesor del cuerpo que lo conforma y son los que se encuentran en mayor proporción o longitud dentro del pozo.

En la Fig. 9 se presenta un esquema donde se representan los diferentes tipos de completamiento superior (Upper Completion), donde la tubería es una de los equipos indispensables en los mismos (Sanmiguel, N. & Toro, F. 2017).

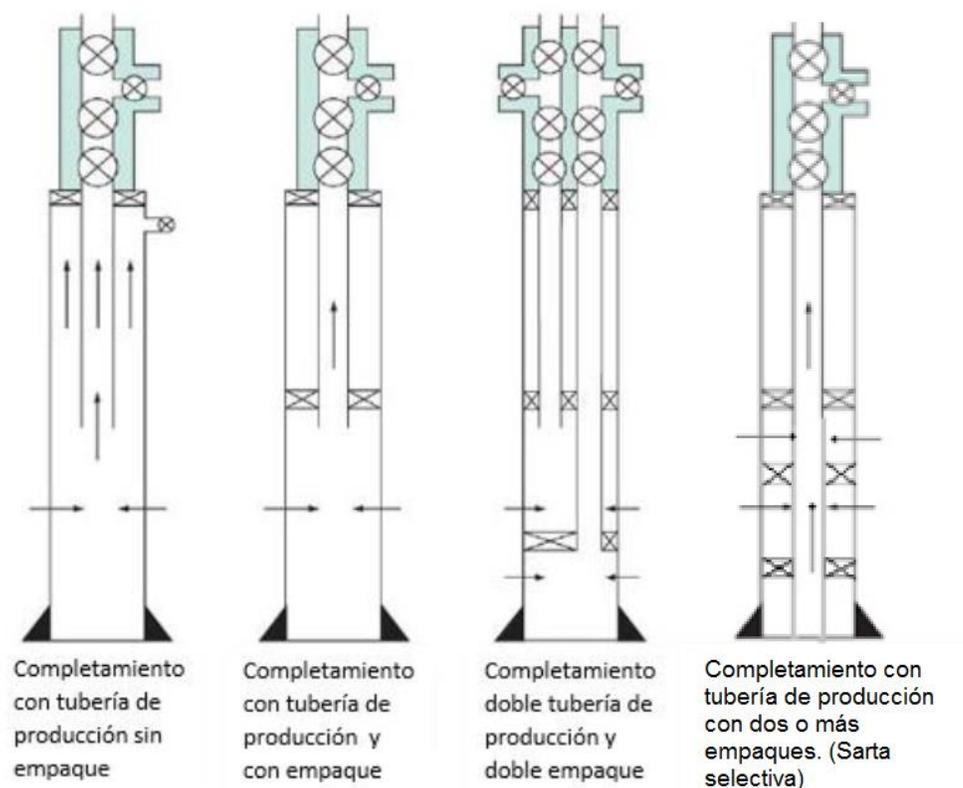


Figura 9. Completamientos superiores. Bellarby J. (2009).

[Figura]. Recuperado de: *Well completion design*

La tubería y equipos que conforman un completamiento de pozos son generalmente construidos en acero, estos deben enfrentarse a unas condiciones críticas de Temperatura y Presión en fondo de pozo; es por ello que se debe realizar un análisis estricto para determinar que estos equipos y tuberías soporten estas condiciones y tengan la vida útil rentable que necesite el proyecto.

Existe una técnica llamada Análisis de Esfuerzo de Tuberías (Tubería Stress Analysis) la cual evalúa el comportamiento de la temperatura y presión en el pozo dependiendo del servicio (Producción y/o inyección) que ejecuten, esto con el fin de desarrollar un análisis de integridad de la tubería y equipos y la resistencia del material. Este análisis conduce a considerar diferentes

situaciones de falla que experimentan la tubería. El término “falla” se entiende como sinónimo de fractura; sin embargo, este concepto hace referencia al momento en que un equipo o herramienta cesa de realizar de forma satisfactoria la función para la cual está destinada; en el caso de las tuberías colocadas en un pozo, si estas alcanzan cualquier nivel de deformación se debe entender como una falla (Sanmiguel, N. & Toro, F. 2017).

Los principales tipos de falla que se producen en las tuberías de completamiento son: colapso, estallido y tensión; este último es uno de los puntos en el cual los cambios de temperatura en el pozo tienen mayor impacto llegando a la deformación del material y por ende dejar de cumplir su función; es por ello que determinar con una mayor precisión cual es la temperatura que experimenta la tubería en el pozo. Ya que esta por tener una mayor longitud es la que más se deforma en el completamiento.

El completamiento en el pozo y en especial la tubería no experimenta una sola temperatura o presión en toda su longitud de profundidad, es por ello que se debe determinar un perfil de estos parámetros para determinar el impacto de estos en cada profundidad.

El presente proyecto se desarrolla con el fin de determinar el perfil de temperatura causado por el flujo de fluidos en el pozo, estos pueden existir en su parte interna o en su parte externa (revestimiento). Este estudio enfoca por medio de los mecanismos de transferencia de calor, determinar el perfil de temperatura que presenta la tubería de acuerdo al impacto de los perfiles de los fluidos presentes en el pozo.

La temperatura del fluido interviene en variedad de cálculos en operaciones de producción petrolíferas, incluyendo perforación y completamiento (análisis de esfuerzo en la tubería, selección del material, química y aseguramiento del flujo de producción, y predicción del rendimiento del

pozo), diseño de facilidades de producción, control de deposición de sólidos, y análisis de presión. El pozo es representado por un sistema de intercambiador de calor de tubos concéntricos el cual se ve afectado por la influencia de la formación (conducción), y las dos tuberías presentes (convección).

La determinación de la temperatura a lo largo del pozo es importante por varias razones. Primero, debemos conocer la temperatura de inyección o fluidos de estimulación en la cara de la formación, y segundo, debemos evaluar los cambios lineales y esfuerzos en tubería causados por el decremento en la temperatura cuando un pozo es convertido de productor a inyector, o cuando un pozo ha sido estimulado. Muchos problemas operacionales ocurren porque efectos térmicos: pandeo de la tubería, esfuerzo en revestimiento, y problemas cuando no se sientan empaques. Particularmente, después de una estimulación a gran profundidad, dichos cambios de longitud en la tubería deben ser conocidos, ya que este puede ser decisivo para un tratamiento efectivo. Moss, White y Ramey condujeron importantes estudios en temperaturas de pozos inyectores y posteriormente en trabajos más complejos, incluyendo casos de flujo paralelo y contraflujo, los cuales serán tratados en este documento.

## METODOLOGÍA

### 5. Modelamientos matemáticos de transferencia de calor en el pozo

#### 5.1. Modelamiento de Ramey

El modelo para procesos de transferencia de calor en el pozo desarrollado por *Ramey* se usó para simular procesos de inyección y producción a través de una línea. El perfil de temperatura de la tubería para estas simulaciones se reduce a un arreglo de ecuaciones algebraicas que proveen un simple y efectivo perfil de temperatura en función del tiempo y profundidad. Este modelamiento fue validado con una simulación de campo.

En orden de desarrollar un rápido método para estimar las temperaturas de la tubería durante inyección y producción, fue necesario identificar las variables de entrada más sensibles para poder formular una correlación apropiada. Usando modelamiento de diferencias finitas, las variables encontradas fueron el flujo volumétrico, profundidad, tiempo, perfil de temperatura estática no distorsionado (formación), geometría del pozo, propiedades de los fluidos fluyendo, y las propiedades térmicas de la formación.

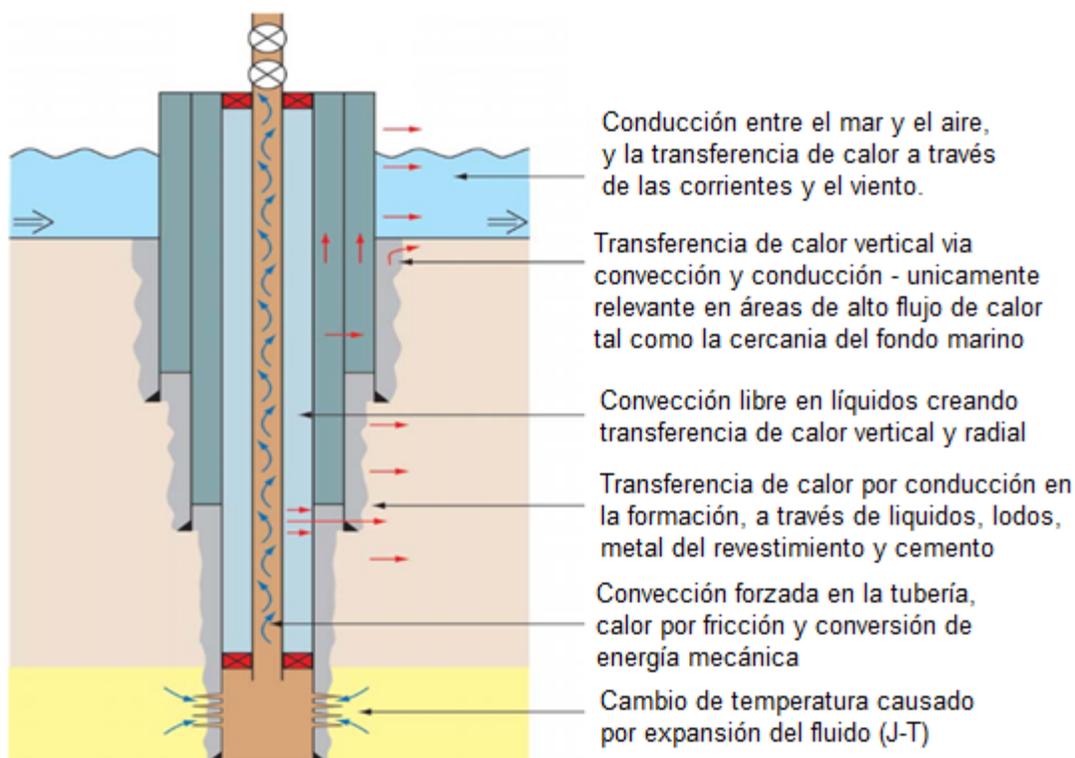


Figura 10. Mecanismos de transferencia de calor en un pozo costa fuera.

Bellarby J. (2009). [Figura]. Recuperado de: *Well Completion Design*.

### 5.1.1. Derivación de la solución del modelo de Ramey

Se considera la inyección de un fluido a través de la tubería en un pozo el cual está cubierto hasta el tope del intervalo de inyección. Asumiendo que la rata de inyección del fluido y la temperatura en superficie es conocida, se determina la temperatura del fluido inyectado en función de la profundidad y el tiempo. Como se muestra en la Fig. 10.  $W$  [lb/día] del fluido inyectado en la tubería en la superficie a temperatura de  $T_i$ . El radio interno de la tubería es  $r$ , y la temperatura del fluido en la tubería  $T$  en función de la profundidad y del tiempo (Ramey. H. J, 1962).

El procedimiento usual para problemas de flujo de este tipo son soluciones de la ecuación total de energía y de energía mecánica simultáneamente para generar ambas distribuciones, ya sean

de temperatura como de presión. Sin embargo, la solución puede ser aproximada por las siguientes consideraciones. La ecuación total de energía es

$$dH + \frac{gdZ}{g_cJ} + \frac{udu}{g_cJ} = dQ - \frac{dW_f}{J} \quad (5 - 1)$$

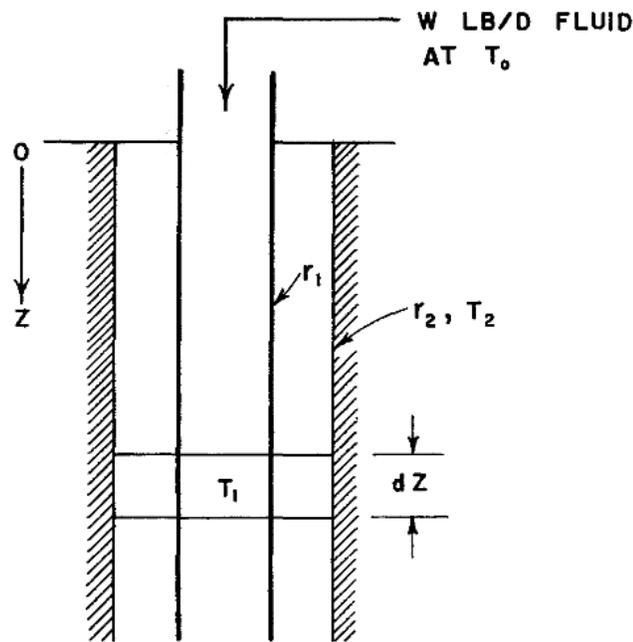


Figura 11. Esquema del problema de transferencia de calor.

Fuente: Ramey, H. J. (1962). [Figura].

Recuperado de: Wellbore Heat Transmission.

Asumiendo flujo estable en una sola fase en la tubería, el trabajo del flujo  $W_f$  es cero y la ecuación 5-1 se transforma a

$$dH + \frac{gdZ}{g_cJ} + \frac{udu}{g_cJ} = dQ \quad (5 - 2)$$

Para el caso de un líquido se trata de un fluido incompresible, la energía cinética se hace cero. Entonces,

$$dH + \frac{gdZ}{g_c J} = dQ \quad (5 - 3)$$

Pero por definición, la entalpía para un líquido incompresible es

$$dH = dE + \frac{d(PV)}{J} = dE + \frac{VdP}{J} \quad (5 - 4)$$

o

$$dH = cdT + \frac{VdP}{J} \quad (5 - 5)$$

Despreciando la fricción del flujo, el término  $VdP$  es igual al cambio del fluido en cabeza, y el cambio de entalpía es

$$dH \approx cdT + \frac{gdZ}{g_c J} \quad (5 - 6)$$

Considerando el flujo hacia abajo del pozo, el aumento de la entalpía debido al aumento de la presión es aproximadamente igual a la pérdida de energía potencial. Por el contrario, para el flujo hacia arriba del pozo, la pérdida de entalpía debida a la disminución de la presión es aproximadamente igual al aumento de la energía potencial.

Como resultado, la ecuación total de energía queda de la manera

$$cdT \approx dQ \quad (5 - 7)$$

Para un líquido no compresible fluyendo verticalmente a través de un diámetro constante. Asumiendo que no hay cambios de fase, un balance de energía aproximado sobre el diferencial de profundidad  $dZ$ , produce: pérdidas de calor por el líquido = calor transferido al revestimiento, o

$$dq = -WcdT = 2\pi rU(T_t - T_a)dZ \quad (5 - 8)$$

Para pérdidas de calor por el gas = calor transferido al revestimiento, el término de energía potencial aparece en el balance total de energía, entonces para flujo de gas

$$dq = -WcdT \pm \frac{WdZ}{778} = 2\pi rU(T_t - T_a)dZ \quad (5 - 9)$$

La rata de conducción de calor del revestimiento a los alrededores de la formación se expresa como

$$dq = \frac{2\pi(T_c - T_e)dZ}{ft} \quad (5 - 10)$$

La ecuación 5-9. Implica la suposición de la transferencia de calor radial a través del pozo. La función del tiempo  $ft$  depende una condición específica para conducción de calor el cual será discutido más adelante. Asumiendo que la temperatura geotérmica es una función lineal de la profundidad,

$$T_{geo} = gGZ + Tes \quad (5 - 11)$$

Ecuación 5-8 y 5-10 pueden ser sustituidas en la ecuación 5-8 como resultado

$$\frac{\partial Tt}{\partial Z} + \frac{Tt}{A} - \frac{gGZ + Tes}{A} = 0, A \neq 0 \quad (5 - 12)$$

Partiendo de la anterior ecuación diferencial se resuelve, y al ser de primer orden se aplica una condición de frontera dependiendo de si el pozo está inyectado o produciendo, ya sea gas o líquido.

La expresión final para la temperatura del líquido en función de la profundidad y el tiempo es

$$T(z, t) = gGZ + Tes - gGA + (Ti + gGA - Tes)e^{(-z/A)} \quad (5 - 13)$$

En resumen. La temperatura de la tubería durante la inyección de un líquido en función de la profundidad y el tiempo puede ser prevista usando:

$$T(z, t) = gGZ + Tes - gGA + (Ti + gGA - Tes)e^{(-z/A)} \quad (5 - 14)$$

Para inyección de un gas:

$$T(z, t) = gGZ + Tes - A \left( gG + \frac{1}{778Cg} \right) + \left[ Ti - Tes + A \left( gG + \frac{1}{778Cg} \right) \right] e^{(-z/A)} \quad (5 - 15)$$

De manera similar, la temperatura de la tubería durante la producción de un líquido en función de la profundidad y el tiempo puede ser prevista usando:

$$T(z, t) = gGZ + Tes + gGA + (Tbh - gGA + gGZd - Tes)e^{(z-zd/A)} \quad (5 - 16)$$

Para producción de un gas:

$$T(z, t) = gGZ + Tes + A \left( gG - \frac{1}{778Cg} \right) + \left[ Tbh - Tes + gGZd + A \left( \frac{1}{778Cg} - gG \right) \right] e^{(z-zd/A)} \quad (5 - 17)$$

Dónde:

$$A = \frac{W(Ke + rUft)}{2\pi rUKe} \quad (5 - 18)$$

$$ft = (0.4063 + 0.5 \text{ Log } td) \times \left( 1 + \frac{0.6}{td} \right) \quad (5 - 19)$$

$$td = \frac{t}{rw^2} \quad (5 - 20)$$

Para el caso de transferencia de calor en un pozo simple de una línea de flujo, el coeficiente de transferencia de calor está expresado de la manera

$$U = \frac{1}{h} + \frac{Xt}{Kt} \quad (5 - 21)$$

Dónde:

$$h = \frac{12NuK_f}{D} \quad (5 - 22)$$

$$Nu = 0.023NRe^{0.8}Pr^n \quad (5 - 23)$$

$n = 0.4$  (para calentamiento, producción)

$n = 0.3$  (para enfriamiento, inyección)

$$Pr = \frac{C_f \mu}{K_f} \quad (5 - 24)$$

## 5.2. Modelamiento de Hasan – Kabir

Uno de los problemas asociados a la transferencia de calor en el pozo puede ser solucionado de manera aproximada por métodos similares a los usados por *Ramey*. En el caso de la presencia de dos o más líneas de flujo, el resultado será una ecuación diferencial de mayor orden que la inicial presentada por *Ramey*.

Para dar solución a este problema, *Hasan* y *Kabir* presentaron una metodología partiendo de los balances de energía para el sistema correspondiente.

### 5.2.1. Inyección a través del revestimiento – producción a través de la tubería (Gas Lift – Bombeo hidráulico)

Para obtener la expresión para este caso, se desarrolló un balance de energía sobre un diferencial de profundidad,  $dZ$ , del fluido del revestimiento como se muestra en la Fig. 12. Nótese que  $Z$  es positivo en dirección hacia abajo. El calor involucrado del elemento  $Z$  de dos fuentes: por convección,  $qa(z)$ , y también por conducción de la formación,  $qF$ . Similarmente, el calor que sale del elemento  $Z + dZ$  por convección,  $qa(z+dz)$ , y por conducción y convección al fluido de la tubería,  $qta$ . Entonces (Hasan, A. R., & Kabir, C. S, 1996).

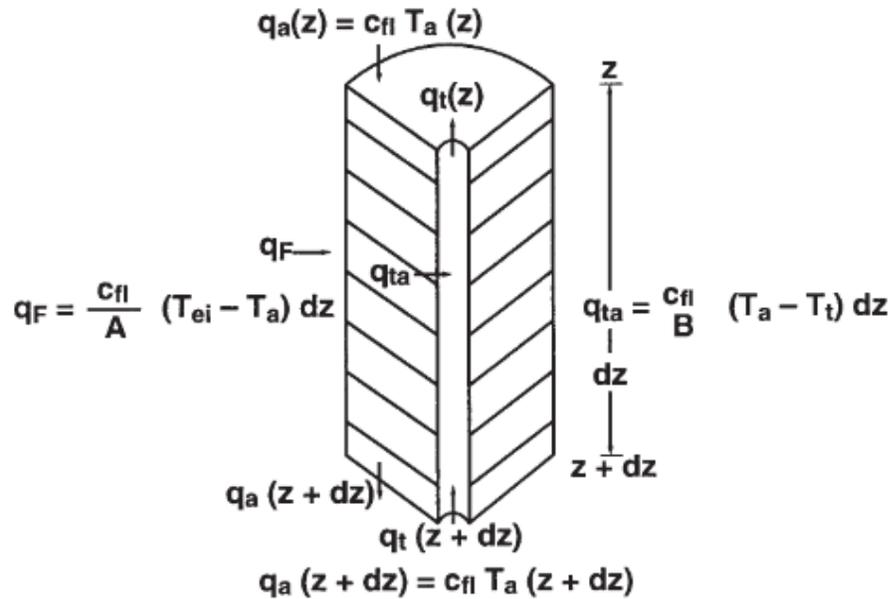


Figura 12. Balance de energía para dos fluidos.

Fuente: Kabir, C. S., Hasan, A. R., Kouba, G.E. & Ameen, (1996)

[Figura]. Recuperado de: *Determining Circulating Fluid Temperature in Drilling Workover, and Well Control Operations.*

$$q_a(z) - q_a(z + dz) = q_{ta} - q_F \quad (5 - 25)$$

o

$$\frac{dH_a}{dz} + \frac{g \sin \theta}{g_c J} + \frac{v}{g_c J} \frac{dv}{dz} = q_F - q_{ta} \quad (5 - 26)$$

Nótese que el balance de energía está escrito en una unidad de rata de flujo másico en el revestimiento. Cambio de entalpía,  $H$ , puede ser expresada en términos de cambios de temperatura y de presión

$$\frac{dH_a}{dz} = -\frac{C_j C_{fla}}{J} \frac{dP}{dz} + C_{fla} \frac{dT_a}{dz} \quad (5 - 27)$$

Flujo de calor,  $qF$ , de la formación al pozo está dada por

$$qF = \frac{2\pi K_e}{Wft} (Tei - Twb) dz \quad (5 - 28)$$

Dónde  $qF$  es la transferencia de calor por unidad de longitud del pozo por unidad de masa del fluido. La temperatura de la interface pozo/formación,  $Twb$ , se relaciona con la temperatura del fluido en el revestimiento,  $Ta$ , por el coeficiente total de transferencia de calor del revestimiento como sigue (Hasan, A. R., & Kabir, C. S, 1996).

$$q = \frac{2\pi r_c U_a}{W} (Twb - Ta) dz \quad (5 - 29)$$

El coeficiente de transferencia de calor,  $U_a$ , depende de las resistencias al flujo de calor a través del sistema. Nótese que el flujo de calor de la formación al revestimiento,  $qF$ , es igual a  $q$  dado por la ecuación 5-29, de la cual se puede eliminar  $Twb$  de la ecuación 5-28 y 5-29 para obtener la rata del calor transferido de la formación al revestimiento (Hasan, A. R., & Kabir, C. S, 1996).

$$qF = \frac{C_{fla}}{A} (Tei - Ta) dz \quad (5 - 30)$$

dónde

$$A = \frac{C_{fla} W_a}{2\pi} \left( \frac{K_e + r_c U_a ft}{r_c U_a K_e} \right) \quad (5 - 31)$$

Transferencia de calor del fluido del revestimiento al fluido de la tubería,  $qta$ , es

$$qta = \frac{C_{fla}}{B} (Ta - Tt) dz \quad (5 - 32)$$

dónde

$$B = \frac{W_a C_{fla}}{2\pi r_t U_t} \quad (5 - 33)$$

Combinando las ecuaciones 5-26, 5-27, 5-30 y 5-32,

$$C_{fla} \frac{dT_a}{dZ} - \frac{C_j C_{fla}}{J} \left( \frac{dP}{dZ} \right) + \frac{g \sin \theta}{g_c J} + \frac{v}{g_c J} \frac{dv}{dZ} = \frac{C_{fla}}{A} (T_{ei} - T_a) + \frac{C_{fla}}{B} (T_t - T_a) \quad (5 - 34)$$

Notar que el coeficiente de Joule-Thompson  $C_j$ , para el caso de líquidos es bastante pequeño por ende es despreciable, mientras que para el caso de gases ideales su valor es cero; para levantamiento artificial de gas generalmente la fracción másica es mínima. Sin embargo, el gradiente de presión  $dP/dZ$ , es bastante pequeño y puede ser despreciado el segundo término. De manera resumida, se puede despreciar el segundo, tercer y cuarto término de la ecuación 5-34, reduciendo la ecuación a (Hasan, A. R., & Kabir, C. S, 1996).

$$C_{fla} \frac{dT_a}{dZ} = \frac{C_{fla}}{A} (T_{ei} - T_a) + \frac{C_{fla}}{B} (T_t - T_a) \quad (5 - 35)$$

La ecuación 5-35 tiene dos incógnitas: La temperatura en el revestimiento,  $T_a$ , y la temperatura en la tubería,  $T_t$ . Un balance de energía para la tubería proveerá una ecuación diferencial de segundo orden. Dentro del balance de energía se debe hacer un arreglo para la mezcla resultante del gas inyectado más el líquido a producir por tubería. Teniendo en cuenta las anteriores recomendaciones, la ecuación de segundo orden para el caso de gas lift es (Hasan, A. R., & Kabir, C. S, 1996).

$$AB' \frac{d^2 T_t}{dz^2} + B'' \frac{dT_t}{dz} + T_{es} + gGZ - T_t = 0 \quad (5 - 36)$$

La ecuación lineal diferencial 5-36 de segundo orden se soluciona con las siguientes condiciones de frontera:

- $T_a = T_{as}$  en cabeza de pozo (cuando  $z = 0$ ).
- $T_{t_{bh}} = \frac{W_t - W_a}{W_t B} C_{flt} T_{ebh} + \frac{W_a}{W_t} C_{fla}$

Dando como resultado la siguiente solución

$$Tt = \alpha e^{\lambda_1 Z} + \beta e^{\lambda_2 Z} + gGZ + B''gG + Tes \quad (5 - 37)$$

$$Ta = \alpha e^{\lambda_1 Z}(1 - \lambda_1 B') + \beta e^{\lambda_2 Z}(1 - \lambda_2 B') + gG(B'' - B') + gGZ + Tes \quad (5 - 38)$$

dónde

$$\lambda_1 = -\frac{B''}{2AB'} + \frac{B''}{2AB'} \sqrt{1 + \frac{4AB'}{B''^2}} \quad (5 - 39)$$

$$\lambda_2 = -\frac{B''}{2AB'} - \frac{B''}{2AB'} \sqrt{1 + \frac{4AB'}{B''^2}} \quad (5 - 40)$$

$$\beta = \frac{e^{\lambda_1 Z v}(T_{ai} - Tes) + (1 - \lambda_1 B')(gGZv + gGB'' + Tes - Tbh) - gGe^{\lambda_1 Z v}(B'' - B)}{e^{\lambda_1 Z v}(1 - \lambda_2 B') - e^{\lambda_2 Z v}(1 - \lambda_1 B')} \quad (5 - 41)$$

$$\alpha = \frac{Tbh - Tes - \beta e^{\lambda_2 Z v} + gGZv - gGB''}{e^{\lambda_1 Z v}} \quad (5 - 42)$$

$$B'' = B' + \left(\frac{AB'}{B}\right) - A \quad (5 - 43)$$

Cabe recalcar que los valores de  $A$ ,  $B$  y  $B'$ , para todos los casos presentes y siguientes, tendrán el mismo valor y solo se verá el cambio denotado por los términos de  $B''$ ,  $B'''$  y  $B^{iv}$ .

$$A = \frac{C_{fla}W_a}{2\pi} \left( \frac{K_e + r_c U_a f t}{r_c U_a K_e} \right) \quad (5 - 44)$$

$$B = \frac{W_a C_{fla}}{2\pi r_t U_t} \quad (5 - 45)$$

$$B' = \frac{W_t C_{flt}}{2\pi r_t U_t} \quad (5 - 46)$$

### 5.3. Modelamiento Propuesto

#### 5.3.1. Inyección a través de la tubería – Producción a través del revestimiento

Para este caso el balance de energía sigue el mismo proceso que el del caso anterior; sin embargo, este parte de una condición contraria correspondiente a su balance de energía.

$$qa(z + dz) - qa(z) = qta - qF \quad (5 - 47)$$

Dando como resultado la siguiente ecuación diferencial de segundo orden, muy similar a la ecuación 5-36.

$$AB' \frac{d^2 Tt}{dz^2} - B^{iv} \frac{dTt}{dz} + Tes + gGZ - Tt = 0 \quad (5 - 48)$$

Tal que,

$$Tt = \alpha e^{\lambda_1 z} + \beta e^{\lambda_2 z} + gGZ - B^{iv} gG + Tes \quad (5 - 49)$$

$$Ta = \alpha e^{\lambda_1 z} (1 + \lambda_1 B') + \beta e^{\lambda_2 z} (1 + \lambda_2 B') + gG(B' - B^{iv}) + gGZ + Tes \quad (5 - 50)$$

$$\lambda_1 = \frac{B^{iv} + \sqrt{(B^{iv})^2 + 4AB'}}{2AB'} \quad (5 - 51)$$

$$\lambda_2 = \frac{B^{iv} - \sqrt{(B^{iv})^2 + 4AB'}}{2AB'} \quad (5 - 52)$$

$$\beta = \frac{Taj - (1 - \lambda_1 B')(Tti - Tes - gGB^{iv}) - gG(B' + B^{iv}) - gGZj - Tes}{e^{\lambda_2 z j} (1 + \lambda_2 B') - (1 - \lambda_1 B')} \quad (5 - 53)$$

$$\alpha = Tti - \beta - Tes - gGB^{iv} \quad (5 - 54)$$

#### 5.3.2. Inyección a través del revestimiento – Inyección a través de la tubería

La ecuación diferencial correspondiente a este caso, está expresada de la manera siguiente para flujo paralelo vertical hacia abajo

$$AB' \frac{d^2 Tt}{dz^2} + B''' \frac{dTt}{dz} - Tes - gGZ + Tt = 0 \quad (5 - 55)$$

Tal que,

$$Tt = \alpha e^{\lambda_1 z} + \beta e^{\lambda_2 z} + gGZ - B''' gG + Tes \quad (5 - 56)$$

$$Ta = \alpha e^{\lambda_1 z} (1 + \lambda_1 B') + \beta e^{\lambda_2 z} (1 + \lambda_2 B') + gG(B' - B''') \quad (5 - 57)$$

$$\lambda_1 = \frac{-B''' + \sqrt{(B''')^2 - 4AB'}}{2AB'} \quad (5 - 58)$$

$$\lambda_2 = \frac{-B''' - \sqrt{(B''')^2 - 4AB'}}{2AB'} \quad (5 - 59)$$

$$\beta = \frac{Tai - gG(B' - B''') - Tes - (Tti - Tes + gGB''')(1 + \lambda_1 B')}{(1 + \lambda_1 B') + (1 + \lambda_2 B')} \quad (5 - 60)$$

$$\alpha = Tti - \beta - Tes + gGB''' \quad (5 - 61)$$

$$B''' = \left( \frac{AB'}{B} \right) + A + B' \quad (5 - 62)$$

### 5.3.3. Producción a través del revestimiento – Producción a través de la tubería

La ecuación diferencial correspondiente a este caso, está expresada de la manera siguiente para flujo paralelo vertical hacia arriba

$$AB' \frac{d^2 Tt}{dz^2} - B''' \frac{dTt}{dz} - Tes - gGZ + Tt = 0 \quad (5 - 63)$$

$$Tt = \alpha e^{\lambda_1 z} + \beta e^{\lambda_2 z} + gGZ + B''' gG + Tes \quad (5 - 64)$$

$$Ta = \alpha e^{\lambda_1 z} (1 - \lambda_1 B') + \beta e^{\lambda_2 z} (1 - \lambda_2 B') + gG(B''' - B') \quad (5 - 65)$$

$$\lambda_1 = \frac{B''' + \sqrt{(B''')^2 - 4AB'}}{2AB'} \quad (5 - 66)$$

$$\lambda_1 = \frac{B''' - \sqrt{(B''')^2 - 4AB'}}{2AB'} \quad (5 - 67)$$

$$\beta = \frac{Taj - (Ttj - gGZj - Tes - gGB''')(1 - \lambda_1 B') + gG(B' - B''') - (Tes + gGZj)}{\alpha e^{\lambda_1 Z} (\lambda_1 B' - \lambda_2 B')} \quad (5 - 68)$$

$$\alpha = \frac{Ttj - \beta e^{\lambda_1 Z j} - gGZj - Tes - gGB'''}{e^{\lambda_1 Z j}} \quad (5 - 69)$$

### 5.3.4. Inyección a través del Revestimiento – Producción a través de la tubería

Para este caso, la ecuación diferencial es:

$$AB' \frac{d^2 Tt}{dz^2} + B^{iv} \frac{dTt}{dz} + Tes + gGZ - Tt = 0 \quad (5 - 70)$$

$$Tt = \alpha e^{\lambda_1 Z} + \beta e^{\lambda_2 Z} + gGZ + B^{iv} gG + Tes \quad (5 - 71)$$

$$Ta = \alpha e^{\lambda_1 Z} (1 - \lambda_1 B') + \beta e^{\lambda_2 Z} (1 - \lambda_2 B') + gG(B^{iv} - B') + gGZ + Tes \quad (5 - 72)$$

$$\lambda_1 = \frac{-B^{iv} + \sqrt{(B^{iv})^2 + 4AB'}}{2AB'} \quad (5 - 73)$$

$$\lambda_2 = \frac{-B^{iv} - \sqrt{(B^{iv})^2 + 4AB'}}{2AB'} \quad (5 - 74)$$

$$\beta = \frac{Ttj - e^{\lambda_1 Z j} \left[ \frac{Tai - gG(B^{iv} - B') - Tes}{(1 - \lambda_1 B')} \right] - gGZj - B^{iv} gG - Tes}{e^{\lambda_2 Z j} - \left[ \frac{(1 - \lambda_2 B') e^{\lambda_1 Z}}{(1 - \lambda_1 B')} \right]} \quad (5 - 75)$$

$$\alpha = \frac{Tai - (1 - \lambda_2 B') \beta - gG(B^{iv} - B') - Tes}{(1 - \lambda_1 B')} \quad (5 - 76)$$

$$B^{iv} = B' + \left( \frac{AB'}{B} \right) - A \quad (5 - 77)$$

## 6. Proceso de determinación del perfil de temperatura

Durante el planteamiento matemático de la transferencia de calor en sistemas de tuberías e intercambiadores de calor se desarrollaron diferentes modelos, los cuales cumplían los objetivos de trabajo en una línea y dos líneas de manera simultánea para el debido cálculo/generación de los perfiles de temperatura en el completamiento. Los modelos desarrollados en el documento se basan en un sistema de transferencia de calor estándar en donde se ven involucrados procesos de transferencia de calor como la convección y conducción en el sistema, trabajando de manera simultánea a un tiempo de simulación determinada, para esto se trabajó con balances de energía el cual se encuentra de manera más explícito en el capítulo anterior. En la siguiente sección se muestra un diagrama de flujo para simplificar el proceso el cual se muestra en las figuras 13 y 14.

Con el fin de aclarar diferentes términos usados en el siguiente proceso se describen a continuación:

*Una línea:* Hace referencia a un servicio (inyección y producción) empleado a través de la tubería mientras el área que compete el revestimiento se mantiene cerrado.

*Doble línea:* Hace referencia al empleo de los servicios a través de las dos áreas (tubería interna y revestimiento) de manera simultánea.

*Flujo paralelo:* Ambos servicios van en la misma dirección (inyección – inyección o producción – producción)

*Contraflujo:* Los servicios trabajan en sentidos contrarios (inyección – producción o producción – inyección)

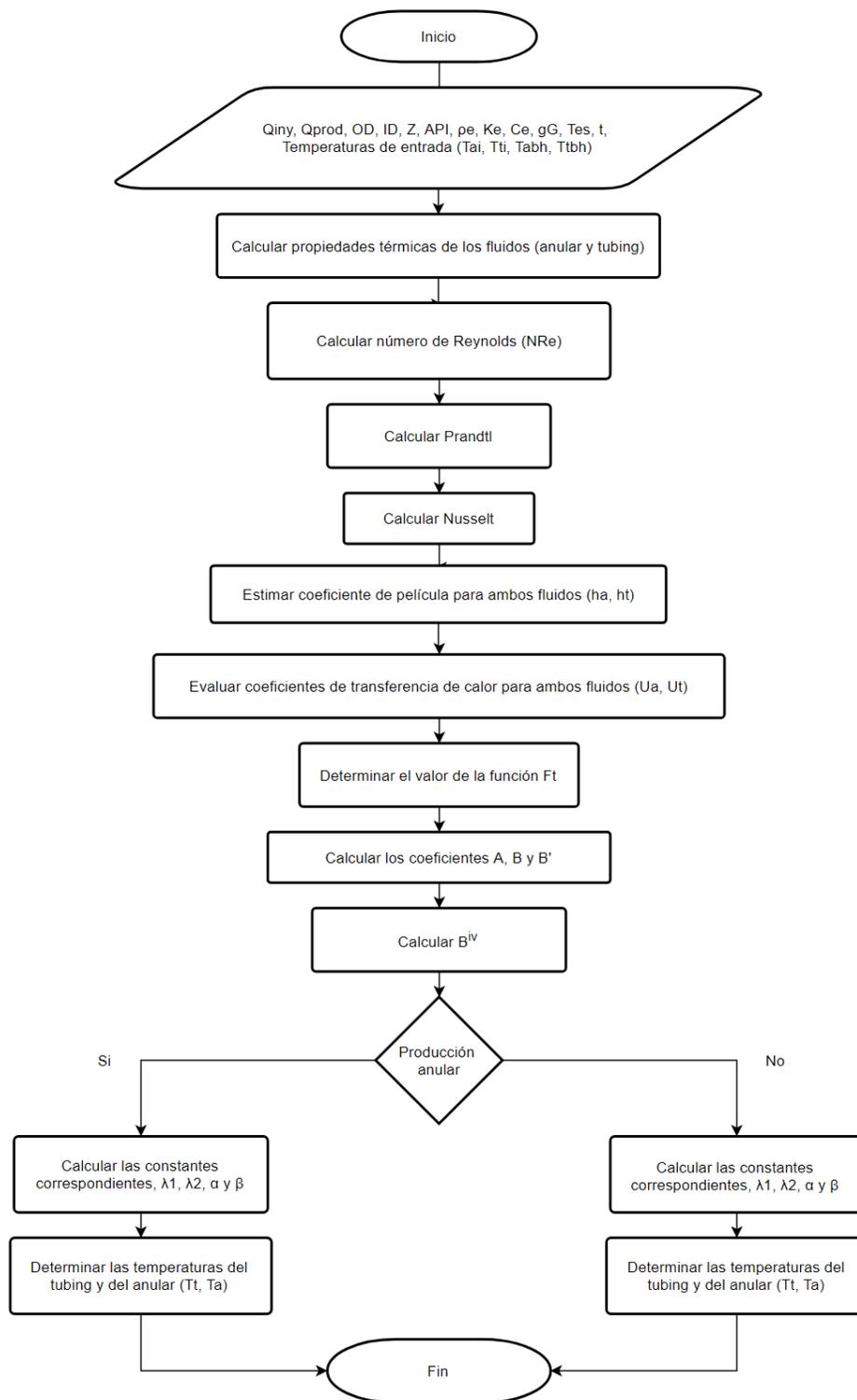


Figura 13. Diagrama de flujo para modelamiento de contraflujo (doble línea), TEMPRO.

Fuente: Autores

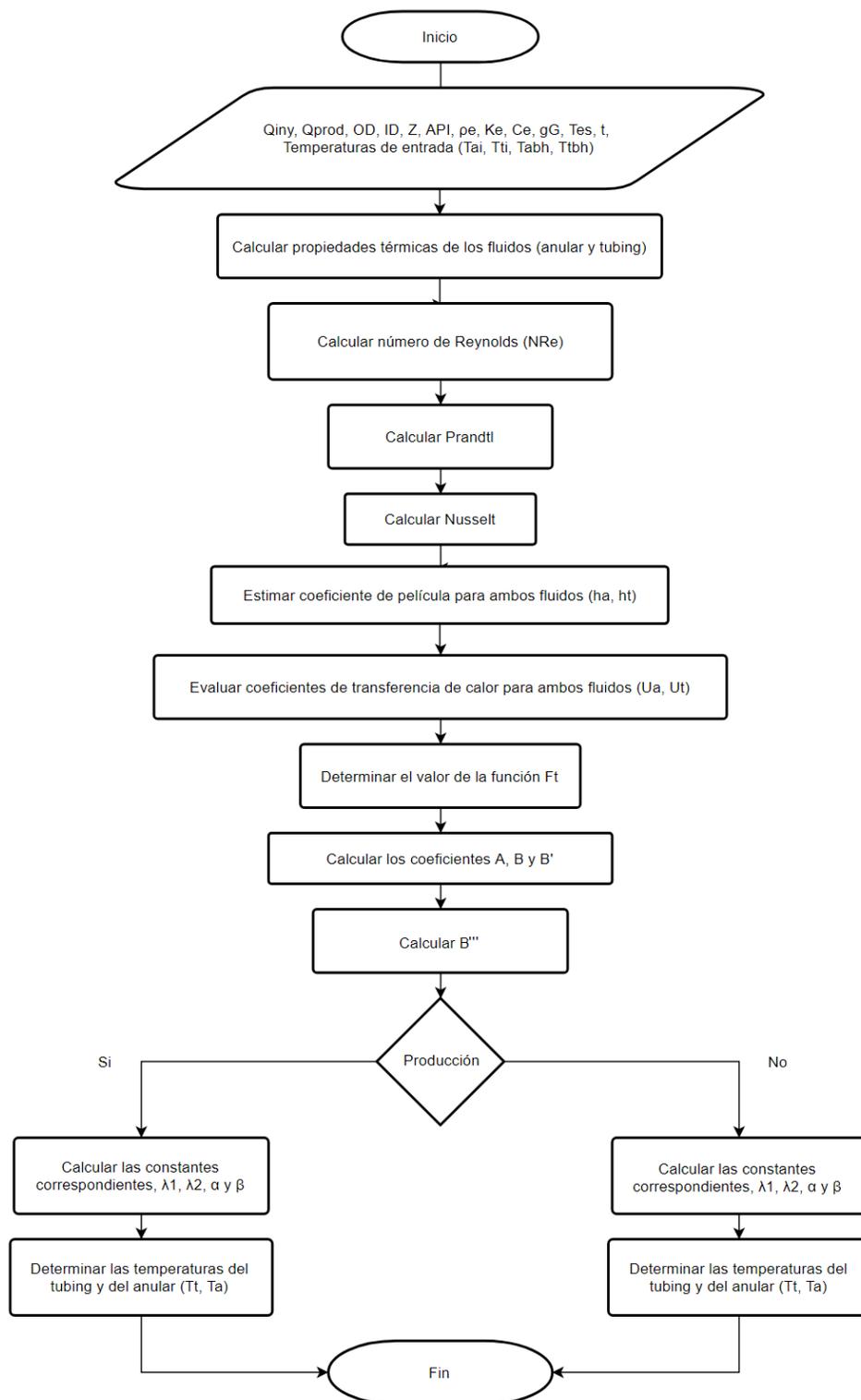


Figura 14. Diagrama de flujo para modelamiento de flujo paralelo (doble línea), TEMPRO.

Fuente: Autores

Debido a la necesidad de generar los perfiles de temperatura de manera acertada se creó una herramienta computacional ‘TEMPRO’, esta con el fin de visualizar el cálculo de estos perfiles de temperatura de manera más eficiente y sencillo a la hora de solicitarlos, de la misma manera agilizar el desarrollo de los modelos y el proceso planteado anteriormente; teniendo en cuenta que lo más importante aquí es el proceso de cómo se calcula los perfiles de temperatura de manera simultánea y el proceso de transferencia de calor en el sistema pozo.

### **6.1. Parámetros estadísticos para la evaluación**

Para comparar los datos de los perfiles de temperatura obtenidos en los diferentes modelamientos propuestos en el simulador con los datos del Software comercial, se emplean tres parámetros estadísticos definidos a continuación.

#### **Coefficiente de determinación (R<sup>2</sup>)**

El coeficiente determina la calidad del modelo para replicar los resultados, y la proporción de variación de los resultados que puede explicarse por el modelo (Steel, R.G.D, et al., 1960).

$$E_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\Delta T_c - \Delta T_m}{\Delta T_m} \times 100 \right) \quad (6 - 1)$$

### **Error medio relativo porcentual (MRE%)**

Es una medida del error relativo de la estimación (Ferreira de Souza, et al., 2014), evalúa la bondad de ajuste del modelo, en general valores pequeños indican un mejor ajuste del modelo a los datos experimentales (Horta de Oliveira, et al., 2016).

$$MRE\% = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\Delta T_c - \Delta T_m}{\Delta T_m} \times 100 \right| \quad (6 - 2)$$

### **Raíz del error cuadrático medio (RMSE)**

evidencia que en cuanto menores sean las magnitudes de estos índices mejor es el ajuste del modelo a los datos observados (Corrêa, et al., 2014).

$$E_3 = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\Delta T_c - \Delta T_m)^2}{n}} \quad (6 - 3)$$

Donde:

n: Numero de datos experimentales

$\Delta T_c$ : Temperatura calculada

$\Delta T_m$ : Temperatura medida

## **7. Desarrollo del programa computacional TEMPRO**

### **7.1. Lenguaje de programación**

Luego de tener el conocimiento de todo los parámetros y condiciones necesarias para cada uno de los modelos propuestos, se continua con el desarrollo del simulador que, teniendo en cuenta estos dos conceptos para cada modelo, calcule los perfiles de temperatura correspondiente al fluido presente tanto en la tubería como en el revestimiento, ya sea en un servicio de inyección o en uno de producción, con el fin de tener un control y una evaluación de su comportamiento. La herramienta computacional TEMPRO fue llevado a cabo gracias al lenguaje de programación Python.

#### **7.1.1. Python**

Python es un lenguaje de programación poderoso y fácil de aprender, ya que cuenta con estructuras de datos eficiente y de alto nivel y un enfoque simple pero efectivo a la programación orientada a objetos, programación imperativa y, en menor medida, programación funcional, dándole al programador un estilo particular de programación.

Su principal ventaja es que es un lenguaje de programación libre, lo cual le da un plus de estar al alcance de cualquier persona para estudiar cómo funciona y adaptarlo a las necesidades propias, también sea para distribuir copias del mismo, ya sea para ser expuesto a análisis o mejoras.

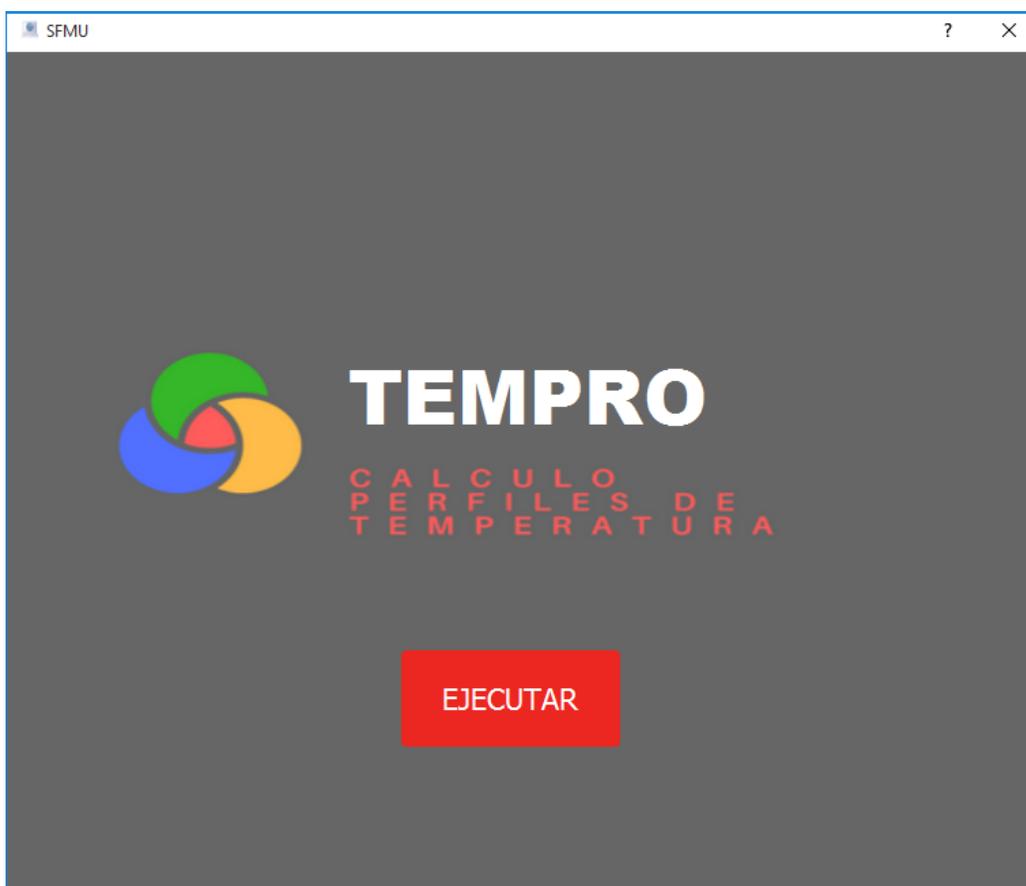
### **7.1.2. Interfaz gráfica (GUI)**

GUI (Graphical User Interface) se le atribuye al conjunto de componentes gráficos que brindan la posibilidad de interacción en usuario – aplicación, a través de ventanas, combos, listas, botones, cuadros de diálogos, etc.

Para el programa computacional TEMPRO se usó Qt Designer como interfaz gráfico por la razón de que tienen la facilidad y flexibilidad de compatibilidad con otras plataformas de desarrollo (Microsoft Windows, Mac OS y Linux).

## 7.2. Descripción de la herramienta computacional TEMPRO

El programa tiene como inicio la siguiente ventana (Figura 15), que muestra la bienvenida al software TEMPRO, con un botón de inicio de simulación (ejecutar), el cual nos traslada a una nueva ventana con diferentes módulos, los cuales se explican en los siguientes puntos.



*Figura 15. Vista principal de inicio de la herramienta computacional TEMPRO.*

*Fuente: Autores*

### 7.2.1. Datos generales del pozo

En este módulo el usuario ingresa los datos generales del pozo como: Nombre de usuario, empresa, campo, pozo, locación, fecha y notas (Figura 16).



The screenshot displays a software window titled 'MainWindow' with a menu bar containing 'File' and 'Help'. The main interface features a dark header with the 'TEMPRO' logo and the text 'CÁLCULO DE PERFILES DE TEMPERATURA'. A vertical sidebar on the left contains several green buttons: 'DATOS GENERALES' (highlighted), 'SELECCIÓN DE MODELO', 'DATA', 'DIAGRAMA', 'TABLA DE RESULTADOS', and 'GRAFICA'. The main content area is a form for entering well data, with the following fields: 'Nombre de usuario' (empty), 'Empresa' (empty), 'Ubicación' (empty), 'Nombre del campo' (empty), 'Nombre del pozo' (containing 'USCO 1'), 'Fecha' (empty), and 'Notas' (a large empty text area).

Figura 16. Vista datos generales del pozo.

Fuente: Autores

### 7.2.2. Selección del modelo

En este módulo el usuario elige el modelo correspondiente al tipo de servicio empleado en el pozo (Figura 17).



Figura 17. Vista datos generales del pozo.

Fuente: Autores

### 7.2.3. Datos del pozo (Data)

Aquí se ingresan los datos de la tubería, conductividades y del caudal (Figura 18).

The screenshot shows the 'MODELO INYECCIÓN DE AGUA' interface with the following data entries:

Section	Parameter	Value	Unit
DATOS GENERALES	Tiempo de simulación	75	dias
	Profundidad	6605	pies
DATOS DE LA TUBERIA	Diámetro interno (ID)	6.366	pulg
	Diámetro externo (OD)	7	pulg
	Caudal	4790	bb/dia
DATOS DE CONDUCTIVIDAD	Conductividad tubería	25	btu/hr*pie*°F
	Conductividad de la tierra	1.4	btu/hr*pie*°F
	Gradiente geotérmico	0.0083	°F/pie
	Capacidad calorífica de la tierra	55	btu/lb*°F
	Densidad de la tierra	140	lb/pie3
DATOS DEL POZO	Temperatura de inyección	58.5	°F
	Temperatura superficie	70	°F

Figura 18. Vista data general del modelo.

Fuente: Autores.

### 7.2.4. Diagrama

Aquí se muestra una ilustración del modelo escogido junto a un botón de ejecución, el cual hará el trabajo de calcular el perfil de temperatura correspondiente (Figura 19).

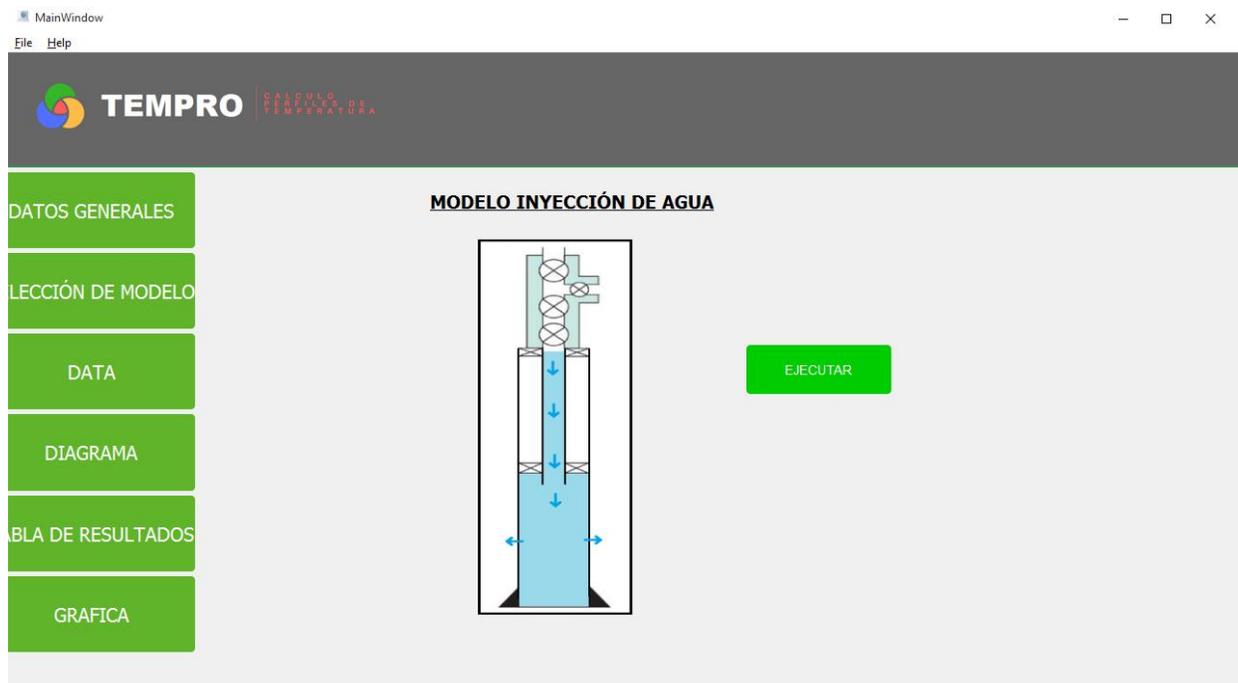
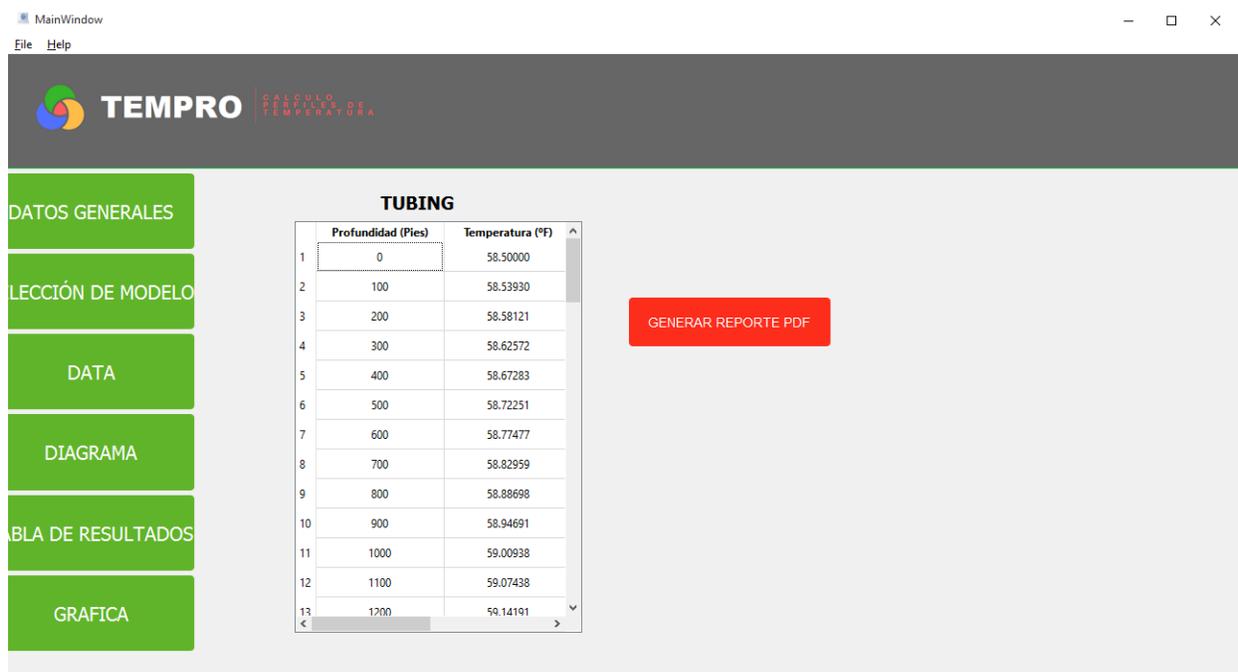


Figura 19. Vista del diagrama correspondiente al modelo escogido.

Fuente: Autores.

### 7.2.5. Tabla de resultados

En este módulo son generados los datos tabulados junto a un botón para exportar estos datos a formato PDF (Figura 20 & 21).



The screenshot displays the TEMPRO software interface. The title bar reads 'MainWindow' with standard window controls. The menu bar includes 'File' and 'Help'. The main header features the TEMPRO logo and the text 'CÁLCULO DE PROFUNDIDAD'. A vertical sidebar on the left contains several green buttons: 'DATOS GENERALES', 'LECCIÓN DE MODELO', 'DATA', 'DIAGRAMA', 'TABLA DE RESULTADOS', and 'GRÁFICA'. The central area is titled 'TUBING' and contains a table with two columns: 'Profundidad (Pies)' and 'Temperatura (°F)'. The table lists data for depths from 0 to 1200 feet. To the right of the table is a red button labeled 'GENERAR REPORTE PDF'.

	Profundidad (Pies)	Temperatura (°F)
1	0	58.50000
2	100	58.53930
3	200	58.58121
4	300	58.62572
5	400	58.67283
6	500	58.72251
7	600	58.77477
8	700	58.82959
9	800	58.88698
10	900	58.94691
11	1000	59.00938
12	1100	59.07438
13	1200	59.14191

Figura 20.. Vista de la tabla de resultados.

Fuentes: Autores.

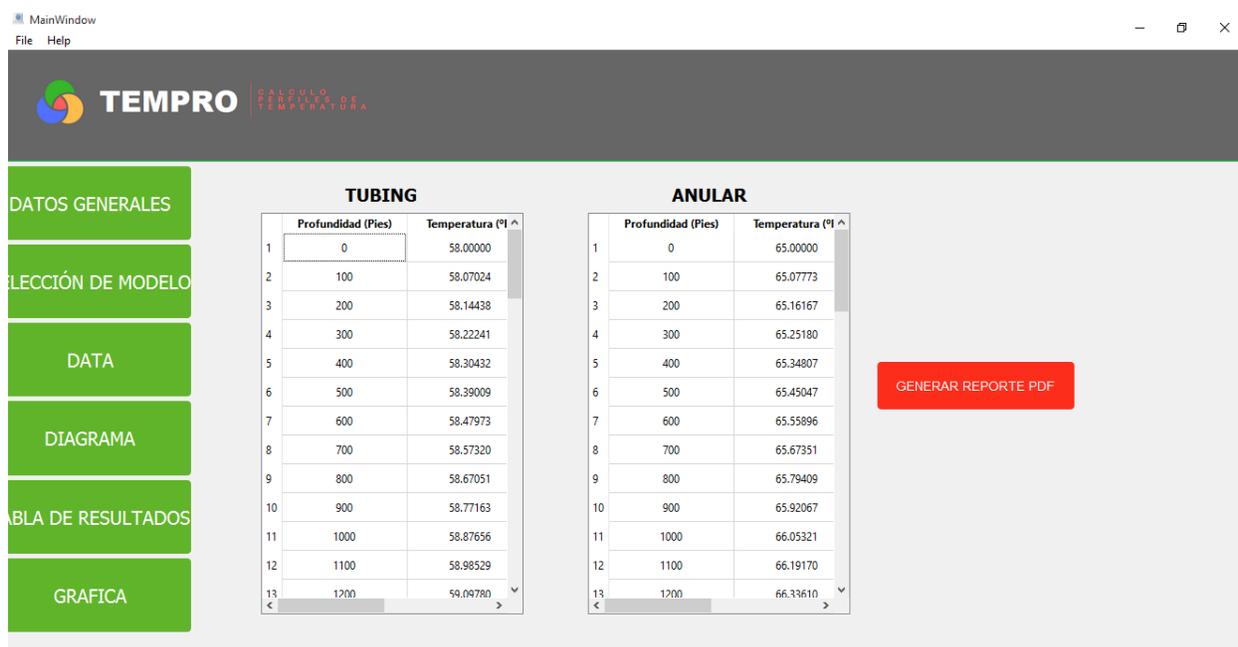


Figura 21. Vista tabla de resultados para modelo de flujo de dos líneas.

Fuente: Autores.

## 7.2.6. Gráfica

En esta sección se muestra de manera gráfica los datos generados por el software en la tabla de resultados (Figura 20), mostrando así el comportamiento del perfil de temperatura del modelo (Figura 22).

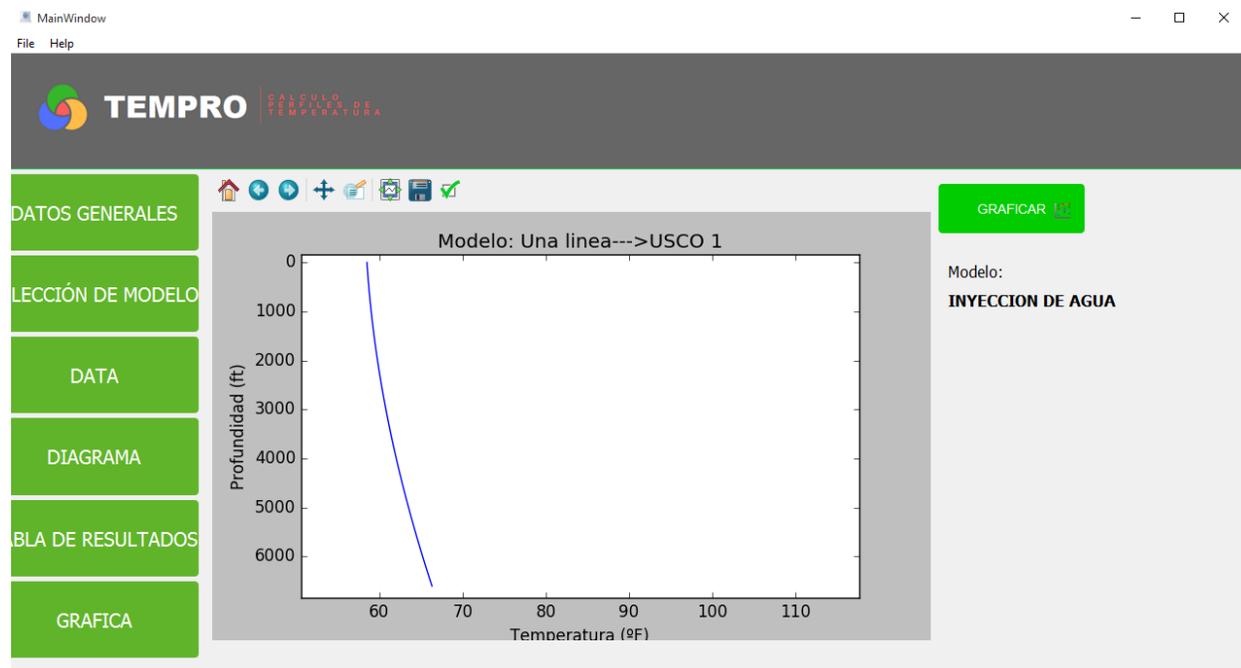


Figura 22. Vista del perfil de temperatura de manera gráfica.

Fuente: Autores.

## 8. Resultados

El análisis desarrollado en el presente proyecto se enfoca en determinar los perfiles de temperatura para distintos servicios ya sea en una línea o en dos líneas, para esto se creó un programa llamado TEMPRO, el cual se describió en la sección anterior.

Para cumplir con los objetivos propuestos se realizó el siguiente análisis de resultados:

1. Se realizó una validación del programa TEMPRO comparando los resultados con un Software comercial, para ellos solo se usaron los casos de una línea, debido a que los diferentes softwares comerciales no presentan las características de dos líneas de manera simultánea, lo cual convierte el programa TEMPRO en una herramienta fundamental para el cálculo del perfil de temperatura de la tubería más real y cercano a las condiciones que presente el pozo.
2. Para desarrollar el caso de dos líneas actuando de manera simultánea a continuación en la sección de ejemplos de aplicación se presentan varios ejemplos, los cuales desarrolla el programa TEMPRO.
3. Por último, se realiza una comparación de perfiles de temperatura de la tubería de completamiento para el mismo pozo realizándolo para una línea y dos líneas, con el fin de observar su diferencia y el impacto que este puede llegar a presentar sobre el diseño de un completamiento y específicamente sobre el análisis de esfuerzos de completamiento.

## 8.1. Validación de resultados

En este proceso de validación se realizará la comparación del programa TEMPRO y el software comercial en tres ejemplos inyección de agua, producción de aceite e inyección de nitrógeno, mostrando las gráficas de comparación y todos los porcentajes de error estadístico indicados en la metodología.

### 8.1.1. Datos de pozos

Las tablas 3,4, y 5 que se muestran a continuación pertenecen a diferentes pozos verticales seleccionados para el análisis.

*Tabla 2.*

*Datos del pozo usado para inyección en una línea*

#### ***Pozo USCO – 1***

<b><i>Profundidad (Ft)</i></b>	6605
<b><i>Temperatura ambiente (°F)</i></b>	70
<b><i>Gradiente geotérmico (°F/100Ft)</i></b>	0,83
<b><i>OD (in)</i></b>	7
<b><i>ID (in)</i></b>	6,366
<b><i>Peso (Lb/Ft)</i></b>	23
<b><i>Temperatura inyección (°F)</i></b>	58,5
<b><i>Rata de inyección (Bbl/Día)</i></b>	4789,7
<b><i>Tiempo de simulación (Días)</i></b>	75

Fuente: Autores.

Tabla 3.

Datos del pozo usado para producción en una línea

**Pozo USCO – 2**

<b>Profundidad (Ft)</b>	8603
<b>Temperatura ambiente (°F)</b>	86
<b>Gradiente geotérmico (°F/100Ft)</b>	1,57
<b>OD (in)</b>	5
<b>ID (in)</b>	4,276
<b>Peso (Lb/Ft)</b>	18
<b>Temperatura producción (°F)</b>	221
<b>Rata de producción (Bbl/Día)</b>	1190
<b>Tiempo de simulación (Días)</b>	30

Fuente: Autores.

Tabla 4.

Datos del pozo usado para inyección de N2 en una línea

**Pozo USCO – 3**

<b>Profundidad (Ft)</b>	2500
<b>Temperatura ambiente (°F)</b>	70
<b>Gradiente geotérmico (°F/100Ft)</b>	3,2
<b>OD (in)</b>	4,5
<b>ID (in)</b>	3,92
<b>Peso (Lb/Ft)</b>	13,5
<b>Temperatura inyección (°F)</b>	94
<b>Rata de inyección (Scf/Día)</b>	230000
<b>Tiempo de simulación (Días)</b>	6

Fuente: Autores.

### 8.1.2. Comparación de perfiles

A continuación, se desarrollará la comparación gráfica entre los perfiles de temperatura de la tubería del programa TEMPRO y el software comercial, para cada uno de los pozos mencionados en las tablas anteriores como sigue (Tabla 2, 3 y 4):

En la figura 23 presenta la comparación de perfiles para el pozo USCO – 1 teniendo un servicio de inyección de agua en una línea.

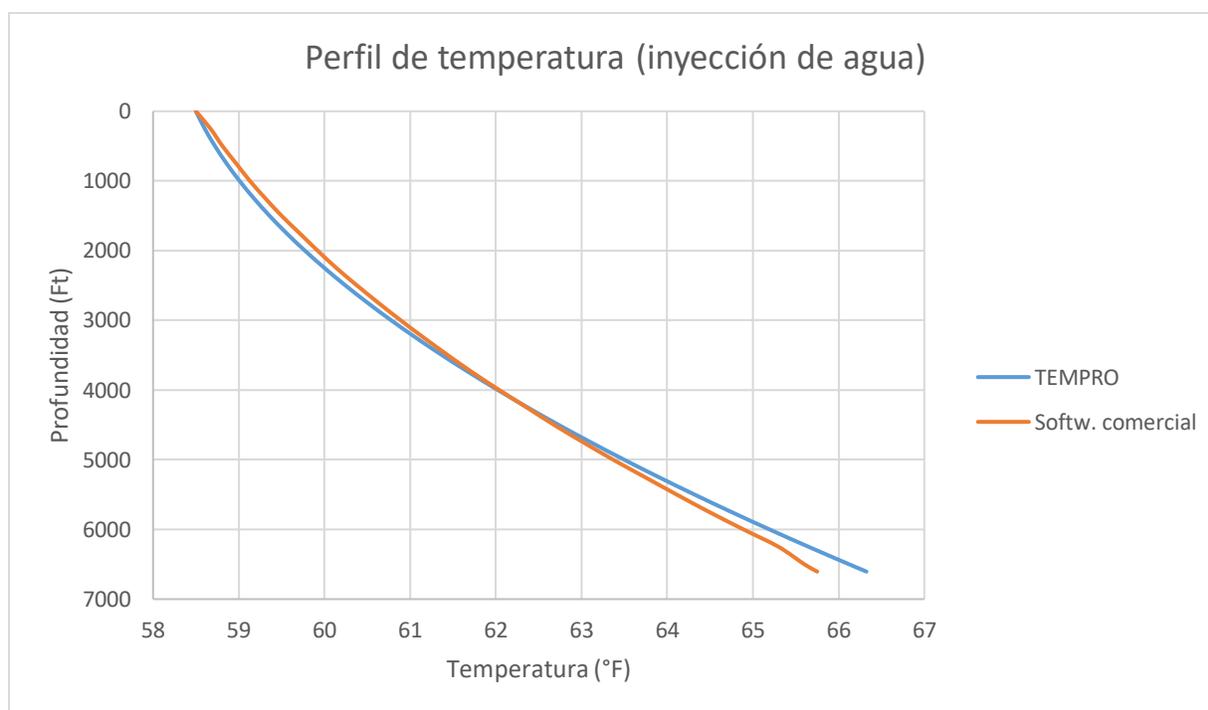
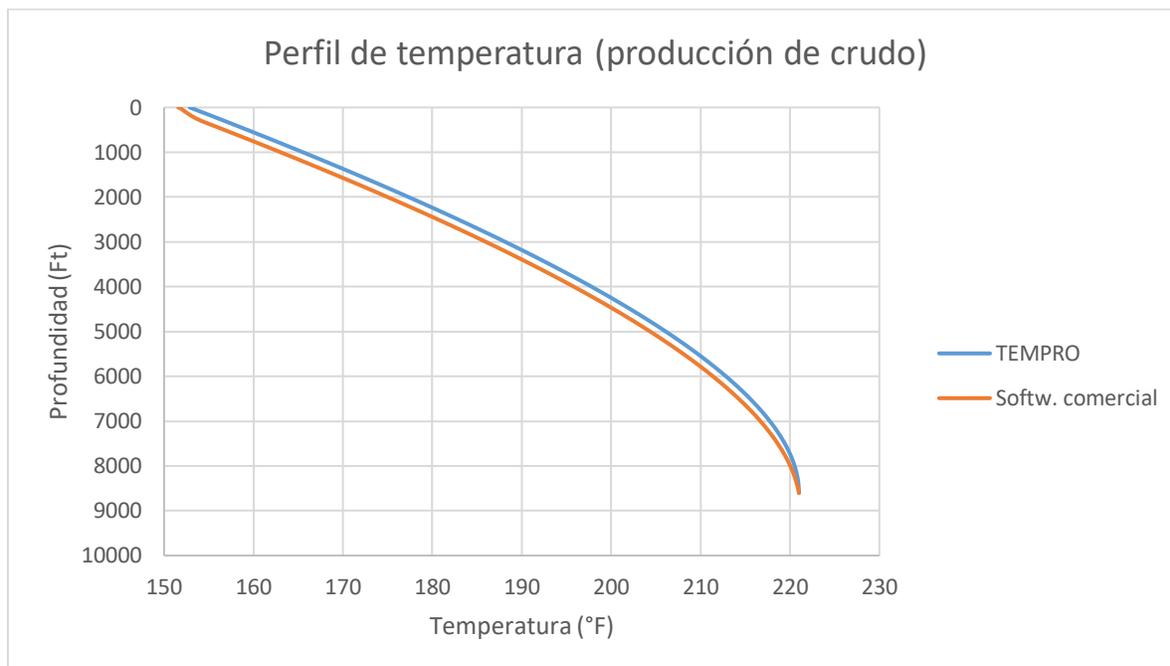


Figura 23. Perfil de temperatura para inyección de agua en una línea.

Fuente: Autores.

En la figura 24 presenta la comparación de perfiles para el pozo USCO – 2 teniendo un servicio de producción de crudo en una línea.



*Figura 24. Perfil de temperatura para producción en una línea.*

*Fuente: Autores.*

En la figura 25 presenta la comparación de perfiles para el pozo USCO – 3 teniendo un servicio de inyección de gas N2 en una línea.

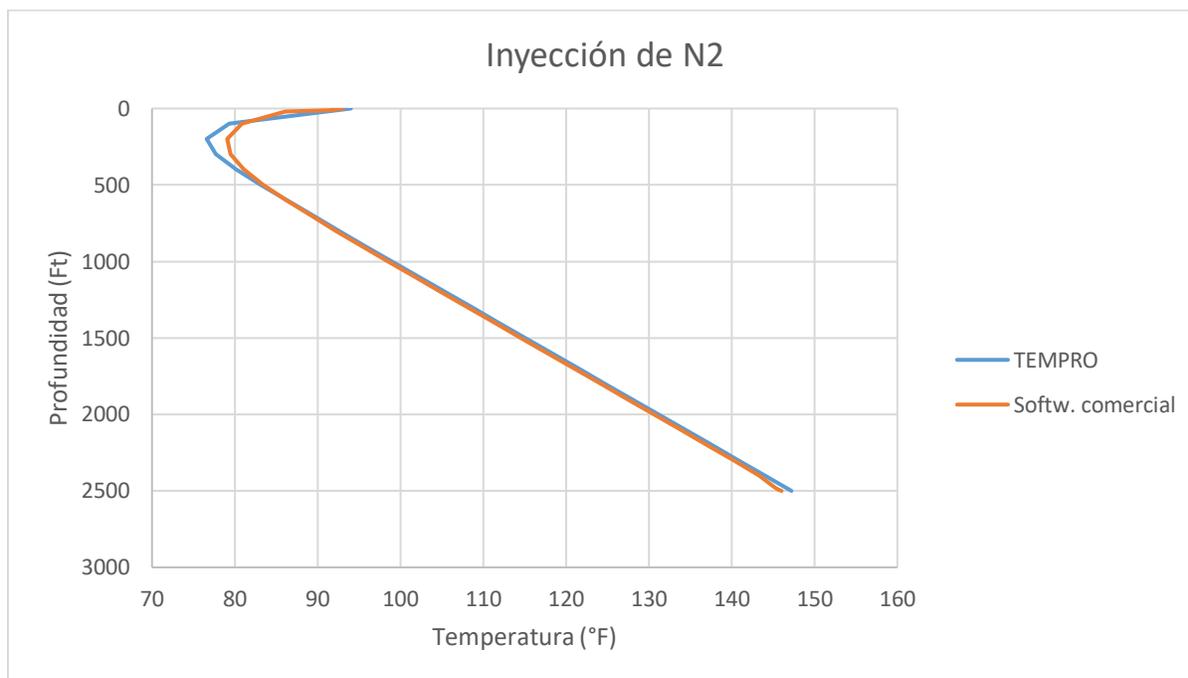


Figura 25. Perfil de temperatura para inyección de nitrógeno en una línea.

Fuente: Autores.

Al revisar la figura 23, se observa una gran similitud del comportamiento de tanto el software comercial como el desarrollado en este trabajo. Mostrando una diferencia menor a 1°F, siendo así un resultado aceptable para diferentes simulaciones que se produzcan para pozos inyectoros de agua.

En la figura 24, durante la producción de crudo se refleja un valor bastante acertado en comparación de los dos softwares, tanto el comercial, como el TEMPRO. En ambos casos la temperatura descende a medida que el fluido se desplaza hacia la superficie, esto se debe a las pérdidas de calor como consecuencia de la disminución de la temperatura geotérmica.

Figura 25, debido a la interacción entre fluido y formación se aprecia en los primeros 500 Ft una pérdida de calor del fluido debido a que la temperatura de inyección del N<sub>2</sub> (94 °F) es mayor a la del ambiente (70 °F), llegando a un punto de equilibrio en el cual las dos temperaturas se comportan de manera similar y continuas (geotérmica y fluido).

Los resultados obtenidos durante la simulación en la herramienta computacional TEMPRO muestra una alta precisión en los 3 casos anteriormente presentados (Fig. 23, 24 y 25), validando que el desarrollo de la metodología propuesta por Ramey es muy acertada dando un alto grado de confianza al momento de generar los perfiles de temperatura y el perfil axial para el posterior cálculo de esfuerzos y diseño de completamiento del pozo.

Para este documento se presentan una serie de limitaciones con respecto a la aplicabilidad que se puede dar en operaciones reales, debido a que además de trabajarse exclusivamente para flujo monofásico, también la geometría del pozo es asumida de manera homogénea, el gradiente geotérmico lineal y no se considera inyección de gas hidrocarburo. Sin embargo, constituye una gran base teórica para servicios de pozos inyectoros y/o productores de manera simultánea.

#### 8.1.4. Resultados estadísticos del error

Para cada uno de los ejemplos evaluados anteriormente se realizó el cálculo de errores estadísticos en la profundidad del perfil donde se presentó mayor diferencia. Estos resultados se pueden observar en las siguientes Tabla 5 y figura 26.

*Tabla 5.*

*Parámetros estadísticos para los casos de flujo por una línea*

<b>Casos</b>	<b>R2</b>	<b>RME %</b>	<b>RMSE</b>
<b>Inyección agua</b>	0,9986458	0,2466928	0,20556361
<b>Inyección N2</b>	0,9990283	0,89693544	2,11072844
<b>Producción crudo</b>	0,9991724	0,71285634	0,71285634

Fuente: Autores.

Para el ajuste de los modelos matemáticos se realizó análisis de regresión no lineal obteniendo los valores de los parámetros del modelo e intervalos de confianza mayores del 95%.

Realizando la comparación entre los porcentajes de error relativo y los perfiles arrojados por el software comercial con los arrojados por el simulador TEMPRO, se demuestra que la herramienta computacional es válida y fue correctamente desarrollada, y puede ejecutarse en otras simulaciones de similares características de los modelos propuestos en este documento.

La herramienta computacional TEMPRO, arroja resultados con porcentajes de error aceptables menores al 1%, cuando se trabaja con modelos de flujo de una línea para los diferentes servicios de inyección (agua y gas) y el de producción.

La exactitud del análisis representado por el valor del coeficiente de determinación  $R^2$  (Tabla 5), así como los datos de error medio relativo RME son bastante bajos, demostrando que

los residuos no afectan de manera potencial al modelamiento del software TEMPRO, esto permite concluir que el desarrollo de la herramienta computacional es preciso.

Por otro lado, la raíz de error cuadrático medio RMSE indica que la variación de temperatura ( $^{\circ}\text{F}$ ) es menor a los  $2^{\circ}\text{F}$ , lo que permite la estimación de los esfuerzos de los perfiles axiales de manera acertada.

El perfil de temperatura es un dato de entrada para el cálculo del perfil axial del pozo, el cual es fundamental para el análisis de esfuerzos de tubería, que es importante para el diseño del completamiento, donde en este último perfil no se ve afectado por un error menor del 1%.

Además, para generar el perfil axial se toma un promedio del perfil de temperatura, así reduciendo el error con una tendencia hacia cero.

## 8.2. Consideraciones

- Esta herramienta computacional presenta una limitación en cuanto que la transferencia de calor se presenta de la formación hacia el pozo, por ende, se escogió una temperatura límite de 212 °F (Temperatura de ebullición del agua) para que así el balance de energía sea correcto.
- La geometría del pozo se trabajó de manera uniforme en toda su longitud, es decir, su configuración es cilíndrica (configuración de pozo vertical).
- Cuando se trabaja con modelos de una línea se debe tener en cuenta que el servicio se hace exclusivamente por tubería, mientras la sección del revestimiento se mantiene cerrada.
- Para el caso de inyección de gas, la herramienta computacional solo emplea gas N<sub>2</sub>.
- En el programa no se consideró producción ni inyección de gas hidrocarburo.
- El proceso de transferencia de calor en el pozo está constituido por los procesos de convección y conducción entre los elementos presentes en el sistema (tuberías, fluidos).

## CONCLUSIONES

- El proyecto tiene como base teórica los balance de energía de los cuales parte el modelamiento matemático para los numerosos casos presentados en el documento, teniendo en cuenta principalmente los procesos de transferencia de calor (conducción y convección) dentro de un sistema (pozo) en el cual se juegan distintas variables respecto al proceso térmico desarrollado durante las operaciones de manera simultánea, dando como resultado un modelamiento más preciso y cercano al comportamiento real de dichos procesos.
- Se determinó que el proceso del cálculo del perfil de temperatura, ya sea para una línea (sección de la tubería abierto y sección del anular cerrada) o para dos líneas de manera simultánea, lo cual es muy importante como datos de entrada para el diseño del perfil axial y por ende el diseño de completamiento de pozos.
- Se creó la herramienta computacional TEMPRO, la cual, permite visualizar el cálculo de los perfiles de temperatura para pozos verticales, con flujo monofásico, en una línea o dos líneas y para diferentes servicios de manera simultánea, exceptuando los casos de gas, el cual se trabajó solamente con N<sub>2</sub>.
- Se realizó la validación de la herramienta con un software comercial arrojando muy buenos resultados y corroborando que el programa puede desempeñarse muy bien, dentro de las consideraciones descritas.

## RECOMENDACIONES

- La herramienta permite el cálculo para diferentes servicios, en completamiento sencillo y en una y dos líneas para pozos verticales y solo para flujo monofásico, se recomienda seguir ampliando el presente trabajo para pozos desviados, horizontales, completamientos selectivos, flujo multifásico, gas hidrocarburo y la aplicación de una línea para sección del anular.
- Cuando se calcula la temperatura geotérmica, se hace en forma lineal, con base en un gradiente geotérmico, la mejor recomendación para este caso es considerar la geometría del pozo con respecto a su diseño.

## Bibliografía

- Cengel, Y. & Boles, M. (2012). *Termodinámica*. México, D.F: McGraw-Hill
- Burgess, K. G. & Lamont, R. P. (1929). *Thermal Properties of Petroleum Products*. Washington: United states department of commerce
- Kreith, F., Manglik R. M. & Bohn M. S. (2012). *Principios de Transferencia de Calor*. México D.F: Cengage Learning
- Kutasov, I. M. (1999). *Applied Geothermics for Petroleum Engineers*. Santa Monica, USA: ELSEVIER
- Bellarby, J. (2009). *Well Completion Design*. Aberdeen, UK: ELSEVIER
- McAdams, W. H. (1954). *Heat Transmission*. United States of America: McGraw-Hill
- Ramey, H. J. (1962, April 1). *Wellbore Heat Transmission*. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/96-PA
- Kabir, C. S., Hasan, A. R., Kouba, G. E., & Ameen, M. (1996, June 1). *Determining Circulating Fluid Temperature in Drilling, Workover, and Well Control Operations*. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/24581-PA
- Hasan, A. R., Kabir, C. S., & Ameen, M. M. (1996, June 1). *A Fluid Circulating Temperature Model for Workover Operations*. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/27848-PA
- Satman, A. & Tureyen, O. I. (2016). *Geothermal wellbore heat transmission: Stabilization times for "Static" and "Transient" pozo temperatures profiles*. *Geothermics*, 64, 482-489

Kabir, C. S. & Hasan, A. R. (2012). *Wellbore heat-transfer modeling and applications*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 86-87, 127-136

Willhite, G. P. (1967, May 1). *Over-all Heat Transfer Coefficients in Steam and Hot Water Injection Wells*. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/1449-PA

Erpelding, P., & Miller, R. A. (1994, January 1). *Tubería Temperature Correlations for Injection and Production Based On Simulation and Field Experience*. Offshore Technology Conference. doi:10.4043/7537-MS

Sagar, R., Doty, D. R., & Schmidt, Z. (1991, November 1). *Predicting Temperature Profiles in a Flowing Well*. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/19702-PA

Hasan, A. R., & Kabir, C. S. (1994, August 1). *Aspects of Wellbore Heat Transfer During Two-Phase Flow* (includes associated papers 30226 and 30970). Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/22948-PA

Hasan, A. R., & Kabir, C. S. (1996, August 1). *A Mechanistic Model for Computing Fluid Temperature Profiles in Gas-Lift Wells*. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/26098-P

Horta de Oliveira, G. H., Corrêa, P. C., Lelis Rodrigues de Oliveira, A. P., Machado Baptestini, F., & Vargas Elías, G. A. (2015, November 3). *Roasting, grinding and storage impact on thermodynamic properties and absorption isotherms of arabica coffee*. Journal of food processing and preservation. doi:10.1111/jfpp.12779.

Ferreira, S. J., Váquiro, H. A., Villa, H. A., Polachini, T. C., & Telis., J. (2014). *Physical thermal and water-sorption properties of passion fruit seeds*. International Journal of food engineering. doi:10.1515/life-2014-0138.

Eim, V. S., Rosselló, C., Femenia, A., & Simal, S. (2011). *Moisture Sorption Isotherms and Thermodynamics Properties of Carrots*. International Journal of food engineering. doi:10.2202/1556-3758.1804.

Steel, R.G.D, and Torrie, J. H., *Principles and Procedures of Statistics with Special Reference to the Biological Sciences.*, McGraw Hill, 1960, pp. 187, 287.

Vollmer, D. P., Fang, C. S., Ortego, A. M., & Lemoine, E. (2004, January 1). *Convective Heat Transfer in Turbulent Flow: Effect of Packer Fluids on Predicting Flowing Well Surface Temperatures*. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/86546-MS

Sanmiguel, N. & Toro, F. (2017) *Determinación de la envolvente operativa de la tubería de completamiento en función de las fuerzas axiales y diferenciales de presión de los diferentes servicios que presente el pozo (inyección y producción)* (Tesis pregrado). Universidad Surcolombiana, Neiva.

**Anexo 1: Propiedades térmicas de los fluidos**

*Agua*

<b><i>T</i></b> (°F)	<b><math>\rho</math></b> (Lbm/Ft <sup>3</sup> )	<b><math>C_p</math></b> (Btu/Lbm°F)	<b><math>\mu \times 10^{-3}</math></b> (Lbm/Ftseg)	<b><i>k</i></b> (Btu/hrFt°F)	<b><i>Pr</i></b>
<b>32</b>	62.4	1.01	1.20	0.319	13.7
<b>40</b>	62.4	1.00	1.04	0.325	11.6
<b>50</b>	62.4	1.00	0.88	0.332	9.55
<b>60</b>	62.4	0.999	0.76	0.340	8.03
<b>70</b>	62.3	0.998	0.658	0.347	6.82
<b>80</b>	62.2	0.998	0.578	0.353	5.89
<b>90</b>	62.1	0.997	0.514	0.359	5.13
<b>100</b>	62.0	0.998	0.458	0.364	4.52
<b>150</b>	61.2	1.00	0.292	0.384	2.74
<b>200</b>	60.1	1.00	0.205	0.394	1.88
<b>250</b>	58.8	1.01	0.158	0.396	1.45

*Nitrógeno*

<b><i>T</i></b> (°F)	<b><math>\rho</math></b> (Lbm/Ft <sup>3</sup> )	<b><math>C_p</math></b> (Btu/Lbm°F)	<b><math>\mu \times 10^{-3}</math></b> (Lbm/Ftseg)	<b><i>k</i></b> (Btu/hrFt°F)	<b><i>Pr</i></b>
<b>0</b>	0.0840	0.2478	1.055	0.0132	0.713
<b>100</b>	0.0690	0.2484	1.222	0.0154	0.71
<b>200</b>	0.0585	0.2490	1.380	0.0174	0.71
<b>400</b>	0.0449	0.2515	1.660	0.0212	0.71

*Aceite*

<b><i>Ko</i></b>	$\frac{0.813}{Ge} [1 - 0.0003(T - 32)]$
<b><i>Ge</i></b>	$\frac{141.5}{131.5 + API}$
<b><math>C_o</math> (Btu/Lbm°F)</b>	$\frac{1}{\sqrt{Ge}} (0.388 + 0.0045T)$

## **Anexo 2: Ejemplos de aplicación**

Uno de los mayores retos en el desarrollo de este programa era crear el perfil de temperatura de la tubería de completamiento afectado por el flujo simultáneo de dos líneas, esto quiere decir anular e interno en tubería, lo cual varía bastante del perfil en una línea. Este tipo de casos se presenta cuando se generan servicios de manera simultánea o en casos como los sistemas de levantamiento por gas (gas lift) o bombeo hidráulico. Este perfil afectado por dos líneas no lo presentan los softwares comerciales y se convirtió en el objetivo del presente trabajo y aporte a este proceso de cálculo.

Es por ello que a partir del anexo 2 se presentan diferentes ejemplos planteados para la determinación del perfil de temperatura de la tubería para el caso de flujo simultáneo en dos líneas, como los perfiles del revestimiento y el perfil de Temperatura geotérmica que también arroja el programa para cada caso, como se presenta a continuación.

- **Ejemplo: Inyección de agua en dos líneas.**

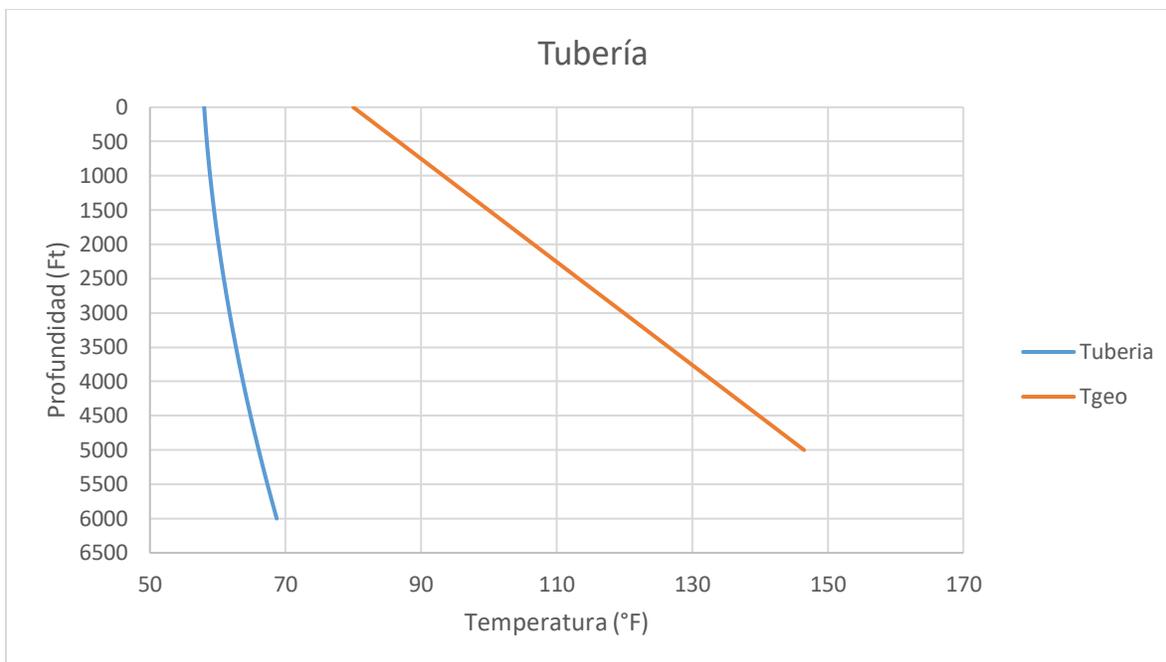
Tabla 6.

Datos del pozo usado para inyección de agua en ambas líneas

**Pozo USCO – 4**

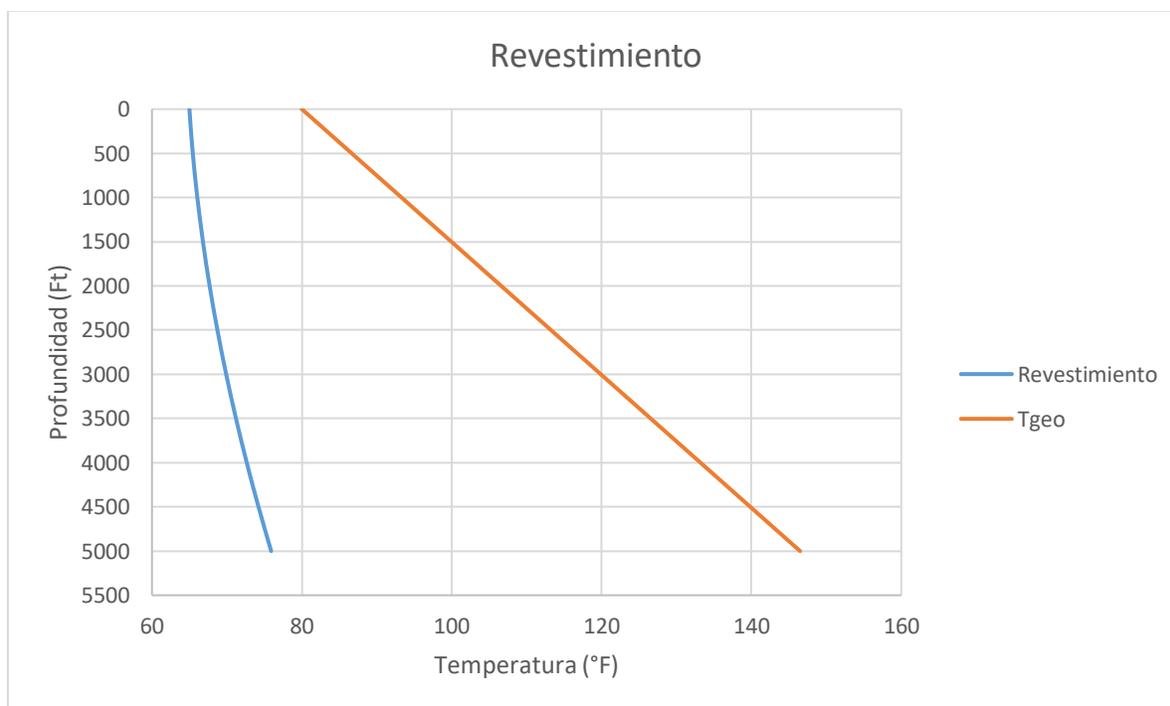
<b>Temperatura ambiente (°F)</b>	80
<b>Tiempo de simulación (Días)</b>	40
<b>Gradiente geotérmico (°F/100Ft)</b>	1,33
<b>Datos de Revestimiento</b>	
<b>OD (in)</b>	7
<b>ID (in)</b>	6,094
<b>Peso (Lb/Ft)</b>	32
<b>Profundidad (Ft)</b>	5000
<b>Temperatura inyección (°F)</b>	65
<b>Rata de inyección (Bbl/Día)</b>	2500
<b>Datos de Tubería</b>	
<b>OD (in)</b>	4,5
<b>ID (in)</b>	3,92
<b>Peso (Lb/Ft)</b>	13,5
<b>Profundidad (Ft)</b>	6000
<b>Temperatura inyección (°F)</b>	58
<b>Rata de inyección (Bbl/Día)</b>	4000

Fuente: Autores.



*Figura 26. Perfil de temperatura para inyección de agua dual – flujo paralelo, tubería.*

*Fuente: Autores.*



*Figura 27. Perfil de temperatura para inyección de agua dual – flujo paralelo, revestimiento.*

*Fuente: Autores.*

- **Ejemplo: Producción de aceite en dos líneas**

Tabla 7.

Datos del pozo usado para producción de aceite en ambas líneas

**Pozo USCO – 5**

<b>Temperatura ambiente (°F)</b>	68
<b>Tiempo de simulación (Días)</b>	30
<b>Gradiente geotérmico (°F/100Ft)</b>	1,8
<b>Datos de Revestimiento</b>	
<b>OD (in)</b>	9,625
<b>ID (in)</b>	8,755
<b>Peso (Lb/Ft)</b>	43,5
<b>Profundidad (Ft)</b>	6500
<b>Temperatura producción (°F)</b>	168
<b>Rata de producción (Bbl/Día)</b>	3200
<b>Datos de Tubería</b>	
<b>OD (in)</b>	7
<b>ID (in)</b>	6,094
<b>Peso (Lb/Ft)</b>	32
<b>Profundidad (Ft)</b>	7200
<b>Temperatura producción (°F)</b>	185
<b>Rata de producción (Bbl/Día)</b>	2600

Fuente: Autores.

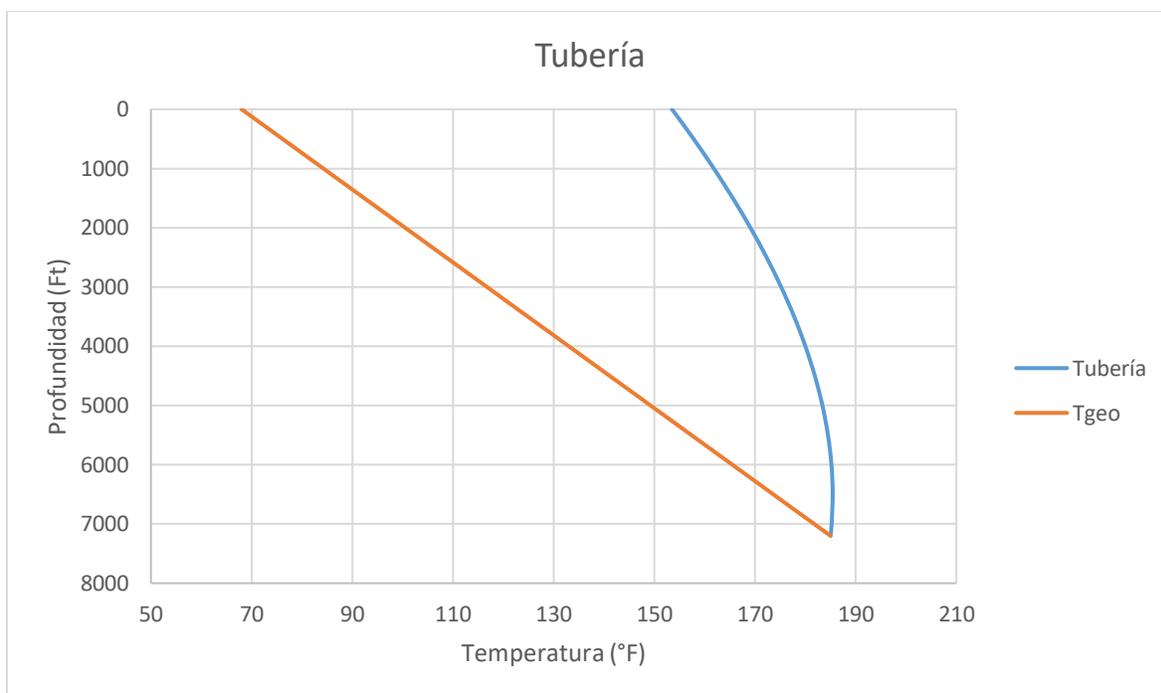


Figura 28. Perfil de temperatura para producción de aceite dual – flujo paralelo, tubería.

Fuente: Autores

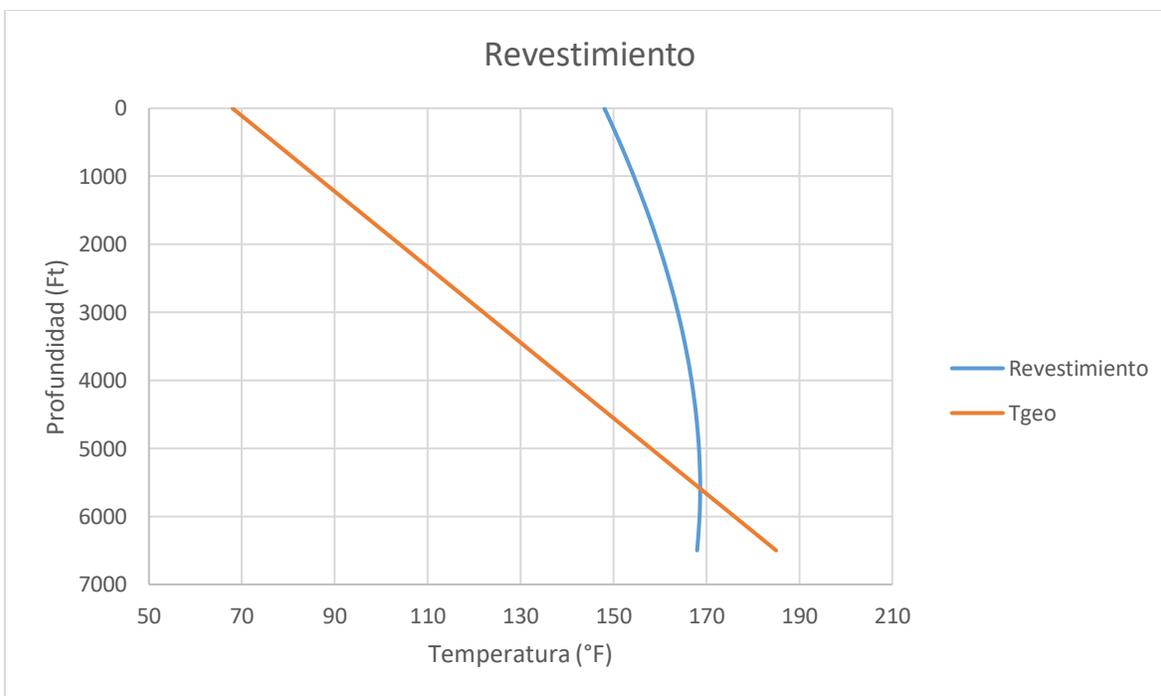


Figura 29. Perfil de temperatura para producción de aceite dual – flujo paralelo, revestimiento.

Fuente: Autores

- **Ejemplo: Inyección de agua tubería – Producción de aceite revestimiento**

Tabla 8.

Datos del pozo usado para contraflujo, inyección de agua tubería y producción de aceite revestimiento

**Pozo USCO – 6**

<b>Temperatura ambiente (°F)</b>	76
<b>Tiempo de simulación (Días)</b>	36
<b>Gradiente geotérmico (°F/100Ft)</b>	2,34
<b>Datos de Revestimiento</b>	
<b>OD (in)</b>	10,75
<b>ID (in)</b>	9,85
<b>Peso (Lb/Ft)</b>	51
<b>Profundidad (Ft)</b>	5300
<b>Temperatura producción (°F)</b>	212
<b>Rata de producción (Bbl/Día)</b>	4200
<b>Datos de Tubería</b>	
<b>OD (in)</b>	8,625
<b>ID (in)</b>	7,825
<b>Peso (Lb/Ft)</b>	36
<b>Profundidad (Ft)</b>	5800
<b>Temperatura inyección (°F)</b>	85
<b>Rata de inyección (Bbl/Día)</b>	7500

Fuente: Autores.

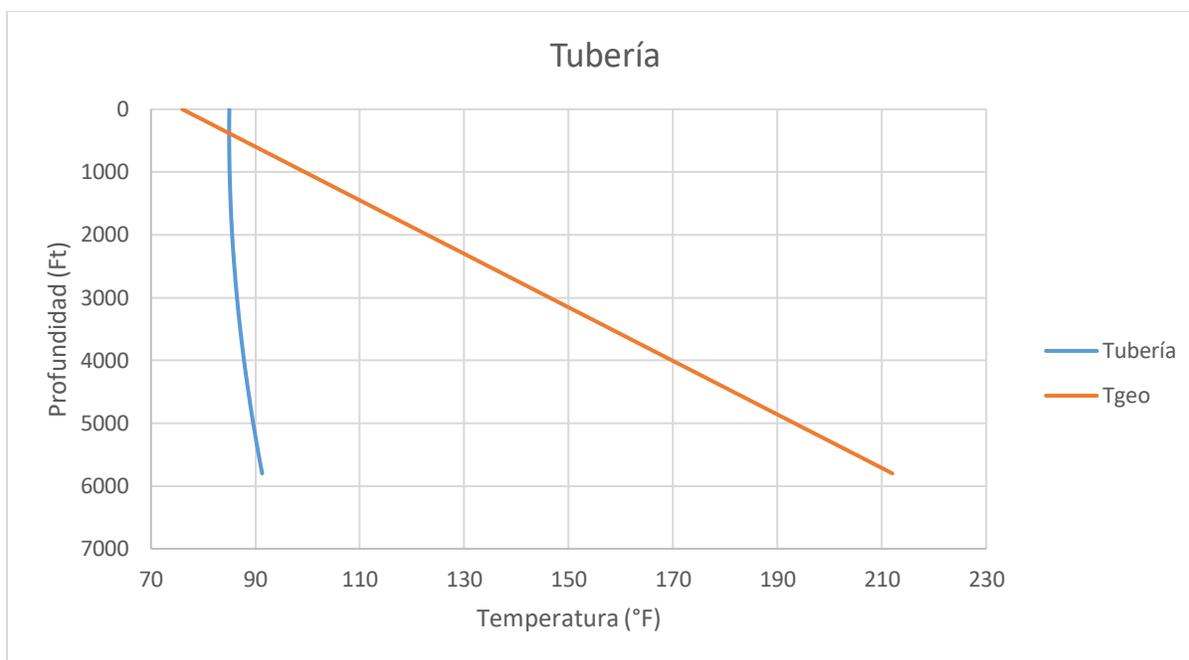


Figura 30. Perfil de temperatura para inyección de agua en tubería, producción de aceite en revestimiento – contraflujo, tubería.

Fuente: Autores

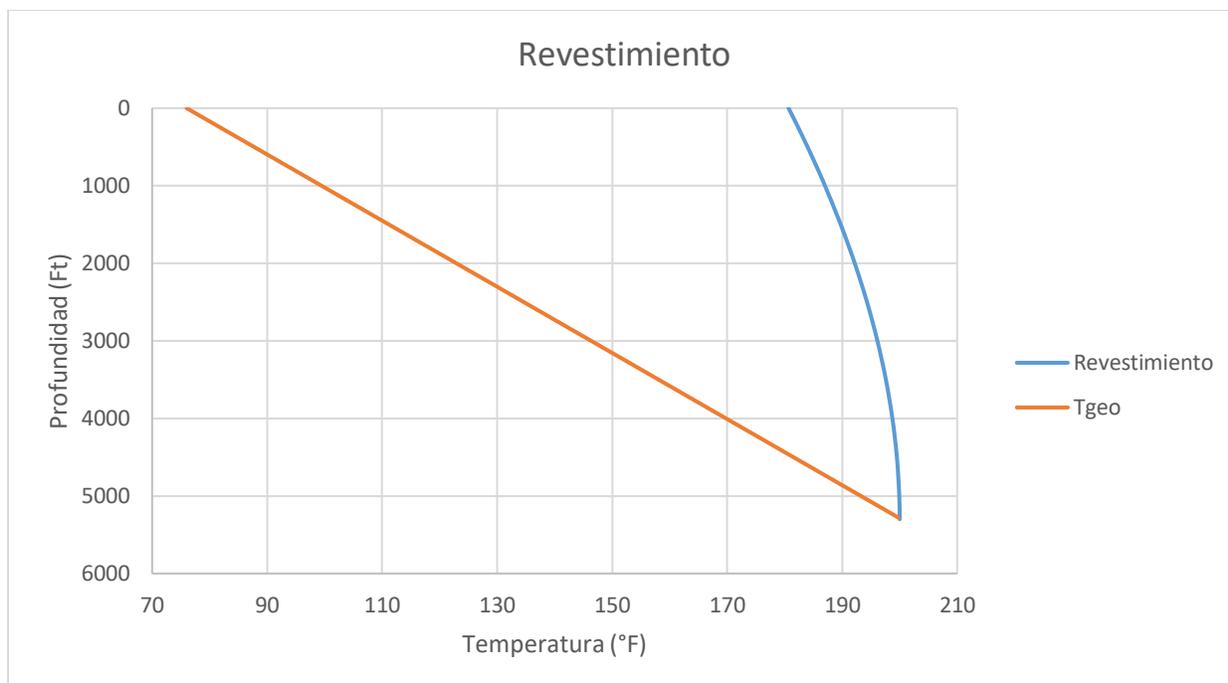


Figura 31. Perfil de temperatura para inyección de agua en tubería, producción de aceite en revestimiento – contraflujo, revestimiento.

Fuente: Autores

- **Producción de aceite en tubería – Inyección de agua en revestimiento**

Tabla 9.

Datos del pozo usado para contraflujo, inyección de agua revestimiento y producción de aceite en tubería

**Pozo USCO – 7**

<b>Temperatura ambiente (°F)</b>	64
<b>Tiempo de simulación (Días)</b>	42
<b>Gradiente geotérmico (°F/100Ft)</b>	1,74
<b>Datos de Revestimiento</b>	
<b>OD (in)</b>	5,5
<b>ID (in)</b>	4,67
<b>Peso (Lb/Ft)</b>	23
<b>Profundidad (Ft)</b>	6200
<b>Temperatura inyección (°F)</b>	72
<b>Rata de inyección (Bbl/Día)</b>	3800
<b>Datos de Tubería</b>	
<b>OD (in)</b>	3,5
<b>ID (in)</b>	2,75
<b>Peso (Lb/Ft)</b>	12,95
<b>Profundidad (Ft)</b>	6400
<b>Temperatura producción (°F)</b>	172
<b>Rata de producción (Bbl/Día)</b>	3000

Fuente: Autores.

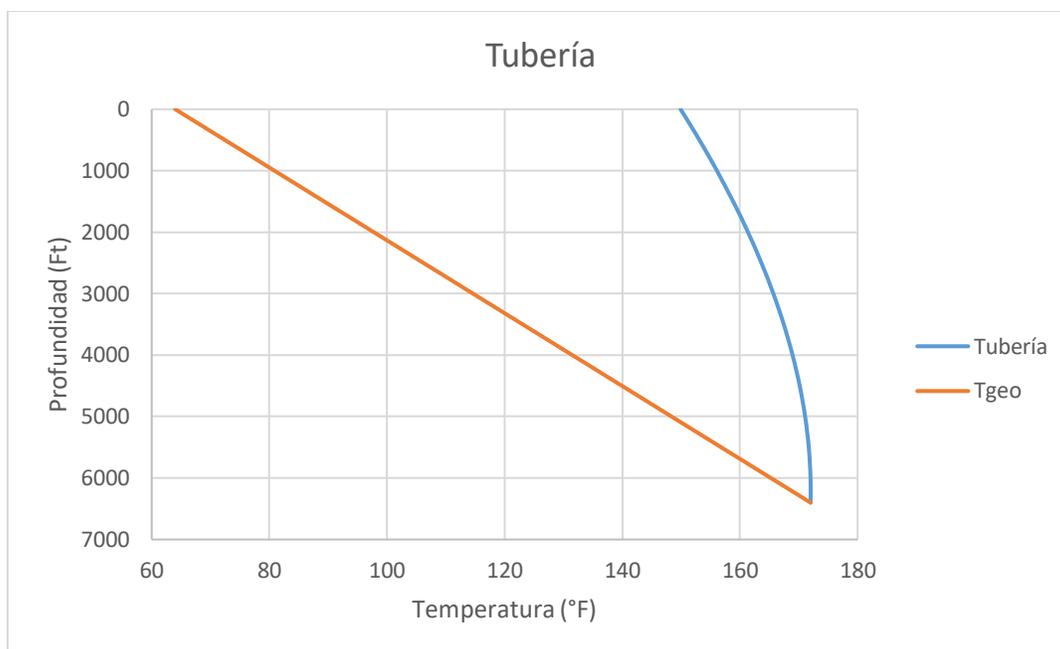


Figura 32. Perfil de temperatura para inyección de agua en revestimiento, producción de aceite en tubería – contraflujo, tubería.

Fuente: Autores

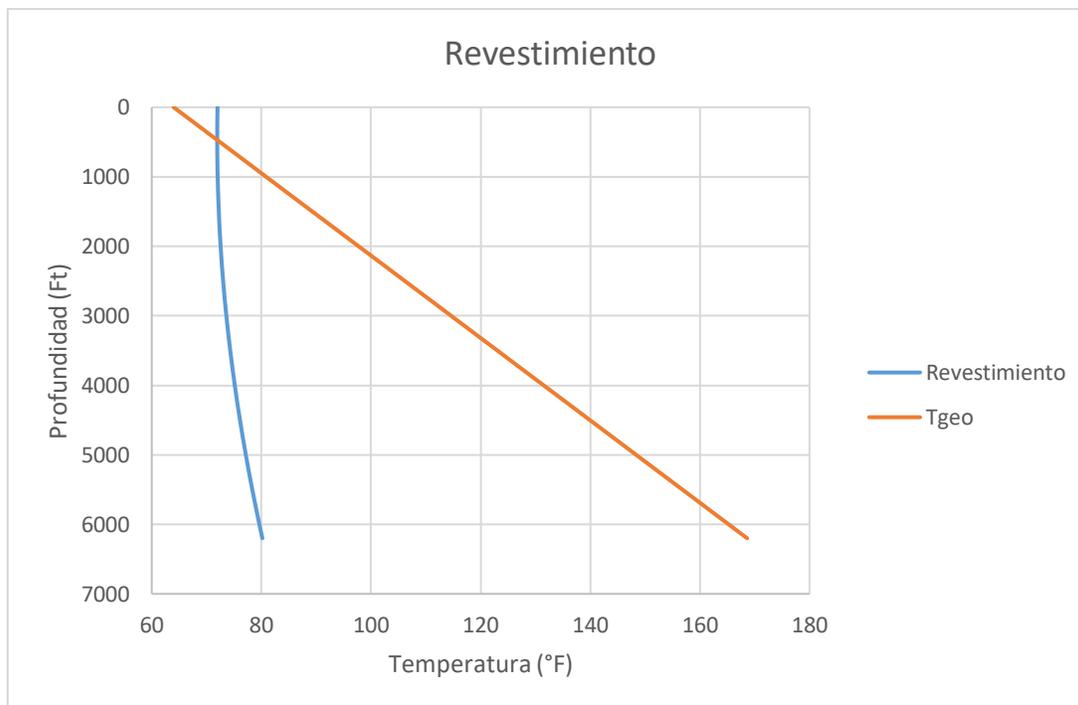
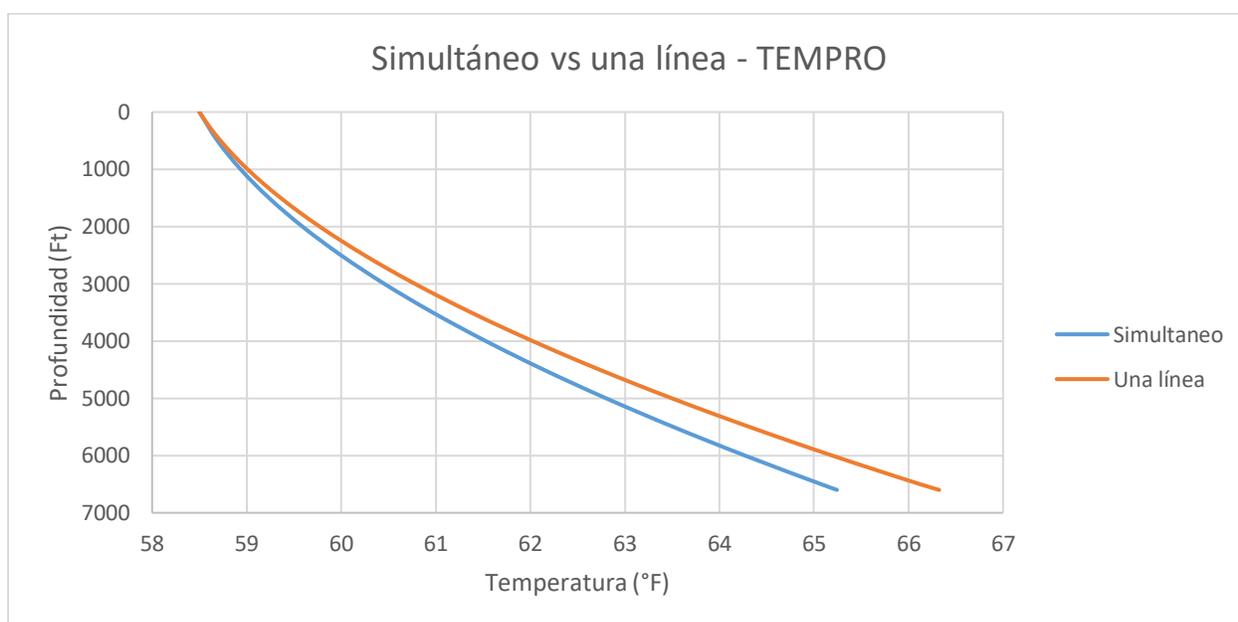


Figura 33. Perfil de temperatura para inyección de agua en revestimiento, producción de aceite en tubería – contraflujo, revestimiento.

Fuente: Autores

- **Comparación de perfiles de una línea con dos líneas**

Para efecto de este ejemplo, se empleó los datos de entrada de la *Tabla 3*. Y se realizó la comparación de perfil de temperatura de la tubería bajo el impacto de la inyección de agua en una línea y dos líneas en la herramienta computacional TEMPRO, con el fin de observar su comportamiento y el impacto sobre el mismo y que si no se toma el perfil correcto para el análisis de esfuerzos de tubería impactaría bastante en el diseño y posteriores fallas del mismo.



*Figura 34. Perfil de temperatura comparativo entre modelo de una línea vs modelo simultáneo - TEMPRO*

*Fuente: Autores*

Como se observa en la figura 34, se puede notar la diferencia que presenta una curva de la otra, este comportamiento se debe a que cuando se trabaja de manera simultánea en dos áreas con un fluido de inyección, enfriará de manera más rápida el sistema y por ende se verá afectado el perfil de temperatura. De la misma manera el perfil axial debido a que los datos arrojados por

el perfil de temperatura son empleados para el cálculo de éste, lo cual afecta directamente la técnica de análisis de esfuerzos y el diseño final del pozo.