

PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA

LABORATORIO VIRTUAL DE ENTRENAMIENTO PARA SENSIBILIDAD A PARÁMETROS EN SISTEMAS DINÁMICOS

Brasili, Matias Damián – LU 1012054

Ingeniería en Informática

Cáceres, Federico Fernando– LU 137953

Ingeniería en Informática

Tutor:

Larreteguy, Axel. Universidad Argentina de la Empresa.

Co-Tutor:

Ferreri, Juan Carlos. Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires.

2 de noviembre del 2015



**UNIVERSIDAD ARGENTINA DE LA EMPRESA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS EXACTAS**

2. RESUMEN

El entrenamiento y adquisición de conocimiento sobre la dinámica de un sistema simple que mantenga las peculiaridades de sistemas complejos, permite su implementación con la generación de resultados en tiempo real. Es por ello que para el desarrollo de este trabajo se ha tomado como guía el circuito conocido como el problema de Welande, siendo este el caso testigo tomado para diversas investigaciones, gracias a la simplicidad y representatividad que presenta sobre el caos en circuitos termo-hidráulicos.

Las etapas desarrolladas en el presente trabajo, junto con la base de datos de conocimientos conceptualmente expresados, permitirán lograr la consolidación de conocimientos y obtener de una manera cuantitativa y cualitativa, una apreciación de la sensibilidad a parámetros de las representaciones computacionales de un sistema dinámico particular.

Como resultado final una interfaz será desarrollada, la misma podrá ser utilizada por el laboratorio de Modelado y Simulación de UADE como un ambiente de trabajo, con una estructura lo suficientemente general para su uso en relación a modelos computacionales en tiempo real.

Asimismo, se deja planteado para futuros trabajos la integración con el código industrial RELAP5, la cual permitirá el contraste de los resultados obtenidos por el producto generado por este proyecto.

3. ABSTRACT

The training and knowledge acquisition over the dynamic of a simple system that maintains the peculiarities of complex systems allows its implementation with the generation of results in real time. Thus, in order to carry out this task, the circuit known as Welandar Problem has been taken as guideline, being the witness case used for several investigations, because of its simplicity and representation qualities over the thermo-hydraulic circuits.

The stages developed in this paper, together with the database of conceptually expressed knowledge, shall allow the consolidation of knowledge and the obtaining of an assessment of the sensitivity to the computerized representation parameters of a specific dynamic system.

As final result, an interface will be developed, which may be used by the Modeling and Simulation Lab of UADE as a work environment, with such a general structure that it may be used in computerized models in real time.

Also, we would like to bring up for future papers the integration with the RELAP5 industrial code which shall allow the contrast of the obtained results by the product generated by this project.

Contenido

2. RESUMEN	2
3. ABSTRACT	3
4. INTRODUCCIÓN	6
5. ANTECEDENTES	9
6. DESCRIPCIÓN	10
6.1 La transferencia de calor	11
6.1.1 Balances de energía.....	13
6.2 Mecanismos generales de transferencia de calor.....	14
6.2.1 La Conducción térmica	14
6.3 La Convección.....	16
6.3.1 Flujos viscosos y no viscosos	18
6.3.2 El flujo estacionario y el no estacionario.....	19
6.3.3 Flujos laminares y turbulentos	19
6.4 La Convección Natural.....	20
6.4.1 Conceptos preliminares.....	20
6.4.2 Circuitos de convección natural y la aproximación Boussinesq.....	25
6.6 Método de discretización de tiempo y espacio	26
6.6.1. FTUS - Forward in Time, Upwind in Space	27
6.6.2. ITUS- Implicit in time, Upwind in Space	27
6.7 El Problema de Welander.....	28
6.7.1 Nuestro escenario	30
6.7.2 Aspectos numéricos del Loop de Welander.....	32
6.8 Especificación del producto	34
6.8.1 Selección del lenguaje de programación.....	35
6.8.2 Núcleo Principal.....	36
7. METODOLOGÍA DE DESARROLLO	38
7.1 Conceptos preliminares.....	40
7.1.1 Estudio de factibilidad	40
7.1.2 El módulo.....	41

7.1.3 El Acoplamiento	43
7.1.4 La Cohesión	44
7.1.5 El Modelo Esencial.....	44
7.2 Desarrollo del interrogador de datos utilizando la metodología de análisis estructurado	46
7.2.1 Primer Etapa: Encuesta	46
7.2.2 Segunda Etapa: Análisis.....	46
7.2.3 Tercer Etapa: Diseño	51
7.2.4 Cuarta Etapa: Implantación.....	52
7.2.5 Quinta Etapa: Generación de pruebas de aceptación	52
7.2.6 Sexta Etapa: Garantía de calidad.....	53
7.2.7 Séptima Etapa: Conversión de bases de datos (no aplica).....	53
7.2.8 Octava Etapa: Instalación	53
7.3 Desarrollo del interrogador de datos y resultados para un código de cálculo industrial (RELAP5)	54
7.3.1 Escenario	55
8. PRUEBAS REALIZADAS	56
9. DISCUSIÓN	57
10. CONCLUSIONES	58
11. BIBLIOGRAFÍA	59
12. ANEXO - LA INTERFAZ GRÁFICA.....	62
13. ANEXO - TABLA DE CONSTANTES UTILIZADAS PARA EL ESTUDIO DEL PROBLEMA DE WELANDER.	64
14. ANEXO - CASOS DE PRUEBA ACEPTADOS.....	66

4. INTRODUCCIÓN

El entrenamiento y adquisición de conocimiento sobre la dinámica de un sistema simple que mantenga las peculiaridades de sistemas complejos, permite su implementación con la generación de resultados en tiempo real.

Un circuito de fluidos dinámicos simplificado, en el que circula fluido bajo efectos de la gravedad y calor, puede ser simulado para ilustrar y poner de manifiesto sus peculiaridades de comportamiento. Esto resulta de interés desde el punto de vista del diseño de los reactores nucleares avanzados, debido a que se busca reducir los sistemas activos de control y seguridad con el objetivo de un reactor inherentemente seguro.

Existe una tendencia gradual a diseñar sistemas primarios de extracción de energía basados en convección natural, es por esto que se torna necesario un estudio detallado de los fenómenos termofluidodinámicos asociados a este efecto. En particular, interesa analizar las condiciones bajo las cuales existen inestabilidades que puedan amenazar la seguridad del reactor.

En particular, y bajo ciertas condiciones, la evolución temporal de este tipo de lazos generados por los fluidos puede presentar un comportamiento inestable de tipo caótico, con oscilaciones no periódicas y alta sensibilidad a condiciones iniciales, tal como fuera planteado por Pierre Welander¹, planteo que puede ser tomado como un paso posterior al de Lorenz², quien presentó el primer sistema determinístico de flujo no periódico, dando comienzo al estudio moderno de los sistemas dinámicos basándose justamente en un modelo simplificado de convección natural en la atmósfera.

Fue justamente a partir del trabajo de Lorenz y de los avances de la era digital del computador, que se han logrado grandes avances tanto matemáticos como físicos. Una década después vio la luz otro factor fundamental del área temática de este proyecto, que fue el concepto de caos introducido por Li³ y Yorke⁴, el cual se refiere al comportamiento no periódico acotado y a la sensibilidad a condiciones iniciales.

¹ Raymond Pierre Louis Sinerce Welander.

² Edward Norton Lorenz.

³ Tien-Yien Li.

Es considerando los anteriores puntos que para el desarrollo de este trabajo se ha tomado como guía el problema de Welander. En parte se debe a la sencillez y representatividad que presenta la cual resulta conveniente al momento para este proyecto.

Como objetivo se buscará el desarrollo de un ambiente que constituya un laboratorio virtual para entrenamiento en temas asociados a la sensibilidad, y a la parametrización del sistema. Este mismo estará comprendido por una interfaz gráfica de usuario para especificación e interrogación de datos generados tiempo real, un interrogador de datos y resultados para un código de cálculo “in house” y un módulo de representación gráfica de variables de interés como función del tiempo y su procesado para diagramas de fase.

Para alcanzar los objetivos planteados, este proyecto se ha dividido en distintas secciones:

- Antecedentes: en esta sección se describen los desarrollos previos que se encuentren relacionados con nuestro proyecto y que no sean de nuestra autoría.
- Descripción: se brinda una introducción teórica sobre las bases que rigen a este problema y sentamos la base matemática fundamental para el desarrollo del laboratorio virtual. La especificación del producto también se encuentra descrita en esta sección.
- Metodología de desarrollo: se explica la forma de trabajo para el desarrollo del interrogador de datos para un código de cálculo in house y para la interfaz gráfica de usuario para especificación e interrogación de datos generados tiempo real. En esta sección se describe el paradigma elegido y la metodología propuesta.
- Pruebas Realizadas: en esta sección se describen las pruebas funcionales y no funcionales que tuvieron lugar sobre el producto desarrollado a fin de corroborar la precisión y el rendimiento del mismo, y ratificar que los requerimientos fueron realizados correctamente.
- Discusión: se explicarán los resultados de los ensayos, indicando limitaciones y conflictos encontrados a lo largo del desarrollo, y detallando

⁴ James Alan Yorke.

diferencias entre el alcance inicialmente definido y el real del producto desarrollado.

- Por último se comentarán las conclusiones derivadas del proyecto.

5. ANTECEDENTES

En correspondencia al desarrollo existen varios trabajos que se relacionan con el sistema propuesto. Desde propuestas técnicas de control difuso como una forma de atacar el problema de Welander, hasta sistemas producidos en código de alto nivel que modelan algunas peculiaridades de este modelo particular. Existen varios trabajos teóricos que toman como base este loop.

Asimismo, no se trata de un concepto nuevo la modelización y simulación de un sistema dinámico. En la actualidad es un proceso utilizado en muchas áreas como sistemas eléctricos, sistemas mecánicos, sistemas térmicos, sistemas hidráulicos, etc., aunque se debe destacar que no mantendrán las mismas características al desarrollo acá descrito.

Al presente no se han encontrado trabajos previos que se encuentren relacionados directamente con el desarrollo de un interrogador de datos en tiempo real ni una interrelación con un código de cálculo industrial RELAP5.

6. DESCRIPCIÓN

Al momento de diseñar reactores nucleares, los circuitos de convección natural toman una particular importancia, ya que proveen una forma completamente pasiva de refrigerar un núcleo, reduciendo de manera significativa los controles de seguridad, y volviendo algunos de estos innecesarios.

Esto se debe a que no es necesario contar con bombas de transporte de calor. Se logra una generación de fuerza motriz del caudal sin partes móviles reduciendo las vulnerabilidades del circuito, haciéndolos más seguros y abaratando sus costos.

Además de la introducción de mejoras relacionadas con la seguridad, este tipo de circuitos aseguran una mejor distribución de caudales entre canales, y por consiguiente, una mejor respuesta del caudal ante cambios de potencia, ya que el caudal aumentará siguiendo a la potencia (diferenciándose del caso de circulación forzada donde la tendencia es la inversa).

En base al comportamiento de un sistema en estado estacionario, es ante una pequeña perturbación que podemos tener una definición de estabilidad. Si el sistema vuelve al estado original luego de la misma, podemos decir que es estable; en caso que se establezca en un nuevo estado estacionario u oscila con amplitud creciente diremos que es inestable.

Si analizamos la evolución temporal de este tipo de lazos generados por los fluidos dentro del circuito, y estableciéramos ciertas condiciones, dicha evolución puede presentar un comportamiento inestable de tipo caótico, con oscilaciones no periódicas y alta sensibilidad a condiciones iniciales (Welander, 1967).

Es objeto de esta sección la introducción a los fenómenos físicos relacionados con la transferencia de calor, haciendo las respectivas observaciones en las definiciones expuestas en el párrafo anterior, para luego realizar un análisis del circuito conocido como el problema de Welander. Vale recordar que dicho problema fue presentado poco tiempo después del trabajo de Lorenz como el primer ejemplo de un circuito de convección natural de comportamiento no periódico.

6.1 La transferencia de calor

La transferencia de calor siempre se produce desde el medio de temperatura más elevada hacia uno de menor, proceso que se detiene cuando ambos medios logran alcanzar la misma temperatura.

Al hablar de temperatura más elevada, estamos haciendo referencia al calor, el cual puede ser definido por el proceso en el cual la energía se puede trasladar de un sistema a otro como resultado de la diferencia en la temperatura.

La ciencia que estudia la cantidad de transferencia de calor en un sistema, es la termodinámica. A través de este estudio, podremos determinar cuánto calor debe transferirse para que se lleve a cabo un cambio de estado específico, satisfaciendo el principio que la energía no se crea ni se destruye, se transforma, conocido como el principio de conservación de la energía.

Es fácil notar que para que se produzca la transferencia de calor debe existir una diferencia de temperatura entre dos medios, esto se debe a que dicha diferencia es la fuerza impulsora para la transferencia de calor, así como la diferencia de tensión lo es para el flujo de corriente eléctrica y la presión lo es para el flujo de fluidos.

La diferencia de temperatura por unidad de longitud o la razón de cambio de la temperatura en una dirección es conocida como el gradiente de temperatura. Cuanto mayor sea el gradiente, mayor será la razón de la transferencia de calor.

De aquí en adelante se hará referencia a la energía total como la suma de todas las formas presentes de energía en el sistema en estudio. De igual forma, la energía interna representará todas las formas microscópicas de energía, o en otras palabras, la suma de las energías cinética y potencial de las moléculas.

Ya que la media de la velocidad y el grado de actividad de las moléculas son proporcionales a la temperatura, mientras más elevada sea la misma, las moléculas tendrán una mayor energía cinética, y lo mismo sucederá con la energía interna del sistema.

Asimismo, la energía interna es la encargada de unir a las moléculas. De introducirse suficiente energía, por ejemplo, a las moléculas de un sólido, se superarán las fuerzas moleculares, separando a las mismas y convirtiendo el sistema sólido en uno gaseoso.

Esto es conocido como cambio de fase, y la energía interna asociada con la fase de un sistema se llama energía latente o calor latente.

El calor específico (c), es definido como la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia, el cual puede ser estudiado en relación al volumen o a la presión a valores constantes. El primer caso se puede concebir como la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia mientras el volumen se mantiene constante. De forma análoga se define el caso de la presión constante.

El principio de conservación de la energía define que en el curso de un proceso, la energía no se puede crear ni destruir, sólo puede cambiar las formas. Por lo tanto, sin importar lo pequeña que sea la cantidad de energía debe ser tomada en cuenta la hora de estudiar el curso de un proceso. El principio de balance de energía define que para cualquier sistema que pasa por cualquier proceso se puede expresar de la siguiente manera: El cambio neto (aumento o disminución) en la energía total de un sistema en el curso de un proceso es igual a la diferencia entre la energía total que entra y la energía total que sale en el desarrollo de ese proceso.

A fin de realizar algunas observaciones matemáticas se define:

- E_{ent} como la energía que ingresa a un sistema.
- E_{sal} como la energía que sale de un sistema.
- $\Delta E_{sistema}$ como el cambio producido por la diferencia de energías, simbólicamente $E_{ent} - E_{sal}$.

Como el cambio de energía total de un sistema durante un proceso es un cambio de energía interna, se puede definir $\Delta E_{sistema}$ como $\Delta U_{sistema}$ (1).

Para un sistema cerrado (es decir, que consta de una masa fija), que a su vez sea estacionario (no sufre cambios en su velocidad o elevación durante el proceso), el $\Delta U_{sistema}$ se define como:

$$E_{ent} - E_{sal} = \Delta U_{sistema} = mc_v \Delta T \quad (1)$$

En donde el cambio de energía interna se expresa en términos de la masa, el calor específico del volumen y el cambio de temperatura. Cuando el sistema no tenga ninguna interacción de frontera, la ecuación anterior se reduce a:

$$Q = mc_v \Delta T \quad (2)$$

En donde Q será la diferencia neta de transferencia de calor.

6.1.1 Balances de energía

Para el caso de volumen de control (el más utilizado en ingeniería) toda la energía que ingresa para un proceso de flujo estacionario debe ser igual a la cantidad de energía que sale de él. La razón de transferencia de masa (gasto de masa) define a la cantidad de masa que fluye a través de una sección transversal de un aparato de flujo por unidad de tiempo. Además en estos casos los fluidos pueden ser bidireccionales, es decir, pueden fluir hacia adentro o hacia afuera de un tubo o cualquiera sea el aparato utilizado.

Resultado apropiado considerar, a la hora de realizar aproximaciones, que el flujo de un fluido por un tubo es unidimensional, es decir, las propiedades varían solo en la dirección del flujo. Aquí también se supone que en la sección perpendicular a la dirección del flujo todas las propiedades son uniformes y toman valores promedios en relación a la masa sobre las secciones transversales. A su vez, el gasto de masa permanecerá constante (para el caso de un tubo) durante el flujo estacionario, situación que no se dará para el gasto volumétrico a menos que la densidad del fluido permanezca constante.

Cuando el sistema de flujo estacionario cuente con una entrada y una salida, el gasto de masa hacia adentro del volumen de control debe ser igual a la velocidad del flujo de masa.

Las superficies no contienen energía (ya que no contienen masa ni volumen), con lo cual se puede considerar que su contenido de energía permanece constante durante un proceso. Es por ello que cuando no se conocen las direcciones de las interacciones se puede suponer que todas se producen en dirección a la superficie y el balance de energía en la

superficie será una sumatoria igualada a cero. Si las mismas fueran en la dirección opuesta la superficie los valores de las interacciones serán negativos.

6.2 Mecanismos generales de transferencia de calor

Recordando que la única forma posible para que se produzca el fenómeno de la transferencia de calor es que exista una diferencia de temperatura entre dos medios, se hará una breve introducción a los mecanismos generales de transferencia de calor, recordando que es objeto de este trabajo el mecanismo conocido como convección será explicado en detalle en la próxima sección.

6.2.1 La Conducción térmica

En este mecanismo la energía se transfiere de las partículas más energéticas hacia sus adyacentes menos energéticas.

En los gases y líquidos, tiene lugar gracias a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio. Para los sólidos se debe a las vibraciones de las moléculas y al transporte de energía por parte de los electrones libres.

La configuración geométrica, el material y la diferencia de temperatura del medio son determinantes en la razón de la conducción térmica.

Experimentalmente se concluye que la razón de la conducción térmica a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura a través de esta y al área de transferencia de calor, pero es inversamente proporcional al espesor de esa capa.

Se define como conductividad térmica de un material, a la medida de la capacidad de un material para conducir calor.

La ley de Fourier (3) (Fourier 1822) definida matemáticamente como:

$$Q_{cond} = -kA \frac{\delta T}{\delta x} \quad (3)$$

El gradiente de la temperatura será $\frac{\delta T}{\delta x}$ definido como la pendiente de la curva de temperatura en un diagrama que expresa la razón de cambio T con respecto de x (o bien, diagrama T-x). Esta relación indica que la razón de la conducción térmica en una dirección es proporcional al gradiente de temperatura en esa dirección. Cuando la temperatura decrece al crecer x, el calor es conducido en dirección de la temperatura y el gradiente se vuelve negativo.

La conductividad térmica anteriormente mencionada se puede definir como la razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura. Es decir, será una medida de la capacidad que tendrá el material para conducir calor. Si este valor es alto, el material será buen conductor, mientras que en opuesto se transformara en un aislante. Los cristales y metales puros, por ejemplo, tendrán las conductividades térmicas más elevadas, mientras que los gases se comportan como aislantes, teniendo las más bajas.

Al chocar dos moléculas que poseen energías cinéticas diferentes, parte de la energía cinética de la que tenga temperatura más elevada se transfiere a la de más baja. Entre más alta sea la temperatura, más se excitan las moléculas, con lo cual mayor será el número de colisiones, mejorando la transferencia de calor.

Además, se sabe que la conductividad térmica de los gases es proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura termodinámica T e inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la masa molar M. Sucede todo lo contrario con la mayoría de los líquidos, donde su conductividad térmica decrece al aumentar la temperatura, esto se debe a la proximidad de sus partículas.

Para simplificar el cálculo de la conductividad térmica, se evalúa en relación a la temperatura promedio, asumiendo que el material es isotrópico (es decir, tiene propiedades uniformes en todas direcciones). Estas suposiciones son incorrectas para materiales con características estructurales diferentes.

6.3 La Convección

Como significante de la lengua castellana, el término convección se utiliza para referirse al *transporte en un fluido de una magnitud física, como masa, electricidad o calor, por desplazamiento de sus moléculas debido a diferencias de densidad*⁵.

Profundizando sobre su significado debemos utilizarlo para referirnos al modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que está en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Cuando mayor velocidad toma el movimiento de un fluido, mayor será la transferencia de calor por convección.

Llegado el caso que no existiera movimiento masivo de fluido, la transferencia de calor entre la superficie sólida y el fluido adyacente es por conducción pura. Asimismo, en caso de encontrarse presente dicho movimiento eleva la dificultad a la hora de determinar las causas de la transferencia de calor.

Cuando el fluido es forzado a circular sobre la superficie mediante intervención externa, tomará el nombre de convección forzada. En cambio, si la circulación se produce por las fuerzas de empuje que son introducidas por las diferencias de densidad debidas a la variación de las temperaturas en ese fluido, tomará el nombre de convección natural. En el caso de que tanto las fuerzas de inercia como las de flotabilidad se presenten por igual, se debe considerar el efecto de ambos tipos de convecciones, en este caso el fenómeno recibe el nombre de convección mixta o combinada.

De forma ilustrativa, suponga que se ha retirado un pan del horno. Si la ansiedad o el hambre requieren un enfriamiento rápido del mismo mediante un ventilador, se habrá experimentado el efecto de la convección forzada. En cambio, si el mismo queda sobre la mesada durante toda la noche enfriándose, se habrá expuesto al efecto de la convección natural. En este último escenario, cualquier movimiento en el aire se deberá a la elevación del aire más caliente cercano a la superficie y la caída del más frío llenará su lugar. La transferencia de calor entre el pan y el aire circulante será por conducción si la diferencia de

⁵ Definición según el diccionario de la Real Academia Española.

temperaturas alcanza los valores adecuados para romper con la resistencia de ese aire al movimiento, y como consecuencia, iniciara corrientes naturales de convección.

Como referencia, la conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas.

Los procesos de transferencia de calor que comprenden cambio de fase de un fluido también se consideran como convección a causa del movimiento de ese fluido inducido durante el proceso, como la elevación de las burbujas de vapor durante la ebullición o la caída de las gotitas de líquido durante la condensación. El cambio de fase puede ser entendido como el proceso en el cual las fuerzas que ejercen entre sí las moléculas de un sistema, las cuales a su vez las unen, son alteradas por la agregación de energía lo suficientemente fuerte como para romper esta unión. Este es el proceso, por ejemplo, por el cual las moléculas de agua se transforman en vapor.

La ley de Newton⁶ (4) del enfriamiento que explica que la rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y queda expresado por:

$$Q_{conv} = hA_s (T_s - T_{\infty}) \quad (4)$$

Donde h es el coeficiente de transferencia de calor por convección, A_s es el área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor por convección, T_s es la temperatura de la superficie y T_{∞} es la temperatura del fluido lo suficientemente alejado de la superficie.

Por lo general, el coeficiente de transferencia de calor por convección varía a lo largo de la dirección del flujo. Para estos casos, la media se obtiene de promediar de manera adecuada los coeficientes locales sobre toda la superficie.

Gracias al número de Nusselt se pueden quitar las dimensiones del coeficiente de transferencia de calor h . Dicho número es también conocido como el coeficiente adimensional de transferencia de calor por convección, y representa el mejoramiento de la

⁶ Isaac Newton -1687-en su obra *Philosophiae naturalis principia mathematica*.

transferencia de calor a través de una capa de fluido como resultado de la convección en relación con la conducción a través de la misma capa.

6.3.1 Flujos viscosos y no viscosos

La viscosidad es la resistencia interna del fluido al movimiento, la misma es causada por las fuerzas de cohesión entre las moléculas (líquidos) o las colisiones moleculares (gases). No existen fluidos con viscosidad cero, por ende, todos los flujos de fluidos implican efectos viscosos en cierta medida.

Los flujos viscosos serán aquellos donde los efectos de la fricción sean significativos, no obstante no siempre tendremos efectos significativos y habrá oportunidades donde las fuerzas viscosas serán despreciablemente pequeñas en comparación a las fuerzas de inercia o presión. Al hacer esto, despreciar estos valores, se simplifica el análisis de las regiones de flujos no viscosos.



Figura 1: Flujo de fluido de una corriente originalmente uniforme sobre una placa plana y las regiones de flujo viscoso (próximas a la placa en ambos lados), así como no viscoso (lejos de la placa).

6.3.2 El flujo estacionario y el no estacionario

El término estacionario implica que no hay cambio en un punto con el tiempo. En cambio, el término uniforme implica que no hay cambio con respecto a la posición en una región especificada. Ambos términos son de uso cotidiano, y su significado acompaña su significado.

Por otro lado, en el estudio de la mecánica de fluidos, el término no estacionario es el término más general que se aplica a cualquier flujo que no es estacionario, mientras que transitorio se usa para flujos en desarrollo y periódico se refiere a la clase de flujo no estacionario en la cual el flujo oscila en torno de una media estacionaria.

En el flujo estacionario, las propiedades del fluido pueden cambiar de punto a punto dentro de un dispositivo, pero en cualquier punto fijo permanecen constantes. Por lo tanto, el volumen, la masa y la cantidad total de energía de un dispositivo de flujo estacionario o una porción de flujo estacionario permanecen constantes en condiciones de la operación estacionaria.

Las propiedades del fluido varían con el tiempo de una manera periódica, y el flujo a través de estos dispositivos incluso se puede analizar como un proceso de flujo estacionario, utilizando los valores promediados en el tiempo para las propiedades.

6.3.3 Flujos laminares y turbulentos

Al analizar el flujo de un fluido en un tubo, se verá que el mismo sigue líneas de corriente suaves a velocidades bajas, obteniéndose un régimen de flujo laminar caracterizado por líneas suaves de corriente y un movimiento altamente ordenado; pero este flujo se vuelve caótico a medida que se incrementa la velocidad por encima de un valor crítico, resultando un caso turbulento, el cual se caracteriza por fluctuaciones en la velocidad y un movimiento altamente desordenado.

La transición de flujo laminar a turbulento tiene lugar primero sobre una región en la que el flujo fluctúa entre laminar y turbulento, para luego volverse completamente turbulento. El flujo laminar existe cuando los fluidos altamente viscosos fluyen en tubos pequeños o figuras similares.



Figura 2: Flujo laminar vs Flujo turbulento

6.4 La Convección Natural

En el apartado anterior se utilizó el ejemplo de un pan horneado para explicar los distintos tipos de convección, continuando con ese ejemplo, se recuerda que la convección natural será el efecto que enfríe el pan debido a la elevación del aire caliente, la cual es producida por el flujo de aire más frío que ocupa su lugar. Este efecto continúa hasta que el objeto, en este caso el pan, adquiere la misma temperatura del aire circundante. La transferencia de calor que se mejora como resultado de esta corriente se define como transferencia de calor por convección natural.

6.4.1 Conceptos preliminares

El enunciado general de la conservación de la masa manifiesta que la masa no se puede crear ni destruir durante un proceso, lo cual implica que durante cualquier sea el análisis a la realizar se debe tener en cuenta la totalidad de la misma⁷.

En el caso del flujo estacionario, este enunciado no es excepcional, y la conservación se puede expresar como la igualdad entre la razón del flujo de masa que entra al volumen de control y la razón del flujo de la masa que sale del volumen de control.

Siguiente este razonamiento, y haciendo los correspondientes cálculos matemáticos se obtiene la ecuación de continuidad (5) o balance de masa para el flujo bidimensional estacionario de un fluido de densidad constante, la cual se expresa como:

⁷ Ley de conservación de la materia o ley de Lomonósov-Lavoisier

$$\frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} = 0 \quad (5)$$

Durante un proceso de flujo estacionario la energía total del sistema permanece invariante, con lo cual la diferencia es constante. Con lo cual según la ecuación (1) queda expresada como $E_{ent} - E_{sal} = 0$. Ya que la energía se puede transferir únicamente mediante calor, trabajo y masa, la expresión anterior queda expresada como:

$$(E_{ent} - E_{sal}) \cdot h + (E_{ent} - E_{sal}) \cdot w + (E_{ent} - E_{sal}) \cdot m = 0 \quad (6)$$

En donde h representa al calor, w al trabajo y a la masa del sistema. Siguiendo el desarrollo matemático con base en que la energía cinética y potencial es despreciable, que la densidad, el calor específico, la viscosidad, y la conductividad térmica del fluido permanecen constantes, se obtendrá la expresión bidimensional de conducción de calor en estado estacionario:

$$\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} = 0 \quad (7)$$

Ahora bien, para analizar la cantidad de movimiento considere que sumergimos una placa plana caliente en una masa inmóvil de fluido, considerando que el flujo por convección natural es estacionario, laminar y bidimensional, y considerando además que la diferencia de densidad $\rho - \rho_\infty$ producto de la existencia de de la fuerza de flotabilidad. Asumidas estas condiciones, es decir, utilizando la aproximación de Boussinesq⁸ y realizando los cálculos matemáticos para adaptar la ecuación de cantidad de movimiento con flotabilidad, se obtiene la ecuación de cantidad de movimiento en la dirección x (8) expresada como:

$$u \frac{\delta u}{\delta x} + v \frac{\delta u}{\delta y} = \nu \frac{\delta^2 u}{\delta y^2} + g\beta(T - T_\infty) \quad (8)$$

En el caso de que no existiesen corrientes de convección natural, la transferencia de calor sería producida por conducción y la rapidez de esa transferencia sería mucho más baja.

⁸ Joseph Valentin Boussinesq- explicado en la sección 6.4.2

Para lograr la adimensionalidad de las ecuaciones que rigen para la convección natural y las condiciones de frontera se debe dividir tanto las variables dependientes como las independientes entre cantidades constantes apropiadas. Sin embargo no podremos hacer esto para la ecuación adimensional de la cantidad de movimiento debida a los efectos de la flotabilidad.

Allí, al eliminar las dimensiones, utilizando la ecuación de cantidad de movimiento y las expresiones definidas por el número de Reynolds, obtendremos:

$$u^* \frac{\delta u^*}{\delta x^*} + v^* \frac{\delta u^*}{\delta y^*} = \frac{g\beta (T_s - T_\infty) L_c^3}{v^2} \frac{T^*}{Re_L^2} + \frac{1}{Re_L} \frac{\delta^2 u^*}{\delta y^{*2}} \quad (9)$$

El parámetro adimensional que representa los efectos de la convección natural es conocido como número de Grashof⁹, obteniendo la ecuación:

$$Gr_L = \frac{g\beta (T_s - T_\infty) L_c^3}{v^2} \quad (10)$$

En donde

g = aceleración gravitacional;

β = coeficiente de expansión volumétrica;

T_s = temperatura de la superficie;

T_∞ = temperatura del fluido lo suficientemente lejos de la superficie;

L_c = longitud característica de la configuración geométrica;

ν = viscosidad cinemática del fluido.

El número de Grashof desempeña un papel equivalente al número de Reynolds en la convección forzada, aunque el número de Grashof representa la razón de la fuerza de flotabilidad y la fuerza viscosa que actúan sobre el fluido, mientras que el número de Reynolds representa la razón entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas.

El número de Grashof proporciona el criterio principal a la hora de determinar si el flujo de un fluido es laminar o turbulento en la convección laminar.

⁹ Franz Grashof

Analizando las correlaciones empíricas para el número de Nusselt (Nu) en la convección natural, se verá que son de la forma:

$$Nu = \frac{hL_c}{k} = C (Gr_L Pr)^n = C Ra_L^n \quad (11)$$

En donde C y n dependen de la configuración geométrica de la superficie y del régimen de flujo, y donde Ra_L representa el producto de la relación entre flotabilidad y viscosidad dentro del fluido con la relación entre la difusividad de la cantidad de movimiento y la difusividad térmica. En otras palabras, Ra_L representa el producto entre el número de Grashof y el de Prandtl, y es conocido como el número de Rayleigh.

Considere un cilindro cuyo diámetro es lo suficientemente grande, el comportamiento del cilindro será similar al de las placas verticales cuando cumpla con la condición:

$$D \geq \frac{35 L}{Gr_L^{1/4}} \quad (12)$$

Existen solo algunos casos en donde las relaciones del número de Nusselt para cilindros verticales no cumplen con estos criterios. Es por ello que se toma como referencia el escenario de placas verticales para explicar los cilindros verticales.

En el caso de que el flujo de calor sea constante en la superficie, la transferencia de calor será $Q = q_s A_s$ y la temperatura superficial T_s aumentará a lo largo de la placa. Y como han demostrado Churchill y Chu las relaciones del número de Nusselt para estos casos son semejantes. Es por ello que las relaciones de placas isotérmicas también se pueden usar para las placas sujetas a flujos uniformes de calor siempre que se use la temperatura $T_{L/2}$ en el punto medio de la placa, la cual se determina por iteración.

Cuando se trate de recinto cerrados verticales, y el calor se encuentre en la parte superior y en la parte más fría en la parte inferior, no se desarrollarán corrientes de convección en el recinto, ya que el fluido más ligero siempre está arriba del más pesado. En el escenario opuesto, la tendencia será la de generar un movimiento de rotación ya que el fluido más ligero buscará derrotar al pesado empujando al mismo hacia abajo, en donde entrará en contacto con la superficie caliente, mientras que el otro hará lo mismo con la superficie fría.

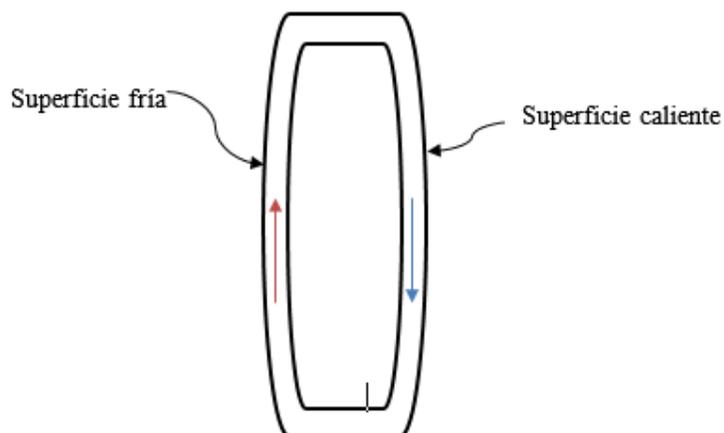


Figura 3: Corrientes de convección en un recinto

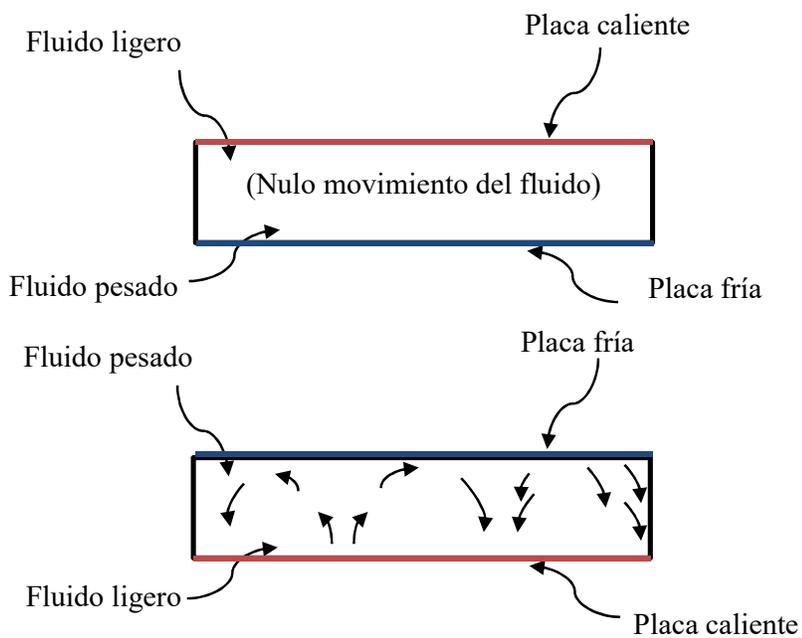


Figura 4: Corrientes de convección.

No obstante, este movimiento puede ser generado fácilmente por conducción, y será este fenómeno el que lo producirá hasta que cumpla que $Ra_L > 1708$, donde la fuerza de flotabilidad venza a la resistencia del fluido e inicie las corrientes de convección natural.

Cuando $Ra_L < 3 \cdot 10^5$, las celdas de Bénard¹⁰ se rompen y el movimiento del fluido se vuelve turbulento.

6.4.2 Circuitos de convección natural y la aproximación Boussinesq

Para lograr un circuito se debe considerar el caso de un recinto cerrado con una fuente de calor en la parte inferior y una fría en la parte superior que tiene como objetivo establecer un caudal -para refrigerar el núcleo de un reactor nuclear, por ejemplo- prescindiendo de componentes activos, y utilizando sólo los efectos boyantes como fuerza impulsora. Es necesario para ello crear un gradiente vertical negativo de densidades que corresponde también a un gradiente negativo de temperaturas.

La aproximación Boussinesq es utilizada en este tipo de circuitos. Ignora las variaciones de propiedades del fluido que no sean la densidad.

Suponiendo una densidad media constante salvo para la contribución de la fuerza boyante al flujo de momento lineal, es posible expresar la densidad de primer orden de la mezcla como:

$$\rho_{(T)} = \rho_0 [1 - \beta (T - T_0)] \quad (13)$$

Donde ρ_0 es la densidad del fluido a la temperatura de referencia T_0 y β el coeficiente de expansión térmica.

Asimismo, la ecuación de continuidad unidimensional para el circuito que se satisface sólo si la velocidad media w es la misma en todo el circuito será:

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \frac{\delta w}{\delta s} = 0 \quad (14)$$

¹⁰ Henri Claude Bénard

6.6 Método de discretización de tiempo y espacio

En la física computacional, los esquemas Upwind denotan una clase de métodos de discretización numéricos para resolver ecuaciones diferenciales parciales hiperbólicas. Esquemas de este tipo utilizan una plantilla de diferencias finitas adaptativo o solución sensible para simular numéricamente la dirección de propagación de la información en un campo de flujo. Los esquemas intentan “contra el viento” discretizar las ecuaciones diferenciales parciales hiperbólicas mediante el uso de diferenciación sesgada en la dirección determinada por el signo de las velocidades.

A fin de facilitar la lectura y entendimiento de las próximas secciones, se seguirá la siguiente nomenclatura:

Variable	Descripción	Unidad
A	Área	m ²
a,b	Coefficientes de la ley de fricción	-
C	Número de Courant	-
Cp	Calor específico a presión constante	J/(m ³ K)
D	Diámetro	m
D(q)	Coefficiente de difusión	-
Fnod(q)	Multiplicador de transferencia de calor de la fuente y sumidero para la solución nodal	-
f	Factor de fricción	-
g	Gravedad	m/s ²
H	Coefficiente de transferencia de calor	W/(m ² K)
L	Longitud completa del loop	m
N	Número de nodos	-
Q	Caudal volumétrico	m ³ /s
q	Caudal volumétrico adimensional	-
R	Parámetro de fricción	1/s
Re	Número de Reynolds basado en el diámetro del tubo	-
S	Coordenada axial a lo largo del loop	m
T	Temperatura del fluido	°C
Ts	Temperatura del fluido en la fuente	°C

t	Tiempo	s
α	Parámetro de flotabilidad en la ecuación adimensionalizada de momento	-
β	Coeficiente de expansión isobárico	-
ϵ	Parámetro de fricción en la ecuación adimensionalizada de momento	-
μ	Viscosidad dinámica del fluido	kg/(ms)
ν	Viscosidad cinemática del fluido	m ² /s

Tabla 1: Descripción de las variables

6.6.1. FTUS - Forward in Time, Upwind in Space

Las ecuaciones algebraicas que expresan el balance de la energía son las siguientes:

$$q \geq 0$$

$$\begin{aligned} \theta_i^{n+1} &= (1 - C) \theta_i^n + C \theta_{i-1}^n \quad (i = 2, \dots, N - 1) \\ \theta_N^{n+1} &= \left(1 - C - \frac{\Delta t}{\Delta s} F_{nod}(Q^n)\right) \theta_N^n + C \theta_{N-1}^n - \frac{\Delta t}{\Delta s} F_{nod}(Q^n) \\ \theta_1^{n+1} &= -\theta_N^{n+1} \end{aligned} \quad (15)$$

$$q < 0$$

$$\begin{aligned} \theta_i^{n+1} &= (1 + C) \theta_i^n - C \theta_{i+1}^n \quad (i = 2, \dots, N - 1) \\ \theta_1^{n+1} &= \left(1 + C - \frac{\Delta t}{\Delta s} F_{nod}(Q^n)\right) \theta_1^n - C \theta_2^n + \frac{\Delta t}{\Delta s} F_{nod}(Q^n) \\ \theta_N^{n+1} &= -\theta_1^{n+1} \end{aligned} \quad (16)$$

6.6.2. ITUS- Implicit in time, Upwind in Space

$$q \geq 0$$

$$(1 + C) \theta_i^{n+1} - C \theta_{i-1}^{n+1} = \theta_i^n \quad (i = 2, \dots, N - 1)$$

$$\begin{aligned} \left(1 + C + \frac{\Delta t}{\Delta s} F_{nod}(Q^n)\right) \theta_N^{n+1} - C \theta_{N-i}^{n+1} &= \theta_N^n - \frac{\Delta t}{\Delta s} F_{nod}(Q^n) \\ \theta_1^{n+1} &= -\theta_N^{n+1} \end{aligned} \quad (17)$$

$q < 0$

$$\begin{aligned} (1 - C) \theta_i^{n+1} - C \theta_{i+1}^{n+1} &= \theta_i^n \quad (i = 2, \dots, N - 1) \\ \left(1 - C + \frac{\Delta t}{\Delta s} F_{nod}(Q^n)\right) \theta_1^{n+1} + C \theta_2^{n+1} &= \theta_1^n + \frac{\Delta t}{\Delta s} F_{nod}(Q^n) \\ \theta_N^{n+1} &= -\theta_i^{n+1} \end{aligned} \quad (18)$$

Donde C es el número de Courant

$$C = \frac{Q^n \Delta t}{\Delta s} \quad (19)$$

Y

$$\Delta s = \frac{1}{N - 1} \quad (20)$$

Donde N es el número de nodos. La función $F_{nod}(q)$ es el multiplicador de transferencia de calor de la fuente-sumidero

La ecuación de momento queda discretizada de la siguiente forma:

$$Q^{n+1} = Q^n + \left(\frac{\alpha}{N - 1} \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\theta_i^n + \theta_{i+1}^n}{2} - \varepsilon(Q^n)^{2-\theta} \right) \Delta t \quad (21)$$

6.7 El Problema de Welander

Un sistema físico que consiste en un loop cerrado de una longitud total L, que contiene fluido incompresible. Dicho sistema está compuesto por dos tubos adiabáticos verticales y dos fuentes de temperatura (una con calor y otra con ausencia del mismo) horizontales y conectados entre sí. Calefacción simétrica desde abajo y enfriamiento desde arriba es obtenido por los arreglos de transferencia de calor con temperatura controlada. En condiciones de equilibrio, el movimiento del fluido se rige por los efectos opuestos de

flotabilidad, que resulta de la diferencia de densidad en el ascendente (caliente) y descendente (frío) de la pierna, y la fricción. Es decir, el líquido se calienta en la parte inferior, ampliándose con el coeficiente de dilatación α y será conducido a la parte superior por la gravedad, donde se enfriará de nuevo. El movimiento se ve afectado por las fuerzas de fricción.

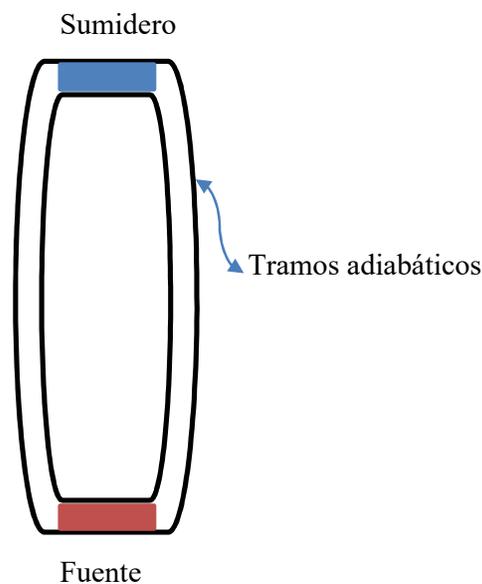


Figura 5: Vista esquemática del loop

Los supuestos originales introducidos por Welander para tratar el problema son los siguientes:

- La aproximación de Boussinesq es aceptada, es decir, el líquido se supone que es incompresible, pero de cualquier manera las variaciones de densidad, debido a las diferencias de temperatura, se tienen en cuenta;

- el flujo es laminar y el fluido es newtoniano, es decir, la fuerza de fricción tangencial es proporcional a la velocidad de la tasa de flujo volumétrico en el loop;

- el flujo de calor en secciones con calefacción y enfriamiento es proporcional a la diferencia entre la temperatura de la pared (uniforme e independiente del tiempo) y la sección transversal promedio de la temperatura del fluido, es decir, la ley de Newton se asume

para la evaluación de flujo de calor por convección con una constante de coeficiente de transferencia de calor, independiente de la tasa de flujo y las propiedades del fluido;

-se supone que las piernas ascendentes y descendentes son adiabáticas

Entendiendo las consideraciones de Welander como correctas y enmarcándonos en el mismo problema, debemos realizar solo una excepción a las condiciones planteadas.

6.7.1 Nuestro escenario

Siguiendo el tratamiento propuesto por J.C. Ferreri y W. Ambrosini (1997), el cual presenta una variación sobre el problema original descrito anteriormente. En nuestro escenario el flujo es asumido como turbulento en vez de laminar.

Las ecuaciones que gobiernan este problema son

-Ecuación de momento integrada a lo largo del loop

$$\frac{dq}{dt} + \frac{aR}{16} \left(\frac{D}{VA} \right)^{1-\theta} q^{2-\theta} = \frac{\beta g A}{L} \int_0^{\frac{L}{2}} (T - T_0) ds \quad (22)$$

-Ecuación de energía expresada en términos de temperatura

$$\rho C_p \left[\frac{\delta T}{\delta t} + \frac{q}{A} \frac{\delta T}{\delta s} \right] = \int_0^{\pi D S H} (T_F - T) \quad (23)$$

En esta ecuación la primera igualdad es tomada para la fuente y el sumidero, mientras que la segunda es tomada en las paredes adiabáticas de los arreglos.

-Ecuación de balance de calor en la fuente y sumidero

$$T_s - T_{SI} = (T_F - T_{SI}) \left[1 - e^{-\left(\frac{\gamma H S}{q}\right)} \right], \quad q > 0 \quad (24)$$

Siendo θ un coeficiente igual a 1 para flujo laminar y $\frac{1}{4}$ para flujo turbulento. a es el coeficiente de la ley de fricción que es igual a 16 para flujo laminar y 0,079 para flujo turbulento. El subíndice SI significa que la condición es evaluada en la entrada de la fuente, el

subíndice S significa que la condición prevalece en la fuente y el subíndice F indica una temperatura evaluada en la pared de la fuente. Además en la ecuación de momento integrada a lo largo del loop existen dos variables más.

$$R = 32 \frac{v}{D^2} \quad (25)$$

$$\gamma = \frac{\pi D}{C_p} 4 \quad (26)$$

Ajustando la temperatura en la pared de la fuente de calor a ΔT grados arriba del promedio del loop y considerando un estado estable, de las ecuaciones (22)-(24), el caudal puede ser obtenido de la siguiente ecuación implícita.

$$2\delta q_{SS}^{2-\theta} = \Delta T + \delta q_{SS}^{2-\theta} \left[1 - e^{-\left(\frac{\gamma}{q_{SS}} HS\right)} \right] \quad (27)$$

Donde δ es:

$$\delta = \frac{2a \left(\frac{D}{Av}\right)^{1-\theta} \frac{v}{D^2} L}{\beta g AL} \quad (28)$$

La solución a la ecuación (28) debe ser iterada si el caudal no coincide con el régimen de flujo postulado. Este no es el caso cuando el número de Reynolds es adoptado como variable dependiente en vez del caudal. En términos no dimensionales, la ecuación (27) especifica la relación entre el caudal y la temperatura en estado estacionario en el loop.

$$\frac{2 Q_{SS}^{2-\theta}}{\frac{\alpha}{\varepsilon} + Q_{SS}^{2-\theta}} = 1 - e^{-\frac{1}{Q_{SS}}} \quad (29)$$

Donde

$$Q = \frac{q}{(KS) A}; \theta = \frac{T}{\Delta T}; \alpha = \frac{\beta g \Delta T L}{2(KS)^2}; K = \frac{\pi D H}{C_p A}; \varepsilon = \frac{a}{16} \left(\frac{DKS}{\nu} \right)^{1-\theta} \frac{RL}{2(KS)}; \varepsilon_{Wel}$$

$$= \frac{\varepsilon}{\frac{a}{16} \left(\frac{DKS}{\nu} \right)^{1-\theta}}$$

(30)

Cabe aclarar que cuando $\theta=1$ y $a=16$ las ecuaciones anteriores se reducen a la ecuación (22). El análisis linealizado de la estabilidad de las ecuaciones de estado estacionario se pueden realizar en términos similares a los de (22). ε muestra la influencia del número de Reynolds en el sistema a través de los coeficientes de la ley de fricción.

6.7.2 Aspectos numéricos del Loop de Welander

W. Ambrosini and J.C. Ferreri, 1997, investigaron los efectos del error de truncamiento en la estabilidad de los resultados numéricos para la circulación natural de este loop. Un resultado interesante y que concierne en parte a los resultados buscados por este trabajo fue que las regiones de estabilidad cambiaban dramáticamente a razón de la cantidad de nodos elegidos para el cálculo numérico. En otras palabras, si se seleccionaba una nodalización muy chica, es decir pocos nodos, las inestabilidades no aparecen en absoluto.

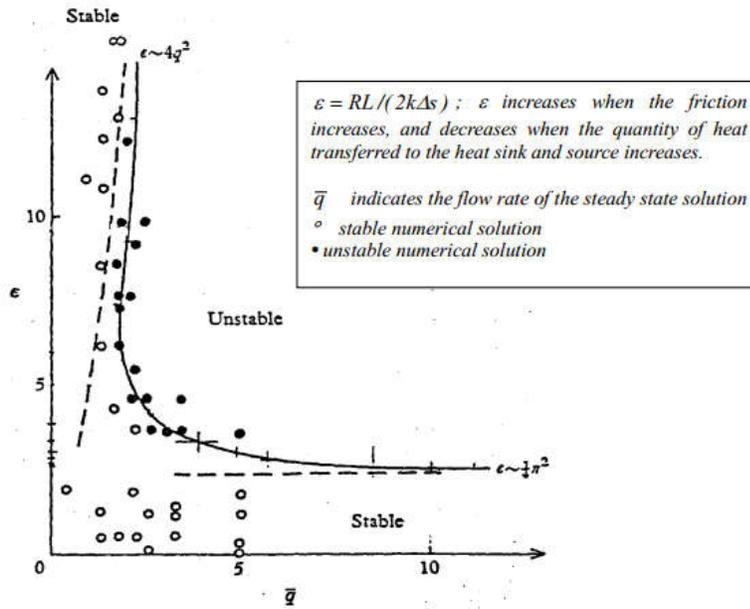


Figura 7: Mapa de estabilidad calculado por Welander, 1967

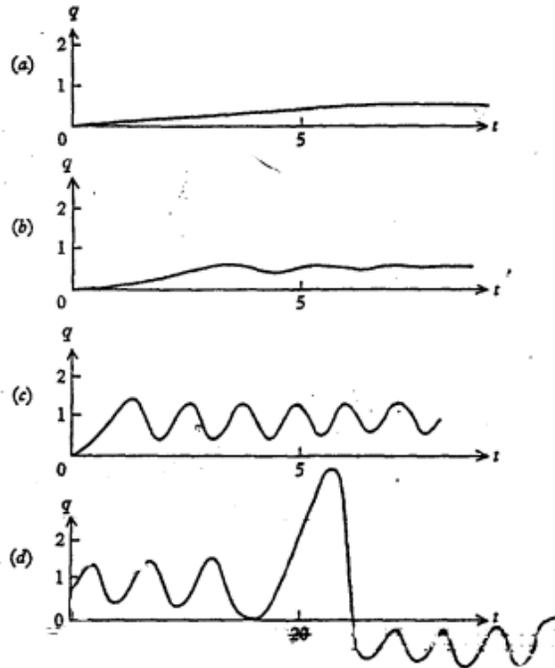


Figura 6: Soluciones numéricas para cuatro casos: (a) $a = 0.4$, $\epsilon = 0.2$ (b) $a = 2.0$, $\epsilon = 2.0$, (c) $a = 20.0$, $\epsilon = 20.0$ (d) $a = 40.0$, $\epsilon = 6.0$ (Welander 1967).

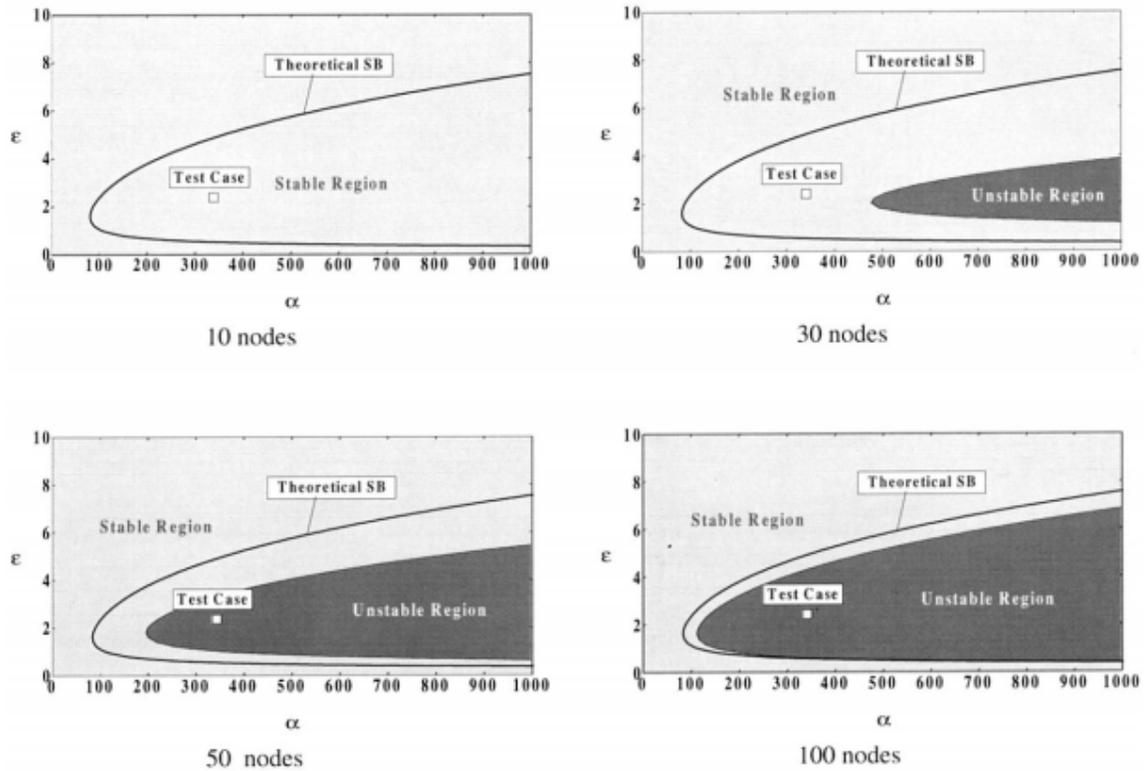


Figura 8: Dependencia de la región estable e inestable de los resultados numéricos sobre el error de truncamiento, en comparación con el límite teórico de la estabilidad.

6.8 Especificación del producto

Habiendo concluido con la teoría física que rige este problema procedemos a especificar cuál va a ser el producto a desarrollar. Se trata de un ambiente que constituya un laboratorio virtual para el entrenamiento en temas asociados a la sensibilidad a la parametrización del sistema dinámico conocido como Loop de Weland.

El mismo va a estar constituido por un núcleo donde serán resueltos todos los cálculos que son necesarios para la representación de los distintos diagramas que constituyen el problema. Y una interfaz que se encarga de la representación gráfica de los datos y la animación de los mismos.

Asimismo para el código del sistema para el problema de Welander va a establecerse un sistema físico que tiene las siguientes características principales:

- Diámetro de tubo interior: 0,1 m ;
- Longitud de cada pierna: 10 m ;
- Longitud del bucle global: 20 m
- Temperatura de la fuente: 30 °C ;
- Temperatura del sumidero: 20 °C ;
- Coeficiente de expansión isobárico: 0.000255;
- Radio espectral: 997;
- Calor específico a presión constante: 4177 J/(m³ K);
- Coeficiente de transferencia de calor: 20000 W/(m² K) ;
- Viscosidad dinámica del fluido: 0.000864 kg/(ms) ;
- Viscosidad cinemática del fluido: 8.6660-7;

No es objetivo de esta sección la descripción de las herramientas necesarias para obtener el producto, pero una breve descripción será otorgada y profundizada a mayor medida en la sección siguiente.

6.8.1 Selección del lenguaje de programación

Partiendo de un código anterior realizado en lenguaje de alto nivel procedimental BASIC (Beginner's All-purpose Symbolic Instruction Code), y evaluando que parte del objetivo del proyecto se basa en obtener una interfaz fácil de utilizar, se decidió como lenguaje base MATLAB (MATrix LABoratory).

Esta decisión a su vez tuvo que ver con la facilidad de generar interfaces de usuario (GUI) mediante GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI) una herramienta adicional, y además por la potencia y eficiencia del lenguaje MATLAB para realizar cálculos y representarlos gráficamente.

El código inicial en BASIC se encuentra en formato .bas y se encarga de la discretización de las ecuaciones para poder ser representadas computacionalmente. Del

mismo se extraen y traducen las funciones principales para así generar un núcleo principal siguiendo la siguiente lógica.

6.8.2 Núcleo Principal

Se partió de un código base realizado por el co-tutor en BASIC. El mismo fue analizado a fondo para la obtención de las funciones principales encargadas de los cálculos físicos que rigen el problema, así como también para entender el funcionamiento del loop en un modelo computacional.

Teniendo en cuenta la diferencia de ambos lenguajes, fue necesaria la traducción exacta de las funciones clave para cálculos físicos y además adaptar las mismas según los nuevos requisitos.

Se realizan en una primera instancia los cálculos físicos mediante el manejo de matrices y los mismos fueron almacenados en vectores que luego serán pasados a la interfaz gráfica para ser modelizados.

6.8.3 Interfaz Gráfica de Usuario

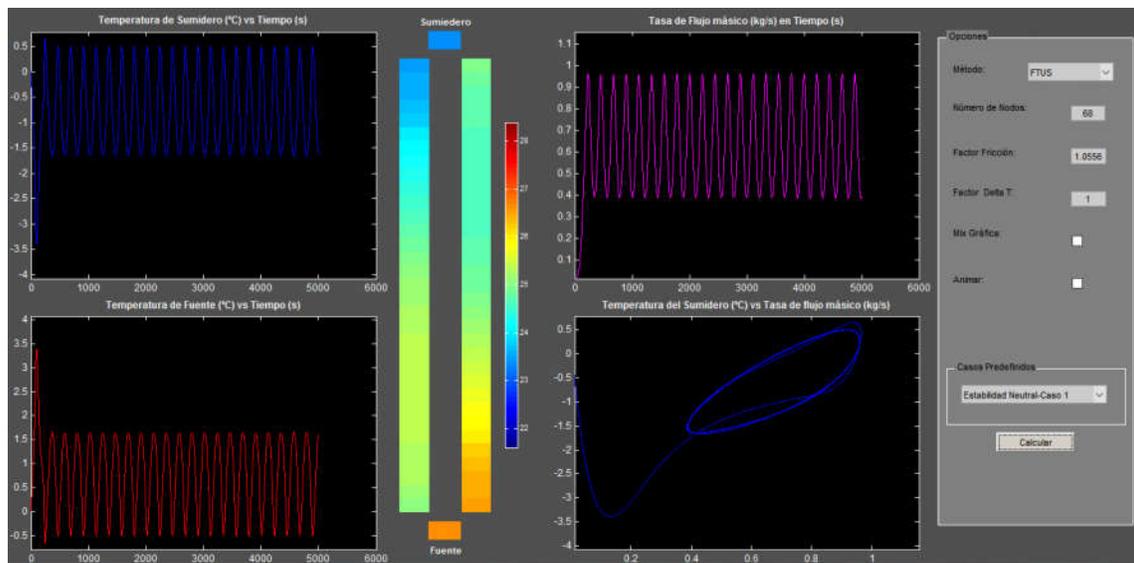


Figura 9: interfaz gráfica del interrogador

La interfaz gráfica se encuentra compuesta por un módulo de ingreso de datos, un módulo de representación de los datos y un menú con cinco opciones para la visualización de los gráficos.

El primer módulo permite el ingreso de las siguientes variables para modelizar el loop:

- Método de discretización tiempo y espacio: FTUS (Forward in Time, Upwind in Space) o ITUS (Implicit in time, Upwind in Space). Esta opción nos permite, a través de un combo box, la selección de dos opciones. Las mismas como explicamos en la sección (6.6) nos permiten la discretización numérica de la solución en ecuaciones diferenciales hiperbólicas.
- Número de nodos: valor natural par que corresponde a la cantidad de nodos a ser modelados, sin contar la fuente o el sumidero. El valor debe ser par ya que el circuito es simétrico.
- Factor de fricción: se trata de un parámetro adimensional utilizado justamente en dinámica de fluidos para el cálculo de la pérdida de carga en una tubería debido a la fricción.
- Factor de variación de temperatura: se trata de nuevamente de un parámetro adimensional utilizado para de modificar el delta de temperatura.
- Mix de gráfica: se trata de un checkbox encargado de juntar en un mismo conjunto de ejes la temperatura de la fuente ($^{\circ}\text{C}$) en función del tiempo (s) y la temperatura del sumidero ($^{\circ}\text{C}$) en función del tiempo(s). Asimismo agrega un nuevo gráfico de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) en función de coordenada longitudinal.
- Animar: se trata de un checkbox que realiza las animaciones de las gráficas a razón de una frecuencia de refresco.
- Casos predefinidos.

El segundo módulo provee una visualización de los siguientes diagramas:

- Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) en función de coordenada longitudinal.
- Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) de la fuente y del sumidero en función de tiempo (s).

- Tasa de flujo másico (Kg/s) en función del tiempo (s).
- Temperatura (°C) del sumidero en función de la tasa de flujo másico (Kg/s).
- Gráfico con mapa de colores de la temperatura de los distintos nodos, fuente y sumidero.

Como fue dicho anteriormente se utilizó GUIDE (entorno de desarrollo de GUI) que proporciona las herramientas necesarias para diseñar interfaces de usuario a medida. El mismo luego es acoplado con el código para agregar funcionalidad a la interfaz generada.

7. METODOLOGÍA DE DESARROLLO

El primer abordaje fue sobre la teoría del problema de Welander, buscando entender el fenómeno y los factores subyacentes del mismo que fueron explicados en la sección anterior.

A raíz de la especialización en informática y sistemas de la información por parte del equipo de trabajo, fue requerido un estudio en profundidad en el área de la termodinámica. Asimismo, se realizaron múltiples seminarios con el tutor, siendo este un especialista en el tema. Luego de varias jornadas de estudio y ejercitación, se logró el entendimiento deseado y necesario sobre el problema antes descripto.

Para la selección del lenguaje y la plataforma de desarrollo, tanto del algoritmo matemático de cálculo como de la interfaz gráfica, se evaluó la potencia de las distintas variables, junto con la usabilidad futura que se podría obtener de la aplicación y versatilidad de las herramientas.

Para realizar el código se decidió trabajar sobre un paquete de software de alto nivel como MATLAB, el cual cuenta con múltiples funciones integradas que hacen el aprendizaje de los métodos numéricos más fácil, y por lo tanto interesante, no solo para el desarrollo del producto, sino también para el usuario final.

Una vez elegida la herramienta de trabajo y el lenguaje, se procedió a la investigación del mismo, ya que era un ámbito de trabajo desconocido para el equipo.

La misma se inició en el laboratorio de Modelado y Simulación de la universidad, donde luego de analizar la bibliografía allí encontrada, se procedió a consultar al docente titular de la materia Modelado y Simulación de la carrera de Ingeniería en Informática.

Habiendo consultado múltiples materiales bibliográficos, y bajo la utilización de una licencia de MathWorks, la que ha permitido la interconsulta con desarrolladores de todo el mundo, se adquirió el conocimiento necesario para el desarrollo del interrogador.

Para llevar adelante la etapa de desarrollo del interrogador de datos se optó por la metodología del desarrollo estructurado de sistemas de la información, viéndose la elección justificada en que esta metodología busca derrotar la complejidad de los sistemas grandes de dos formas, por un lado, particionando en cajas negras y, por otro lado, organizándolo jerárquicamente.

El concepto de caja negra se refiere a completar y sus características principales son:

- Se conocen las entradas.
- Se conocen las salidas que debe devolver.
- Se conoce la función (que le pasa a las entradas para producir las salidas)
- No se necesita saber cómo esto ocurre para utilizarla.

Por lo tanto este particionamiento debe cumplir con cuatro metas fundamentales para ser exitoso, las cuales son:

- Cada caja negra debe resolver una parte bien definida del problema.
 - El sistema debe ser particionando de tal manera que la función de cada caja negra sea fácil de entender.
 - La partición debe ser hecha de tal manera que cada conexión entre las cajas negras que se introduzca sea producida solo por conexiones entre piezas del problema.
 - El particionamiento debe asegurar que las conexiones entre las cajas negras sean tan simples como sea posible para que las cajas negras sean tan independientes como sea posible.
-

Como vemos, esta forma de abordar el problema es especialmente útil cuando nos enfrentamos a una complejidad desconocida, donde una visión integral del problema puede llevar fácilmente el proyecto al fracaso. Llevando adelante una partición adecuada se logra asegurar que el problema quede circunscripto dentro de las cajas negras, mientras que los problemas no relacionados quedan por fuera.

De esta manera la forma del problema nos guiará hacia la forma de la solución, y viceversa.

La técnica de programación utilizada fue la de programación estructurada. Esta técnica propone una serie muy pequeña de pasos para desarrollar código, y más importante, la programación estructurada reconoce que para atacar el problema detalladamente, es muy importante tener una sólida comprensión de todo el problema.

Los recursos para llevar adelante esta etapa fueron, desde el punto de vista del soporte bibliográfico, material recolectado a lo largo del desarrollo de la carrera, bibliografía de uso internacional sobre termodinámica, fluidos y flujos de energía; y desde el punto de vista de los recursos de software, la plataforma de desarrollo MATLAB con su paquete de aplicaciones, como por ejemplo la herramienta GUIDE descrita anteriormente. Asimismo como se explicó con anterioridad se partió de un código base realizado en BASIC.

7.1 Conceptos preliminares

7.1.1 Estudio de factibilidad

El estudio de factibilidad sirve para:

- Identificar el avance del actual sistema que será estudiado.
- Identificar problemas y oportunidad desaprovechados del sistema actual.
- Identificar mejores objetivos para el sistema nuevo.
- Estimar aproximadamente el costo de cada solución posible para los problemas del usuario y de esta manera identificar las soluciones que

satisfagan las necesidades del usuario dentro de su presupuesto y cronograma.

- Desarrollar estimaciones aproximadas de los beneficios y desventajas de cada solución.
- Desarrollar bocetos de cómo debe llevarse a cabo el proyecto para tener una idea de los recursos que serán necesarios.

7.1.2 El módulo

El módulo es definido como una colección de declaraciones del programa con cuatro atributos característicos: entrada o salida, funciones, mecanismos y datos internos.

- Entradas: Que necesita para ser invocado.
- Salidas: Que devuelve si es invocado.
- Funciones: Que le hace a la entrada para producir la salida.
- Mecanismos: Son los códigos de procedimiento o lógica que se necesitan para realizar la función.
- Datos internos: Datos a los que sólo se hace referencia en el módulo

La entrada y salida son, respectivamente, la información que el módulo requiere y provee. El funcionamiento del módulo es lo que produce las entradas y salidas. Entradas, salidas y funcionamiento comprenden la vista exterior del módulo. Los mecanismos son los códigos de procedimiento o lógica que se necesitan para realizar la función; los datos internos son el espacio privado de trabajo del módulo, datos a los que sólo hace referencia el módulo. El módulo también tiene otros atributos. Tiene un nombre, el cual puede hacer referencia a toda la unidad, y puede invocar o ser invocado por otros módulos; por ejemplo por una llamada.

En el diseño estructurado, el involucramiento se encuentra relacionado con la vista exterior del módulo (que hace el módulo por sobre cómo lo hace), aunque se debe tener en cuenta el hecho de que el módulo tenga un nombre y que cada módulo pueda invocar a otro. Pero no importará el código interno o los detalles lógicos de cada módulo en particular,

tan pronto como un módulo pueda lograr un funcionamiento estable, se intenta realizar la mejor implementación de ellos dentro de todas las técnicas de programación.

7.1.2.1 Representación gráfica del módulo

En la carta de estructura el módulo se grafica con una caja rectangular con un nombre. El nombre es una declaración del funcionamiento del módulo, esta es, el producto de cada llamada al módulo. Este no se llama Rutina de cómputo o Proceso de Rutina porque esos nombres proveen declaraciones vagas sobre su lógica y no sobre su funcionamiento.

Un módulo predefinido se grafica con dos líneas paralelas a las líneas verticales. Este es un módulo (o un pequeño subsistema) que existe previamente en el sistema o es una aplicación de librería.

7.1.2.2 Conexiones entre módulos

Un sistema no es una anarquía de cajas sombrías, es un conjunto de módulos organizados de forma jerárquica, cooperando y comunicándose para realizar una tarea. Como se ve en la siguiente figura donde:

- A llama a B (invoca)
- B hace la tarea.
- B devuelve a inmediatamente después de ser llamado por A.

En otras palabras, la flecha muestra como se llama a una subrutina, con la dirección de la flecha se muestra cuál módulo llama a cual.

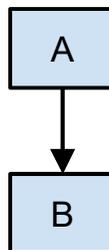


Figura 10: Conexión entre módulos

Hay dos tipos de flechas, uno es para datos y la otra para banderas, sus diferencias son:

- Los datos son procesados.
- Una bandera no es realmente procesada.

7.1.3 El Acoplamiento

Una de las formas de asegurar la calidad de nuestro diseño es a través del acoplamiento, esto es el grado de independencia entre dos módulos. Lo que se busca es minimizar el acoplamiento, esto es, hacer los módulos lo más independientes como sea posible. Un bajo acoplamiento entre módulos indica que un sistema está bien particionado, logrando así algunos de estos objetivos:

- Eliminar relaciones innecesarias.
- Reducir el número de relaciones necesarias.
- Debilitar las relaciones necesarias.
- Además, el bajo acoplamiento es deseable porque:
- Cuantas menos conexiones haya entre dos módulos, menor será la chance de un efecto cascada (un problema en un módulo aparece como síntoma en otro).
- A la hora de cambiar un módulo, se busca minimizar el menor riesgo de tener que cambiar otro módulo.
- Se simplifica el mantenimiento, ya que al realizar dicha tarea sobre cualquiera módulo no debe realizarse un análisis del código interno del módulo, buscando que los sistemas sean tan simples de comprender como sea posible.

7.1.4 La Cohesión

La cohesión es la relación funcional de los elementos dentro de un módulo. Con elementos se hace referencia a una instrucción, un grupo de instrucciones, una definición de datos o una llamada a otro módulo, cualquier pieza de código que realice un trabajo o defina algunos datos.

Los diseñadores deben crear módulos fuertes, altamente cohesivos y cuya relación con otros módulos sea poderosa. Por otra parte, los elementos de un módulo no deben estar fuertemente relacionados con elementos de otro módulo, porque esto llevaría a un acoplamiento estrecho entre módulos.

La cohesión, entonces, es la segunda forma de averiguar que tan bien particionado está el sistema en los módulos. La mejor forma de minimizar el acoplamiento entre módulos es asegurándonos que todos los módulos poseen una buena cohesión.

7.1.5 El Modelo Esencial

Es un modelo de lo que debe hacer el sistema para satisfacer los requerimientos del usuario, exponiendo lo mínimo posible de cómo se implementará. Está compuesto por el Modelo Ambiental y el Modelo de comportamiento.

Modelo Ambiental: define la frontera entre el sistema y el mundo (ambiente donde existe el sistema).

- Propósito del Sistema: Texto breve y conciso, del objetivo del sistema dirigido al nivel administrativo (no están directamente involucrados con el desarrollo del sistema).
- Lista de acontecimientos: Es una lista narrativa, simple y concisa de los “estímulos” del exterior al sistema. Pueden ser :
 - Tipo de flujo o externos: Ingreso o arribo de un dato.
 - Temporales: Arrancan solos en momento de tiempo.
 - De control o internos: acontecimientos externos que ocurren en un momento impredecible.

- Diagrama de Contexto: Es un caso especial del DFD con una sola burbuja que representa todo el sistema. Este diagrama enfatiza:
 - Las personas, organizaciones y sistemas con los que se comunica el sistema.
 - Frontera entre el sistema y el resto del mundo.
 - Datos que el sistema recibe y que deben proporcionarse de alguna forma, datos producidos por el sistema y que envía al mundo exterior

Modelo de comportamiento: describe el comportamiento del sistema al interactuar con el ambiente.

- Diagrama de Flujo de Datos: Herramienta que permite:
 - Un punto de vista de un sistema orientado a funciones.
 - Visualizar la red de procesos funcionales, conectados por flujo de datos.
 - Relaciona los procesos con terminadores externos y almacenamiento.
- Diagrama Entidad Relación: Hace énfasis en las relaciones entre los datos. Utilizado para reconocer el detalle de los datos, y sus relaciones. Modelo de red que describe con alto nivel de abstracción la estructura de los datos almacenados en un sistema.
- Diagrama de Transición de Estados: Está basado en una teoría formal: máquinas de estados finitos.
- Diccionario de Datos: Es un catálogo de los datos del sistema donde se definen los componentes de:
 - Los flujos (Datos en Movimiento): nombre del flujo, descripción, viene de los procesos, va hacia los procesos, estructuras de datos.
 - Los Almacenes (Datos en Reposo): nombre del almacén, descripción, flujos recibidos, flujos proporcionados, descripción de datos, tipo de acceso.

7.2 Desarrollo del interrogador de datos utilizando la metodología de análisis estructurado

7.2.1 Primer Etapa: Encuesta

Empieza cuando el usuario solicita partes de un sistema. Es de suma importancia.

Objetivos:

- Identificar a los usuarios responsables y crear un campo de actividad inicial del sistema;
- Identificar las diferencias actuales en el ambiente del usuario;
- Establecer metas y objetivos para un sistema nuevo;
- Determinar si es factible automatizar el sistema y de ser así sugerir escenarios aceptables;
- Preparar el esquema que se usará para guiar el resto del proyecto;

Ingresa: Requerimientos, Restricciones políticas, operacionales y tecnológicas

Produce: Documentos, los cuales contendrán requerimientos más formales, planificación costo/beneficio, estudio de factibilidad.

Resultado de esta etapa: Estudio de factibilidad

Dicho estudio dio como resultado los objetivos que debe cumplir el sistema a desarrollar, teniendo un alto coste por la falta de conocimiento del equipo de desarrollo en el área en la que se debió llevar adelante el proyecto. No obstante esto, se procedió a llevar adelante el mismo utilizando la metodología que se desarrollará en la próxima sección.

7.2.2 Segunda Etapa: Análisis

El objetivo de esta etapa será el de transformar las políticas del usuario y el esquema del proyecto en una especificación estructurada. Modela el ambiente del usuario con DFD, DER, DTE, etc.

Ingresar: Documentos de la encuesta, Restricciones políticas, operacionales y tecnológicas

Produce:

- Modelo Esencial
- Estudio de factibilidad refinado.

Resultado de esta etapa: Modelo Ambiental

Propósito del sistema

Desarrollar un ambiente que constituya un laboratorio virtual para entrenamiento en temas asociados a la sensibilidad a la parametrización de sistemas dinámicos.

Lista de acontecimientos

- El usuario genera un gráfico.
- El usuario cancela un gráfico.
- El usuario anima un gráfico.
- El usuario pausa un gráfico.
- El usuario reanuda un gráfico.

Diagrama de contexto

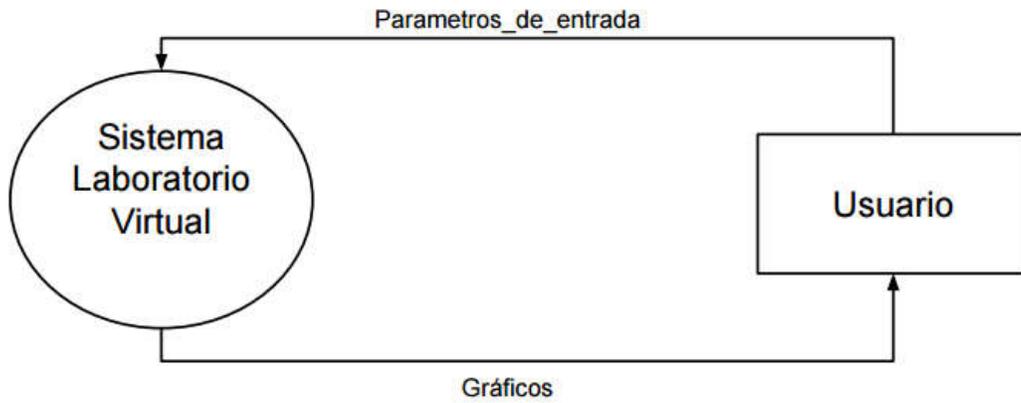


Figura 11: Diagrama de contexto

Resultado de esta etapa: Modelo de Comportamiento

Diagrama de Flujo de Datos

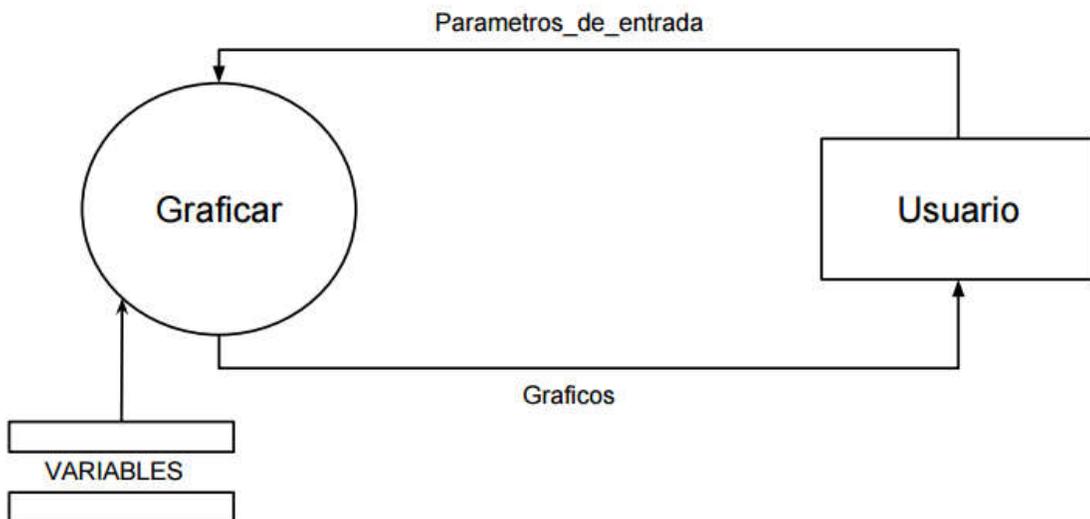


Figura 12: DFD nivel 1

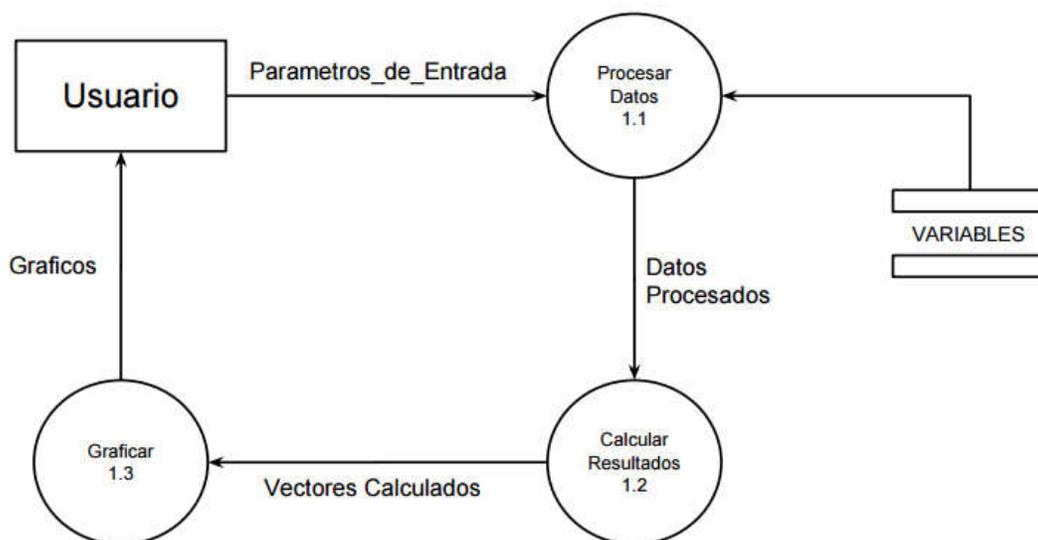


Figura 14: DFD nivel 2

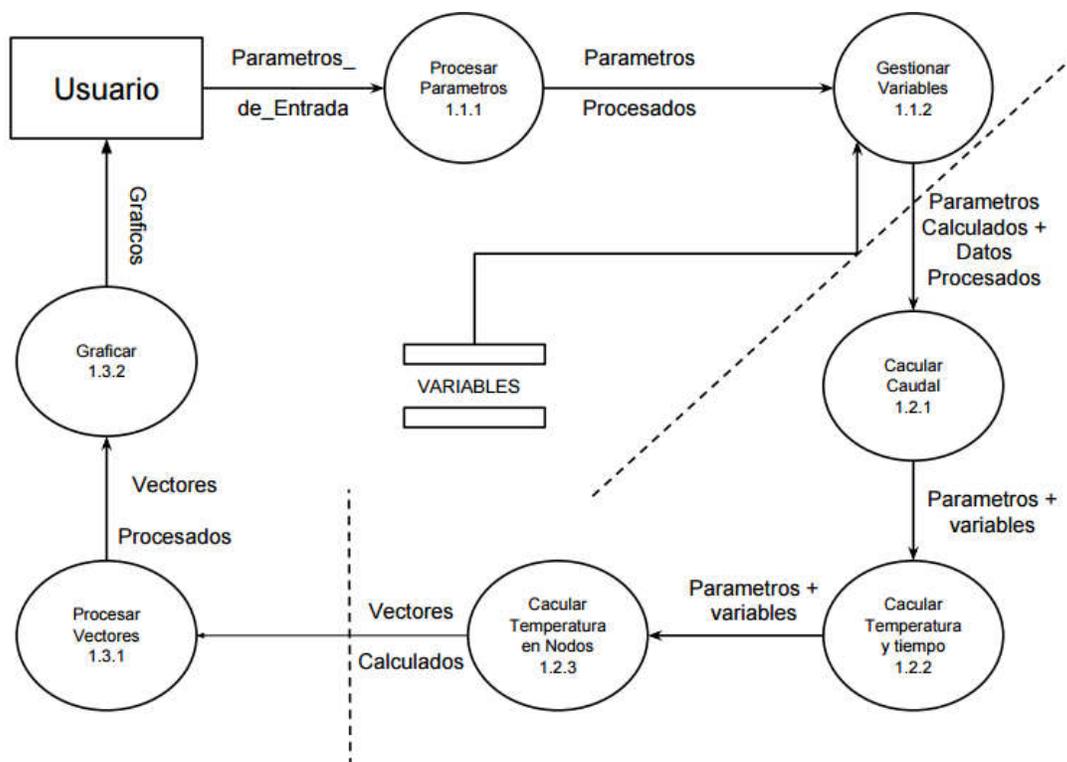


Figura 13: DFD nivel 3

Diagrama de Entidad Relación

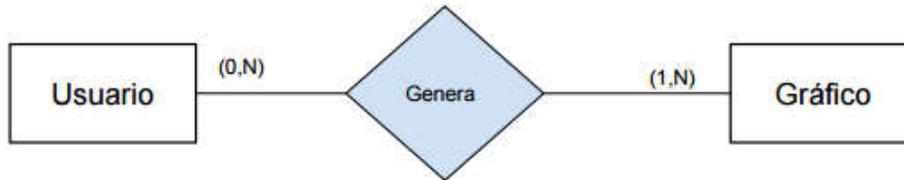


Figura 15: Diagrama Entidad Relación

Diagrama de Transición de Estados

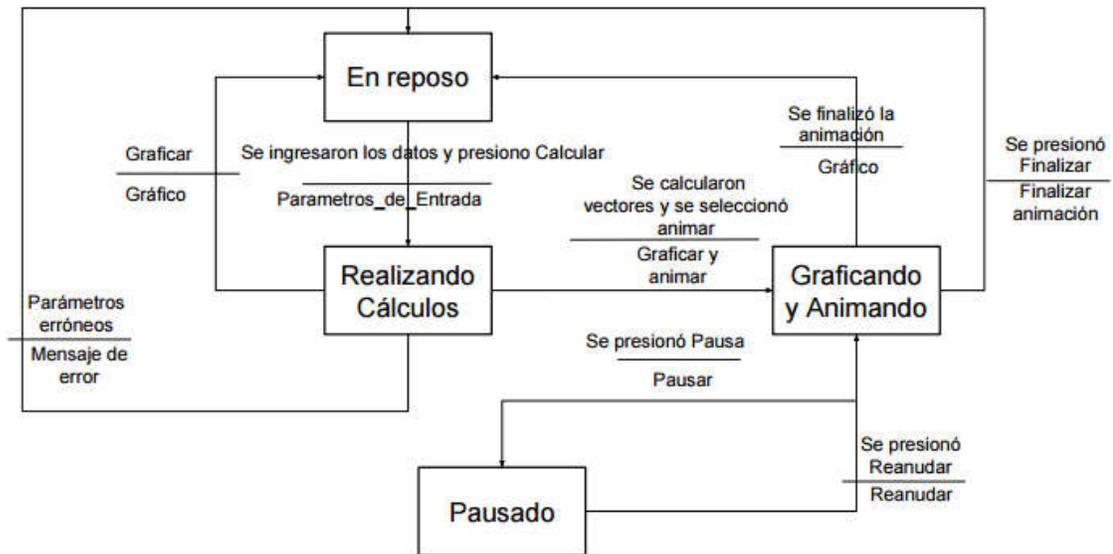


Figura 16: Diagrama de Transición de Estados

Diccionario de Datos

Caracter_legal = [A-Z|a-z];
 Datos_Procesados = {Parametro+Valor};
 Graficos = {Imagen};
 Imagen = *Descripcion del grafico*;
 Nombre = 1 {Caracter_legal}30;
 Numero = [0-9];
 Parametro = 1 {Caracter_legal}20;
 Parametros = {Parametro};
 Parametros_Calculados = {Parametro+Valor};
 Parametros_de_Entrada = {Parametro+Valor};
 Parametros_Procesados = {Parametro+Valor};
 Usuario = @ID+Nombre;
 Valor = 1 {Numero}20;
 Variable = Parametro+Valor ;
 VARIABLES = {Variable};
 Variables = {Variable};
 Vector = {Parametro+Valor} ;
 Vectores_Calculados = {Vector};
 Vectores_Procesados = {Vector};

7.2.3 Tercer Etapa: Diseño

El objetivo de esta etapa será el de asignar porciones de la especificación o modelo esencial a procesadores (máquinas o humanos) y las labores apropiadas dentro de cada procesador.

Ingresa:

- Modelo Esencial
- Restricciones operacionales y tecnológicas

Produce: Especificación de diseño (Diseño de interfaces H-M)

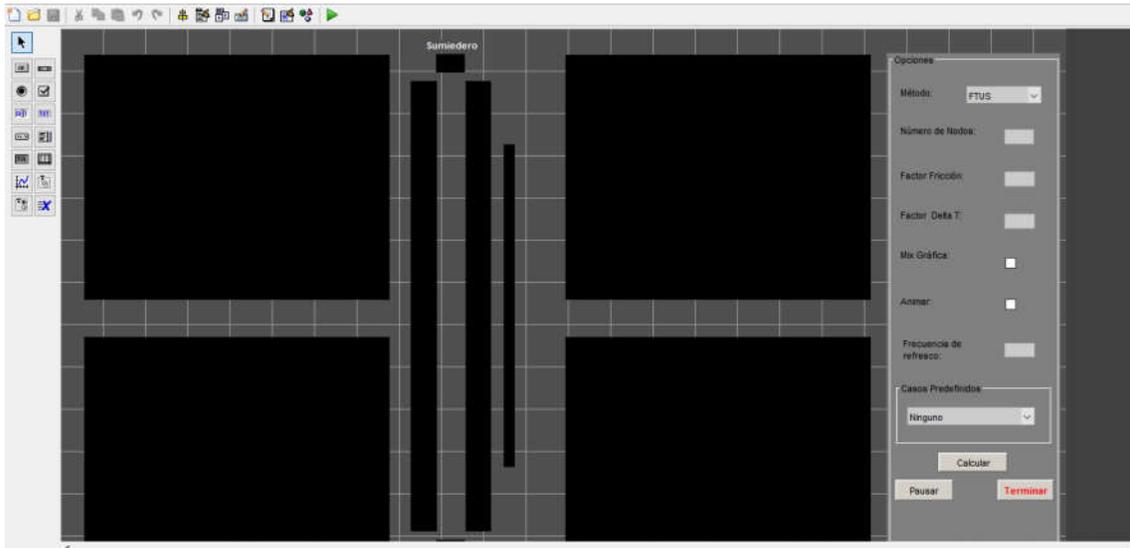


Figura 17: Diseño de interfaz mediante GUIDE

7.2.4 Cuarta Etapa: Implantación

Incluye la codificación y la integración de módulos en un esqueleto cada vez más completo del sistema final

Ingresar: Especificación de diseño

Produce: Sistema Integrado (Codificación de módulos, Integración de programas, Generación de menús/jobs/etc.)

7.2.5 Quinta Etapa: Generación de pruebas de aceptación

Producir un conjunto de casos de pruebas de aplicación. Como esta actividad puede suceder al mismo tiempo que las actividades de diseño e implantación, al analista se le asigna esta actividad al final del análisis.

Ingresar: Especificación estructurada

Produce: Casos de pruebas (14. ANEXO - CASOS DE PRUEBA ACEPTADOS)

7.2.6 Sexta Etapa: Garantía de calidad

El objetivo de esta etapa será el de proporcionar una prueba final o de aceptación.

Ingres: Sistema integrado, Casos de pruebas (teniendo en cuenta las restricciones y lo requerimientos formales).

Produce: Sistema aceptado. (14. ANEXO - CASOS DE PRUEBA ACEPTADOS)

7.2.7 Septima Etapa: Conversión de bases de datos (no aplica)

En algunos proyectos involucra más trabajo y planeamiento estratégico que el desarrollo de programas para el nuevo sistema

Objetivos: Tomar las bases de datos existentes y darle la estructura del nuevo diseño

Ingres: Especificación de diseño, Bases de datos existentes

Produce: Bases de datos convertidas

7.2.8 Octava Etapa: Instalación

En algunos casos la instalación puede implicar cambios de la noche a la mañana, en otros casos será un proceso gradual.

Objetivos: Instalación del sistema aceptado (ya probado). Entrega del nuevo sistema

Ingres: Sistema aceptado, Bases de datos convertidas, Manuales del usuario

Produce: Sistema instalado.

7.3 Desarrollo del interrogador de datos y resultados para un código de cálculo industrial (RELAP5)

Introducción

El RELAP5 es un código genérico de análisis transitorio para sistemas térmico hidráulicos utilizando un fluido que puede ser una mezcla de vapor de agua, agua, no condensables, y un soluto no volátil. Este código fue desarrollado por el Laboratorio Nacional de Ingeniería de Idaho (INEL) para la Comisión de Regulación de Energía Nuclear de los Estados Unidos de Norteamérica (NRC).

La versión de RELAP5 que se analizará es la MOD3, cuyo objetivo fue el desarrollo de un código para el análisis de todos los accidentes transitorios y postulados en los sistemas LWR (reactores de agua liviana por sus siglas en inglés), incluyendo roturas pequeñas y largas producidas por accidentes en los sistemas refrigerantes, así como también todo el rango de operaciones transitorias.

Las trayectorias de los fluidos y los flujos de energía se aproximan mediante modelos de tubos de corriente y conducción de una sola dimensión. El código contiene modelos de componentes de sistema aplicables a los LWR. En particular, incluye modelos de puntos neutrónicos, bombas, turbinas, generadores, válvulas, separador, y controles. El código también contiene un componente de bomba de chorro.

Las aplicaciones LWR para las cuales se destina el código incluyen accidentes iniciados por roturas que generan pérdidas de refrigerantes, transiciones operacionales tales como las previstas sin SCRAM (Varilla de control Hacha-Hombre por sus siglas en inglés, utilizado para referirse al sistema de apagado de emergencia de los reactores nucleares), pérdida de alimentación, pérdida de alimentación ocurrida fuera de las instalaciones, y la pérdida del flujo transitorio. El comportamiento del RCS (sistema refrigeración del reactor por sus siglas en inglés) puede ser simulado hasta, y ligeramente más allá del punto de daño del combustible.

Un código de sistema como el RELAP5 contiene numerosas aproximaciones para un sistema continuo real. Estas aproximaciones son necesarias por la capacidad de

almacenamiento finita de las computadoras, la necesidad de obtener un el resultado de un cálculo en la cantidad razonable de tiempo, y en muchos casos por el limitado conocimiento del comportamiento físico de los componentes y procesos modelados.

7.3.1 Escenario

El contexto de análisis sobre los cuales se ocuparan los resultados se basan en una situación muy sencilla de circulación natural, donde a partir de una construcción de tubos adiabáticos en vertical y colocados de forma paralela, se conformará un loop impulsado por la flotabilidad del fluido.

El loop tiene una fuente de calor en su parte inferior y un punto disipador de calor en su parte superior. El modo de transferencia de calor es tal que el producto del coeficiente de transferencia de calor en la longitud calentada se mantiene constante cuando la longitud calentada tiende a cero. Esto define la velocidad de calentamiento. El mismo concepto se aplica en el disipador de calor. De esta manera, la fuente de calor (o sumidero) se convierte en un punto.

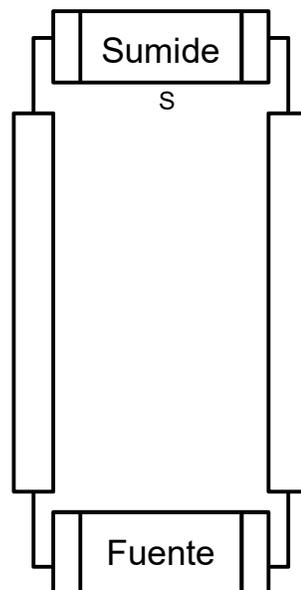


Figura 18: Representación geométrica del loop utilizada para el análisis en RELAP5

8. PRUEBAS REALIZADAS

Se realizaron una serie de pruebas funcionales (14.ANEXO – CASOS DE PRUEBA ACEPTADOS) y no funcionales específicas, concretas y exhaustivas para probar y validar que el software hace lo que debe y sobre todo, lo que se ha especificado.

Se corrieron un conjunto de casos de prueba, los cuales fueron pasaron de manera correcta.

Asimismo se probaron requerimientos no funcionales claves para este tipo de sistemas donde la performance y usabilidad son de vital importancia. Esto se debe a la enorme cantidad de cálculos requeridos para encontrar la solución y a su vez a las animaciones que se dan para lograr representación gráfica del problema planteado.

Se ejecutaron test dentro del código para evaluar que los tiempos de ejecución fueran los óptimos. Se utilizaron herramientas provistas por el paquete de MATLAB que lograron depurar el código de forma exhaustiva. Se buscaron soluciones a animaciones para que no se requieran grandes cantidades de tiempo de procesamiento. Se controlaron los tiempos de ejecución de cada bloque de código para ser optimizados. Se minimizaron los accesos a funciones ya que los mismos reducían de forma notable el rendimiento del programa.

Se ejecutaron test de volumen para verificar la capacidad del sistema. El volumen de ensayo es sobre estrategias de ensayo, tales como la entrada del volumen máximo de datos en cada campo.

9. DISCUSIÓN

Luego de numerosas pruebas y ejecuciones con diferentes parámetros se pudo observar que las condiciones estables predichas por Welander no pueden ser alcanzadas de forma total.

El laboratorio resulta de conveniente para el entrenamiento y adquisición de conocimiento sobre la dinámica de un sistema simple que mantenga las peculiaridades de sistemas complejos. Nos provee las herramientas y el conocimiento necesario para observar caos en circuitos termo-hidráulicos. Distinguir como ante el cambio de diversos parámetros la naturaleza del sistema puede cambiar.

Además resultó interesante poder visualizar como gracias al error de truncamiento las regiones de estabilidad varían a razón de la cantidad de nodos elegidos para el cálculo numérico. El efecto de esta difusión numérica puede amortiguar las oscilaciones del sistema, aunque una correcta nodalización puede corregir el comportamiento físico del mismo.

Enmarcándonos en el alcance del proyecto, se encontraron diferencias entre el alcance inicialmente definido y el real del producto desarrollado. En un principio se pretendía el desarrollo agregado a este, de un sistema experto de conclusiones válidas referidas al análisis de los resultados de los modelos. Debido a inconvenientes surgidos con el experto resultó imposible el desarrollo del mismo por lo cual se resolvió no continuar con el mismo.

De igual manera al momento de desarrollar el interrogador de datos y resultados para un código de cálculo industrial (RELAP5), surgieron inconvenientes con el uso de la licencia del mismo ya que no había sido aprobada la extensión de la misma para nuestro proyecto. Es por esto que se resolvió escribir solo el modelo teórico propuesto por nosotros el cual se espera sirva para incentivar el futuro desarrollo del mismo, el cual permitirá el contraste de los resultados obtenidos por el producto generado en este proyecto.

10. CONCLUSIONES

Retomando las postulaciones dadas en la introducción del presente trabajo se puede concluir que los objetivos del proyecto fueron cumplidos de manera satisfactoria. El desarrollo del ambiente que constituya un laboratorio virtual para entrenamiento en temas asociados a la sensibilidad fue desarrollado y comprendido en su totalidad.

El laboratorio permitirá lograr la consolidación de conocimientos, obteniendo una apreciación de la sensibilidad a parámetros de las representaciones computacionales. Permitirá afirmar los conocimientos acá descriptos y generar el desarrollo de nuevas conclusiones.

Este laboratorio estará a disposición del laboratorio de Modelado y Simulación de UADE como un ambiente de trabajo para su uso y modificación en el caso de ser requerida.

11. BIBLIOGRAFÍA

- [01] Allison, C.M., Johnson, E.C.. SCDAP/RELAP5/MOD2 Code Manual, Volume I: RELAP5 Code Structure, System Models, and Solution Methods, and Volume III: User's Guide and Input Requirements, NUREG/CR-5273, EGG-2555, 1989.
- [02] Ambrosini, W., Buci, M., Ferreri J.C., Forgione, N. The effect of wall friction in single-phase natural circulation stability at the transition between laminar and turbulent flow. *Annals of Nuclear Energy*, 2004.
- [03] Ambrosini, W., Ferreri J.C. On the analysis of thermal-fluid-dynamic instabilities via numerical discretization of conservation equations. *Nuclear Engineering and Design*, 2002.
- [04] Ambrosini, W., Ferreri J.C. Prediction of stability of one-dimensional natural circulation with a low diffusion numerical scheme. *Annals of Nuclear Energy*, 2003.
- [05] Ambrosini, W., Ferreri J.C. Stability analysis of single-phase thermosyphon loops by finite-difference numerical methods. *Nuclear Engineering and Design*, 2000.
- [06] Ambrosini, W., Ferreri J.C. The effect of truncation error on the numerical prediction of linear stability boundaries in a natural circulation single-phase loop. *Nuclear Engineering and Design*, 1998.
- [07] Berkovsky, B. M. Polevikov, V. K.. "Numerical Study of Problems on High-Intensive Free Convection", *Heat Transfer and Turbulent Buoyant Convection*, D. B. Spalding y N. Afgan (eds.), Washington, DC: Hemisphere, 1977, pp. 443-445.
- [08] Boussinesq, J. 1903 *Theorie Analytique de la Chaleur*, , vol. II. Gauthier-Villars, Paris.
- [09] Boyack, B.E. Quantifying Reactor Safety Margins. Part 1: An Overview of the Code Scaling, Applicability and Uncertainty Evaluation Methodology, *Nuclear Eng. and Design*, 1991.
- [10] Çengel, Y. A. y Cimbala, J. M.. *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. Nueva York: McGraw-Hill. 2006.
- [11] Cao, W., Chung T., Morris, J., Yang W.Y.. *Applied Numerical Methods Using MATLAB*. Wiley Interscience. USA, 2005.

- [12] Carlson, K.E. et al., RELAP5/MOD3 Code Manual Volume 1: Code Structure, System Models and Solution Methods, NUREG/CR-5535, 1990.
- [13] Catton, I. "Natural Convection in Enclosures", Proceedings of Sixth International Heat Transfer Conference, vol. 6, Toronto, Canadá, 1978, pp. 13-31.
- [14] Chen, K., On the oscillatory Instability of Closed-Loop Thermosyphons, ASME Trans., J. of Heat Transfer, 1985.
- [15] Cheng, H.S., Mallen A.N., Rothagi U.S., Wulff, W. BWR Stability Analysis with the BNL Engineering Plant Analyzer, NUREG/OR 5816, 1992
- [16] Churchill, S. W. Chu, H. S. "Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Horizontal Cylinder", International Journal of Heat Mass Transfer 18 (1975), p. 1049.
- [17] D'Auria, F., Debrechin, N. and Galassi, G.M., Outline of the Uncertainty Methodology based on Accuracy Extrapolation, Nuclear Technology, 1995.
- [18] Devaney, R.L. An introduction to chaotic dynamical systems. Addison Wesley, 1987.
- [19] Emery, A.P., MacGregor, R.K. "Free Convection Through Vertical Plane Layers: Moderate and High Prandtl Number Fluids", *Journal of Heat Transfer* 91 (1969), p. 391.
- [20] Fink, K. D., Mathews, J. H. Numerical Methods Using MATLAB, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1999.
- [21] Holland, O.T., Marchand, P. Graphics and GUIs with MATLAB, 3ed. Chapman & Hall. USA, 2003.
- [22] Li, T. Y., Yorke, J.A. Period Three Implies Chaos. The American Mathematical Monthly. USA, 1975.
- [23] Lindfield, G. R., Penny, J. E. T., Numerical Methods Using MATLAB, 8th ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2000.
- [24] Lorenz, Edward. Deterministic nonperiodic flow. Journal of the Atmospheric Sciences, 1963.
- [25] Nakamura, S., Numerical Analysis and Graphic Visualization with MATLAB, 2nd ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2002.

-
- [26] Page-Jones, Meilir. The practical guide to structured systems design. 2a ed. Englewood Cliffs : Prentice Hall International, 1988.
- [27] Pressman, R. Ingeniería del software: un enfoque práctico. Editorial McGraw Hill, 2005.
- [28] Ransom V.H., RELAP5/MOD2 Code Manual, Volumes I and II, NUREG/CR-4312, EGG-2396, 1985.
- [29] Recktenwald, G. W., Numerical Methods with MATLAB, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2000.
- [30] O. Reynolds. “On the Experimental Investigation of the Circumstances Which Determine Whether the Motion of Water Shall Be Direct or Sinous, and the Law of Resistance in Parallel Channels”, Philosophical Transactions of the Royal Society of London 174 (1883), pp. 935-982.
- [31] Welander, P., On the Oscillatory Instability of a Differentially Heated Fluid Loop, J. of Fluid Mechanics, 1967.
- [32] Yourdon, E. Análisis estructurado moderno. Editorial Prentice Hall Hispanoamericana, 1993.

12. ANEXO - LA INTERFAZ GRÁFICA.



Figura 19: Pantalla principal del laboratorio virtual.

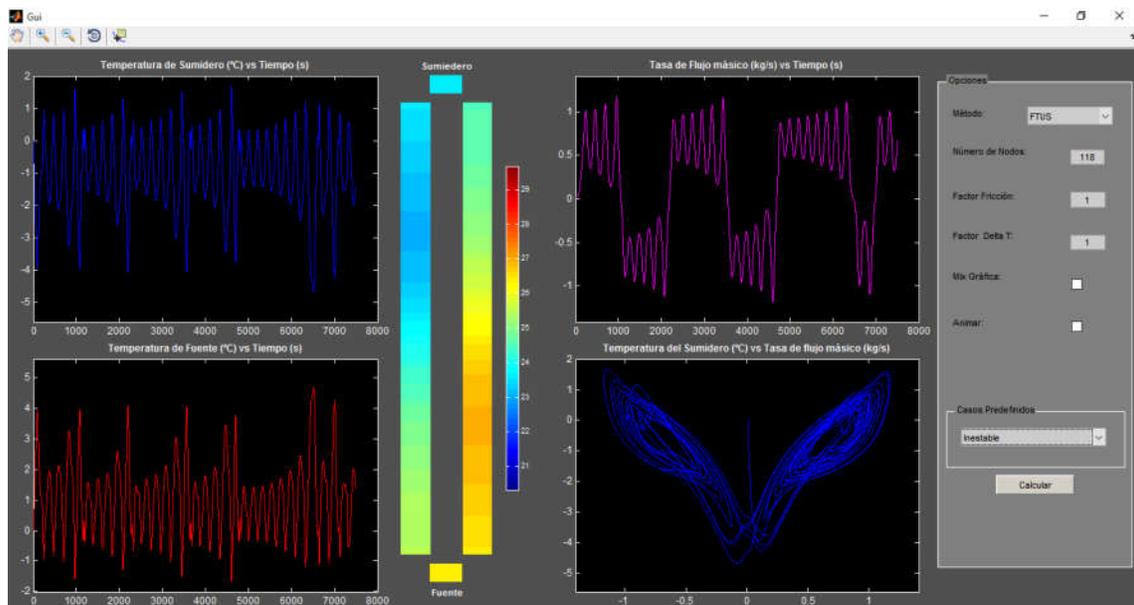


Figura 20: Ejecución de un caso particular. Sistema inestable.

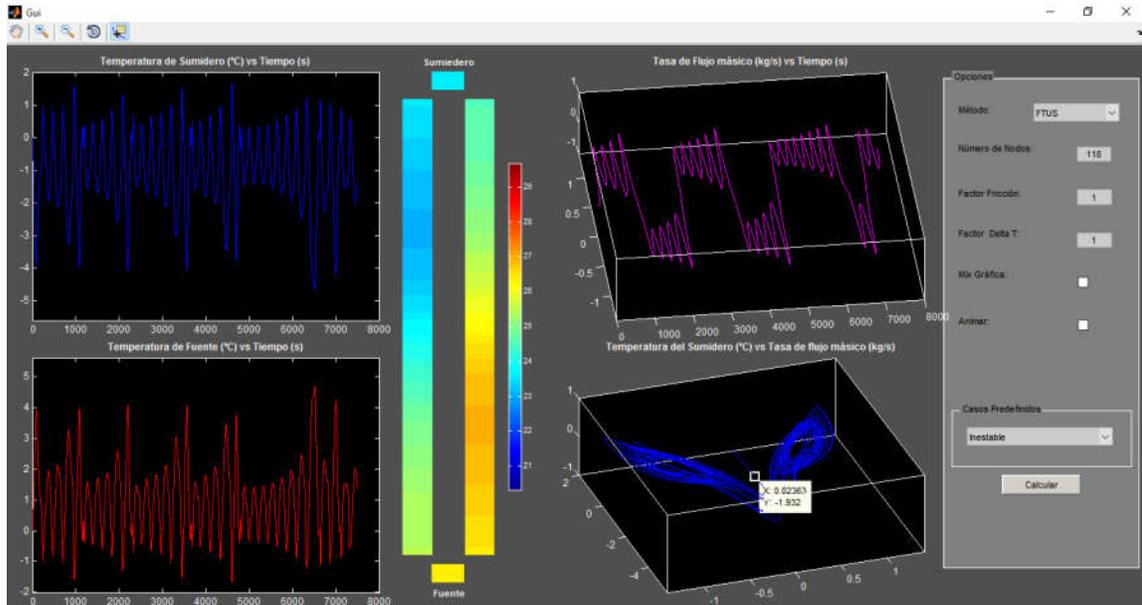


Figura 19: Ejecución de un caso particular. Sistema inestable.

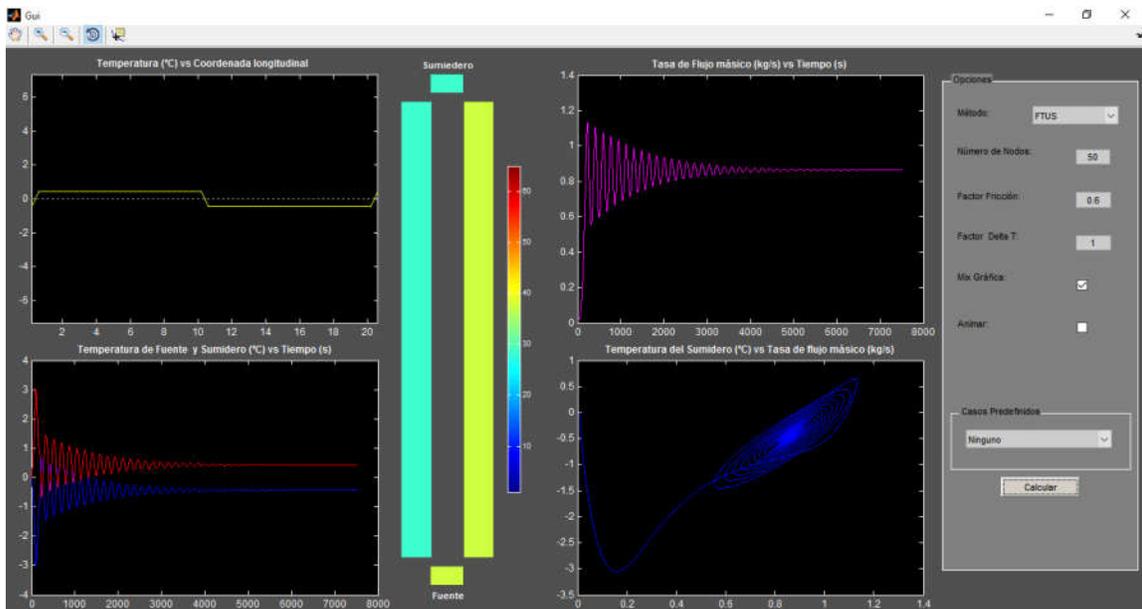


Figura 20: Ejecución de un caso particular. Sistema estable.

13. ANEXO - TABLA DE CONSTANTES UTILIZADAS PARA EL ESTUDIO DEL PROBLEMA DE WELANDER.

Variable	Descripción	Unidad
A	Área	m ²
a,b	Coefficientes de la ley de fricción	-
C	Número de Courant	-
Cp	Calor específico a presión constante	J/(m ³ K)
D	Diámetro	m
D(q)	Coefficiente de difusión	-
Fnod(q)	Multiplicador de transferencia de calor de la fuente y sumidero para la solución nodal	-
f	Factor de fricción	-
g	Gravedad	m/s ²
H	Coefficiente de transferencia de calor	W/(m ² K)
L	Longitud completa del loop	m
N	Número de nodos	-
Q	Caudal volumétrico	m ³ /s
q	Caudal volumétrico adimensional	-
R	Parámetro de fricción	1/s
Re	Número de Reynolds basado en el diámetro del tubo	-
S	Coordenada axial a lo largo del loop	m
T	Temperatura del fluido	°C
Ts	Temperatura del fluido en la fuente	°C
t	Tiempo	s
α	Parámetro de flotabilidad en la ecuación adimensionalizada de momento	-
β	Coefficiente de expansión isobárico	-
ε	Parámetro de fricción en la ecuación adimensionalizada de momento	-



μ	Viscosidad dinámica del fluido	kg/(ms)
ν	Viscosidad cinemática del fluido	m ² /s

Tabla 1: Descripción de las variables

14. ANEXO - CASOS DE PRUEBA ACEPTADOS

CASO DE USO	NOMBRE	OBJETO	ACCIÓN	ENTRADA	RESULTADO ESPERADO	RESULTADO OBTENIDO
CU0001	Numero de nodos incorrecto valor impar	Ingresar datos al texto de "numero de nodos"	Ingresar datos al texto de "numero de nodos" y completar demas campos y hacer click en calcular	Numero de nodos="3", Factor de Fricción= "1", Factor Delta T= "1"	Mensaje: "Numero de nodos tiene que ser Par"	Mensaje: "Numero de nodos tiene que ser Par"
CU0002	Numero de nodos incorrecto valor muy grande	Ingresar datos al texto de "numero de nodos"	Ingresar datos al texto de "numero de nodos" y completar demas campos y hacer click en calcular	Numero de nodos="900", Factor de Fricción= "1", Factor Delta T= "1"	Mensaje: "Numero de nodos tiene que ser menor a 341"	Mensaje: "Numero de nodos tiene que ser menor a 341"
CU0003	Numero de nodos incorrecto valor muy chico	Ingresar datos al texto de "numero de nodos"	Ingresar datos al texto de "numero de nodos" y completar demas campos y hacer click en calcular	Numero de nodos="1", Factor de Fricción= "1", Factor Delta T= "1"	Mensaje: "Numero de nodos tiene que ser mayor a 2"	Mensaje: "Numero de nodos tiene que ser mayor a 2"
CU0004	Datos vacios	No ingresar ningun dato	No ingresar ningun dato y hacer click en calcular		Mensaje: "Por favor ingrese valores adecuados"	Mensaje: "Por favor ingrese valores adecuados"
CU0005	Transgredir caso predefinido	Seleccionar un caso predefinido e ingresar valores	Ingresar datos a los campos correspondientes y seleccionar un caso predefinido y hacer click en calcular	Numero de nodos="50", Factor de Fricción= "1", Factor Delta T= "1", Caso predefinido= "Inestable"	Calcular los datos con el caso predefinido, reestablecer los campos con los datos del caso	Calcular los datos con el caso predefinido, reestablecer los campos con los datos del caso
CU0006	Seleccionar caso predefinido	Seleccionar un caso predefinido	Seleccionar un caso predefinido y hacer click en calcular	Caso predefinido= "Inestable"	Calcular los datos con el caso predefinido, reestablecer los campos con los datos del caso	Calcular los datos con el caso predefinido, reestablecer los campos con los datos del caso
CU0007	Mover los gráfico al animar	Mover los graficos mientras se anima	Seleccionar un caso predefinido y hacer click en calcular tildando la opcion animar. Durante la animacion realizar acciones con el gráfico	Caso predefinido= "Inestable"	La animacion continua de manera normal mientras se manipula los gráficos	La animacion continua de manera normal mientras se manipula los gráficos

CASO DE USO	NOMBRE	OBJETO	ACCIÓN	ENTRADA	RESULTADO ESPERADO	RESULTADO OBTENIDO
CU0008	Pausar gráfico	Seleccionar pausar	Seleccionar un caso predefinido y hacer click en calcular tildando la opcion animar. Durante la animacion pausar	Caso predefinido= "Inestable"	La animacion se pausa hasta que el usuario reestablezca	La animacion se pausa hasta que el usuario reestablezca
CU0009	Terminar gráfico	Seleccionar Terminar	Seleccionar un caso predefinido y hacer click en calcular tildando la opcion animar. Durante la animacion terminar	Caso predefinido= "Inestable"	La animacion termina sin posibilidad de reestablecerla.	La animacion termina sin posibilidad de reestablecerla.
CU0010	Valores inválidos	Ingresar valores invalidos al campo	Ingresar datos a los campos con caracteres distintos a numeros.	Numero de nodos="&%%\$&", Factor de Fricción="habia", Factor Delta T= "crecido"	Mensaje: "Por favor ingrese valores adecuados"	Mensaje: "Por favor ingrese valores adecuados"
CU0011	Datos luego de un caso predefinido	Cambiar los datos luego de un caso predefinido	Seleccionar un caso predefinido y hacer click en calcular. Luego ingresar datos en los campos y presionar calcular	Numero de nodos="50", Factor de Fricción= "1", Factor Delta T= "1", Caso predefinido= "Inestable"	El sistema vuelve el combobox de casos predefinidos a "ninguno" y calcular en base a los datos ingresados	El sistema vuelve el combobox de casos predefinidos a "ninguno" y calcular en base a los datos
CU0012	Datos mientras caso predefinido	Ingresar datos a los campos y seleccionar caso predefinido	Ingresar los datos a los campos y seleccionar un caso predefinido	Numero de nodos="50", Factor de Fricción= "1", Factor Delta T= "1", Caso predefinido= "Inestable"	El sistema calcula sobre el caso predefinido, los campos se rellenan con los datos del caso.	El sistema calcula sobre el caso predefinido, los campos se rellenan con los datos del caso.
CU0013	Datos invalidos a frecuencia de refresco	Ingresar datos invalidos al campo frecuencia de refresco	Ingresar datos a los campos y hacer click en calcular	Numero de nodos="50", Factor de Fricción= "1", Factor Delta T= "1", Caso predefinido= "ninguno",Animar="si", Frecuencia de refresco="\$\$"	El sistema calcula normalmente con la frecuencia de refresco defecto (1)	El sistema calcula normalmente con la frecuencia de refresco defecto (1)