

***“ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE
UN CIRCUITO TERMOHIDRÁULICO DE SODIO LÍQUIDO DE
ESCALA DE LABORATORIO UTILIZANDO UNA BOMBA
ELECTROMAGNÉTICA”***

***CARRERA: ESPECIALIZACIÓN EN REACTORES NUCLEARES
Y SU CICLO DE COMBUSTIBLE***

Alumno: Ing. Sergio Vergara
Director: Dr. Osvaldo E. Azpitarte
Co-Director: Dr. Alejandro J. Villanueva

Noviembre 2015.



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

RESUMEN

En este trabajo se estimarán los parámetros característicos de un circuito termohidráulico cerrado de sodio líquido de dimensiones de laboratorio (loop de sodio), compuesto por una bomba electromagnética y dos intercambiadores de calor. Las bombas electromagnéticas basan su principio de funcionamiento en la capacidad intrínseca que tiene un material conductor de sufrir una fuerza cuando es sometido a la acción conjunta de una corriente eléctrica y un campo magnético, o bien a la acción de un campo electromagnético variable en el tiempo.

El interés de este trabajo está enmarcado en el estudio general de las tecnologías relevantes al funcionamiento de los reactores nucleares rápidos refrigerados por metal líquido. En particular, los reactores rápidos refrigerados por sodio utilizan bombas electromagnéticas en los circuitos secundarios de extracción de calor.

La Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) ha seleccionado el concepto de reactor rápido refrigerado por sodio para un programa de futuros estudios y desarrollos. Para el primer paso de este programa se prevé, en el corto a mediano plazo, la adquisición o construcción de un circuito termo-hidráulico de ensayos de sodio líquido de escala de laboratorio, a fin de estudiar las propiedades fisicoquímicas del sodio, adiestrarse en el uso del instrumental necesario para su funcionamiento y aprender los principios del manejo de sodio como refrigerante. Este circuito de ensayos termohidráulicos de sodio contará con una bomba electromagnética.

En este trabajo se calcularon, en forma teórica, los parámetros característicos de un circuito termohidráulico cerrado de sodio líquido de escala de laboratorio, compuesto por una bomba electromagnética y dos intercambiadores de calor, mediante la aplicación de un modelo analítico que describe la magnetohidrodinámica de las bombas electromagnéticas, es decir, que se estimó la intensidad de campo magnético e intensidad de corriente eléctrica necesarios para que la bomba electromagnética imprima al sodio líquido la velocidad necesaria para extraer una cierta potencia térmica entregada al circuito por uno de los intercambiadores de calor.

El estudio paramétrico objeto de este trabajo permitió concluir la factibilidad de poder usar este tipo de bomba en el loop de sodio ya que sus componentes son fácilmente accesibles en el mercado local y además se estableció una metodología de cálculo de los parámetros de la bomba electromagnética para distintas condiciones de uso del loop de sodio.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	2
CAPITULO I – INTRODUCCIÓN GENERAL.....	4
1.1 Antecedentes.....	4
1.2 Objetivos.	5
1.2.1 Marco teórico general y particular.....	6
1.2.2 Loop de sodio.	6
1.2.3 Bomba electromagnética.	6
1.2.4 Cálculos.....	7
1.2.5 Conclusiones.	7
CAPÍTULO II - MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 Introducción.	8
2.2 Marco Teórico General.	9
2.2.1 Ecuación de inducción magnética.....	9
2.2.2 Ecuaciones de fluido dinámica.	10
2.3 Marco Teórico Particular.....	11
2.3.1 Ecuaciones básicas.	12
2.3.2 Condiciones de borde.....	13
CAPÍTULO III – LOOP DE SODIO.	15
3.1 Introducción.	15
3.2 Descripción del loop de sodio.	15
CAPÍTULO IV – BOMBA ELECTROMAGNÉTICA.	19
4.1 Modelo analítico general sin inyección de corriente externa.	19
4.2 Modelo analítico de la bomba electromagnética.	23
4.3 Descripción de la bomba electromagnética.....	26
CAPÍTULO V – CÁLCULOS.	30
5.1 Cálculo adiabático.	30
5.2 Cálculo con transferencia de calor.	31
CAPÍTULO VI – CONCLUSIONES.....	34
6.1 Resultados.....	34
6.2 Análisis del caudal volumétrico y corriente a inyectar.	34
6.3 Modos de funcionamiento y arranque.	37
6.4 Metodología general.	37
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	39

ANEXOS.	40
--------------	----

CAPITULO I – INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Antecedentes.

Dentro del plan estratégico de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), se ha implementado un programa de seguimiento de nuevas tecnologías de reactores nucleares de Generación IV y sus ciclos de combustible con el objetivo de realizar estudios y evaluaciones para definir una línea de reactores de mayor interés para el país para futuras posibles implementaciones.

En base a la política planteada se llevó a cabo el estudio en el año 2010, donde se realizó una evaluación comparativa en base al diseño de seis conceptos de reactores avanzados seleccionados dentro del marco del proyecto Generation IV International Forum (GIF) obteniendo como conclusión un informe final (CNEA, 2011), en el cual se efectuaron recomendaciones, sugiriendo líneas de desarrollo hacia las cuales se consideraba conveniente que CNEA direccionara sus recursos económicos y humanos en el futuro.

Dicha evaluación comparativa finalizó ubicando los seis conceptos de acuerdo a una lista de prioridades, relevante a nivel nacional, la cual resulta encabezada por el reactor rápido refrigerado por sodio líquido (SFR).

Como parte de las conclusiones, se recomendó el desarrollo de facilidades experimentales; promover el inicio de proyectos experimentales de investigación y el desarrollo en distintas áreas para la generación de conocimientos que posibiliten cumplir con los objetivos planteados en el plan estratégico de CNEA.

De acuerdo a lo expresado anteriormente, existe la posibilidad de que en un futuro cercano se adquiera o construya un pequeño circuito de ensayos termo-hidráulicos de sodio líquido (loop de sodio).

Este trabajo está enmarcado dentro del contexto descripto anteriormente y el objetivo de éste es el estudio teórico de la posibilidad de implementar una bomba electromagnética como parte integral del loop de sodio.

Por otro lado este trabajo también reviste importancia en lo referente al estudio general de las tecnologías relevantes al funcionamiento de los reactores nucleares rápidos refrigerados por sodio líquido, en los cuales se utilizan bombas electromagnéticas en los circuitos secundarios de extracción de calor, en particular estos reactores cuentan con un circuito intermedio de intercambio de calor sodio-sodio.

Esto se debe a que el sodio reacciona exotérmicamente con el agua y el aire, de modo que para evitar una posible liberación de sodio activado se implementa un circuito intermedio de intercambio de calor. Existen hasta la fecha dos líneas de diseño tradicionales para este tipo de reactores: el reactor tipo pileta y el reactor tipo loop. En el diseño tipo loop el circuito intermedio de intercambio de calor se encuentra fuera del recipiente del reactor tal como se observa en la siguiente figura.

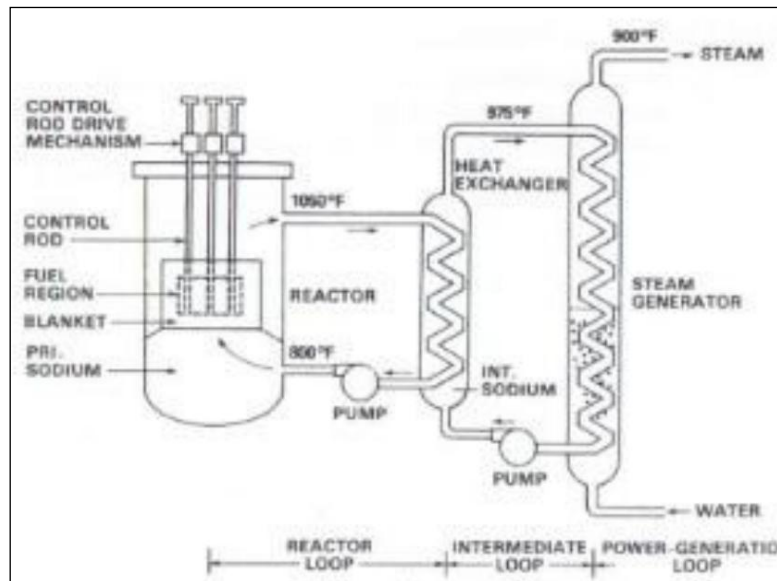


Fig. 1: Diseño tipo “loop”.

En el reactor tipo piletta, el núcleo, las bombas principales y los intercambiadores del circuito intermedio de intercambio de calor están todos sumergidos en una piletta de sodio contenida en un único recipiente.

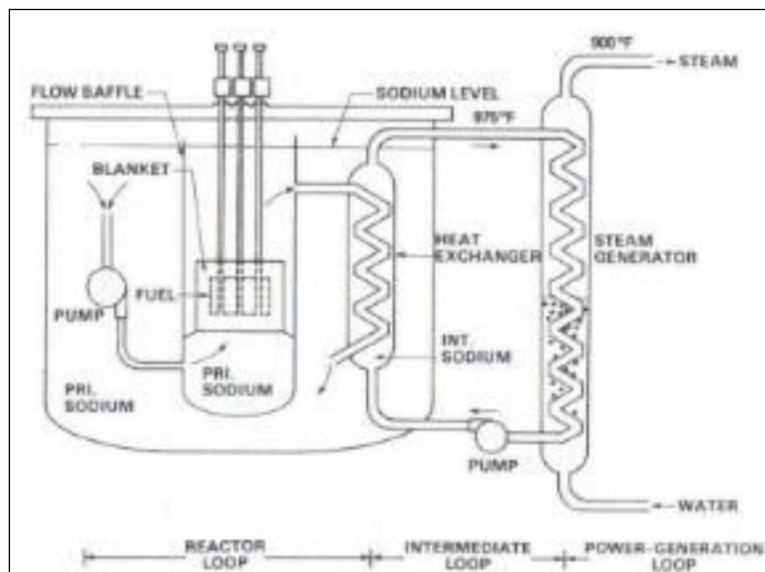


Fig. 2: Diseño tipo “pool”.

1.2 Objetivos.

En pocas palabras, CNEA ha seleccionado el concepto de reactor rápido refrigerado por sodio para un programa de futuros estudios y desarrollos. Para el primer paso de este programa se prevé, en el corto a mediano plazo, la adquisición o construcción de un circuito termohidráulico de ensayos de sodio líquido de escala de laboratorio (loop de sodio) el cual podría contar con una bomba electromagnética.

En este trabajo se calcularán, en forma teórica, los parámetros característicos de un circuito termohidráulico cerrado de sodio líquido de escala de laboratorio, compuesto por una bomba electromagnética de conducción y dos intercambiadores de calor, mediante la aplicación de un modelo analítico que describe la magnetohidrodinámica de las bombas electromagnéticas, es decir, que se estimó la intensidad de campo magnético e intensidad de corriente eléctrica necesarios para que la bomba electromagnética imprima al sodio líquido la velocidad necesaria para extraer una cierta potencia térmica entregada al circuito por uno de los intercambiadores de calor.

El estudio paramétrico objeto de este trabajo permitirá concluir como primera aproximación, las variables intervinientes, su peso en el sistema y estimar, en consecuencia, si sus componentes son fácilmente accesibles en el mercado local o no.

Para abordar a estas preguntas se divide el trabajo en distintos ejes temáticos a desarrollar en distintos capítulos, los cuales se exponen en forma resumida a continuación.

1.2.1 Marco teórico general y particular.

En este capítulo se introducirá brevemente la disciplina que explica el funcionamiento de las bombas electromagnéticas, la magnetohidrodinámica, la cual estudia la dinámica de cómo se relacionan los fluidos que pueden conducir electricidad bajo la influencia de campos magnéticos y eléctricos.

En lo referente al marco teórico general, se enunciará el conjunto de ecuaciones que describe en forma general la magnetohidrodinámica, las cuales se obtienen de considerar la dinámica de los fluidos a través de las ecuaciones de Navier-Stokes y de las ecuaciones de Maxwell que describen y caracterizan los campos electromagnéticos.

En la descripción del marco teórico particular se describirá un sistema simplificado en el cual se hacen las aproximaciones válidas a los fines del nivel de detalle que se busca en este trabajo, para obtener un conjunto de ecuaciones más sencillas a resolver.

1.2.2 Loop de sodio.

En este capítulo se describirá el fluido de trabajo en forma breve al igual que el loop considerado para el estudio (geometría, dimensiones, elementos constituyentes) y luego se realizará el cálculo de la potencia de bombeo necesaria para cumplir con las condiciones impuestas al loop de sodio.

1.2.3 Bomba electromagnética.

En este capítulo se introducirá el modelo para describir la bomba electromagnética, además se analizan las distintas variables que intervienen.

1.2.4 Cálculos.

En este capítulo se calcularán los parámetros característicos de la bomba electromagnética considerando el loop establecido para el estudio y el modelo analítico de la bomba.

En primer lugar se calcularán el sistema sin transferencia de calor alguna, luego se tomará el cálculo adiabático como punto inicial, es decir, que se harán las mismas aproximaciones que en el caso anterior. Pero ahora se considerará que al sistema le es entregada una cantidad de calor determinada en uno de los intercambiadores de calor, que es a su vez removida en el otro, de modo que la temperatura promedio de todo el sistema permanece invariable en el tiempo cuando se ha llegado al estado estacionario. El cálculo consistirá en determinar qué cantidad de calor el fluido de trabajo puede extraer para el caudal entregado por la bomba teniendo en cuenta las restricciones impuestas.

1.2.5 Conclusiones.

Se expondrán las conclusiones a las cuales se arribaron en el análisis del sistema planteado y se establecerá una metodología de cálculo de los parámetros de la bomba electromagnética para distintas condiciones de uso del loop de sodio.

CAPÍTULO II - MARCO TEÓRICO.

2.1 Introducción.

La magnetohidrodinámica (MHD) es un área del conocimiento que describe la combinación de dos campos, por un lado la mecánica clásica de fluidos y por otro lado la electrodinámica, siendo su área de aplicación la de aquellos fluidos eléctricamente conductores, los cuales se encuentran bajo la influencia de campos electromagnéticos y corrientes eléctricas.

Entre las varias aplicaciones que tiene esta área se puede citar entre otras aquellas relacionadas a la medición de flujos, bombas para impulsar metales líquidos.

En lo referente a las bombas electromagnéticas para metales líquidos, éstas tienen importantes aplicaciones técnicas. Esto es posible ya que el fluido de trabajo metálico, por ejemplo el sodio, tiene como característica una buena conducción de la electricidad. Aprovechando esta propiedad y aplicando campos electromagnéticos de forma apropiada se puede poner en movimiento el fluido, prescindiendo de esta manera de elementos mecánicos como es el caso de los que emplean las bombas mecánicas tradicionales.

En la siguiente figura se esquematizan los dos principios básicos de funcionamientos posibles.

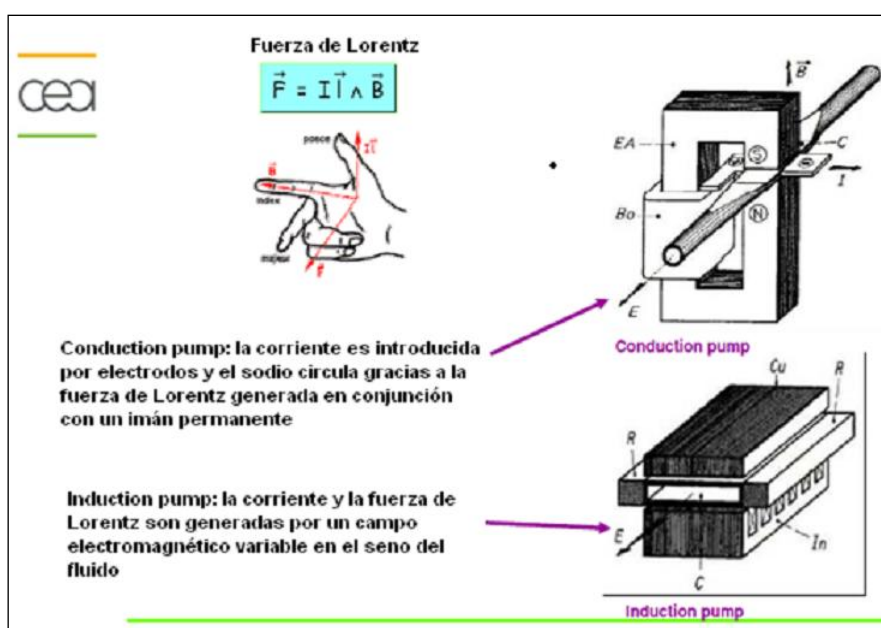


Fig. 3: Principios básicos de funcionamientos.

Fuente: CEA – Comisión de Energía Atómica y Energías Alternativas Francesa.

En la ilustración se observa que estas bombas pueden trabajar bajo el principio de conducción e inducción. Para el principio de conducción, la corriente eléctrica atraviesa el líquido en el conducto e interactúa con el campo magnético externo aplicado generando una fuerza electromagnética inducida, llamada fuerza de Lorentz,

la cual empuja el líquido a través de la tubería. Usualmente se necesitan grandes corrientes eléctricas para conseguir adecuados flujos volumétricos. La eficiencia de esta bomba suele ser pequeña. Sin embargo éstas tienen la ventaja de prescindir de partes móviles y ser muy robustas en operación.

Por otro lado, el principio de inducción es generalmente usado en aplicaciones industriales. Éste consiste en hacer circular corrientes alternas a través de bobinas eléctricas ubicadas en forma apropiada alrededor de la tubería generando de esta manera un campo magnético móvil el cual induce una corriente eléctrica en el fluido y esta corriente interactúa a su vez con el campo magnético dando origen a la fuerza de Lorentz que impulsa el fluido a través de la tubería. Sin embargo esto es posible si hay un adecuado desfase entre la corriente eléctrica y el campo magnético. Estas bombas trabajan como los motores eléctricos asíncronos.

Para el caso de estudio se considerará el principio de funcionamiento de conducción, es decir, se analizará una bomba de conducción.

2.2 Marco Teórico General.

En este apartado se estudia el conjunto de ecuaciones que relacionan la dinámica de los fluidos con la electrodinámica. Estas ecuaciones diferenciales tienen que ser resueltas simultáneamente, ya sea analíticamente o numéricamente.

Para este trabajo se toma la base de análisis y modelos analíticos provista por la bibliografía (Müller & Bühler, 2001).

2.2.1 Ecuación de inducción magnética.

De la combinación de las leyes de la electrodinámica – Ley de Ohm, Ley de Faraday, Ley de Ampere y de la condición de que el campo magnético es solenoidal – aplicada a un sistema en el cual un líquido conductor se mueve dentro de un campo magnético y eléctrico, se deriva la ecuación de transporte para el campo magnético $\mathbf{B}$ el cual forma la base de la teoría de la magnetohidrodinámica.

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{B} = \frac{1}{\mu \sigma} \nabla^2 \mathbf{B} + (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{v}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

Donde:

$\mathbf{v}$: campo de velocidades del fluido.

$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$: evolución temporal del campo magnético.

$(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{B}$: advección del campo magnético a lo largo del flujo.

$\nabla^2 \mathbf{B}$: difusión magnética.

$(\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{v}$: fuentes de intensidad de campo, originados por estiramiento mecánico de las líneas de campo por la velocidad del fluido.

$\frac{1}{\mu\sigma} = \eta$: difusividad magnética (inversa del producto de la permeabilidad magnética del fluido de trabajo por la conductividad eléctrica del mismo).

La ecuación describe la evolución temporal del campo magnético debido a la advección magnética, difusión magnética y las fuentes de campo magnético.

Para trabajar de forma más cómoda, a la ecuación de inducción se la lleva a su forma adimensional aplicando los siguientes factores de escala:

$\mathbf{v} \rightarrow \mathbf{v} : v_0$: donde la velocidad es un valor característico del sistema.

$\nabla \rightarrow \nabla : L^{-1}$: donde la longitud es un valor característico del sistema.

$t \rightarrow t : L/v_0$: combinación de parámetros característicos elegidos.

$\mathbf{B} \rightarrow \mathbf{B} : B_0$: valor característico de campo magnético externo aplicado.

Obteniéndose la ecuación de inducción en forma adimensional.

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{B} = \frac{1}{R_m} \nabla^2 \mathbf{B} + (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{v} \quad (\text{Ec. 2. 1})$$

Donde la cantidad:

$R_m = \mu\sigma L v_0$: número de Reynolds magnético.

2.2.2 Ecuaciones de fluido dinámica.

El balance del momento lineal de un elemento del fluido de trabajo queda representado en la siguiente expresión:

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right] = -\nabla p + \rho \nu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{f} + \mathbf{j} \times \mathbf{B}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

Donde:

$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v}$: evolución temporal del momento lineal.

$-\nabla p$: gradiente de presión.

$\rho \nu \nabla^2 \mathbf{v}$: fuerzas viscosas o de fricción.

$\mathbf{f}$: fuerzas volumétricas no electromagnéticas.

$\mathbf{j} \times \mathbf{B}$: fuerza de Lorentz, acopla las variables mecánicas y electrodinámicas del sistema.

ρ : densidad del fluido de trabajo.

ν : viscosidad cinemática del fluido de trabajo.

La ecuación describe la evolución temporal del momento lineal de un elemento de fluido que cambia por la acción de las fuerzas de Lorentz, de presión, viscosas y volumétricas.

Para trabajar de forma más cómoda, a la ecuación de balance de momento lineal se la lleva a su forma adimensional aplicando los siguientes factores de escala, entre los cuales se aplican los usados en el apartado anterior.

$\mathbf{v} \rightarrow \mathbf{v} : v_0$: donde la velocidad es un valor característico del sistema.

$\nabla \rightarrow \nabla : L^{-1}$: donde la longitud es un valor característico del sistema.

$t \rightarrow t : L/v_0$: combinación de parámetros característicos elegidos.

$\mathbf{B} \rightarrow \mathbf{B} : B_0$: valor característico de campo magnético externo aplicado.

$p \rightarrow p : \rho v_0^2$: combinación de parámetros característicos elegidos.

$\mathbf{f} \rightarrow \mathbf{f} : v_0^2/L$: combinación de parámetros característicos elegidos.

$\mathbf{j} \rightarrow \mathbf{j} : \sigma v_0 B_0$: combinación de parámetros característicos elegidos.

Obteniéndose la ecuación de inducción en forma adimensional.

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla p + \frac{1}{R} \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{f} + N(\mathbf{j} \times \mathbf{B}) \quad (\text{Ec. 2. 2})$$

Donde los números adimensionales que gobiernan el problema son los siguientes

- $R = \frac{v_0 L}{\nu}$: número de Reynolds
- $N = \frac{\sigma L B_0^2}{\rho v_0}$: número Stuart

Para una variedad de aplicaciones en campos magnéticos se establece un balance esencial entre las fuerzas viscosas y electromagnéticas. La relación de estas fuerzas puede ser expresada en términos del número de Reynolds y el número de Stuart, obteniéndose el número de Hartmann.

$$Ha^2 = NR \rightarrow Ha = LB_0 \sqrt{\frac{\sigma}{\rho \nu}}$$

2.3 Marco Teórico Particular.

En este apartado se desarrollan las ecuaciones básicas que describen el caso de metales líquidos como fluidos de trabajo que circulan dentro de conductos y los cuales están inmersos en un campo magnético $\mathbf{B}$ que penetra en un dado volumen del fluido. Éste análisis está relacionado a las bombas electromagnéticas de conducción.

El otro caso posible es que no exista un campo magnético inicial presente ni adentro ni afuera del dominio que contiene al fluido de trabajo, en este caso existe la posibilidad de la autoexcitación de un campo magnético debido a pequeñas perturbaciones.

2.3.1 Ecuaciones básicas.

Para la obtención del sistema de ecuaciones básicas se parte de las ecuaciones generales en forma adimensional descritas en el marco teórico general, donde el campo magnético $\mathbf{B}$ presentes en las ecuaciones es el total.

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla p + \frac{1}{R} \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{f} + N(\mathbf{j} \times \mathbf{B}) \quad (\text{Ec. 2. 2})$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{B} = \frac{1}{R_m} \nabla^2 \mathbf{B} + (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{v} \quad (\text{Ec. 2. 1})$$

Se considera un conducto o tubería de sección transversal arbitraria y constante longitudinalmente, la cual está expuesta a un campo magnético externo, el cual es perpendicular al eje del canal. El fluido de trabajo es impulsado por un gradiente de presión uniforme en la dirección indicada. La configuración del sistema es mostrada en la siguiente figura, en donde se indica el sistema de referencia, la dirección del flujo y el campo magnético externo aplicado al sistema.

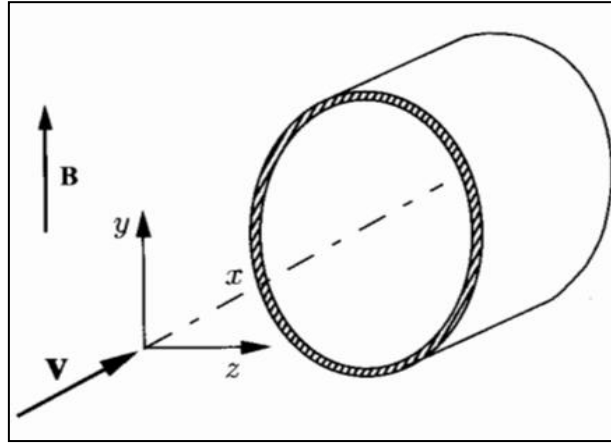


Fig. 4: Características de flujos en canales unidireccionales.

Donde el campo magnético y la velocidad tienen las siguientes expresiones:

$\mathbf{B} = \hat{\mathbf{y}} + \frac{Rm}{Ha} \mathbf{b}$: el campo magnético tiene dos componentes, una causada por la componente externa y otra causada por el campo magnético inducido.

$\mathbf{v} = u(y, z)\hat{\mathbf{x}}$: debido a que la sección transversal del conducto es constante y el flujo que se establece está completamente desarrollado.

Teniendo en cuenta la Ec. 2.1 y que el sistema está en estado estacionario y el flujo completamente desarrollado se obtiene la ecuación de inducción simplificada:

$$\nabla^2 b + Ha \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \quad (\text{Ec. 2. 3})$$

Ahora se considera la Ec. 2.2, con el sistema en estado estacionario y el flujo completamente desarrollado el lado izquierdo de la ecuación desaparece y se obtiene un balance de fuerzas de presión, fuerzas viscosas y fuerzas de Lorentz. En este punto de análisis es conveniente multiplicar la ecuación por:

$$R = \frac{v_o L}{\nu} : \text{número de Reynolds.}$$

$v_o = \frac{L^2(-\partial p/\partial x)}{\rho \nu}$: la velocidad característica del sistema, la cual depende de la longitud característica del sistema, el gradiente de presión y las propiedades mecánicas del fluido, luego asumimos que la magnitud del gradiente de presión es uniforme y a continuación se evalúa como la unidad y la ecuación de momento a lo largo de x toma la forma siguiente.

$$\nabla^2 u + Ha \frac{\partial b}{\partial y} = -1 \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Como comentario, la notación usada por los autores es apropiada para los flujos completamente desarrollados en la cual la inercia es irrelevante. Por otra parte, esto permite una representación de resultados en los límites hidrodinámicos, cuando el número $Ha \rightarrow 0$.

2.3.2 Condiciones de borde.

Para evaluar las ecuaciones 2.3 y 2.4 en casos prácticos se necesitan tener condiciones de borde adecuadas.

Para el establecimiento de estas condiciones se tiene en cuenta la siguiente figura.

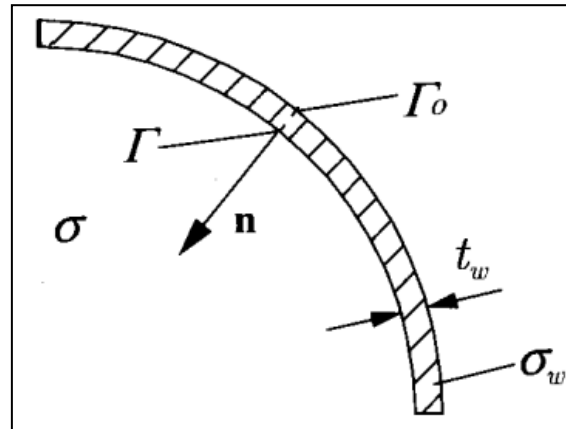


Fig. 5: Esquema de la sección de pared del canal.

Donde se puede identificar los siguientes parámetros:

Γ : interfaz fluido-pared.

Γ_0 : interfaz entre la pared y un aislante que rodea al conducto o canal.

σ : conductividad eléctrica del fluido de trabajo.

σ_w : conductividad eléctrica del material del conducto o canal que contiene al fluido de trabajo.

t_w : espesor del conducto que contiene al fluido de trabajo.

- Condición de borde hidrodinámica, el fluido viscoso no posee deslizamiento en la interfaz entre el fluido y la pared del canal.

$$\mathbf{v} = 0 \text{ en } \Gamma$$

- Condición de borde electromagnética, si la pared del canal no es conductora, entonces la componente normal de la densidad de corriente no tiene componente normal en la interfaz entre el fluido y la pared del canal.

$$\mathbf{j} \cdot \mathbf{n} = 0 \text{ en } \Gamma$$

- Condición de borde electromagnética, pared del canal no es conductora las líneas de campo magnético $b = \text{constante}$

$$b(\Gamma) = 0$$

- Condición de borde electromagnética, pared del canal es conductora.

$$b(\Gamma_o) = 0$$

- Condición de borde que tienen en cuenta el material y el espesor del canal que contiene el fluido de trabajo.

$$\frac{\partial b}{\partial n} - \frac{1}{c} b = 0 \text{ en } \Gamma \rightarrow c = \frac{\sigma_w \cdot t_w}{\sigma \cdot L}$$

Siendo “c” conocida como relación o coeficiente de conductancias.

- Condición de borde que tiene en cuenta el material y el espesor del canal que contiene el fluido de trabajo y además se considera la inyección de una corriente externa al sistema considerado.

$$\frac{\partial b}{\partial n} + \frac{1}{c} \left(b + \frac{1}{2} Ha \times I \right) = 0 \text{ en } \Gamma \rightarrow c = \frac{\sigma_w \cdot t_w}{\sigma \cdot L}$$

Como se observa, las condiciones de borde electromagnéticas son controladas por la conductividad eléctrica del material del canal.

CAPÍTULO III – LOOP DE SODIO.

3.1 Introducción.

Un loop es un circuito cerrado en el que se hace circular el fluido para fines de estudio exclusivamente. A diferencia del circuito primario de un reactor, no posee combustibles en estado de criticidad y en la mayoría de los casos tampoco ningún otro tipo de inventario radioactivo.

En este caso de estudio el fluido de trabajo es sodio líquido, por lo cual es conveniente tener presentes las propiedades del sodio más relevantes (Villanueva, 2011):

- Líquido entre 98°C y 883°C (presión atmosférica.)
- Reacción exotérmica Na-agua, Na-aire.
- Opaco.
- Conductor eléctrico.
- Compatible con aceros.
- Siempre la densidad del sodio es menor que la del agua.

Estas propiedades tienen consecuencias que determinan drásticamente el comportamiento del fluido, así como los sistemas necesarios para su manejo. Estos sistemas a su vez están en su mayoría presentes en todos los loops, inclusive en los de menor envergadura. Por ejemplo el punto de fusión relativamente elevado de 98°C a presión atmosférica es responsable de que todos los loops posean calentadores para llevar el sodio a estado líquido. A su vez el alto punto de ebullición, también a presión atmosférica, hace posible que los loops (así como también los reactores) operen a presiones bajas. La reacción exotérmica del sodio con el agua tanto como con el aire es quizá la característica más delicada del sodio. Implica la necesidad de un sistema de detección temprana y mitigación de fugas. En los reactores rápidos de sodio, esta reacción es la causa de que se disponga de un sistema intermedio de intercambio de calor entre el sodio activado del circuito primario y el agua del sistema de generación de vapor. De este modo se disminuye la probabilidad de liberación de inventario radioactivo dentro de la contención frente a una eventual reacción exotérmica del sodio con el agua.

La compatibilidad del sodio con aceros es la razón para el uso generalizado de aceros austeníticos en loops y reactores.

Teniendo en cuenta lo dicho anteriormente, en este capítulo se listan algunas propiedades del fluido de trabajo (sodio) y de se describe el loop considerado para el estudio.

3.2 Descripción del loop de sodio.

En términos generales, un loop consta de tanques, caños, válvulas, bombas y el fluido de trabajo. En el caso de estudio se supone un loop simplificado con el objetivo de determinar los distintos parámetros a saber: caídas de presión localizadas, distribuidas, etc.

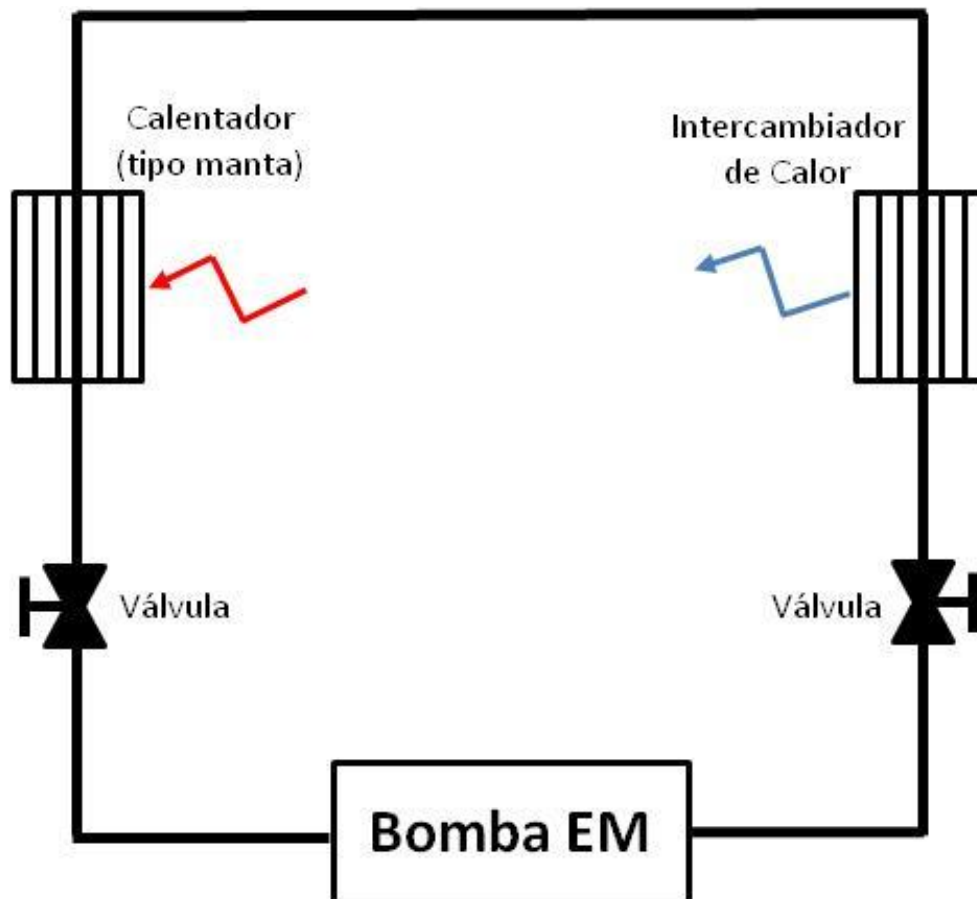


Fig. 6: Esquema simplificado del loop de sodio.

En primera instancia se detallarán las distintas propiedades del fluido de trabajo (sodio) las cuales se exponen en la siguiente tabla.

Parámetro	Dimensión	Valor
Densidad (ρ)*	kg/m^3	902,907
Viscosidad Cinemática (ν)*	m^2/seg	$514,343 \times 10^{-9}$
Conductividad Térmica (k)*	$\text{W/m}^2.\text{K}$	82,0044
Difusividad Térmica (α)**	m^2/seg	$66,2135 \times 10^{-6}$
Conductividad Eléctrica (σ ***)	Siemens/m	$7,588636 \times 10^6$

Tabla 1: Propiedades del Sodio a temperatura de 200°C o 473,15K.

(*) Datos obtenidos del libro (Fink & Leibowitz, 1995).

(**) Datos obtenidos del libro (Bergman, Lavine, Incropera, & Dewitt, 2011).

(***) Datos obtenidos del libro (Müller & Bühler, 2001).

A continuación se detalla el loop propiamente dicho, el cual tiene las siguientes características:

- Diámetro del loop: ½" o 12,7mm
- Velocidad referencia loop: 2 m/seg.

Parámetro	Dimensión	Valor
Velocidad en el loop (v_1)	m/seg	2
Área tubería	m^2	$1,2668 \times 10^{-4}$
Caudal de loop	m^3/seg	$2,5335 \times 10^{-4}$

Tabla 2: parámetros del loop de sodio.

La velocidad y el diámetro del loop son fijados de acuerdo al propósito del loop, en base a estos datos se calculan los siguientes parámetros.

- Tubería.

Parámetros		
Material: acero inoxidable.		
Diámetro Tubería (ϕ t)	m	0,0127
Rugosidad Típica (ϵ)	mm	0,002
Longitud Total	m	4
Factor Fricción (Diagrama de Moody)	adimensional	0,021
Pérdidas por fricción	kPa	11,944

Tabla 3: Parámetros de la tubería usada en el loop.

En el Anexo N°2 se exponen tablas con los cálculos para las caídas de presión.

- Codos.

Parámetros		
Material: acero inoxidable.		
Tipo: regular de 90°, atornillada.		
Cantidad: 4		
Diámetro Codo	m	0,0127
Rugosidad Típica (ϵ)	mm	0,002
Coeficiente de pérdida (tabulado)	adimensional	2
Pérdidas en Codos	kPa	14,447

Tabla 4: Parámetros de los codos usados en el loop.

En el Anexo N°2 se exponen tablas con más características de los codos.

- Válvulas.

Características		
Material: acero inoxidable.		
Tipo: gate o compuerta.		
Cantidad: 2		
Diámetro Válvula	m	0,0127
Porcentaje de apertura	fracción	1
Coeficiente de pérdida (tabulado)	adimensional	0,3
Pérdidas en Codos	kPa	1,083

Tabla 5: Parámetros de las válvulas usadas en el loop.

En el Anexo N°2 se exponen tablas con más características de las válvulas.

- Transición de sección entre la bomba electromagnética y la tubería.

Parámetros		
Sección Transversal Bomba: rectangular (10cm x 0.667cm)		
Sección Transversal Tubería: circular (ϕ t: 1.27cm)		
Coeficiente de pérdida de entrada	adimensional	0,5
Coeficiente de pérdida de salida	adimensional	1
Pérdidas en transición loop-bomba	kPa	2,709

Tabla 6: Parámetros del loop de sodio-bomba electromagnética.

En el Anexo N°2 se exponen tablas con más características de los cálculos realizados.

A continuación se determina la potencia de bombeo necesaria para poder cumplir con las condiciones impuestas.

Parámetros	Dimensión	Valor
Caudal Loop	m ³ /seg	2,5335 x10 ⁻⁴
Pérdidas Totales	kPa	30,18
Potencia de Bombeo	W	7,65

Tabla 7: Parámetros del loop de sodio.

La potencia de bombeo calculada, deberá ser provista por la bomba electromagnética para poder cumplir con las restricciones impuestas por el loop, donde la misma se calcula con la siguiente expresión.

$$P_{bombeo} = \Delta P \cdot Q \text{ [W]}$$

Donde:

- P_{bombeo} [W]: Potencia de bombeo.
- ΔP [Pa]: Caída de presión correspondiente a las pérdidas totales.
- Q [m³/seg]: Caudal del loop.

CAPÍTULO IV – BOMBA ELECTROMAGNÉTICA.

En este capítulo se analizarán las soluciones analíticas provistas por los autores (Müller & Bühler, 2001), que permitirá concluir como primera aproximación, las variables intervinientes, su peso en el sistema, y estimar, en consecuencia, si sus componentes son accesibles en el mercado local o no.

Hartmann, J. (1937) investigó experimental y teóricamente el flujo de los fluidos magnetohidrodinámicos en el espacio entre dos placas paralelas. Esta investigación proveyó el conocimiento fundamental para varios dispositivos como bombas electromagnéticas, generadores, frenos y medidores de flujo.

4.1 Modelo analítico general sin inyección de corriente externa.

En la siguiente figura se representa el arreglo geométrico del sistema de placas paralelas e infinitas que se usan para determinar las soluciones analíticas de las ecuaciones magnetohidrodinámicas (2.3 y 2.4) que aportarán el fundamento posterior para el funcionamiento de la bomba electromagnética.

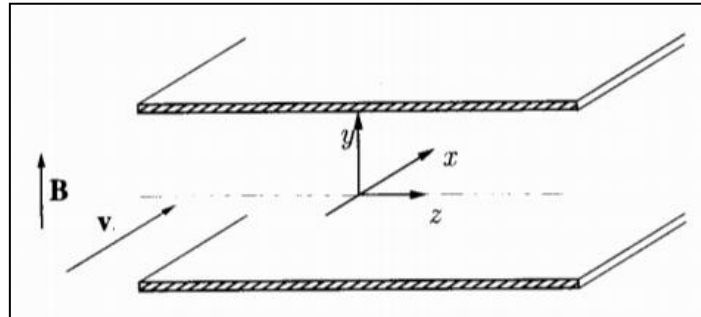


Fig. 7: Representación esquemática del sistema.

En la figura anterior, se observan las placas superior e inferior del canal; las placas laterales están en el infinito. Además, el campo magnético externo aplicado es perpendicular a las placas y se supone uniforme en el volumen ocupado por el fluido, el cual circula en el sentido y dirección del eje x en el canal impulsado por un gradiente de presión uniforme, el sistema de referencia de trabajo está fijado en el centro entre las dos placas del canal.

Para el sistema planteado se toma como valores característicos los siguientes:

v_0 : velocidad característica del fluido.

B_0 : valor característico de campo magnético, en este caso el campo magnético externo aplicado.

L : longitud característica, en este sistema es la mitad de la separación entre placas paralelas.

Aplicando las ecuaciones 2.3 y 2.4 al sistema descripto se obtienen las siguientes ecuaciones con sus correspondientes condiciones de borde.

$$Ha \frac{\partial b}{\partial y} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = -1$$

$$Ha \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial^2 b}{\partial y^2} = 0 \text{ para } -1 < y < 1$$

$$CC01: u = 0,$$

$$CC02: \pm \frac{\partial b}{\partial y} + \frac{1}{c} b = 0 \text{ en } y = \pm 1$$

Donde CC01, es la condición de borde hidrodinámica, es decir, el fluido viscoso no posee deslizamiento en la interfaz entre el fluido y la pared del canal.

La solución analítica al sistema de ecuaciones planteadas es la siguiente:

$$u(y) = \hat{u} \left[1 - \frac{\cosh(Ha \cdot y)}{\cosh(Ha)} \right] \quad (\text{Ec. 4.1})$$

$$b(y) = -\frac{y}{Ha} + \hat{u} \frac{\sinh(Ha \cdot y)}{\cosh(Ha)} \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Donde:

$$\hat{u} = \frac{1}{Ha} \frac{c + 1}{cHa + \tanh(Ha)}$$

$$c = \frac{\sigma_w \cdot t_w}{\sigma \cdot L} \quad Ha = LB_0 \sqrt{\frac{\sigma}{\rho \nu}}$$

Del análisis se pueden observar las siguientes características:

Para valores fijos de conductividad eléctrica de las placas del canal, la velocidad disminuye cuando aumenta el campo magnético externo (aumento del número de Hartmann).

Cuando se incrementa el número de Hartmann (aumento del campo magnético externo) el perfil de velocidad se aplana en el núcleo del canal.

Para un dado número de Hartmann, el flujo volumétrico es mayor cuando las paredes del canal tienen baja conductividad eléctrica y viceversa cuando el material del canal posee una alta conductividad eléctrica.

Cuando el campo magnético externo aplicado es nulo, la ecuación de velocidad tiende a la solución para flujo hidrodinámico clásico de Poiseuille.

Este comportamiento es físicamente razonable ya que el movimiento del fluido en un campo magnético externo genera un campo eléctrico. La energía para crear dicho campo eléctrico debe ser provista por el gradiente de presión externo, por lo tanto, a

los efectos del fluido, el campo magnético externo aparece como una caída de presión adicional a los elementos que componen el loop.

Una vez que se conoce el perfil de velocidad del sistema a través del canal, se puede obtener el flujo volumétrico, tal cual se expresa a continuación.

$$Q = \int_{-1}^1 u(y) dy = 2 \hat{u} \left[1 - \frac{1}{Ha} \tanh(Ha) \right] \quad (\text{Ec. 4.3})$$

La expresión anterior del caudal volumétrico es adimensional. Para llevarlo a su forma dimensional, se lo debe multiplicar por el siguiente factor:

$$K_Q = v_o \cdot 2L \cdot a \left[\frac{m^3}{seg.} \right]$$

Donde:

- v_o : velocidad característica del sistema.
- $2L$: separación entre placas del canal.
- a : ancho del canal.

Esta expresión será exacta en el límite $L/a \ll 1$. Para casos reales se pueden usar correlaciones empíricas en función de la relación de aspecto, es decir, la relación entre el ancho por altura.

En la siguiente gráfica se observa como varía el caudal en función del número de Hartmann, el cual depende directamente del campo magnético exterior aplicado.

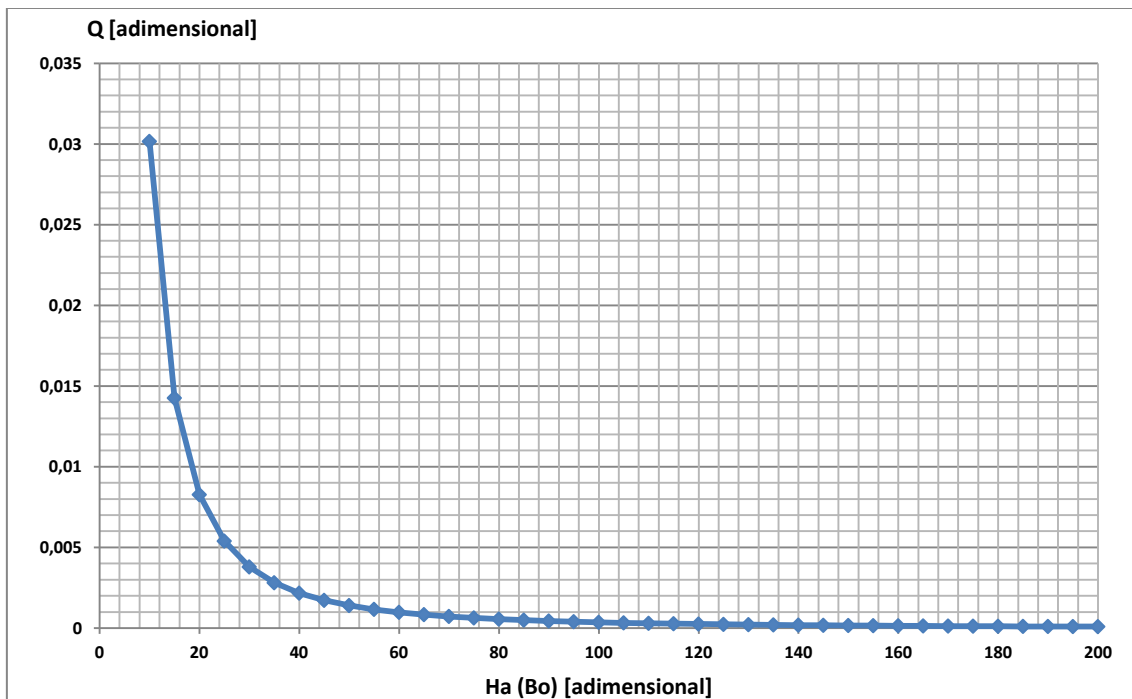


Gráfico 1: Caudal en el canal en función del número de Hartmann (genérico).

Se puede concluir que para un determinado caudal volumétrico impulsado por un gradiente de presión uniforme exterior, a medida que se aumenta el campo magnético externo aplicado el caudal disminuye hasta llegar a anularse, es decir, que para mantener un cierto caudal volumétrico en el sistema para números crecientes de Hartmann, se debe aumentar el gradiente de presión externo aplicado.

Por otro lado, se puede obtener la caída de presión del sistema como:

$$K = \frac{2}{Q} = \frac{1}{\hat{u} \left[1 - \frac{1}{Ha} \tanh(Ha) \right]}$$

Este parámetro está en formato adimensional, para llevarlo a su forma dimensional se lo debe multiplicar por el siguiente factor:

$$K_k = \frac{v_o \rho \nu}{L^2} \left[\frac{Pa}{m} \right]$$

Donde:

- v_o : velocidad característica del sistema.
- L : longitud característica del sistema.
- ρ : densidad del fluido de trabajo.
- ν : viscosidad cinemática del fluido de trabajo.

En la siguiente figura, se muestra la dependencia de la caída de presión con el número de Hartmann y las conductancias de las paredes del canal. Para pequeños números de Hartmann la caída de presión se debe únicamente al aspecto hidrodinámico del fluido de trabajo, por lo tanto independiente de la conductancia eléctrica de las paredes del canal.

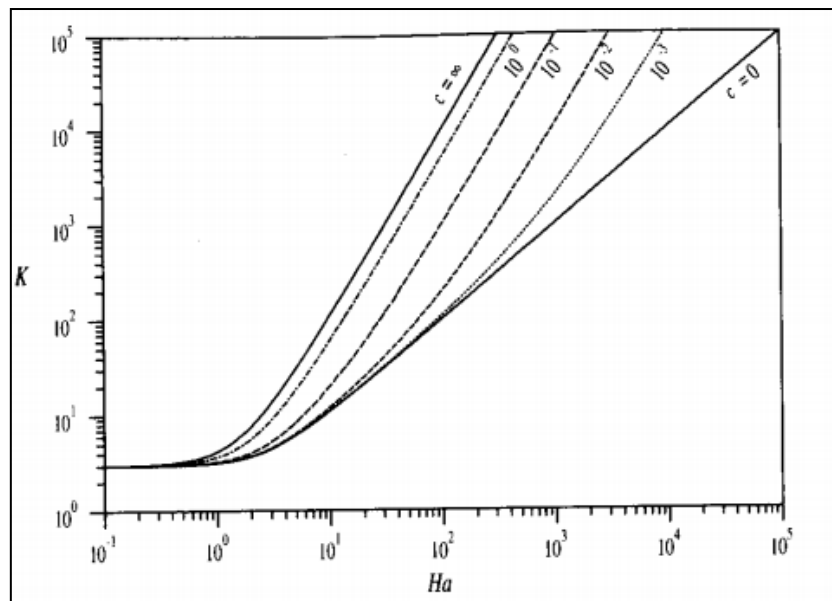


Gráfico 2: Gradiente de presión K como función del número de Hartmann y de coeficiente de conductancias.

Desde un punto de vista de la hidrodinámica es común usar la representación de las pérdidas de presión en términos de un coeficiente de caída de presión adimensional; la siguiente expresión permite obtener dicho coeficiente para el caso aquí tratado.

$$\lambda = \frac{2K}{R}$$

Donde R , es el número de Reynolds, y para calcular la pérdida de presión se utiliza la hidrodinámica clásica.

$$\Delta P = \lambda \frac{v_o^2}{2g} (\rho g) \text{ [Pa]}$$

Este valor debe ser calculado para determinar su importancia con respecto al resto de las pérdidas del circuito.

4.2 Modelo analítico de la bomba electromagnética.

Hasta aquí en el análisis se tuvo en cuenta que el fluido era impulsado por un gradiente de presión externo; ahora se considera que en el sistema se inyecta una corriente externa por las placas laterales del canal y se procede a obtener la solución analítica.

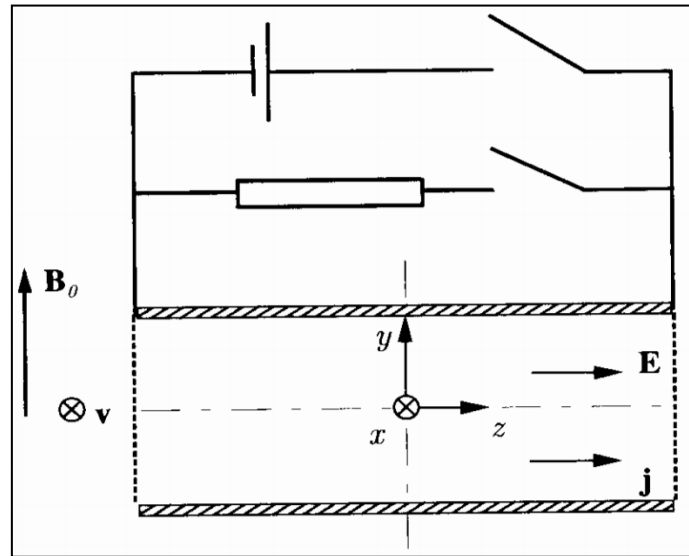


Fig. 8: Representación esquemática del sistema con inyección de corriente.

Aplicando las ecuaciones 2.3 y 2.4 al sistema descrito se obtienen las siguientes ecuaciones con sus correspondientes condiciones de borde.

$$Ha \frac{\partial b}{\partial y} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = -1$$

$$Ha \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial^2 b}{\partial y^2} = 0 \text{ para } -1 < y < 1$$

$$CC01: u = 0,$$

$$CC02: \frac{\partial b}{\partial y} + \frac{1}{c} \left(b + \frac{1}{2} Ha \cdot I \right) = 0 \text{ en } y = \pm 1$$

La condición de borde CC02, tiene en cuenta el material y el espesor del canal que contiene el fluido de trabajo y además se considera la inyección de una corriente externa al sistema considerado.

Siendo la solución analítica para el flujo volumétrico la siguiente:

$$Q = 2\hat{u} \left[1 - \frac{1}{Ha} \tanh(Ha) \right] \cdot \left(1 - \frac{1}{2} Ha^2 I \frac{1}{1+c} \right) \quad (\text{Ec. 4.4})$$

Donde:

$$\hat{u} = \frac{1}{Ha} \frac{c+1}{cHa + \tanh(Ha)}$$

$$c = \frac{\sigma_w \cdot t_w}{\sigma \cdot L} \quad Ha = LB_0 \sqrt{\frac{\sigma}{\rho \nu}}$$

Se puede identificar en la expresión anterior la parte del flujo volumétrico que es independiente de la corriente inyectada externa, esta componente está presente aún si la corriente inyectada por el circuito externo es nula. Esta parte del flujo que no se anula es llamada flujo de Hartmann, quedando la expresión anterior como sigue.

$$Q_H = 2\hat{u} \left[1 - \frac{1}{Ha} \tanh(Ha) \right]$$

$$\frac{Q}{Q_H} = \left(1 - \frac{1}{2} Ha^2 I \frac{1}{1+c} \right) \quad (\text{Ec. 4.5})$$

A continuación se gráfica la relación del caudal total sobre el caudal de Hartmann.

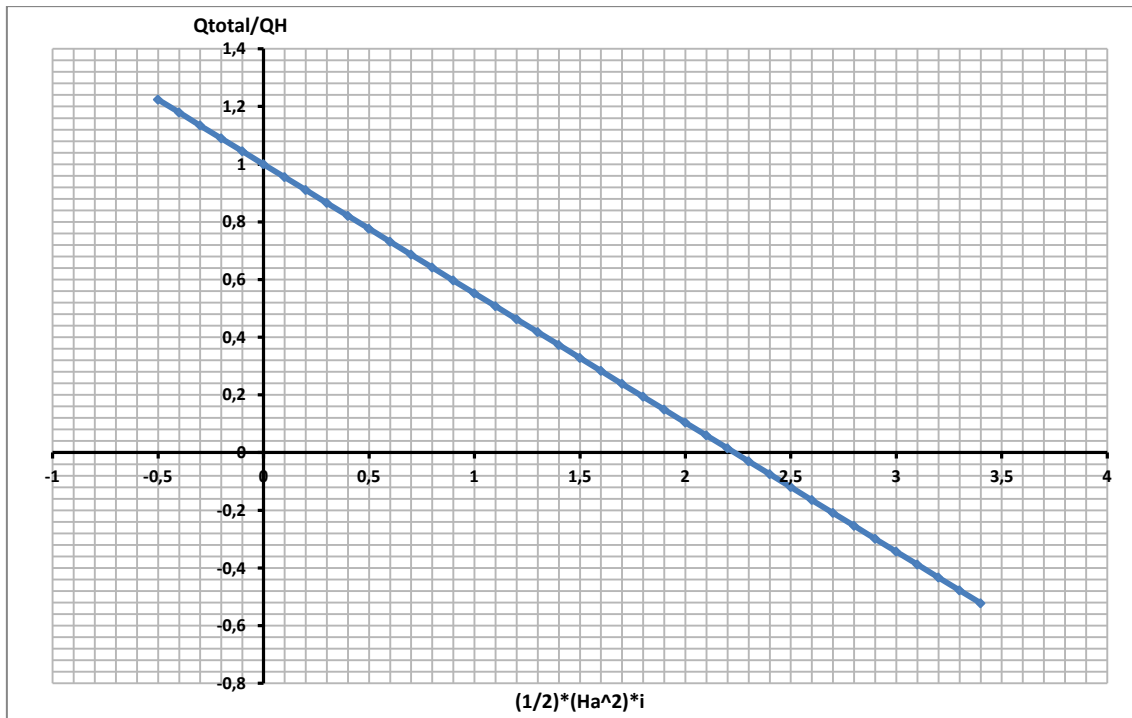


Gráfico 3: Relación de caudales en función de la corriente inyectada (genérico).

Cuando la corriente externa que se inyecta al sistema es nula, se re obtiene el caudal de Hartmann, que es el caso analizado en el apartado anterior.

A medida que se aumenta la corriente inyectada, bajo un campo magnético externo constante, el caudal comienza a disminuir tal cual se observa en la gráfica anterior.

Cuando la relación del caudal es cero, teóricamente el flujo volumétrico impulsado por el gradiente de presión externo sería frenado por la fuerza volumétrica de origen electromagnético, es decir, que el sistema actúa como un freno; si en este punto se sigue aumentando el valor de corriente inyectada el caudal volumétrico es revertido.

También del análisis se deduce que sí la corriente inyectada al sistema es negativa, el caudal volumétrico total se vería incrementado tal cual se ve en el gráfico.

Partiendo del análisis anterior, se hace hincapié en el punto en el cual la inyección de corriente externa al sistema detiene el flujo, si en este estado se anula el gradiente de presión externo que impulsa al fluido de trabajo, la fuerza volumétrica de origen electromagnética deja de encontrar una resistencia por lo cual el fluido comienza a circular.

De este modo se puede aprovechar los resultados de este equilibrio que brinda la solución analítica, siguiendo la metodología planteada a continuación.

1. Del sistema planteado, se establece el flujo que se requiere en el loop, éste sería, para la bomba electromagnética, el flujo de Hartmann (Q_H).
2. De la condición de equilibrio donde el fluido impulsado por un gradiente de presión externo (flujo de Hartmann), está completamente frenado por la

combinación de la corriente externa inyectada al sistema y del campo magnético externo aplicado (número de Hartmann $-Ha-$), se despeja la corriente que es el valor buscado.

$$\frac{Q}{Q_H} = 0 = \left(1 - \frac{1}{2} Ha^2 I \frac{1}{1+c}\right)$$

$$I = \frac{2(1+C)}{Ha^2}$$

3. El valor obtenido de corriente cumple con las restricciones impuestas, pero este es un valor adimensional, para llevarlo a su valor dimensional se debe multiplicar por el siguiente factor.

$$K_I = v_o B_o \sigma A [A]$$

Donde:

- v_o : velocidad característica del sistema.
- B_o : campo magnético externo aplicado.
- σ : conductividad eléctrica del fluido de trabajo.
- A : área de los electrodos de inyección de corriente.

4.3 Descripción de la bomba electromagnética.

La geometría de placas paralelas e infinitas fue usada en la determinación de las soluciones analíticas, pero para la realización de una bomba electromagnética una buena aproximación al sistema ideal planteado puede ser obtenida empleando un ducto rectangular de poco espesor el cual debe tener una alta relación de aspecto (relación entre el ancho y la altura). Los autores recomiendan, en base a experimentos realizados por otros investigadores una relación de aspecto:

$$d = \frac{\text{ancho}}{\text{altura}} = \frac{a}{h} = 15$$

Donde la altura es igual al doble de la longitud característica: $h = 2 \cdot L$

A continuación se presenta una tabla con distintos parámetros de la bomba electromagnética.

Parámetro	Dimensión	Valor
Material: Aluminio (Al)		
Conductividad Eléctrica Al (σ_w)	Siemens/m	$3,78 \times 10^{+7}$
Espesor de Pared (t_w)	m	$1,65 \times 10^{-3}$
Relación Aspecto (d)	adimensional	15
Ancho Canal (a)	m	0,1
Profundidad Canal (p)	m	0,1
Altura Canal (h)	m	$6,67 \times 10^{-3}$

Tabla 8: Parámetros de la bomba electromagnética.

Teniendo en cuenta la relación de aspecto, se fijó el ancho del canal y de esta manera se puede obtener la separación entre placas. A continuación se presenta una figura esquemática de la bomba electromagnética.



Fig. 9: Parámetros geométricos de la bomba electromagnética.

También se presenta un esquema de la transición entre la bomba electromagnética y la tubería del loop.

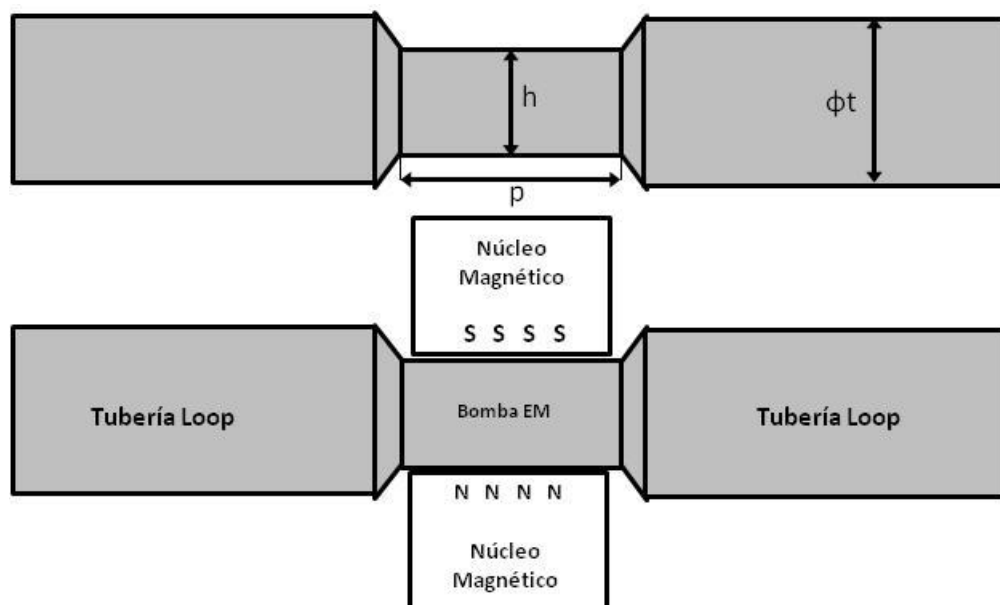


Fig. 10: Vista lateral transición bomba loop.

En la siguiente tabla se exponen el resto de los parámetros del sistema bajo estudio.

Parámetro	Dimensión	Valor
Inducción Magnética Externa (B_0)	Tesla	0,235
Longitud Característica (L)	m	$3,33 \times 10^{-3}$
Caudal Loop-Bomba Electromagnética	m^3/seg	$2,5335 \times 10^{-4}$
Velocidad en el canal (v_0)	m/seg	0,380
Número de Hartmann (Ha)	adimensional	100
Relación de Conductancia (c)	adimensional	2,47

Tabla 9: Parámetros de la bomba electromagnética.

La velocidad en el canal (v_o) se obtiene por conservación de caudal volumétrico, a su vez este valor es tomado como valor característico del sistema, además la longitud característica (L) es la mitad de la separación entre las placas o espesor.

Por otro lado, el número de Hartmann y la relación de conductancia son obtenidos con las expresiones dadas por la ecuación 4.4.

El campo magnético exterior aplicado (B_o) puede obtenerse de un imán permanente mediante un circuito magnético, tal cual se indica en la siguiente figura.

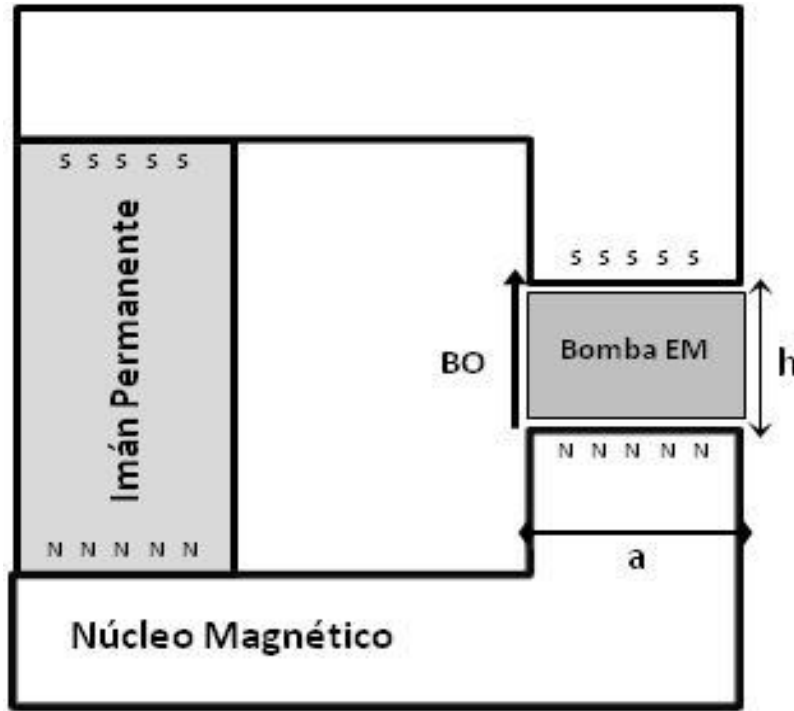


Fig. 11: Circuito magnético, corte transversal.

De acuerdo a las características del circuito magnético y del imán permanente se establecerá un punto de trabajo, es decir, que variando los parámetros del circuito magnético se puede obtener los valores deseados de campo magnético exterior (B_o).

Por último se calcula la pérdida de carga en la bomba de acuerdo a las siguientes expresiones.

$$\Delta P = \lambda \frac{v_o^2}{2g} (\rho g) \text{ [Pa]}$$

$$\lambda = \frac{2K}{R}$$

$$K = \frac{2}{Q} = \frac{1}{\hat{u} \left[1 - \frac{1}{Ha} \tanh(Ha) \right]}$$

Los cálculos se exponen en la siguiente tabla.

Parámetro	Dimensión	Valor
Caída de Presión (K)	adimensional	$7,23 \times 10^{+3}$
Diámetro Hidráulico	m	$1,25 \times 10^{-2}$
Velocidad en el canal (v_0)	m/seg	0,380
Viscosidad Cinemática (ν)	m^2/seg	$5,14 \times 10^{-7}$
Número de Reynolds (Re)	adimensional	9236
Coeficiente de Pérdida (λ)	adimensional	1,57
Aceleración Gravedad (g)	m/seg^2	9,806
Densidad Sodio (ρ)	kg/m^3	902,907
Pérdida Bomba Electromagnética	kPa	0,102

Tabla 10: Pérdida de carga en la bomba electromagnética.

La pérdida de carga de la bomba electromagnética es despreciable frente al resto de las pérdidas del loop.

En resumen, del análisis de la solución analítica se fijan los distintos parámetros de la bomba electromagnética y se concluye sus componentes constitutivos podrían ser accesibles en el mercado.

Para el caso de los imanes permanentes, hay disponibilidad de los mismos en distintos materiales y características tal cual se muestra en la siguiente tabla.

MATERIAL	PRODUCTO DE ENERGIA (BxH) MAXI en kJ/m ³	REMANENCIA Br en mT	CAMPO COERCITIV Hcj en kA/m	COEFICIENTE DE TEMPERATURA °C sobre Br en %	TEMPERATURA MAX UTILIZATION en °C	DENSIDAD en g/cm ³	PUNTO DE CURADO en °C
Composite inyectado ferrita	2.9-16	130-290	173-240	-0.2	180	3.2-3.7	NA
Composites soplados	4	245	95.5	-0.2	75	3.7	NA
Ferrita	25.6	365	175.15	-0.2	250	5	450
Composite inyectado Neodimio Fer Boro	32-60	450-610	640-1000	-0.11 à -0.15	160	4.5-5.7	NA
Alnico	36	1150	47.8	-0.02	450	7.4	860
Composite Neodimio Fer Boro comprimido	70-78	600-690	700-1000	-0.11 à -0.15	150	5.9-6.1	NA
Samarium Cobalt	176-224	1000-1100	692.7-820	-0.03	300	8.4	750-800
Neodymio Fer Boro	224-256	1080-1160	796.2-875.8	-0.1	100-180	7.4	310

Tabla 11: Características de los principales materiales magnéticos, proveedor Arelec Iberica.

Como se lee en la tabla los valores de remanencia de los imanes permanentes pueden llegar hasta valores superiores al 1 Tesla.

CAPÍTULO V – CÁLCULOS.

En este apartado se calculará la corriente eléctrica a inyectar en el sistema de acuerdo a los parámetros fijados y calculados en el capítulo anterior, considerándose al sistema aislado adiabáticamente, luego en el apartado siguiente se considerará el caso en el que el sistema intercambia calor.

5.1 Cálculo adiabático.

Para encontrar la corriente se sigue la metodología planteada en el apartado 4.2 del capítulo 4.

1. Del sistema planteado, se establece el flujo de Hartmann (Q_H).
2. Se busca la condición de equilibrio donde el fluido impulsado por un gradiente de presión externo (flujo de Hartmann), está completamente frenado por la combinación de la corriente externa inyectada al sistema y del campo magnético externo aplicado (número de Hartmann $-Ha-$).

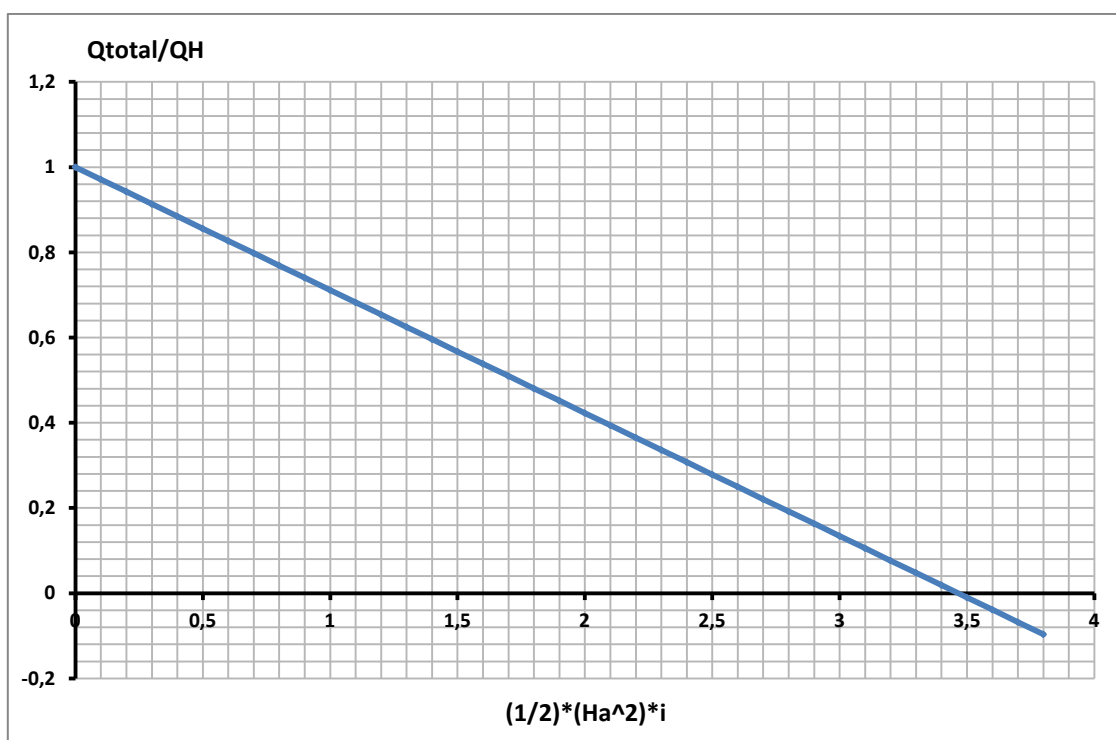


Gráfico 4: Relación de caudales en función de la corriente inyectada para el sistema planteado.

La tabla con los cálculos para construir el gráfico anterior es presentada en el Anexo N° 03.

3. De la condición de equilibrio se despeja la corriente.

$$\frac{Q}{Q_H} = 0 = \left(1 - \frac{1}{2} Ha^2 I \frac{1}{1 + c} \right)$$

$$I = \frac{2(1 + C)}{Ha^2}$$

4. El valor obtenido de corriente que cumple con las restricciones impuestas, es un valor adimensional, para llevarlo a su valor dimensional se debe multiplicar por el siguiente factor.

$$K_I = v_o B_o \sigma A [A]$$

Donde:

- v_o : velocidad característica del sistema.
- B_o : campo magnético externo aplicado.
- σ : conductividad eléctrica del fluido de trabajo.
- A : área de los electrodos de inyección de corriente.

En este caso el área de los electrodos de corriente se considera del mismo tamaño que la pared lateral de la bomba electromagnética.

Se resumen en la siguiente tabla los principales parámetros que intervienen en el cálculo y el resultado obtenido para la corriente

Parámetro	Dimensión	Valor
Inducción Magnética Externa (B_o)	Tesla	0,235
Longitud Característica (L)	m	$3,33 \times 10^{-3}$
Velocidad en el canal (v_o)	m/seg	0,380
Número de Hartmann (Ha)	adimensional	100
Caudal Hartmann (Q_H)	adimensional	$2,76 \times 10^{-4}$
Caudal Total (Q)	adimensional	0
Corriente Externa (i)	adimensional	$6,9 \times 10^{-4}$
Constante dimensional Corriente	A	451,8
Corriente Externa (i)	mA	312

Tabla 12: Parámetros intervinientes en los cálculos.

Se observa que para el sistema planteado la magnitud de corriente a inyectar por un circuito externo es de 312 mA, la cual puede ser provista por una fuente convencional.

5.2 Cálculo con transferencia de calor.

Con la confirmación de que la bomba electromagnética puede proveer un caudal fijado con las restricciones impuestas, se procede a calcular la magnitud de energía térmica que puede remover el fluido de trabajo en las condiciones establecidas.

Para esto, se consideran dos intercambiadores de calor tipo manta o frazada, uno de ellos entrega energía térmica al fluido y el otro le extrae la energía térmica al fluido de trabajo. A continuación se presenta una tabla con las temperaturas puestas en juego.

Parámetro	Dimensión	Valor
Temperatura Fuente Caliente	K	573,15
Temperatura Sodio antes Intercambiador de Calor	K	473,15
Temperatura Sodio después de la Temperatura de Calor	K	523,15
Salto de Temperatura (ΔT)	K	75

Tabla 13: Temperaturas del sistema antes y después de los intercambiadores de calor.

También se exponen en la siguiente tabla otros parámetros del circuito de transferencia de calor.

Parámetro	Dimensión	Valor
Longitud calefaccionada	m	0,3
Viscosidad cinemática (ν)	m ² /seg	5,14343 x10 ⁻⁷
Difusividad térmica (α)	m ² /seg	6,62135 x10 ⁻⁵
Conductividad térmica ($k_{\text{Térmica}}$)	W/m.K	82,0044
Velocidad en el canal (v_1)	m/seg	2
Diámetro tubería (ϕ_t)	m	0,0127
Superficie de transferencia de calor	m ²	0,01197

Tabla 14: Parámetros del circuito de transferencia de calor y del fluido de trabajo.

Para el cálculo de la potencia térmica que puede extraer el fluido de trabajo de la fuente caliente, se hace uso de Ley de enfriamiento de Newton.

$$q = h \cdot A_{TC} \cdot \Delta T$$

Donde:

- q [W]: energía térmica transferencia por convección por unidad de tiempo.
- h [$\frac{W}{K.m^2}$]: coeficiente de transferencia de calor por convección.
- A_{TC} [m²]: área de transferencia de calor o superficie de contacto.
- ΔT [K]: diferencia de temperatura entre la fuente caliente y la temperatura promedio del fluido antes y después de la transferencia de calor.

El coeficiente de transferencia de calor de calor por convección se obtiene a partir del número de Nusselt (Nu).

$$h = \frac{Nu \cdot k_{\text{Térmica}}}{\phi_{\text{calefactor}}}$$

Para el cálculo del número de Nusselt, se usan las correlaciones empíricas de convección para tuberías circulares provistas por los autores (Bergman, Lavine, Incropera, & Dewitt, 2011), dichas expresiones son aplicables a metales líquidos, en condiciones de flujo turbulento y completamente desarrollado.

$$Nu = 4,82 + 0,0185(Re \cdot Pr)^{0,827} \quad \text{con } q'' = \text{constante}$$

$$3 \times 10^{-3} \leq Pr \leq 5 \times 10^{-2}$$

$$3,6 \times 10^3 \leq Re \leq 9,05 \times 10^5$$

$$10^2 \leq Pe \leq 10^4$$

Donde:

- $q'' = \text{constante}$
- $Re = \frac{v_1 \cdot \phi_{\text{hidráulico}}}{\nu}$: número de Reynolds.
- $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$: número de Prandtl.
- $Pe = Re \cdot Pr$: número de Péclet.

A continuación se presenta una tabla con los resultados del cálculo.

Parámetro	Dimensión	Valor
Diámetro Tubería ($\phi_{\text{tubería}}$)	m	0,0127
Diámetro Hidráulico ($\phi_{\text{hidráulico}}$)	m	0,0127
Diámetro Calefactor ($\phi_{\text{calefactor}}$)	m	0,0127
Número de Prandtl (Pr)	adimensional	$7,77 \times 10^{-3}$
Número de Reynolds (Re)	adimensional	49383
Número de Nusselt (Nu)	adimensional	7,355
Coefficiente de Convección (h)	$W/m^2 \cdot K$	$4,75 \times 10^4$
Calor Total Transferido	W	42.636

Tabla 15: Resumen del cálculo de transferencia de calor.

Para las condiciones impuestas el fluido de trabajo podría evacuar aproximadamente 42,5 kW.

CAPÍTULO VI – CONCLUSIONES.

Del análisis del modelo analítico expuesto en el trabajo se puede concluir lo siguiente:

6.1 Resultados.

Para el sistema planteado y fijados los distintos parámetros del sistema:

- Geometría, dimensiones y elementos constituyentes de loop.
- Fluido de trabajo y propiedades del mismo a la temperatura de trabajo.
- Velocidad del fluido de trabajo (caudal de loop).
- Geometría y dimensiones de la bomba electromagnética.
- Intensidad del campo magnético externo.

Se determina el valor de la corriente a inyectar siguiendo la siguiente metodología analítica.

1. Del sistema planteado, se establece el flujo de Hartmann (Q_H).
2. Se busca la condición de equilibrio donde el fluido impulsado por un gradiente de presión externo (flujo de Hartmann), está completamente frenado por la combinación de la corriente externa inyectada al sistema y del campo magnético externo aplicado (fuerza de Lorentz).
3. De la condición de equilibrio se despeja la corriente, que cumple con las restricciones impuestas.

Los resultados obtenidos permiten concluir en primera instancia la factibilidad de usar una bomba electromagnética, ya que la magnitud de la corriente a ser inyectada al sistema puede ser provista por un inversor comercial.

6.2 Análisis del caudal volumétrico y corriente a inyectar.

En la metodología usada en el análisis, el campo magnético externo aplicado es fijado de antemano de acuerdo a la disponibilidad de imanes permanentes comerciales y de los parámetros del circuito magnético. Pero, haciendo una análisis más general del modelo analítico usado, se observa la correlación entre la velocidad del fluido de trabajo en el loop (en forma indirecta dado por el caudal del loop), el campo magnético externo aplicado y la corriente a inyectar al sistema, a continuación se presentan los siguientes gráficos.

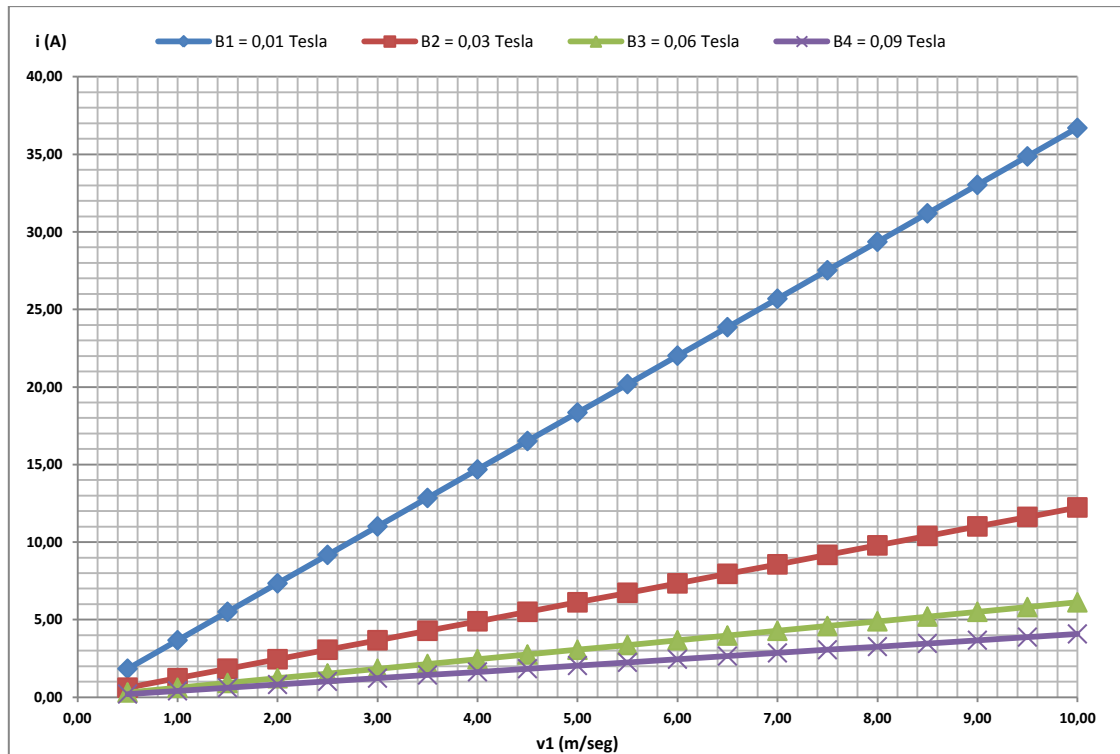


Gráfico 5: Correlación de variables del sistema planteado.

En el gráfico anterior se observa que para pequeños campos magnéticos aplicados, las corrientes a inyectar para obtener velocidades en el loop (indirectamente caudales) deben ser cada vez mayores; a medida que el campo magnético aplicado es mayor, la pendiente de las rectas es menor, y la diferencia entre pendientes no es tan acentuada, es decir, que para campos magnéticos grandes se observa que su eficacia es cada vez menor.

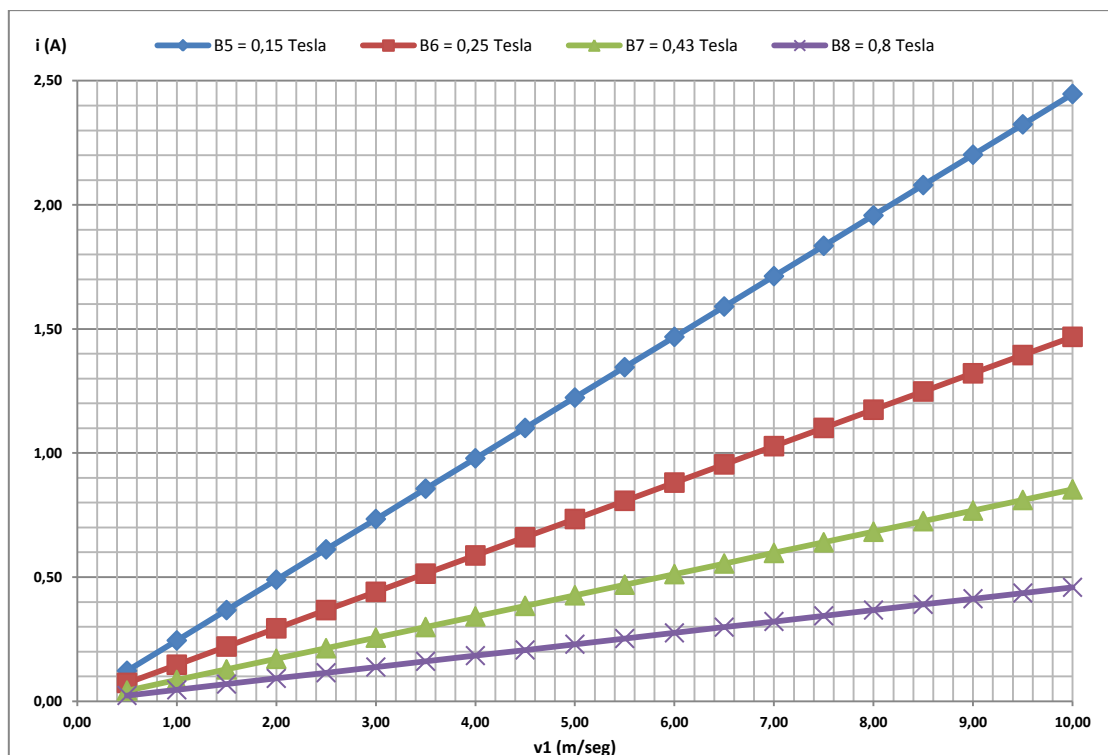
En el siguiente gráfico se hace el mismo análisis que el anterior, pero para campos magnéticos más grandes, observándose el mismo comportamiento, pero se puede arribar a esta conclusión haciendo el siguiente análisis sobre la ecuación de caudal cuando se inyecta corriente:

$$Q = 2\hat{u} \left[1 - \frac{1}{Ha} \tanh(Ha) \right] \cdot \left(1 - \frac{1}{2} Ha^2 I \frac{1}{1+c} \right) \quad (\text{Ec. 4.4})$$

Si se toma el límite de la ecuación anterior para números de Hartmann muy grandes ($Ha \gg 1$) y corriente inyectada al sistema no nula se obtiene:

$$Q(Ha \gg 1) \rightarrow -\frac{I}{c}$$

Lo que implica que el caudal en estas condiciones es independiente del campo magnético externo aplicado.



Como conclusión de este análisis se puede afirmar que de acuerdo al modelo analítico usado, el uso de grandes campos magnéticos no aumenta notablemente la eficacia del sistema por lo cual no sería necesario el uso de imanes permanentes potentes, es decir, que la corriente inyectada al sistema tiene mayor eficacia en lo referente a obtener el valor de caudal deseado, además de que los valores de corriente aplicados para bajos campos magnéticos son fácilmente obtenibles en el mercado tal cual se muestra en la siguiente tabla, en la cual se listan rectificadores comerciales disponibles en el mercado.

Código	Tipo	I_F (A)	V_{RRM}	Imagen
DF10	Monofásico	1A	1000V	Dip-4
W10M	Monofásico	1,5A	1000V	WM
KBPC1-10	Monofásico	3A	1000V	BR 3
KBL02	Monofásico	4A	200V	KBL
KBPC8-10	Monofásico	8A	1000V	KBPC 8
KBPC15-10	Monofásico	15A	1000V	
KBPC25-10	Monofásico	25A	1000V	
KBPC35-10	Monofásico	35A	1000V	
36MB120	Monofásico	35A	1200V	
KBPC50-10	Monofásico	50A	1000V	

Tabla 16: Catálogo de puentes rectificadores, proveedor Electrocomponentes S.A.

En lo referente a imanes permanentes, los mismos también se encuentran disponibles en el mercado tal cual se exponen en el apartado 4.3 del capítulo 4.

6.3 Modos de funcionamiento y arranque.

Si para el sistema planteado, se considera que no se inyecta corriente externa y que el fluido se mueve debido a un gradiente de presión externo, este gradiente de presión impulsará el fluido a través del canal atravesando el campo magnético externo aplicado, por lo cual se inducirá un campo eléctrico perpendicular al flujo y al campo magnético. Esto da lugar a diferencias de potencial y corrientes eléctricas que fluyen paralelas a las paredes del canal, en este caso el flujo actúa como generador.

Este resultado puede ser obtenido de la solución analítica dada en la Ec. 4.4

$$Q = 2\hat{u} \left[1 - \frac{1}{Ha} \tanh(Ha) \right] \cdot \left(1 - \frac{1}{2} Ha^2 I \frac{1}{1+c} \right) \quad (\text{Ec. 4.4})$$

Si la corriente es nula, y para números de Hartmann grandes:

$$Q \rightarrow \frac{2}{Ha^2} \left(\frac{c+1}{c} \right)$$

Lo que implica que cuando el sistema funciona como generador se tienen cada vez más pérdidas a medida que crece el campo magnético externo aplicado (crece el número de Hartmann; Ha). Estas pérdidas se deben a que parte de la energía que se pierde se encuentra almacenada en el campo eléctrico.

Con respecto al arranque de la bomba electromagnética, en teoría esta podría arrancar cuando se aplica el campo magnético externo y se inyecta corriente eléctrica. Esto se debe a que el término de fuerza volumétrica en la ecuación de Navier-Stokes (ver sección 2.2.2) es de la forma: $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ este término es no nulo aún cuando la velocidad del fluido inicialmente sea nula.

6.4 Metodología general.

Como conclusión general, se establece una metodología general para aplicar.

1. Se establece la velocidad del caudal dentro loop, la cual será determinada por las condiciones de operación deseadas.
2. Luego se calculan las caídas de presión por pérdidas distribuidas y localizadas en el loop y se obtiene la potencia de bombeo que debe ser provista por una bomba para cumplir con las restricciones impuestas.
3. En este punto se supone una bomba mecánica de una dada potencia que provee la potencia de bombeo, de aquí se puede determinar el caudal.

$$Q^* = \frac{P_0}{\Delta P_{\text{pérdidas}}}$$

4. A partir de este caudal, si es impulsado por la bomba mecánica a través del canal que está bajo la acción de un campo magnético externo, se puede determinar de esta condición la magnitud del campo magnético, es decir, se

despeja el número de Hartmann que cumpla con la condición y luego se obtiene el campo magnético del número de Hartmann. Aquí es importante señalar que el caudal Q^* del punto 3 es DIMENSIONAL y el Q^* del punto 4 es ADIMENSIONAL para llevar a ambos a una forma comparable entre sí, se usa el procedimiento descrito en la sección 4.1 del capítulo 4, en donde se indica el coeficiente de transformación del parámetro de una forma adimensional a dimensional o viceversa.

$$Q^* = Q_H = \frac{2}{Ha} \frac{c+1}{cHa + \tanh(Ha)} \left[1 - \frac{1}{Ha} \tanh(Ha) \right]$$

$$Ha = LB_0 \sqrt{\frac{\sigma}{\rho\nu}}$$

5. Con el valor de campo magnético determinado ahora se despeja la corriente a inyectar de la siguiente expresión.

$$0 = 1 - \frac{1}{2} Ha^2 I \frac{1}{1+c}$$

6. Finalmente el número de Hartmann (campo magnético externo) y la corriente obtenida proveen el caudal Q^* para las pérdidas del loop, lo cual se interpreta como que la bomba electromagnética es equivalente a una bomba mecánica que provee la potencia de bombeo necesaria. Cabe aclarar que una fuente de mayor corriente también satisfará los requerimientos deseados, el valor de corriente obtenido por este procedimiento da una cota inferior.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & Dewitt, D. P. (2011). *"Fundamentals of Heat and Mass Transfer"*. John Wiley & Sons, Inc.

CNEA. (2011). "Evaluación Comparativa de los Seis Conceptos de Reactores Seleccionados en el Marco del Proyecto GIF".

Fink, J. K., & Leibowitz, L. (1995). *"Thermodynamic and Transport Properties of Sodium Liquid and Vapor"*. Argonne National Laboratory.

Müller, U., & Bühler, L. (2001). *"Magnetofluidynamics in Channels and Containers"*. Springer.

Villanueva, A. (2011). "Consideraciones preliminares para el Diseño de un Loop de Sodio". CNEA.

White, F. M. (1979). *"Fluid Mechanics"*. McGraw-Hill.

ANEXOS.

Anexo N° 01: Tablas de propiedades del sodio.

- Fuente: libro (Fink & Leibowitz, 1995).

Table 1.3-1 Sodium Density

Temperature (K)	Liquid Density (kg · m ⁻³)	Vapor Density (kg · m ⁻³)
400.	919.	1.24 x 10 ⁻⁹
500.	897.	5.03 x 10 ⁻⁷
600.	874.	2.63 x 10 ⁻⁵
700.	852.	4.31 x 10 ⁻⁴
800.	828.	3.43 x 10 ⁻³
900.	805.	1.70 x 10 ⁻²
1000.	781.	6.03 x 10 ⁻²
1100.	756.	0.168
1200.	732.	0.394
1300.	706.	0.805
1400.	680.	1.48
1500.	653.	2.50
1600.	626.	3.96
1700.	597.	5.95
1800.	568.	8.54
1900.	537.	11.9
2000.	504.	16.0
2100.	469.	21.2
2200.	431.	27.7
2300.	387.	36.3
2400.	335.	49.3
2500.	239.	102.
2503.7	219.	219.

Table 2.2-1 Recommended Values for the Dynamic Viscosity of Liquid Sodium

Temperature (K)	Viscosity x 10 ⁴ (Pa·s)
371	6.88
400	5.99
500	4.15
600	3.21
700	2.64
800	2.27
900	2.01
1000	1.81
1100	1.66
1200	1.53
1300	1.43
1400	1.35
1500	1.28
1600	1.22
1700	1.17
1800	1.12
1900	1.08
2000	1.04
2100	1.01
2200	0.98
2300	0.95
2400	0.92

Table 2.1-1 Thermal Conductivity of Liquid Sodium

Temperature (K)	Thermal Conductivity (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)
371	89.44
400	87.22
500	80.09
600	73.70
700	68.00
800	62.90
900	58.34
1000	54.24
1100	50.54
1200	47.16
1300	44.03
1400	41.08
1500	38.24
1600	35.44
1700	32.61
1800	29.68
1900	26.57
2000	23.21
2100	19.54
2200	15.48
2300	10.97
2400	5.92
2500	0.27
2503.7	0.05

- Fuente: libro (Bergman, Lavine, Incropera, & Dewitt, 2011).

TABLE A.7 Thermophysical Properties of Liquid Metals^a

Composition	Melting Point (K)	<i>T</i> (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg · K)	$\nu \cdot 10^7$ (m ² /s)	<i>k</i> (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^5$ (m ² /s)	<i>Pr</i>
Bismuth	544	589	10,011	0.1444	1.617	16.4	1.138	0.0142
		811	9739	0.1545	1.133	15.6	1.035	0.0110
		1033	9467	0.1645	0.8343	15.6	1.001	0.0083
Lead	600	644	10,540	0.159	2.276	16.1	1.084	0.024
		755	10,412	0.155	1.849	15.6	1.223	0.017
		977	10,140	—	1.347	14.9	—	—
Potassium	337	422	807.3	0.80	4.608	45.0	6.99	0.0066
		700	741.7	0.75	2.397	39.5	7.07	0.0034
		977	674.4	0.75	1.905	33.1	6.55	0.0029
Sodium	371	366	929.1	1.38	7.516	86.2	6.71	0.011
		644	860.2	1.30	3.270	72.3	6.48	0.0051
		977	778.5	1.26	2.285	59.7	6.12	0.0037
NaK, (45%/55%)	292	366	887.4	1.130	6.522	25.6	2.552	0.026
		644	821.7	1.055	2.871	27.5	3.17	0.0091
		977	740.1	1.043	2.174	28.9	3.74	0.0058
NaK, (22%/78%)	262	366	849.0	0.946	5.797	24.4	3.05	0.019
		672	775.3	0.879	2.666	26.7	3.92	0.0068
		1033	690.4	0.883	2.118	—	—	—
PbBi, (44.5%/55.5%)	398	422	10,524	0.147	—	9.05	0.586	—
		644	10,236	0.147	1.496	11.86	0.790	0.189
		922	9835	—	1.171	—	—	—
Mercury	234	See Table A.5						

^aAdapted from Reference 23.

- Fuente: libro (Müller & Bühler, 2001).

Table A.1. Overview on fluid properties

Metal	Hg	Ga ⁶⁸ In ²⁰ Sn ¹²	Na ²² K ⁷⁸	Na	Li	PbLi ¹⁷	SnPbInBi (MCP58)
Melting point [°C]	-38.87	10.5	-11	97.82	179.1	234.85	58
Volume change on fusion	3.6%	-3.5%	2.48%	2.5%	1.5%	3.5%	
Density ρ [$\frac{g}{cm^3}$]	13546.0 _{20°C}	6363.2 _{20°C}	868.2 _{20°C}	915.3 _{150°C}	504.9 _{300°C}	9491.7 _{300°C}	9230 _{75°C}
A_0	13595.4	6372	873.55	950.46	535.2	9993.3	
A_1	-2.455	-0.44	-0.258	-0.2307	-0.101	-1.672	
$A_2 \cdot 10^6$	0.2472	0	0	-18.017	0	0	
valid temperature range [°C]	-20 - 300	25 - 200	0 - 204	98 - 1370	200 - 600	235 - 400	
Heat capacity c_p [$\frac{J}{kg \cdot K}$]	139.068 _{20°C}	365.813 _{20°C}	982.120 _{20°C}	1425.65 _{150°C}	4278.7 _{300°C}	189.78 _{300°C}	209 _{75°C}
A_0	139.6	368.01	990.7	1437.08	4530.2	192.51	
$A_1 \cdot 10^3$	-27.5	-110	-513.3	-580.6	838.2	-9.116	
$A_2 \cdot 10^6$	45	6.67	537	462.4	0	0	
valid temperature range [°C]	0 - 300	25 - 200	0 - 450	100 - 600	180 - 420	235 - 530	
Kinematic viscosity ν [$10^{-6} \frac{m^2}{s}$]	0.1148 _{20°C}	0.34809 _{20°C}	1.05 _{20°C}	0.5916 _{150°C}	0.8911 _{300°C}	0.2209 _{300°C}	4.04 _{75°C}
A_0	0.1245	0.3853	1.278	0.936775	1.6925	0.6525	
$A_1 \cdot 10^3$	-0.4633	-1.926	-13.4	-2.5806	-3.515	-1.943	
$A_2 \cdot 10^6$	1.136	3.2686	100	2.571	2.9	1.7324	
valid temperature range [°C]	-20 - 200	25 - 200	0 - 80	100 - 300	180 - 550	235 - 660	
Electric conductivity σ [$10^6 \frac{A}{V \cdot m}$]	1.04452 _{20°C}	3.30737 _{20°C}	2.878 _{20°C}	8.6356 _{150°C}	3.3434 _{300°C}	0.78917 _{300°C}	1.28 _{20°C}
A_0	1.0635	3.4882	2.976	13.1155	4.458	0.876	
$A_1 \cdot 10^3$	-0.9502	-9.32	-5.05	-33.44	-4.38		
$A_2 \cdot 10^6$	0.0595	13.933	7.188	29.0284	2.248	0.080952	
valid temperature range [°C]	20 - 350	20 - 200	0 - 80	100 - 400	200 - 1200	235 - 720	
Thermal conductivity λ [$\frac{W}{m \cdot K}$]	8.7169 _{20°C}	39 _{100°C}	21.8 _{20°C}	84.4 _{150°C}	40.64 _{300°C}	13.184 _{300°C}	10.0 _{75°C}
A_0	8.214		21.38	91.752	34.9275	7.30374	
$A_1 \cdot 10^3$	25.7		20.8	-48.688	19.03	19.6	
$A_2 \cdot 10^6$	-27.84		-22.07	-0.303	0	0	
valid temperature range [°C]	0 - 220		0 - 400	100 - 550	200 - 1100	235 - 400	

Thermophysical values for some liquid metals. The temperature dependent values fitted by polynomial regressions as $A_0 + A_1T + A_2T^2$ with T [°C].

The fit formulas for all values have in their range an error of less than 0.5%. The thermophysical data have been taken from:

Lyon, R.N. (1952). Liquid metals handbook, Navexos P-733, Second edition

Foust, O.J. (1972). Sodium-NaK engineering Handbook, Vol.1

Sodium chemistry and physical properties, Gordon and Breach SCIENCE Publishers, ISBN0677030204

Addison, C.C. (1984). The chemistry of the liquid alkali metals, John Wiley&Sons Ltd, ISBN0471905089

Smith, D.L. et al. (1984). Blanket comparison and selection study, Final report, ANL/FPP-84-1, Volume 2, Chapter 6

Schulz, B. (1986). Thermophysical properties in the system LiPb, Technical Report KfK 4144

Anexo N° 02: Tablas de componentes de loop sodio, cálculos de pérdidas localizadas y por fricción, fuente libro (White, 1979).

$$\Delta P_{\text{totales}} = \frac{v_1^2}{2g} \left(f \frac{L}{\phi_{\text{hid}}} + \sum K \right) (\rho g) \quad [Pa \text{ o } kPa]$$

- **Pérdida por fricción.**

Parámetro	Dimensión	Valor
Velocidad en el loop (v1)	m/seg	2
Aceleración Gravedad (g)	m/seg2	9,806
Longitud Total Loop	m	4
Diámetro Tubería (φt)	m	0,0127
Diámetro Hidráulico	m	0,0127
Viscosidad Cinemática (ν)	m2/seg	5,143E-07
Número de Reynolds (Re)	adimensional	49383
Rugosidad Típica (ε)	mm	0,002
Rugosidad Relativa (ε/φt)	adimensional	0,00015748
Factor Fricción (f): Diagrama Moody	adimensional	0,021
Pérdidas por Fricción	kPa	11,944

Tabla 17: Cálculo de parámetros de pérdidas distribuidas.

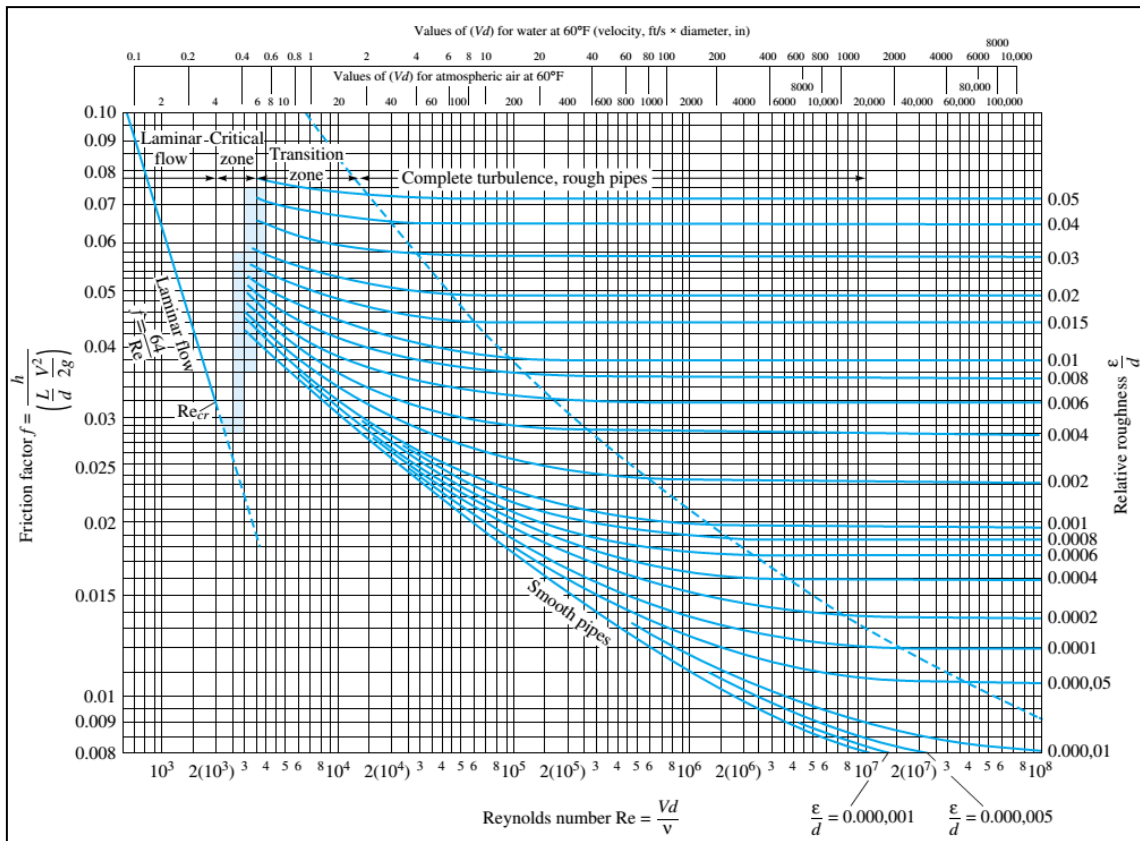


Gráfico 6: Diagrama de Moody.

Material	Condition	ϵ		Uncertainty, %
		ft	mm	
Steel	Sheet metal, new	0.00016	0.05	± 60
	Stainless, new	0.000007	0.002	± 50
	Commercial, new	0.00015	0.046	± 30
	Riveted	0.01	3.0	± 70
	Rusted	0.007	2.0	± 50
Iron	Cast, new	0.00085	0.26	± 50
	Wrought, new	0.00015	0.046	± 20
	Galvanized, new	0.0005	0.15	± 40
	Asphalted cast	0.0004	0.12	± 50
Brass	Drawn, new	0.000007	0.002	± 50
Plastic	Drawn tubing	0.000005	0.0015	± 60
Glass	—	Smooth	Smooth	
Concrete	Smoothed	0.00013	0.04	± 60
	Rough	0.007	2.0	± 50
Rubber	Smoothed	0.000033	0.01	± 60
Wood	Stave	0.0016	0.5	± 40

Tabla 18: Valores de rugosidad recomendados para tuberías comerciales.

- **Pérdida localizada en codos.**

Parámetro	Dimensión	Valor
Velocidad en el loop (v1)	m/seg	2
Aceleración Gravedad (g)	m/seg ²	9,806
Cantidad de Codos	N/A	4
Diámetro Codos	m	0,0127
Coeficiente de Pérdidas (K): tabulados	adimensional	2
Pérdidas en Codos	kPa	14,447

Tabla 19: Cálculo de parámetros de pérdidas en codos.

- **Pérdida localizada en válvulas.**

Parámetro	Dimensión	Valor
Velocidad en el loop (v1)	m/seg	2
Aceleración Gravedad (g)	m/seg ²	9,806
Cantidad de Válvulas	N/A	2
Diámetro Válvulas	m	0,0127
Porcentaje Apertura	fracción	1
Coeficiente de Pérdidas (k): tabulados	adimensional	0,3
Pérdidas en Válvulas	kPa	1,083

Tabla 20: Cálculo de parámetros de pérdidas en válvulas.

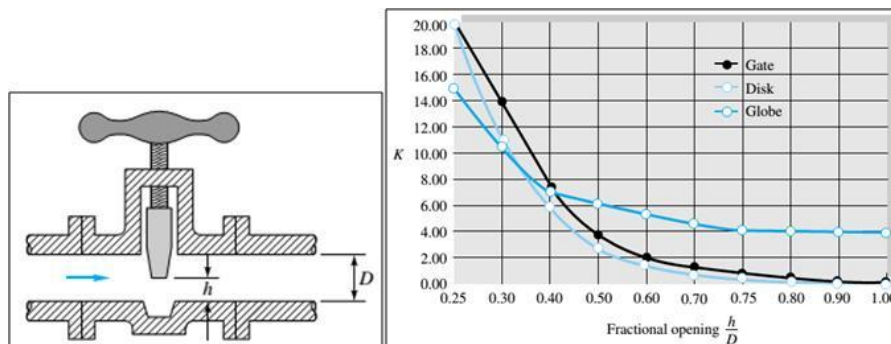


Gráfico 7: Válvula tipo compuerta, parámetros.

	Nominal diameter, in								
	Screwed				Flanged				
	$\frac{1}{2}$	1	2	4	1	2	4	8	20
Valves (fully open):									
Globe	14	8.2	6.9	5.7	13	8.5	6.0	5.8	5.5
Gate	0.30	0.24	0.16	0.11	0.80	0.35	0.16	0.07	0.03
Swing check	5.1	2.9	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Angle	9.0	4.7	2.0	1.0	4.5	2.4	2.0	2.0	2.0
Elbows:									
45° regular	0.39	0.32	0.30	0.29					
45° long radius					0.21	0.20	0.19	0.16	0.14
90° regular	2.0	1.5	0.95	0.64	0.50	0.39	0.30	0.26	0.21
90° long radius	1.0	0.72	0.41	0.23	0.40	0.30	0.19	0.15	0.10
180° regular	2.0	1.5	0.95	0.64	0.41	0.35	0.30	0.25	0.20
180° long radius					0.40	0.30	0.21	0.15	0.10
Tees:									
Line flow	0.90	0.90	0.90	0.90	0.24	0.19	0.14	0.10	0.07
Branch flow	2.4	1.8	1.4	1.1	1.0	0.80	0.64	0.58	0.41

Tabla 21: Valores de coeficiente de pérdidas para distintos elementos.

- Pérdida por transición entre loop-bomba electromagnética.

Parámetro	Dimensión	Valor
Velocidad en el loop (v1)	m/seg	2
Aceleración Gravedad (g)	m/seg ²	9,806
Coeficiente de Pérdidas (Kin): tabulados	adimensional	0,5
Coeficiente de Pérdidas (Kout): tabulados	adimensional	1
Pérdidas de Transición	kPa	2,709

Tabla 22: Cálculo de parámetros de pérdidas en codos.

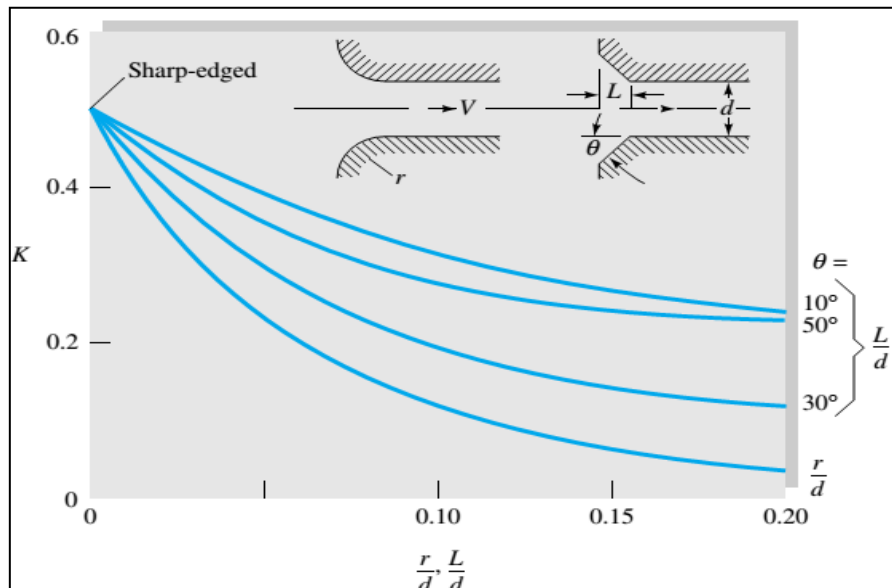


Gráfico 8: Coeficiente de pérdida de entrada y salida (las pérdidas de salida dan $k \approx 1.0$ para todas las formas de salida).

Anexo N° 03: Tablas de cálculo de parámetros de la bomba electromagnética.

Ha (Bo)	c	i	i (A)	$(1/2)*(Ha^2)*i$	Qtotal/Qh
100	2,466	0	0,000	0	1
100	2,466	0,00002	0,009	0,1	0,97114547
100	2,466	0,00004	0,018	0,2	0,94229094
100	2,466	0,00006	0,027	0,3	0,91343641
100	2,466	0,00008	0,036	0,4	0,88458189
100	2,466	0,0001	0,045	0,5	0,85572736
100	2,466	0,00012	0,054	0,6	0,82687283
100	2,466	0,00014	0,063	0,7	0,7980183
100	2,466	0,00016	0,072	0,8	0,76916377
100	2,466	0,00018	0,081	0,9	0,74030924
100	2,466	0,0002	0,090	1	0,71145471
100	2,466	0,00022	0,099	1,1	0,68260019
100	2,466	0,00024	0,108	1,2	0,65374566
100	2,466	0,00026	0,117	1,3	0,62489113
100	2,466	0,00028	0,126	1,4	0,5960366
100	2,466	0,0003	0,135	1,5	0,56718207
100	2,466	0,00032	0,144	1,6	0,53832754
100	2,466	0,00034	0,153	1,7	0,50947301
100	2,466	0,00036	0,162	1,8	0,48061848
100	2,466	0,00038	0,171	1,9	0,45176396
100	2,466	0,0004	0,180	2	0,42290943
100	2,466	0,00042	0,190	2,1	0,3940549
100	2,466	0,00044	0,199	2,2	0,36520037
100	2,466	0,00046	0,208	2,3	0,33634584
100	2,466	0,00048	0,217	2,4	0,30749131
100	2,466	0,0005	0,226	2,5	0,27863678
100	2,466	0,00052	0,235	2,6	0,24978226
100	2,466	0,00054	0,244	2,7	0,22092773
100	2,466	0,00056	0,253	2,8	0,1920732
100	2,466	0,00058	0,262	2,9	0,16321867
100	2,466	0,0006	0,271	3	0,13436414
100	2,466	0,00062	0,280	3,1	0,10550961
100	2,466	0,00064	0,289	3,2	0,07665508
100	2,466	0,00066	0,298	3,3	0,04780056
100	2,466	0,00068	0,307	3,4	0,01894603
100	2,466	0,0007	0,316	3,5	-0,0099085
100	2,466	0,00072	0,325	3,6	-0,03876303
100	2,466	0,00074	0,334	3,7	-0,06761756
100	2,466	0,00076	0,343	3,8	-0,09647209

Tabla 23: Parámetros de calculados de la bomba electromagnética.