

OPTIMIZACION DEL PROYECTO DE DUCTOS

(Metodología aplicable a Oleoductos, Poliductos y Gasoductos)

Ing. Frabotta Remo, UTN / Arcan Engineering, remo.frabotta@arcaneng.com.ar,

Ing. Gustavo Luis Cavallo, UTN / UBA/ Arcan Engineering, gustavo.cavallo@arcaneng.com.ar

INTRODUCCION

El problema del transporte de fluidos a gran distancia ha sido afrontado por la técnica desde la antigüedad y numerosos progresos han ocurridos desde entonces a nuestros días. Para muchos ingenieros mencionar la “optimización” de sistemas complejos es mas un término declamatorio que práctico, por la serie de variables que involucra y el tiempo que significa buscar por tanteos la mejor opción. Este trabajo exhibe que mediante el adecuado uso de las herramientas matemáticas, es posible ahorrar una enormidad de tiempo aplicado al análisis de alternativas y selección de la solución optima.

1 GENERALIDADES

Al proyectar un ducto destinado al transporte de fluidos a gran distancia el ingeniero debe cumplir con las premisas fundamentales impuestas en las bases del diseño (caudal, presión en cabecera, presión mínima, etc.), la geomorfología del trazado y demás condiciones requeridas.

Considerando estas premisas y condiciones y utilizando formulaciones matemáticas y programas de cálculo, se asegura que el proyecto sea apto para trasportar el caudal previsto. Sin embargo, esto no es suficiente, puesto que esta metodología no brinda información acerca del costo de transporte.

¹ 1 Ing. Frabotta Remo, UTN/Arcan Engineering, remo.frabotta@arcaneng.com.ar

¹ 2 Ing. Gustavo Luis Cavallo, UTN/UBA/ARCAN Engineering, gustavo.cavallo@arcaneng.com.ar

El general objetivo final de este tipo de proyectos debería ser transportar el fluido a un “costo mínimo”; la metodología desarrollada en el presente trabajo permitirá justamente buscar de manera rápida el proyecto de mínimo costo, denominado “Proyecto Optimo”.

Para transportar fluido por una cañería es conveniente hacerlo con alta velocidad, de esta manera resulta un diámetro de cañería menor y consecuentemente de menor costo. Sin embargo, el transporte con una alta velocidad del fluido trae como consecuencia la necesidad de impulsarlo con mayor presión, y por ende con un consumo mayor de energía de compresión o bombeo, y con compresores o bombas de mayor tamaño, lo que implica un costo mayor.

Otra variable en juego también es la cantidad de plantas de compresión o de bombeo instaladas sobre la línea, puesto que a mayor cantidad de compresores/bombas, se tiene menor salto de presión para una misma distancia de transporte, lo que por un lado aumenta el costo al aumentar el numero de plantas de compresión/bombeo, y por el otro lado disminuye el costo por disminuir el salto de presión.

Al intentar resolver el problema matemáticamente, se presenta el hecho que la cantidad de ecuaciones que condicionan al problema es menor que la cantidad de incógnitas, y en consecuencia el sistema admite infinitas soluciones. Entre las infinitas soluciones, y con la ayuda de funciones de costo obtenidas del costo de los elementos que constituyen la instalación, se obtiene el proyecto óptimo, utilizando el método matemático de máximos y mínimos condicionados desarrollado por el matemático italiano Lagrange.

La metodología presentada concluye obteniendo un conjunto de fórmulas relativamente sencillas, aplicable a muchos casos prácticos (básicamente oleoductos/poliductos y gasoductos), que permiten obtener las variables con su valor óptimo, y que se corresponden con el mínimo costo de instalación y operación.

¹ 1 Ing. Frabotta Remo, UTN/Arcan Engineering, remo.frabotta@arcaneng.com.ar

¹ 2 Ing. Gustavo Luis Cavallo, UTN/UBA/ARCAN Engineering, gustavo.cavallo@arcaneng.com.ar

3 OPTIMIZACION Y MEDIO AMBIENTE

Es fundamental destacar que todos los productos industriales son tomados básicamente de la naturaleza -materiales y energía- los cuales son transformados para encontrar un objetivo cierto. Pero estas transformaciones desde un punto de vista termodinámico son irreversibles; es decir con algún deterioro ecológico o ambiental resultante.

En términos generales la Optimización de los Sistemas bajo análisis debe significar Costo Mínimo y Consumo de Energía Mínimo, lo cual significa transformaciones irreversibles mínimas y consecuentemente un mínimo deterioro ecológico (ver diagrama en **ANEXO II**).

El objetivo fundamental de este trabajo es introducir una metodología de cálculo para obtener el “Proyecto Optimo”, lo cual tiene estricta relación con el abastecimiento continuo de fluido a los consumidores al más bajo costo. El hecho de buscar un mínimo costo, nos obliga a evaluar los costos de todos los componentes que intervienen en el sistema (o sea el ducto propiamente dicho y las instalaciones de impulsión).

Con las “herramientas” de la mecánica de los fluidos de la resistencia de los materiales y de la transmisión de calor, se elaboran funciones de costo correspondientes a todos los elementos de la instalación. A continuación, con apropiados métodos matemáticos se optimizan las variables, de tal manera que la instalación resulte de “mínimo costo”.

4 FUNCIONES DE COSTO

A fin de comenzar el verdadero objeto del trabajo y para facilitar el desarrollo matemático en la obtención de las funciones, dividiremos el costo de todo el sistema en cuatro grandes grupos de variables:

¹ 1 Ing. Frabotta Remo, UTN/Arcan Engineering, remo.frabotta@arcaneng.com.ar

¹ 2 Ing. Gustavo Luis Cavallo, UTN/UBA/ARCAN Engineering, gustavo.cavallo@arcaneng.com.ar

- Costo de la cañería (material, revestimiento, válvulas, accesorios e instalación).
- Costo (valor actual) de la energía consumida para la operación de las instalaciones de compresión/bombeo.
- Costo de las plantas de compresión/bombeo y accesorios (equipos, materiales e instalaciones).
- Costo (valor actual) del fluido necesario para llenar inicialmente la cañería.

4.1 Costo de la cañería “C₁”

El costo de la cañería depende del costo del material (o sea el correspondiente a la cañería de acero propiamente dicha y el revestimiento aislante anticorrosivo y/o térmico, las válvulas de bloqueo de línea, los accesorios varios de cañerías, etc.) y del costo de la instalación. Mediante una investigación de mercado es posible obtener los distintos costos en función del diámetro.

Para la obtención de esta función, $C_1 = f(D)$, resulta útil dividir los costos que intervienen en dos grandes grupos, uno proporcional al peso de la cañería (y que incluiría operaciones como el transporte de los caños, la descarga, el desfile y la soldadura); y otro proporcional al diámetro exterior de la cañería comprendiendo ítems como el revestimiento, el zanjeo, y la tapada.

4.2 Costo de la energía consumida en las plantas de compresión o bombeo “C₂”

Este costo es una función de la potencia necesaria en las plantas de compresión o bombeo, y del tiempo de funcionamiento. Para su incorporación a la ecuación de costos totales, el precio de la energía consumida durante el funcionamiento debe ser convenientemente actualizado con una tasa de interés oportuna (valor actual), por cuanto los pagos se van realizando periódicamente durante la vida operativa del ducto.

¹ 1 Ing. Frabotta Remo, UTN/Arcan Engineering, remo.frabotta@arcaneng.com.ar

¹ 2 Ing. Gustavo Luis Cavallo, UTN/UBA/ARCAN Engineering, gustavo.cavallo@arcaneng.com.ar

4.3 Costo de las instalaciones de compresión o bombeo “C₃”

Este costo es una función de la potencia de compresión o bombeo incluyendo la necesaria para el funcionamiento del ducto y los equipos de reserva (potencia instalada). Se deben incluir en el mismo el costo de las instalaciones periféricas (filtros, válvulas, circuitos de medición y protección, sistema de control, etc.) y el mantenimiento y/o reemplazo de partes de la planta durante todo el tiempo de funcionamiento.

4.4 Costo del producto para llenar la cañería “C₄”

Este costo es función del precio del producto a transportar (petróleo, gas natural, terminados, etc) en calidad de ingreso al ducto para el llenado inicial que posibilite el funcionamiento del conducto, que se incorpora al inicio del proyecto y que en teoría se recuperaría al final de la vida útil fijada para el proyecto. Por este motivo debe considerarse el valor actual del capital inmovilizado durante la vida operativa del ducto.

4.5 Costo total del proyecto “C_T”

Una vez obtenidas las cuatro funciones de costo, se procede a sumarlas para obtener el Costo Total del proyecto (obviamente este es un costo ficticio en términos de inversión inicial).

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 = f(D)$$

El mínimo de C_T se obtiene derivando respecto del diámetro y con esto se posibilita conocer el Diámetro Óptimo como se representa **gráficamente** en el **Anexo 1**.

La simplificación teórica expuesta para la búsqueda del Diámetro Óptimo, no es posible en forma directa en el esquema de cálculo propuesto porque las funciones de costo C₁, C₂, C₃ y C₄, no resultan función de una sola variable a optimizar (“D”), sino que son funciones de varias variables.

¹ 1 Ing. Frabotta Remo, UTN/Arcan Engineering, remo.frabotta@arcaneng.com.ar

¹ 2 Ing. Gustavo Luis Cavallo, UTN/UBA/ARCAN Engineering, gustavo.cavallo@arcaneng.com.ar

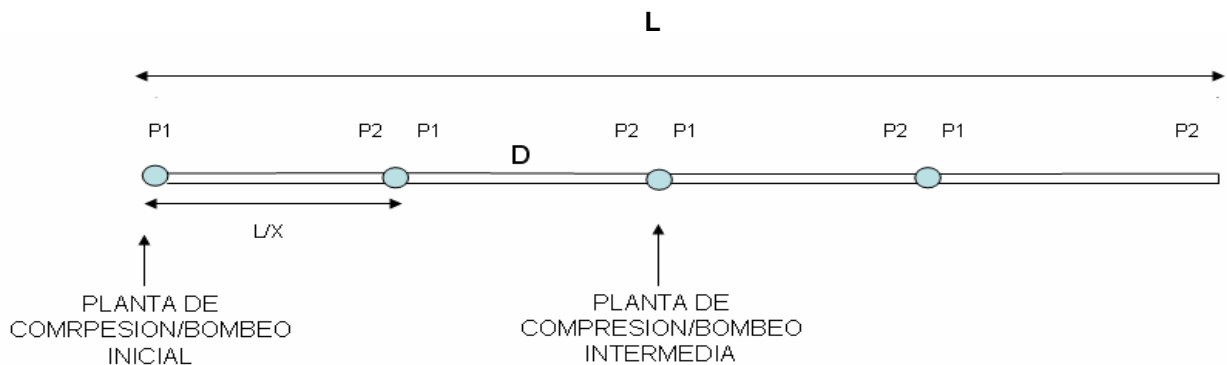
Para optimizar varias variables sujetas a condicionamientos técnicos, se aplica el método de los multiplicadores de Lagrange (también denominado de “máximos y mínimos condicionados”).

5 PLANTEO DEL PROBLEMA

La metodología para resolución de un proyecto óptimo de un ducto difiere en cierta medida si se trata de transportar un producto líquido o un producto gaseoso. En efecto el planteo de las funciones de costo en el caso de Oleoductos o Poliductos resulta idéntico (que aquí presentamos),

No obstante para productos líquidos, debe diferenciarse en la definición inicial de los parámetros característicos el caso que se trate del transporte de un producto único (por ejemplo: petróleo, o GLP o gasolina) o de una sucesión de productos líquidos (por ejemplo: gasolina y JP1 y GLP), dentro de la cañería.

En el presente trabajo se ha denominado genéricamente Oleoductos (Caso I) cuando se trate del transporte de un producto líquido único, o Poliducto (Caso II) para el caso de “batches” de distintos productos transportados sucesivamente por la misma cañería (no se desarrolla el tema de Poliductos ni Gasoductos).



¹ 1 Ing. Frabotta Remo, UTN/Arcan Engineering, remo.frabotta@arcaneng.com.ar

² 2 Ing. Gustavo Luis Cavallo, UTN/UBA/ARCAN Engineering, gustavo.cavallo@arcaneng.com.ar

6 LINEAS PARA TRANSPORTE DE LIQUIDOS

5.1 Caso I: Oleoductos

Dado un petróleo (u otro líquido) de densidad ρ y la viscosidad μ , se desea transportarlo una distancia L siguiendo una topografía determinada. Además siendo “m” la masa a transportar en un tiempo “t”, se define un caudal másico. Para lograr esto, es necesario colocar una cierta cantidad “ χ ” de estaciones de bombeo, donde a efectos del cálculo, consideramos la longitud total y la altura total, dividido por “ χ ”, quedando así definido cada tramo de cañería.

Siendo el término de pérdidas (en cada tramo) $\Delta h = f \frac{V^2}{2g} \frac{L}{D_i}$

Se obtiene
$$P_1 = P_2 + \rho g \frac{H}{\chi} + \frac{8f}{\pi^2} \frac{C_p^2}{\rho D_i^5} \bullet \frac{L}{\chi}$$

P1: Presión inicial en el tramo de cañería y salida de la planta de bombeo.

P2: Presión final en el tramo de cañería y presión de succión en la planta de bombeo.

D: Diámetro interior de la cañería

5.2 Caso I: Planteo de las funciones de costo (oleoductos)

5.2.1 Costo de la cañería C_1

Separando los costos relacionados con el peso de la cañería y los costos relacionados con la superficie exterior tenemos

$$C_1 = K_{11} \frac{1 + K_D}{2} D^2 \left(\frac{P_1}{2\sigma} \right) \pi \gamma_f L + (K_{12} + K_{13}) \pi D L$$

Siendo:

K_{11} : Costo de material de la cañería por unidad de peso (o sea por N)

K_{12} : Costo del revestimiento aislante térmico y/o anticorrosivo por m^2

K_{13} : Costo de la instalación de la cañería

γ_f : Peso específico del material de la cañería (acero)

D_m : Diámetro medio de la cañería

¹ 1 Ing. Frabotta Remo, UTN/Arca Engineering, remo.frabotta@arcaneng.com.ar

¹ 2 Ing. Gustavo Luis Cavallo, UTN/UBA/ARCA Engineering, gustavo.cavallo@arcaneng.com.ar

D : Diámetro exterior de la cañería

K_D : Relacion $\frac{Di}{D}$

5.2.2 Costo de la energía consumida para el funcionamiento de las instalaciones de bombeo C_2

La energía que se consumirá depende de la potencia de las estaciones de bombeo; el

costo de la energía resulta $C_2 = K_{02} K_2 \frac{N}{\eta_m} X t$

$$C_2 = K_{02} K_2 \frac{t}{\eta_m \eta_B} \frac{C_\rho}{\rho} \left(\rho \cdot g \cdot \frac{H}{x} + \frac{8f}{\pi^2} \frac{C_\rho^2}{\rho x} \frac{L}{K_D^5 D^5} \right) X$$

Siendo:

η_B : Rendimiento de las bombas

η_m : Rendimiento del motor de accionamiento (Eléctrico, Térmico)

N : Potencia de las bombas en Kw aplicada al bombeo durante la operación

t : Tiempo de funcionamiento de las instalaciones en horas

K_2 : Costo unitario de la energía en Kw-h

K_{02} : Coeficiente de actualización del costo de la energía (valor actual)

X : Numero de plantas de bombeo, incluyendo la de cabecera

5.2.3 Costo de las plantas de bombeo C_3

Esta función no es lineal con la potencia de las plantas de bombeo. Para simplificar los cálculos suponemos una función lineal, valida dentro de un cierto rango de potencia

$$C_3 = \left[K_{03} + \frac{K_3}{\eta_B} \frac{C_\rho}{\rho} \left(\rho \cdot g \cdot \frac{H}{x} + \frac{8f}{\pi^2} \frac{C_\rho^2}{\rho x} \frac{L}{K_D^5 D^5} \right) \right] X$$

¹ 1 Ing. Frabotta Remo, UTN/Arcan Engineering, remo.frabotta@arcaneng.com.ar

¹ 2 Ing. Gustavo Luis Cavallo, UTN/UBA/ARCAN Engineering, gustavo.cavallo@arcaneng.com.ar

Siendo:

K_{03} : Constante (valor fijo) que representa el costo del terreno y de las instalaciones auxiliares.

K_3 : Costo medio unitario de potencia de las estaciones de bombeo.

N : Potencia instalada de los equipos de bombeo (inclusive las en “Stand By” o redundantes).

5.2.4 Costo del producto utilizado para llenar el oleoducto C_4

Es necesario evaluar asimismo el costo del “capital de trabajo” (producto de llenado inicial) sin el cual el sistema no podría funcionar

$$K_{04} K_4 K_D^2 \frac{\pi D^2}{4} L \quad C_4 = K_{04} K_4 \frac{\pi D_i^2}{4} L$$

Siendo:

K_4 : Costo unitario del producto a transportar\$/m³

K_{04} : Coeficiente de actualización de costo

5.2.5 Costo total

Costo total C_T de la instalación y operación del sistema se obtiene de la sumatoria de los costos antedichos

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$$

Se trata de buscar el mínimo de la función C_T condicionado con la función de flujo incompresible a régimen permanente, dada por la mecánica de los fluidos

$$P_1 = P_2 + \rho g \frac{H}{\chi} + \frac{8f}{\pi^2} \frac{C_\rho^2}{\rho D_i^5} \frac{L}{\chi}$$

¹ 1 Ing. Frabotta Remo, UTN/Arcan Engineering, remo.frabotta@arcaneng.com.ar

¹ 2 Ing. Gustavo Luis Cavallo, UTN/UBA/ARCAN Engineering, gustavo.cavallo@arcaneng.com.ar

La presión P_1 es coincidente con la presión de salida de las plantas de bombeo y la presión P_2 , coincidente con la presión de succión de las bombas, (que debe limitarse por razones de cavitación en las bombas y/o cañerías).

Para simplificar los desarrollos matemáticos, en las funciones de costo C_1 , C_2 y C_3 reemplazamos las variables, siendo:

e : espesor de la cañería

D_i : diámetro interior de la cañería

D_m : diámetro medio de la cañería

D : diámetro exterior de la cañería

Por resistencia de los materiales
$$e = \frac{P_1 D}{2\sigma} \quad D_m = \frac{1 + K_D}{2} D$$

Las funciones quedan de la forma:
$$\varphi = (P_1 - P_2) - \left(\rho g \frac{H}{\chi} + \frac{8f}{\pi^2} \frac{C_\rho^2}{\rho K_D^5 D^5} \frac{L}{\chi} \right)$$

$$C_T = K_{11} \frac{1+K_D}{2} \frac{\pi}{2\sigma} P_1 D^3 L \gamma_f + (K_{12} + K_{13}) \pi D L + \left(\frac{K_{02} K_2 t}{\eta_m \eta_b} + \frac{K_3}{\eta_b} \right) \frac{C_\rho}{\rho} \left[\rho g H + \frac{8f C_\rho^2 L}{\pi^2 \rho K_D^5 D^5} \right] + K_{03} x + K_{04} K_4 K_D^2 \frac{\pi D^2}{4} L$$

5.3 Optimización de variables (oleoductos)

En este caso estudiado las incógnitas a optimizar son:

- D : diámetro exterior de la cañería
- P_1 : presión máxima en la cañería
- χ : cantidad de plantas de bombeo, incluyendo la de cabecera.

Para buscar el mínimo de la función C_T , condicionado a la función φ utilizamos el método de los multiplicadores de Lagrange.

Con este método se obtienen tres ecuaciones que, junto con la ecuación de condición φ forman un sistema de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas: $D; P_1; \chi; \lambda$

¹ 1 Ing. Frabotta Remo, UTN/ArcaN Engineering, remo.frabotta@arcaneng.com.ar

² 2 Ing. Gustavo Luis Cavallo, UTN/UBA/ARCA N Engineering, gustavo.cavallo@arcaneng.com.ar

$$\begin{aligned}
1) \quad & \frac{1+K_D}{2} K_{11} D^2 \gamma_f L \frac{\pi}{2\sigma} + \lambda = 0 \\
2) \quad & K_{03} + \frac{\lambda}{\chi^2} \left(\rho g H + \frac{8 f C_\rho^2 L}{\pi^2 \rho K_D^5 D^5} \right) = 0 \\
3) \quad & P_1 = P_2 + \rho g \frac{H}{\chi} + \frac{8 f C_\rho^2 L}{\pi^2 \rho K_D^5 D^5} \frac{L}{\chi} \\
4) \quad & \left(\frac{1+K_D}{2} K_{11} \frac{\pi}{\sigma} P_1 \gamma_f + K_{04} K_4 K_D^2 \frac{\pi}{2} \right) D + (K_{12} + K_{13}) \pi - \left(\frac{K_{02} K_2 t}{\eta_B \eta_m} + \frac{K_3}{\eta_B} \right) \frac{40 f C_\rho^3}{\pi^2 \rho^2 K_D^5 D^6} + \lambda \frac{40 f C_\rho^2}{\pi^2 \rho K_D^5 \chi D^6} = 0
\end{aligned}$$

Dado lo complicado de resolver estas ecuaciones, se resuelven por aproximaciones sucesivas, estimado un diámetro D

$$\text{De (1)} \quad (-\lambda) = \frac{1+K_D}{2} K_{11} D^2 \gamma_f L \frac{\pi}{2\sigma}$$

$$\text{De (2)} \quad \chi = \left[\frac{-\lambda}{K_{03}} \left(\rho g H + \frac{8 f C_\rho^2 L}{\pi^2 \rho K_D^5 D^5} \right) \right]^{1/2}$$

De (3) Se calcula P₁

Luego se verifica el D adoptado con la ecuación (4)

6 CONCLUSIONES

El método propuesto pretende cumplimentar las exigencias de utilización racional de los recursos y posibilidades efectivas de cálculo, siendo que la mayoría de los datos utilizados están usualmente disponibles en las empresas del sector, si bien algunos de ellos eventualmente requieran una acotada investigación de mercado.

Dada la importancia mayúscula que tienen los sistemas de transporte por ductos dentro de la industria de hidrocarburos líquidos y gaseosos nunca serán suficientes los esfuerzos que se hagan para lograr la mayor racionalidad económica al momento de proyectar un nuevo sistema.

¹ 1 Ing. Frabotta Remo, UTN/Arcan Engineering, remo.frabotta@arcaneng.com.ar

² 2 Ing. Gustavo Luis Cavallo, UTN/UBA/ARCAN Engineering, gustavo.cavallo@arcaneng.com.ar

El presente no es el primer tratamiento que se da al tema. Los métodos de optimización en la industria de los hidrocarburos y en el transporte de fluidos en particular son ya de larga data. No obstante este nuevo enfoque es el de una revisión actualizada en su lenguaje matemático y fundamentalmente en la cantidad de variables optimizadas simultáneamente, con un alcance que, como se ha expuesto, puede ser fácilmente ampliado a distintos tipos de sistemas de transmisión de fluidos a distancia (oleoductos, poliductos, acueductos, mineraloductos, etc) y adaptado a las condiciones locales en términos de unidades, normas, valores usuales, etc.

7 BIBLIOGRAFIA Y NOTA FINAL

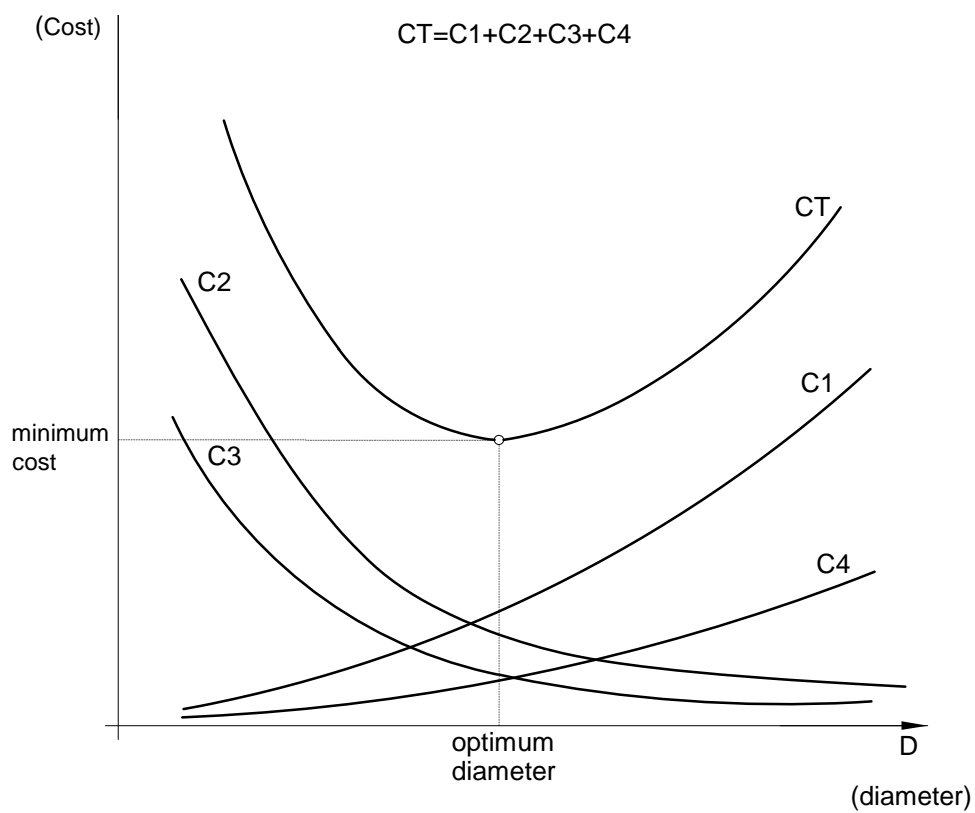
El presente trabajo se basa en clases de los cursos de grado (Transporte de Fluidos por Tuberías y Mecánica de los Fluidos) desarrollados principalmente en la Universidad Tecnológica Nacional, y en los cursos de postgrado en la UBA (IGPUBA/FiUBA) dictados por los autores durante mas de 30 años de actividad docente universitaria ininterrumpida.

Cabe destacar que el presente texto es un “parcial” extractado de los textos preliminares del libro “Optimización del Transporte de Fluidos por Tuberías” en vías de preparación por los autores.

¹ 1 Ing. Frabotta Remo, UTN/Arcan Engineering, remo.frabotta@arcaneng.com.ar

¹ 2 Ing. Gustavo Luis Cavallo, UTN/UBA/ARCAN Engineering, gustavo.cavallo@arcaneng.com.ar

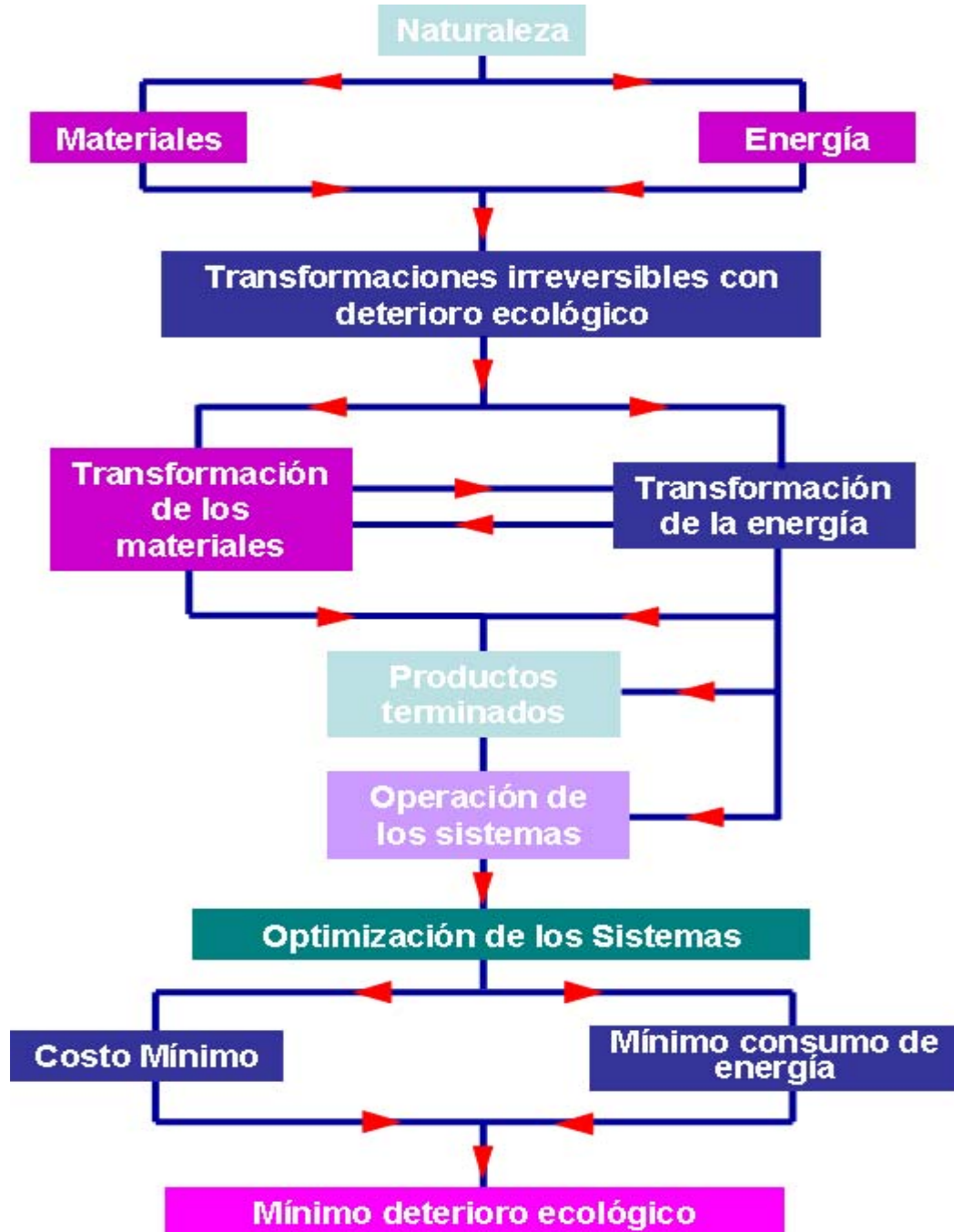
ANEXO 1



¹ 1 Ing. Frabotta Remo, UTN/Arcan Engineering, remo.frabotta@arcaneng.com.ar

¹ 2 Ing. Gustavo Luis Cavallo, UTN/UBA/ARCAN Engineering, gustavo.cavallo@arcaneng.com.ar

ANEXO II



¹ 1 Ing. Frabotta Remo, UTN/Arca Engineering, remo.frabotta@arcaneng.com.ar

¹ 2 Ing. Gustavo Luis Cavallo, UTN/UBA/ARCA Engineering, gustavo.cavallo@arcaneng.com.ar

¹ 1 Ing. Frabotta Remo, UTN/Arcan Engineering, remo.frabotta@arcaneng.com.ar

¹ 2 Ing. Gustavo Luis Cavallo, UTN/UBA/ARCAN Engineering, gustavo.cavallo@arcaneng.com.ar