

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIMI
Facultad de
Ingeniería Mecánica
e Industrial

Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías Ambientales

TRABAJO DE DIPLOMA

Estudio del transporte del calor residual de los grupos
electrógenos Santa Clara 110 a la UEB Matadero "Chichi Padrón".

Autor: Julio Pérez Ruíz

Tutor: Ing. Yaniel Garcia Lovella

Santa Clara, Junio de 2018
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419



Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial
Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías ambientales

Trabajo de diploma

Estudio del transporte del calor residual de los grupos electrógenos Santa Clara 110 a la UEB Matadero “Chichi Padrón”.

Autor: Julio Pérez Ruíz

Tutor: Ing. Yaniel Garcia Lovella

Santa Clara
2018



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Mecánica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Tutor

Firma del Jefe de
Departamento donde se
defiende el trabajo

PENSAMIENTO

PENSAMIENTO

“Solo tenemos un futuro, y estará hecho de nuestros sueños, si tenemos la valentía de enfrentarnos a las convenciones.”

Soichiro Honda

DEDICATORIA



DEDICATORIA

*A mis padres María de los Ángeles y Leonel,
Por su apoyo incondicional durante todo mi proceso de formación vocacional y
durante toda mi vida.
A toda mi familia y personas que estuvieron a mi lado durante todo mi proceso
de formación,
Ya que fueron un pilar fundamental para soportar las adversidades y lograr llegar
a la meta.*

AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS

Agradezco sinceramente:

Principalmente a mis padres, pues gracias a ellos pude cumplir uno de mis mayores sueños. Gracias por acompañarme durante todo el camino, aconsejarme, apoyarme incondicionalmente e inculcarme, con su ejemplo, la importancia del estudio y la adquisición constante de conocimientos. Gracias por ser los dos más importantes pilares de mi vida, por estar cuando más los necesité y por ser los dos grandes seres humanos y padres que son. Gracias, simplemente, por darme la vida, solo espero tenerlos mucho más tiempo en mi vida para seguir compartiendo mis logros con ustedes, pues aquí solo termina una etapa de mi vida para empezar otra.

A mis hermanos Miguel y Tania por ser parte de mi vida y por ayudarme a ser quien soy hoy. A mi hermano Andrés por su apoyo durante toda mi vida y durante el proceso de realización de la tesis

A Marlén por su ayuda durante todos estos años y aunque no fue un camino fácil, crecimos juntos.

A mis tías y tíos, por estar presentes y ayudar en todo lo que le fue posible durante este largo proceso.

A mi abuela Ana y a mi abuela Clara aunque ya no esté presente quiero que sepa lo agradecido que estoy por su apoyo y sus horas y horas de charla brindándome su sabiduría.

A mi prima Adriana, Michel y Eliané por ser un apoyo emocional muy fuerte durante estos últimos años.

A todas las personas que han estado presentes en mi formación brindándome su ayuda incondicional. Todos ellos han ocupado una parte importante en mi corazón.

A todos mis amigos de la UCLV con los cuales he forjado lazos que nunca se romperán, gracias por los magníficos momentos que vivimos y por su apoyo.

A todo el personal de la empresa UEB Matadero y la refinería de petróleo Camilo Cienfuegos de Cienfuegos por su apoyo durante el proceso de confección de la tesis. En especial a Serguei, Marta, Piñón, Lobelles, Tito, Freddy y Ernesto, por darme la oportunidad de formar parte de algo especial.

A todos mis profesores por su esfuerzo y ayuda en mi formación como profesional.

A todas las personas que no forman parte de estas líneas porque en el momento de escribirlas se me olvidó pero que tienen un lugar especial en mi corazón así que no se sientan excluidas.

A todos muchas gracias y espero que estén a mi lado por mucho más tiempo.

RESUMEN

RESUMEN

Hoy en día enfrentamos un problema energético mundial. Esto se debe al agotamiento de los principales portadores energéticos, los combustibles fósiles. El presente trabajo demostró que la cogeneración es una solución agradable para frenar el consumo de los combustibles. Con el software informático PIPEPHASE 9.6 se diseñó un sistema de transporte de vapor. Este sistema consiste en una tubería de acero st 37.0 que transportará calor residual mediante un flujo de vapor. La demanda de vapor de la empresa UEB Matadero “Chichi Padrón” es de 1 276.27 kg/h durante cuatro horas al día, de lunes a sábado, a una presión de 686.6 kPa y a una temperatura de 164 °C. El 41 % del vapor generado una vez condensado debe ser desechado producto a que se contamina con sustancias de limpieza. Para cubrir la demanda en los Grupos Electrógenos Santa Clara 110 un flujo de vapor de 1 276.27 kg/h a una presión de 854.98 kPa a una temperatura de 210 °C. Durante la simulación de la tubería se observó que el fluido se presentaba de tres formas (en una fase, estratificado y anular).

ABSTRACT

ABSTRACT

Today we face a global energy problem. This is due to the depletion of the main energy carriers, fossil fuels. The present work showed that cogeneration is a pleasant solution to stop the consumption of fuels. With the computer software PIPEPHASE 9.6, a steam transport system was designed. This system consists of a st 37.0 steel pipe that will transport waste heat through a steam flow. The steam demand of the company UEB Matadero "Chichi Padrón" is 1 276.27 kg / h for four hours a day, from Monday to Saturday, at a pressure of 686.6 kPa and at a temperature of 164 °C. 41% of the steam generated once condensed must be discarded product that is contaminated with cleaning substances. To cover the demand in the Santa Clara Generating Sets 110, a steam flow of 1 276.27 kg / h at a pressure of 854.98 kPa at a temperature of 210 °C. During the simulation of the pipeline, it was observed that the fluid appeared in three ways (in one phase, stratified and annular).

ÍNDICE

ÍNDICE

Contenido

PENSAMIENTO.....	6
DEDICATORIA	8
AGRADECIMIENTOS.....	10
RESUMEN	13
ABSTRACT	15
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	4
Fundamentación teórica de la investigación	4
Cap. I: Fundamentación teórica de la investigación.....	5
1.1- Introducción a los sistemas de transporte de calor.....	5
1.1-1. Clasificación.	7
1.2- Antecedentes de los sistemas de transporte de calor en Cuba y en el mundo.....	11
1.3- Descripción de los principales componentes de un sistema de transporte de calor.....	12
1.4- Índice económico.....	13
1.5- Caracterización de la demanda.....	14
1.6- Metodologías para el cálculo del sistema de transporte de calor.....	15
1.6-1. Metodología desarrollada por AESA.....	16
1.6-2. Software informático PIPEPHASE 9.6.....	21
1.7- Conclusiones parciales.....	22
Capítulo II	23
Diseño de un sistema de transporte de vapor	23
Capítulo II: Diseño de un sistema de transporte de vapor	24
2.1- Introducción.....	24
2.2- Análisis geográfico del caso de estudio (Planta Santa Clara 110 – Matadero Sub Planta).....	24
2.3- Caracterización de la demanda.....	24
2.4- Diseño de un sistema de transporte de calor.....	27
2.4.1 Metodología usada.....	27
2.4.2 Búsqueda de datos.....	30
2.4.3 Trabajo con PIPEPHASE 9.6	32
2.5- Conclusiones parciales.....	35
Capítulo III	36
Análisis de los resultados.....	36
CAPÍTULO III: Análisis de los resultados.....	37
3.1 Introducción	37
3.2- Cálculo del diámetro económico.....	37
3.3- Análisis de los resultados obtenidos en PIPEPHASE 9.6.....	39
3.4 Colocación de las trampas de vapor y apoyos de la tubería.....	43
3.6- Conclusiones parciales.....	44
Conclusiones generales.....	46
Recomendaciones	48

Bibliografía.....50

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la humanidad vive en un mundo donde la energía es un factor clave para alcanzar altos estándares de desarrollo. Sin embargo, el principal problema radica en la vertiginosa velocidad a la que son consumidas las fuentes primarias de energía. El indiscriminado consumo de fuentes primarias energéticas de origen fósil han conducido al incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Según (Arroyo, 2006) las concentraciones de los GEI alcanzan niveles preocupantes en cuanto a su potencial para causar el cambio climático. Según (Rezaie and Rosen, 2012) una acción importante para abordar los desafíos energéticos y medioambientales radica en el uso racional y eficiente de la energía. Incluyendo la utilización de la energía térmica con bajo contenido exergético; así como el uso de combustibles con bajas emisiones de carbono. La cogeneración es una forma de hacer un uso racional y eficiente de la energía.

La cogeneración, por sus siglas en Inglés (CHP, Combined Heat and Power), es la generación de calor y potencia simultáneamente, a partir de una misma fuente primaria de energía (Rosen et al., 2005). Dentro de las ventajas que tiene la cogeneración se encuentra el aumento de la eficiencia energética, esto se debe al aprovechamiento tanto del calor (para procesos de la propia empresa) como de la energía eléctrica (para el consumo de la empresa y vender a la red). De acuerdo a (Gustafsson et al., 2010) para una planta de cogeneración el factor de utilización es cercano al 90%, pues la mayor parte de la energía residual es transportada y luego utilizada por un usuario final. El incremento en la eficiencia de la quema del combustible y la efectividad de los equipos de transferencia de calor trae consigo lo siguiente:

- Cubrir la demanda energética en una mayor medida.
- Incrementar el nivel de satisfacción de los usuarios.

La cogeneración es una alternativa económicamente viable, que además permite disminuir el consumo de combustible y por lo tanto reducir las emisiones de GEI (Klimstra, 2008). Las nuevas tecnologías han permitido que la

cogeneración sea una alternativa económicamente atractiva, incluso en aplicaciones a pequeña escala en comunidades o sitios aislados. El Parlamento Europeo (Directive, 2004) reconoció la cogeneración como un método para impulsar la eficiencia de los sistemas energéticos y disminuir las emisiones de GEI. Un sistema de cogeneración bien diseñado permite aumentar el factor de utilización por encima de un 80% (Heat, 2000). Por ejemplo, la planta de cogeneración de Győr en Hungría basada en un motor de gas tiene un factor de utilización de un 81.5%, el 43.1% de la energía del combustible se convierte en electricidad y el 38.4% en calor para la calefacción de viviendas (Klimstra, 2008). Un ejemplo de cogeneración presente en nuestro país se encuentra en la industria azucarera, donde se genera vapor sobrecalentado en una caldera, luego se expande en una turbina, generando energía eléctrica, este sale casi a la temperatura de saturación y luego es enviado al proceso de producción de azúcar.

En la provincia de Villa Clara, municipio Santa Clara existe un potencial de cogeneración alto entre las empresas: Planta Santa Clara 110 y UEB Matadero “Chichi Padrón” (ver Anexo 1). En los grupos electrógenos Santa Clara 110 existe calor residual disponible producto de la quema de HFO (Heavy Fuel Oil) en los motores de combustión interna para la generación de electricidad. En sus instalaciones cuentan con una caldera recuperadora, que usa parte del calor residual proveniente de los gases de escape para generar vapor, que luego es utilizado para calentar el fuel oil.

En la UEB Matadero “Chichi Padrón” se utiliza cantidades de vapor considerables para llevar a cabo las siguientes actividades económicas:

- Producir de forma mayorista carnes y sus derivados de distintos tipos y calidades, carnes frescas, carnes en conservas y grasas.
- Obtener y elaborar de forma mayorista subproductos comestibles y no comestibles como cuero, sebo, astas, pesuñas, bilis, pelos y harina animal.

Lo cual evidencia una posible potencial de cogeneración entre ambas

entidades. Para que esto sea posible es necesario el diseño y construcción de un sistema de transporte de calor, que haga posible comunicar al posible productor de vapor (Planta Santa Clara 110) y el consumidor (UEB Matadero “Chichi Padrón”). Según (Guía de referencia técnica) un sistema de distribución de vapor consiste en el enlace entre la fuente generadora de vapor y el usuario. Dicha fuente, debe proporcionar vapor de buena calidad en las condiciones de caudal y presión requeridas, esto con las mínimas pérdidas de calor y atenciones de mantenimiento. Para que esto se cumpla es de suma importancia un correcto diseño de este.

Problema de ingeniería:

¿Cómo disminuir el consumo de fuel oil en la UEB Matadero “Chichi Padrón”, producto al consumo de calor en el proceso de elaboración de subproductos en dicha entidad?

Objetivo general:

Diseñar un sistema de transporte de calor desde la central de generación de electricidad “Santa Clara 110” a la UEB Matadero “Chichi Padrón”.

Objetivos específicos:

- ✓ Realizar una búsqueda bibliográfica relacionada a las principales características de los sistemas de transporte de calor y metodologías de diseño.
- ✓ Caracterizar la demanda de portadores energéticos de la UEB Matadero “Chichi Padrón”.
- ✓ Diseñar el sistema de transporte de calor desde la central de generación de electricidad “Santa Clara 110” a la UEB Matadero “Chichi Padrón”.

CAPÍTULO I

Fundamentación teórica de la investigación

Cap. I: Fundamentación teórica de la investigación.

1.1- Introducción a los sistemas de transporte de calor.

Un sistema de transporte de calor consta de tres subsistemas principales: fuente de energía térmica (para calefacción, refrigeración o ambos), distribución de energía térmica y usuarios finales (consumidores)(Weber et al., 2007). En este caso, la fuente de energía térmica se consideraría a la caldera recuperativa de Santa Clara 110 que utiliza el calor residual de los motores de combustión interna de los grupos electrógenos. La distribución de energía térmica se realizaría por medio de tuberías aisladas y el usuario final sería la UEB Matadero “Chichi Padrón”. Dicho vapor generado en la caldera recuperativa sería usado para calentar el agua en el escaldado de subproducto (pata, panza, ubre), calentamiento del sebo en el proceso de elaboración de jabones y se puede calentar agua para la limpieza de pisos, equipos y utensilios de trabajo.

Los componentes para una red de distribución de calor típico se pueden categorizar como se muestra a continuación(Weber et al., 2007).

- Planta de producción de energía térmica: esta planta genera calor en forma de vapor o agua caliente para satisfacer las necesidades de calefacción de los clientes. La energía térmica puede obtenerse de plantas de calefacción o plantas de cogeneración. Las plantas de calefacción por lo general implican la quema de una variedad de combustibles (como el gas natural, el petróleo, los desechos de madera y la turba) o la utilización de energía térmica reutilizada (Institute, 1992). Otras fuentes de energía para producir calor son los recursos geotérmicos y la energía térmica proveniente del sol (Institute, 1992, Diamant and Kut, 1981). Las plantas de cogeneración convierten el combustible en electricidad y energía térmica útil simultáneamente. En las plantas de cogeneración, el calor residual se suministra para aplicaciones industriales. También se utiliza para calentar edificios en las cercanías a través de un sistema de distribución de calor (Diamant and Kut, 1981).

- Red de tuberías de transporte y distribución de energía térmica: el calor de las centrales térmicas se transfiere a los consumidores a través de un fluido portador de calor en las tuberías de suministro. Luego de suministrada la energía, vuelve a la fuente a través de tubos de retorno (Diamant and Kut, 1981). La pérdida de calor en una red de tuberías es un elemento crítico en el diseño de un sistema de transporte y uso de la energía. Las pérdidas de calor, mezcladas con las cargas del cliente, determinan el tamaño de la fuente de calor (Diamant and Kut, 1981, Handbook, 2009, Bohm, 1990, Bohm, 1991, Borgström and Böhm, 1996).
- Consumidores: el sistema de calefacción urbana está diseñado para las situaciones de carga de usuarios finales. Esta carga consiste en casas unifamiliares, casas multifamiliares, edificios grandes, edificios comerciales, edificios institucionales, edificios industriales, oficinas y hospitales (Rezaie and Rosen, 2012). Pero también pueden ser pequeñas industrias...

El sistema de transporte y uso de calor involucra la calefacción y refrigeración de edificios múltiples, en la cual el calor y / o el frío se distribuyen haciendo circular agua caliente o vapor a baja presión a través de tuberías subterráneas (İbrahim and Rosen, 2007). Las redes de dicho sistema incorporan un sistema subterráneo de tuberías desde una o más fuentes centrales a usuarios industriales, comerciales y residenciales (Summerton, 1992, Marinova et al., 2008). El calor suministrado a los edificios también se puede utilizar para producir frío (o para la refrigeración), mediante la adición de una bomba de calor o un enfriador de absorción (Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado) (Handbook, 2009). El sistema de transporte y uso de calor puede proporcionar beneficios como el incremento de la eficiencia, reducción de impactos ambientales y económicos a las comunidades que utilizan esta forma de energía (Nijjar et al., 2009). Según (Difs et al., 2009) estos sistemas suelen exhibir impactos ambientales más bajos en comparación con los sistemas

convencionales; también utilizaron el método para el análisis de carga de calefacción para demostrar que, con el aumento de las aplicaciones en los procesos industriales se produce un aumento de la eficiencia energética.

La fuente de energía para los sistemas de calefacción urbana pueden ser combustibles fósiles o renovables, y los sistemas mixtos que combinan dos o más fuentes de energía, como gas natural, desechos de madera, desechos sólidos urbanos y calor residual industrial, suelen ser económicamente más atractivos (Rosen et al., 2005). Persson y Werner (Persson and Werner, 2011) consideran que los suministros de calor para los sistemas de transporte y uso de calor, incluyen el calor de las plantas de cogeneración, de conversión de residuos en energía (WTE), biomasa y energía geotérmica, así como el exceso de calor industrial. Esto hace que a los sistemas de transporte de energía sean flexibles siendo esto una gran ventaja. La energía térmica que necesita la red de transporte de energía a menudo es suministrada por una planta, pero la energía residual industrial puede ser una alternativa atractiva porque permite que se dividan los costos de depreciación y mantenimiento de la central eléctrica (Trygg et al., 2006). Los combustibles fósiles solían ser las principales fuentes de generación de energía (Holmgren, 2006), pero los sistemas híbridos que combinan tecnologías de energía renovable o alternativa (como colectores solares y bombas de calor), la poligeneración, el almacenamiento estacional de calor y sistemas de biomasa han comenzado a utilizarse como fuente de energía alternativa (Philibert, 2005).

1.1-1. Clasificación.

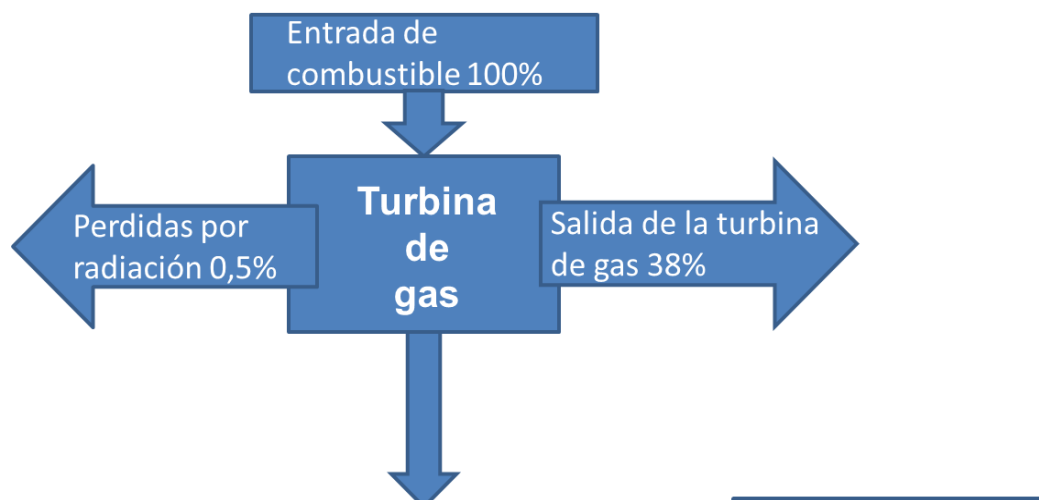
Los sistemas de transporte de energía se categorizan en función de diferentes aspectos. Una agrupación se deriva del agente de transporte: vapor a baja presión, agua caliente y aire caliente. Otra clasificación se basa en la cantidad de energía térmica transportada: calefacción. Una categorización adicional del sistema de calefacción de distrito puede basarse en el tipo de recursos de calor: usar una fuente de energía separada para el calor o usar energía / calor residual. El ejemplo más práctico de este último tipo de red térmica es uno que usa calor y potencia combinados (CHP), ya que el calor cogenerado (producido por la

generación de electricidad) puede ser utilizado para calentar edificios cercanos (Rezaie and Rosen, 2012).

Dado que el trabajo consiste en diseñar un ducto para transportar el calor residual de una empresa a otra, considerándose la cogeneración como una solución para disminuir los consumos de fuel oil, se dará una clasificación de las plantas de cogeneración según (Kleinbach and Hinrichs, 2002):

Ciclo principal (Topping cycle): tiene por objetivo principal producir electricidad y como objetivo secundario aprovechar parte de los calores residuales de la máquina térmica como energía útil en procesos térmicos secundarios. Se genera vapor en una caldera (utilizando la quema de combustibles o calor residual). Luego este vapor es trasladado a una turbina a contrapresión que acciona un generador para generar electricidad. Para así utilizar luego el vapor que sale de la turbina para la calefacción de proceso o de poblaciones. En la figura 1 se representa un sistema de cogeneración de turbina de gas general (Rezaie and Rosen, 2012).

Ciclo de abatimiento: el vapor del ciclo, que ya ha sido utilizado en otro proceso industrial, pasa a través de una turbina de vapor de baja presión para producir electricidad.



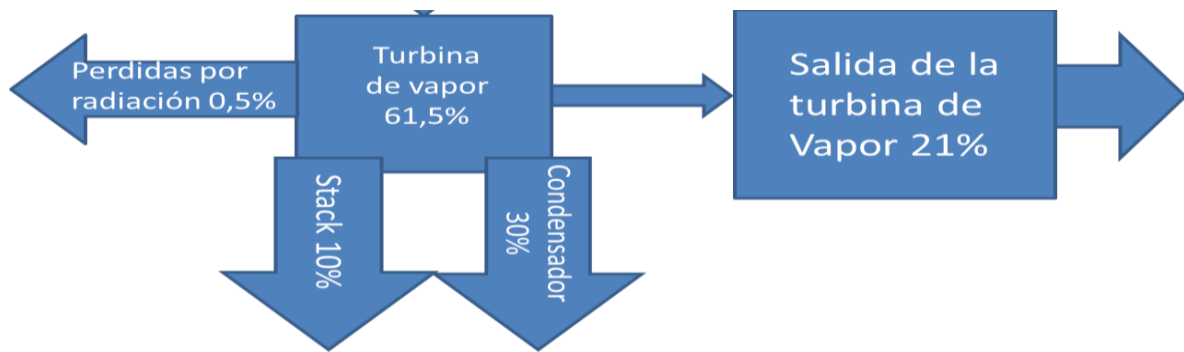
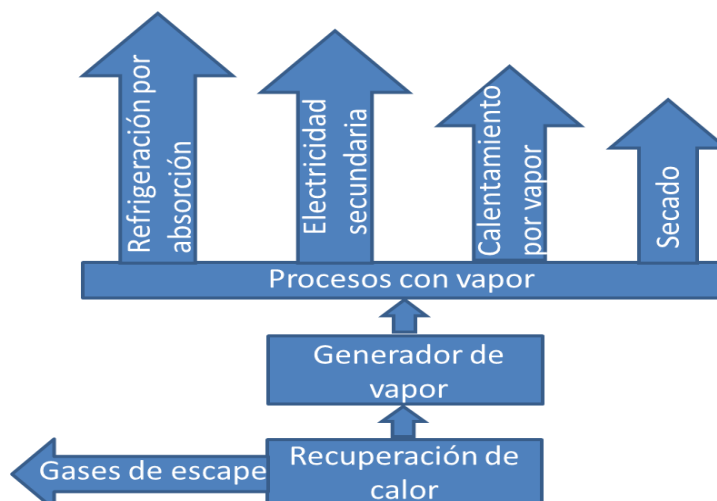


Figura 1.1.1.1 Ilustración de la cogeneración utilizando una central eléctrica de ciclo combinado, que incluye una turbina de gas y una turbina de vapor, así como un desglose de los flujos de energía. Adaptado (por el autor) de Boyce (Boyce).

Según (Rezaie and Rosen, 2012) una planta de cogeneración general que produce simultáneamente varias formas de energía a partir de una única fuente se ilustra en la figura 2. En este esquema podemos observar con mayor calidad el caso que estamos estudiando. En los grupos electrógenos Santa Clara 110 se genera electricidad a partir de generadores de fuel oil. Los gases de escape pasan por una caldera recuperativa donde el calor de estos es transferido al agua para generar vapor. Luego este vapor sería enviado al UEB Matadero para los procesos de limpieza, lavado y cocción de subproductos.



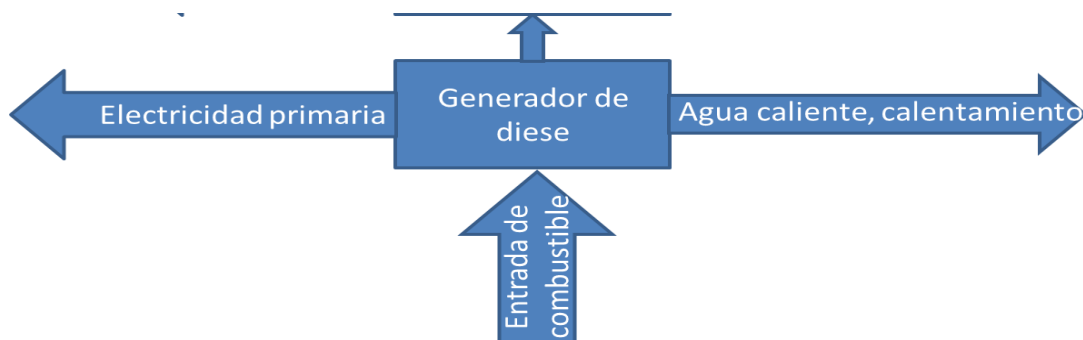


Figura 1.1.1.2 Esquema de una planta de cogeneración general. Adaptado (por el autor) de Hinrichs y Kleinbach (Kleinbach and Hinrichs, 2002).

Los sistemas de cogeneración pueden clasificarse también por tipo, según (Boyce) de la siguiente manera:

- **Cogeneración de servicios públicos:** estos sistemas suelen tener unidades grandes con los sistemas de transporte y uso de calor y, a menudo, están financiados parcialmente por el municipio.
- **Cogeneración industrial:** fábricas de papel, plantas petroquímicas, fábricas de vidrio, fábricas textiles y otras plantas industriales que son operadas por entidades del sector privado se encuentran en esta categoría.
- **Desalinización:** el uso de procesos híbridos de cogeneración / desalinización puede reducir los costos de desalinización. Las instalaciones de cogeneración de desalinización producen electricidad y agua de mar desalinizada; generalmente son grandes. Los procesos de desalinización a menudo son una buena opción para la cogeneración, ya que los generadores de electricidad y el evaporador de múltiple efecto de la unidad de destilación funcionan con vapor a alta presión y a baja presión respectivamente. El uso de vapor para estos dos procesos reduce significativamente el consumo de combustible en comparación con las

operaciones separadas. Este tipo de cogeneraciones se usa en Medio Oriente y el Norte de África, donde la desalinización es común.

1.2- Antecedentes de los sistemas de transporte de calor en Cuba y en el mundo.

Los sistemas de transporte de energía se han utilizado en Europa desde el siglo XIV, con un sistema geotérmico de calefacción urbana en funcionamiento continuo en Francia (estación térmica de Chaudes-Aigues) desde ese momento (Lemale, 1999). La Academia Naval de los EE. UU. Construyó el primer sistema de transporte de energía en su campus de Annapolis en 1853, y el sistema de calefacción del distrito comercial en Nueva York se construyó en 1877 (Marinova et al., 2008). El primer sistema de transporte de energía en Canadá se construyó en el núcleo comercial de Winnipeg en 1924 (Marinova et al., 2008).

Los países del norte de Europa son los principales usuarios de los sistemas de transporte de energía. Por ejemplo, Suecia ha instalado un sistema de calefacción poblacional de 40 TWh que suministró más de la mitad de la capacidad de calefacción del país en el año 2000 (Gebremedhin, 2003). El porcentaje de hogares con calefacción poblacional es de alrededor del 65% en Letonia y Lituania. Debido al uso de las redes de transporte de energía, el uso de petróleo e hidroelectricidad ha caído alrededor del 10% en Noruega (Pavlas et al., 2006).

En la UEB Matadero “Chichi Padrón” ubicada en la Carretera a Subplanta, s/n e/ CUPET y Circunvalación, Municipio Santa Clara. Provincia Villa Clara, desde 1975 utiliza el vapor para los procesos de limpieza y cocción de la entidad (Anexo 2). La refinería de petróleo “Camilo Cienfuegos” de Cienfuegos, fundada en 1989 con la ayuda de la antigua URSS y luego reactivada con la ayuda del ALBA el 21 de diciembre de 2007, usaba el vapor para los procesos de refinación de petróleo y para turbinas con un sistema básico, pero luego, paso a ser empresa mixta gracias a una inversión extranjera modernizando el sistema de transporte de calor a uno con controles automáticos vigilados, en tiempo real, desde las máquinas de los tecnólogos aumentando la eficiencia del sistema. El proceso es automatizado

en su totalidad presentando a su vez controles manuales en el caso de falla de estos. El vapor se genera en la casa de calderas y distribuidos mediante la red de transporte de calor a los consumidores (Anexo 3). Las condiciones del vapor son $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $13\text{ Kg}/\text{cm}^2$, consta con 3 calderas de $25\text{ ton}/\text{h}$. El índice de generación es de $10,5\text{ T}_{\text{vapor}}/\text{m}^3$ de fuel oil o sea para generar 10,5 toneladas de vapor se consume 1 m^3 fuel oil.

1.3- Descripción de los principales componentes de un sistema de transporte de calor.

Como habíamos expresado anteriormente sistema de transporte de calor está formado por tres componentes principales: fuente de energía térmica, distribución térmica y usuarios finales. Tomaremos el caso del sistema de transporte de calor del UEB Matadero “Chichi Padrón” (ver Anexo 2).

Fuente de energía térmica: Dicha fuente de energía térmica está compuesta por dos calderas pirotubulares certificadas por ALASTOR, de las cuales está operativa una sola 4 h al día, 5 días a la semana, a continuación se muestran los datos de chapa:

Caldera 1:

Modelo: ENCAC-1-1

Presión: $12\text{ Kg}/\text{cm}^2$

Generación de vapor: $1500\text{ kg}/\text{h}$

Volumen: 5.9 m^3

Estos eran los datos de chapa legibles, pues esta es la caldera más antigua y es la que no se encuentra en funcionamiento.

Caldera 2:

Modelo: CMS/L 1500

Presión: $7.6\text{ Kg}/\text{cm}^2$

Generación de vapor: 1500 kg/h

Volumen: 5.9 m^3

Temperatura: 195 °C

Dicha caldera posee un quemador moderno con sistema de precalentamiento para el combustible. Esta caldera es encendida y se mantiene generando vapor hasta que alcanza la presión de trabajo (7 Kgf/cm^2) para luego enviarlo a la producción.

Distribución térmica: Este está compuesto por un distribuidor de vapor y un conjunto de tuberías de distintos diámetros aisladas al medio (el aislamiento está en mal estado) que llevan el vapor desde las calderas hasta las distintas áreas de la empresa, donde es utilizada para: calentar el agua de duchado en la máquina de escardado de patas, calentamiento del cebo en el proceso de elaboración de jabones, calentar agua en la lavandería y limpieza de pisos, equipos y utensilios de trabajo.

Usuarios finales: Los consumidores de la entidad son la lavandería, los tachos de cocción de pata, de estómagos, de ubre y de sebo, este último para la fabricación de jabón, consume vapor también las lavadoras de los subproductos anteriormente mencionados. También se consume vapor para la limpieza de los locales y utensilios de trabajo los cuales, por normas, se limpian cada dos días.

Aunque en Cuba el desarrollo de los UAV es bastante escaso, debido a las disímiles aplicaciones que estos poseen, es de interés del Grupo de Automatización, Robótica y Percepción (GARP) el desarrollo e implementación de autopilotos para estos vehículos. Estos autopilotos se implementan utilizando tecnología de bajo costo.

1.4- Índice económico.

A la hora de realizar un proyecto ingenieril, no se puede concebir el mismo, sin un estimado de costo donde se exponga el costo de inversión de dicho proyecto y el tiempo de recuperación de esta inversión. El análisis económico de

un proyecto para un proceso industrial, constituye un complejo estudio de cada uno de los eslabones que contribuyen a la actividad económico-productiva. Dicho análisis, permite determinar si la inversión proyectada es capaz de satisfacer los requerimientos que la han originado y si es o no, económicamente factible, valorando objetivamente los resultados (Ulrich, 1988).

Para un mejor entendimiento de esto, según el diccionario de la Real Academia Española, se muestra una definición de costo y de estimación:

Costo

- Cantidad que se da o se paga por algo.

Estimación

- Aprecio y valor que se da y en que se tasa y considera algo.
- La que se realiza en ciertos tributos para determinar el valor de la base imponible.

Teniendo en cuenta lo antes expuesto y según (Bonilla Monzón, 2011) el estimado de costo consiste en: el valor o aprecio supuesto que tiene o se le da a un producto o servicio, volviéndose este supuesto, lo más cercano a la realidad, dependiendo de la cantidad y calidad de la información disponible para estimarlo.

1.5- Caracterización de la demanda.

Según (Rodríguez, 2009a) la caracterización de la demanda consiste en describir el uso de cada uno de los portadores energéticos por parte del hotel para cumplir con su objeto social que es la atención a los clientes. En dicha tesis el autor grafica los portadores energéticos (electricidad, gas licuado, combustible diésel, gasolina regular y especial, fuel oil, lubricantes y grasas) contra costo y % acumulado. Luego decide hacer un estudio más exhaustivo de los dos portadores energéticos de mayor costo (electricidad y gas licuado). En este estudio caracteriza los equipos consumidores de cada uno de estos portadores energéticos y el consumo de dichos equipos.

En el caso de (Rodríguez, 2009b) realiza una caracterización de la demanda en el Hospital Provincial Universitario "Camilo Cienfuegos Gorrirán" de Sancti Spíritus donde grafica cada uno de los portadores energéticos (electricidad, fuel oil, gas licuado (GLP), diesel) consumidos por la entidad contra el consumo en toneladas de combustible convencional (tcc) y el porcentaje que representa del consumo total de la entidad. Al igual que la tesis anterior describe cada uno de los equipos consumidores y el consumo de cada uno de ellos.

La tesis de (Ramsarran, 2016) consiste en realizar la caracterización de la demanda del Hospital Militar Cmdte Manuel Piti Fajardo para la futura implementación de la norma ISO 50001. Como en los casos anteriores describe los portadores energéticos usados en la entidad así como su consumo total en toneladas en el año 2015 y su equivalencia en tcc.

Con lo antes expuesto, y basándome en el principal objeto de estudio, la caracterización de la demanda que se realizará en el matadero consistirá en un estudio de la demanda de vapor de la entidad. Donde se caracterizará cada uno de los equipos, consumidores de vapor, existentes en la entidad. Me centraré solo en la demanda de vapor porque es necesario saber con exactitud cuánto requiere la entidad para un correcto funcionamiento.

1.6- Metodologías para el cálculo del sistema de transporte de calor.

Las tuberías, en la actualidad, juegan un papel importante dentro del ámbito industrial y fuera del mismo, esto se debe que brindan la posibilidad de transportar sustancias de un punto a otro con un menor costo de operación. Las sustancias transportadas comúnmente son líquidos, gases y vapor; pero son usadas además, en menor medida, en el transporte de sustancias sólidas mediante un impulso neumático. Los sistemas de transporte de calor están principalmente compuestos por las tuberías, así como otros accesorios tales como codos, válvulas, entre otras.

Es de suma importancia una correcta realización de los cálculos para diseñar un sistema de transporte de calor. Esto se debe a que un mal cálculo traería

consigo problemas tales como sobredimensionamiento o subdimensionamiento. Según (Sarco, 2006)

Sobredimensionar las tuberías significa que:

- Las tuberías serán más caras de lo necesario.
- Se formara un mayor volumen de condensado a la causa de las mayores
- pérdidas de calor.
- La calidad de vapor y posterior entrega de calor será más pobre, debida al
- mayor volumen de condensado que se forma.
- Los costos de instalación serán mayores.

Subdimensionar las tuberías significa que:

- La velocidad del vapor y la caída de presión serán mayores, generando una
- presión inferior a la que se requiere en el punto de utilización.
- El volumen de vapor será insuficiente en el punto de utilización.
- Habrá un mayor riesgo de erosión, golpe de ariete y ruidos a la causa del aumento de velocidad.

Por lo antes expuesto, se pretende, en este subepígrafe seleccionar una metodología para una correcta realización de los cálculos.

1.6-1. Metodología desarrollada por AESA.

La siguiente metodología de cálculo para tuberías fue de desarrollada por la empresa AESA (empresa dedicada a Ingeniería, Construcciones y Servicios que integra las actividades de ingeniería, fabricación, construcción, operación y mantenimiento de plantas y yacimientos; dirigida principalmente a los sectores del Petróleo, el Gas y la Petroquímica perteneciente a REPSOL YPF.) en una aplicación EXEL (Listado de conexiones). Dicha aplicación consta de dos partes, en primer lugar se describen los cálculos generales, comunes para todos los

fluidos y en segundo lugar se describen los cálculos y propiedades específicos para los distintos fluidos Base de cálculo de tuberías.

El método de cálculo general para cualquier fluido a presión sigue los siguientes pasos:

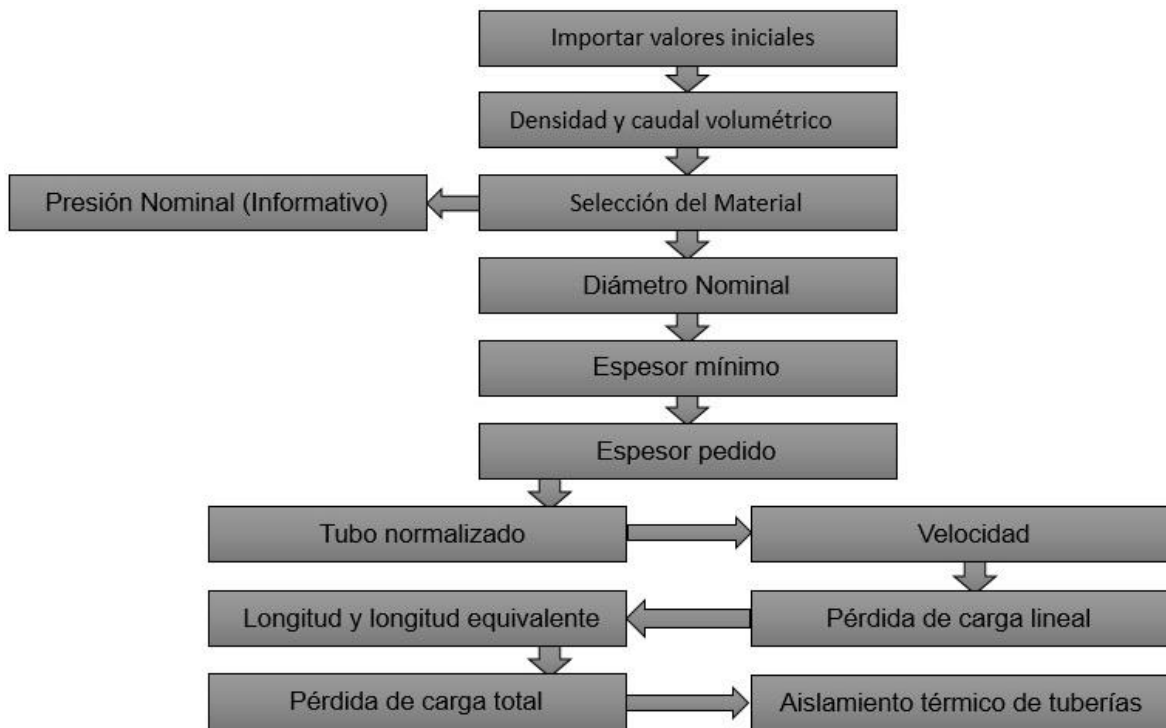


Figura 1.6.1.1 Pasos a seguir para desarrollar la metodología de AESA. Elaboración propia.

La metodología desarrollada por AESA consiste en a partir del fluido (agua, vapor, gas natural, gases de escape, fuel óleo, aceite térmico) obtener datos como: presión de dicho fluido (P , kPa), temperatura (T , °C), caudal másico (q , t/h). Luego se busca la densidad en tablas entrando, dependiendo del estado del vapor (saturado o sobrecalentado), con la presión y la temperatura. Después se calcula el caudal volumétrico (m^3/h) con la división del caudal másico (t/h) y la densidad (kg/m^3).

La selección del material se realiza según la temperatura de diseño del fluido, debiéndose tener en cuenta que la tubería nunca deberá trabajar a temperaturas por encima del valor máximo aceptable del material. Según la norma que se elija (ANSI o DIN) esta empresa ofrece una amplia variedad de materiales tabulados. Se pretende usar la norma DIN para la selección del material de la tubería (Anexo 4).

El cálculo del diámetro nominal está dado por la raíz cuadrada de 4 veces el caudal másico (kg/s) entre π por la velocidad (m/s). Las velocidades máximas de trabajo habitualmente aceptadas para el vapor de agua son: para el vapor saturado 40 m/s y para el vapor sobresaturado 50 m/s. Luego el diámetro es normalizado (ver tabla 1.6.1.1) tomando el valor inmediato superior al resultado obtenido.

Tabla 1.6.1.1 Diámetros nominales normalizados. Fuente: Norma DIN.

DN	
(")	(mm)
3/8	10
1/2	15
3/4	20
1	25
1 (1/4)	32
1 (1/2)	40
2	50
2 (1/2)	63
3	80
4	100
5	125
6	150
8	200
10	250
12	300
14	350
16	400
20	500
24	600

El resultado del espesor calculado mínimo (sin márgenes ni tolerancias), depende del diámetro, la presión de diseño y la tensión admisible del material. La tensión admisible esta tabulada y está dado por el material y la temperatura al que es sometido el mismo (ver Anexo 4). Luego este espesor mínimo se puede calcular (a decisión del usuario) según la norma ANSI (ASME B31.1) o la norma DIN (UNE-EN 13480-3). Luego a este espesor mínimo se le suma el margen de corrosión, valor absoluto de la tolerancia negativa (obtenido por norma o facilitado por el fabricante), margen de adelgazamiento y la rugosidad del tubo para obtener el espesor pedido.

Para cada diámetro nominal de tubería (DN), existen diferentes tuberías normalizadas con distintos espesores. Una vez determinado el diámetro nominal y el espesor pedido, y según la normativa considerada (europea: DIN, americana: ANSI), se debe encontrar la tubería normalizada con un espesor inmediatamente superior al calculado. Para normalizar la tubería se utilizará la tabla de la norma europea DIN (ver Anexo 5).

La velocidad (m/s) del fluido está dada por 4 veces el caudal volumétrico (m^3/s) entre π por el diámetro (m) al cuadrado. Esta velocidad no podrá ser superior a la velocidad máxima admisible para cada fluido. Luego se calcula la pérdida de carga lineal por las siguientes fórmulas:

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{L} = \lambda \times \frac{u^2 \times \rho \times p_1}{d} \quad \text{Ec. 1.6.1.1}$$

Donde:

- u : velocidad (m/s)
- p : presión (Pa)
- ρ : densidad (kg/m^3)
- d : diámetro (m)
- L : longitud (m)
- λ : coeficiente de rozamiento

El coeficiente de rozamiento expresa la oposición al deslizamiento que ofrecen las superficies de dos cuerpos en contactos. Este coeficiente está dado por factores como la viscosidad dinámica ($kg/m \cdot s$), el diámetro interior de la tubería (m) y la rugosidad. El coeficiente es adimensional. La rugosidad se expresa dependiendo del tipo de tubería en la siguiente tabla:

Tabla 1.6.1.2 Rugosidad de algunos tipos de tubería. Fuente: Norma DIN.

Clase de tubo	k en mm
Acero	
Sin indicaciones expresas	0.5
Sin costura. Nuevo	0.03-0.06
Roscado. Nuevo	0.04-0.1
Galvanizado. Nuevo	0.1-0.15
Oxidado o con incrustaciones leves	0.2-0.5
Con incrustaciones	0.5-2
Fundición	
Sin indicaciones expresas	1.5
Nuevo	0.1-0.15
Oxidado o con incrustaciones leves	0.5-1.5
Con incrustaciones	1.5-4
Cobre	0.002
Plástico	0.01
Hormigón	3

Luego se calcula la longitud equivalente. La relación L/D es la longitud equivalente en diámetros de tubería recta que causa la misma pérdida de presión que el obstáculo, en las mismas condiciones de flujo (Crane). Para el cálculo de la longitud equivalente, en el Anexo 6 se dan los valores de L/D para distintos tipos de válvulas usuales y diferentes accesorios habituales en los trazados de líneas.

La pérdida de carga lineal para fluidos compresibles se expresa en su forma cuadrática, para obtener la pérdida de carga total se debe resolver la ecuación $\frac{p_1^2 - p_2^2}{L}$, siendo p_2 la única incógnita (en Pa). Finalmente sólo se debe convertir p_2 en bar y realizar la resta de $p_1 - p_2$.

Cuando se selecciona el aislamiento se hace por una tabla donde aparece el tipo de aislante y el espesor recomendado para una temperatura dada.

Ventajas y desventajas:

Esta metodología es de fácil uso; se selecciona el diámetro nominal a partir de la velocidad económica y luego es normalizado (Según norma DIN o ANSI). Se selecciona el material a partir de la temperatura del fluido (Según norma DIN o ANSI). Solo calcula la caída de presión y las pérdidas de carga lineal. No tiene en cuenta las pérdidas por transferencia de calor.

1.6-2. Software informático PIPEPHASE 9.6.

Pipephase es un simulador de flujo multifásico en estado estacionario que permite simular pozos, tuberías, y redes de tuberías, tanto para el transporte de hidrocarburos como de agua y vapor. Este simulador cuenta con una interfaz de usuario que facilita la construcción de modelos y el análisis de resultados, además de contar con un módulo para optimización de flujo en redes de conducción de fluidos (García-Gutiérrez et al.).

Pipephase basa sus métodos de cálculos en modelos matemáticos tradicionales que describen el flujo de fluidos y la transferencia de calor. Para resolver sistemas de redes de tuberías el sistema realiza en primer lugar, un balance de masa con el fin de obtener un valor preciso de la distribución de los caudales. El proceso iterativo de resolución del sistema de ecuaciones se detiene cuando el error entre las presiones estimadas y las calculadas es igual a cero o se aproxima a cero. En este software el proceso de definición del sistema de tuberías se realiza gráficamente, mediante el empleo de iconos y líneas que representan fuentes o llegadas de flujo y tuberías respectivamente. También pueden representarse variados equipos de procesos utilizados en el transporte y distribución de fluidos tales como bombas, compresores, válvulas, intercambiadores de calor, entre otros. (Invensys, 2009)

Con la ayuda de pipephase logras ver el comportamiento del fluido a lo largo de la tubería. Esto hace posible un mejor entendimiento de lo que ocurre dentro de las tuberías. Dentro de los datos que podemos obtener, encontramos las temperaturas y las presiones a la entrada y a la salida de la tubería, la velocidad del fluido, entre otras cosas.

Ventajas y desventajas.

El software no te da a elegir un diámetro económico del tubo, ni el espesor del mismo dado a que son valores que debes introducir. No tiene la conductividad de los materiales ni de los aislantes. Calcula con mayor exactitud la caída de presión. Tiene en cuenta la transferencia de calor y permite un mejor análisis de resultados.

1.7- Conclusiones parciales.

Luego de una exhaustiva revisión bibliográfica se arriba a las siguientes conclusiones:

1. La cogeneración es una opción agradable debido a que se puede generar dos o más servicios con una misma fuente primaria de energía. Haciendo esta fuente más eficiente y a su vez dañando en menor medida al medio ambiente ya que las emisiones de los GEI son menores. Aminorando a su vez, los costos de la producción de vapor.
2. La red de transporte de calor se diseñará mediante el software informático PIPEPHASE 9.6 con ayuda de la metodología desarrollada por AESA.

Capítulo II

Diseño de un sistema de transporte de vapor

Capítulo II: Diseño de un sistema de transporte de vapor

2.1- Introducción.

En este capítulo con los conocimientos adquiridos en las literaturas especializadas se pretende diseñar la red de tuberías encargadas de la distribución del calor. Con ayuda del software informático PIPEPHASE 9.6 y la metodología de cálculo elaborada por AESA. Para ello se necesita realizar un análisis geográfico del caso. Además se utiliza una caracterización de la demanda de vapor de los equipos consumidores de la empresa UEB Matadero. Por último es necesario la búsqueda de datos para introducir en el programa.

2.2- Análisis geográfico del caso de estudio (Planta Santa Clara 110 – Matadero Sub Planta).

En el anexo 1 podemos observar que entre las dos empresas hay 6 pases de calle y una distancia de 688 m. Se decidió que las tuberías pasarán por debajo de la carretera y las trampas de vapor drenarán el condensado al suelo. En el anexo 7 podemos observar el perfil de elevación proporcionado por el software informático Google Earth Pro. Del tramo de tubería de 0 a 300 m la pendiente de mayor inclinación es de un 3,8 %. Del tramo de 300 a 455 m el suelo no tiene elevación y de 455 a 581 m la mayor pendiente es de 2,5%. Luego el tramo de 581 la mayor pendiente es de -1,7%.

En el anexo 8 se puede apreciar el perfil de elevación a el que va a estar expuesto la tubería. Se tuvo en cuenta para esto las mayores elevaciones del terreno anteriormente expuesta.

2.3- Caracterización de la demanda.

El vapor es generado en la caldera y luego se distribuye por una red de transporte de calor hasta cada uno de los consumidores (Tachos de cocción de patas, de estómagos, de ubre y de sebo; lavadoras de patas y de patas y de estómagos; así como en el proceso de limpieza de equipos y lavandería) como se

muestra en el anexo 2 (ver Anexo 2). Se utilizará la caracterización de la demanda realizado en la tesis de Lenier Pérez Martín.

Según (Martín, 2016) a la hora de calcular el calor necesario para cada uno de los equipos se necesita el calor específico (C_p) de cada producto (ver tabla 2.3.1). Luego realizar un cálculo del C_p medio (ver tabla 2.3.2) de cada equipo para realizar un balance energético (ver tabla 2.3.3). Donde solo se realizará hasta la parte donde se haya el flujo de vapor (kg/h) necesario en cada equipo.

Tabla 2.3.1. Calor específico de cada producto (Martín, 2016).

Cálculo del C_p de los materiales manejados				
Contenido en 1000 g de porción comestible				
Nutriente	Patas	Estómagos	Ubre	Sebo
Hc	0	0	0	0
Proteínas	212	130	177	91
Grasas	135	43	124	388
Cenizas	5	4	4	2
Agua	648	823	695	519
C_p (Kj/Kg°C)	3.248	3.705	3.374	2.954

El cálculo del C_p se lleva a cabo con la fórmula siguiente:

$$C_p = 1.424 \cdot X_{Hc} + 1.549 \cdot X_P + 1.675 \cdot X_{Gra} + 0.847 \cdot X_{H_2O} \quad \text{Ec. 2.3.1}$$

Tabla 2.3.2. Cálculo del C_p medio (Martín, 2016).

Balance energético								
Necesidades tecnológicas	Mtotal (Kg)	M (agua)	Mi	Tiempo(hrs)	Flujo (Kg/h)	C_p (agua)	C_{pi}	C_{pm} (KJ/Kg°C)
Lavadora de patas	2850	2000	850	2.5	1140	4.174	3.248	3.898
Tacho cocción de patas	2550	1700	850	3	850	4.174	3.248	3.865
Lavadora de estómagos	3770	2600	1170	2.5	1508	4.174	3.705	4.029
Tacho cocción de estómagos	3510	2340	1170	3	1170	4.174	3.705	4.018
Tacho cocción de ubre	1925	1200	725	2	962.5	4.174	3.374	3.873
Tacho cocción de sebo	1355	940	415	1.5	903.3	4.174	2.954	3.800
Lavandería	3000	3000	0	2	1500	4.174	0	4.174
Limpieza	5000	5000	0	2	2500	4.174	0	4.174

Donde M_{total} es la masa total manejada por cada equipo en un día de trabajo. M es la masa de agua con la que trabaja cada equipo en un día laboral y M_i es la masa de producto manejada por cada equipo en un día laboral. C_{pm} es el calor específico medio de cada equipo. El flujo másico de cada equipo está dado por la división de $M_{total}/tiempo$.

En la ecuación siguiente podremos observar el cálculo del C_{pm} para cada equipo:

$$C_{pm} = \frac{M_a}{M_t \cdot C_{p_a}} + \frac{M_i}{M_p \cdot m} \quad \text{Ec. 2.3.2}$$

Donde M_a masa del agua, M_t masa total, M_i masa del producto. C_{p_a} calor específico del agua y m es el flujo másico total en cada equipo. Luego a continuación de la tabla anterior el autor con la temperatura inicial y final del agua en los equipos, calcula el consumo de vapor de cada uno de ellos (ver tabla 2.3.3) mediante la siguiente fórmula.

$$m_v = \frac{m \cdot C_{pm} \cdot (T_2 - T_1)}{\lambda_v} \quad \text{Ec. 2.3.3}$$

Tabla 2.3.3. Continuación de la tabla 2.3.2(Martín, 2016).

t1	t2	Consumo
(°C)	(°C)	de vapor
		(Kg/h)
25	65	85.86
25	100	119.04
25	65	117.39
25	100	170.31
25	100	135.05
25	100	124.38
25	90	196.59
25	90	327.65
Total		1,276.27

Donde el total del consumo diario promedio de la empresa es de 1,276.27 kg/h. Una vez obtenido los consumos horarios de cada equipo se realiza una distribución porcentual del calor con la ayuda del siguiente diagrama de pastel:

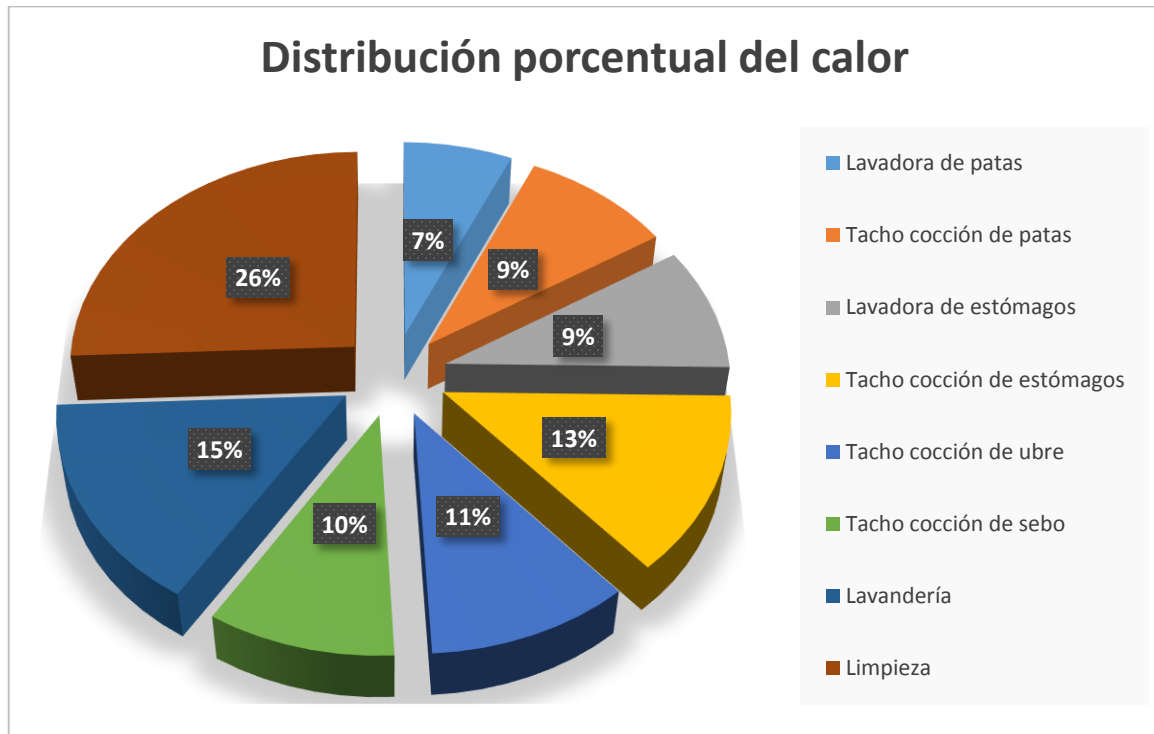


Gráfico 2.3.1. Distribución porcentual del calor. Elaborado por el autor.

En el gráfico podemos observar que el mayor flujo de calor está destinado a las labores de limpieza y a la lavandería de la empresa UEB Matadero. Esto hace que el condensado del 41 % del vapor necesario no se pueda recuperar, porque se contamina en estas labores.

2.4- Diseño de un sistema de transporte de calor.

Antes de comenzar el trabajo en el software informático PIPEPHASE 9.6 es necesario buscar una serie de datos. Estos deben ser introducidos en el programa para obtener un resultado.

2.4.1 Metodología usada.

El método de cálculo usado por el programa se dará a continuación según (García-Gutiérrez et al.):

Cálculo de la caída de presión en tuberías por el software Pipephase.

Lo primero que calcula el software es la caída de presión en estado estable para flujos en dos fases en un tubo de longitud L y diámetro d , se obtiene de:

$$\left(\frac{dp}{dL}\right) = \left(\frac{dp}{dL}\right)_f + \left(\frac{dp}{dL}\right)_g + \left(\frac{dp}{dL}\right)_{ac} \quad \text{Ec. 2.4.1.1}$$

El término de la izquierda se refiere a la pérdida total de presión en el tubo, el primer término de la derecha es la pérdida de presión debida a la fricción, el segundo es la caída de presión por gravedad o elevación y el último representa las pérdidas de presión debidas a la aceleración del flujo. Las pérdidas por fricción relacionan el esfuerzo cortante en la pared del tubo y el factor de fricción de Darcy-Weisbach (o de Moody). En el simulador Pipephase este factor de fricción se define como cuatro veces el factor de Fanning. Con esto, la ecuación anterior quedaría de esta manera:

$$\left(\frac{dp}{dL}\right) = \left(\frac{f_D \rho v^2}{2d}\right) + (\rho g \sin \theta) + \left(\frac{\rho v dv}{dL}\right) \quad \text{Ec. 2.4.1.2}$$

Donde f es el factor de fricción, ρ la densidad del fluido, v la velocidad del fluido, g la aceleración de la gravedad y θ el ángulo de la tubería desde la horizontal. La condensación de vapor en un tubo da lugar a flujo en dos fases y así, en la ecuación anterior el factor de fricción y las propiedades físicas se sustituyen por sus equivalentes para flujo en dos fases:

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_{2\phi} = \left(\frac{f_M \rho_M v_M^2}{2d}\right) + (\rho_M g \sin \theta) + \left(\frac{\rho_M v_M dv_M}{dL}\right) \quad \text{Ec. 2.4.1.3}$$

El factor de fricción de Moody f se basa en el No. de Reynolds sin-deslizamiento, definido por:

$$Re = \left(\frac{\rho_M v_M d}{\mu_{ns}}\right) \quad \text{Ec. 2.4.1.4}$$

La densidad de la mezcla y la viscosidad para el caso de no deslizamiento están dadas por:

$$\rho_M = \rho_L H_L + \rho_g (1 - H_L) \quad \text{Ec. 2.4.1.5}$$

$$\mu_{ns} = \mu_L H_L + \mu_g (1 - H_L) \quad \text{Ec. 2.4.1.6}$$

Donde H_L es el colgamiento de líquido. La caída de presión debida a la elevación está dada por:

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_g = \rho_M g \sin \theta \quad \text{Ec. 2.4.1.7}$$

La caída de presión por aceleración es despreciable, excepto para flujo niebla (mist) y está dada por:

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_{ac} = \frac{v_M v_{sg} \rho_M}{p} \left(\frac{dp}{dL}\right)_T \quad \text{Ec. 2.4.1.8}$$

Donde v_{sg} es la velocidad superficial del gas, $(dp/dL)_T$ es el gradiente total de presión, v_M la velocidad de la mezcla y ρ_M es la densidad de la mezcla para el caso de no deslizamiento de fases. Para patrón de flujo estratificado, las pérdidas por fricción están dadas por:

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_f = \left(\frac{f \rho_g v_g^2}{2 d_h}\right) \quad \text{Ec. 2.4.1.9}$$

Donde f es el factor de fricción de Moody basado en el número de Reynolds, el cual a su vez está definido por:

$$Re = \left(\frac{\rho_g v_g d_{hg}}{\mu_g}\right) \quad \text{Ec. 2.4.1.9}$$

Donde d_{hg} y μ_g son el diámetro hidráulico y la viscosidad de la fase gaseosa. Luego d_{hg} está definida por:

$$d_{hg} = d \frac{[2\pi - (\delta - \sin\delta)]}{2\pi - \delta + d \sin(\delta/2)} \quad \text{Ec. 2.4.1.10}$$

Donde d es el diámetro de la tubería y δ es el ángulo subtendido por la interfaz del gas en el centro de la tubería. Las pérdidas de presión por elevación y por aceleración están dadas por la misma expresión que para flujo burbuja.

La ecuación para pérdidas de presión en accesorios Δp está dada por:

$$\Delta p = \frac{kG^2\Phi}{2\rho g} \quad \text{Ec. 2.4.1.11}$$

Donde k es el coeficiente de resistencia, G es el flujo másico/área, F es un multiplicador de flujo en dos fases, g es la aceleración por gravedad y ρ es la densidad del fluido. Después se calcula las pérdidas de calor que se dan a lugar en la tubería. Para un tubo aislado, la pérdida de calor por unidad de longitud hacia el medio ambiente es la suma de la transferencia de calor por convección (Q_{cv}/L) y radiación (Q_r/L) que a su vez es igual a la suma de la conducción a través de sistema tubo-aislante y la convección interna (Q_{cd}/L).

$$Q = U A D_i (T_{sat} - T_{\infty}) \quad \text{Ec. 2.4.1.12}$$

Donde T_{sat} es la temperatura del vapor saturado y T_{∞} es la temperatura media ambiente y U es el coeficiente global de transferencia de calor. Esta metodología es muy completa y exacta. Además el software una vez simulado la red de tuberías da la posibilidad de crear un reporte en Microsoft Excel donde se obtiene una gran variedad de datos además de un comportamiento del fluido por segmentos de tubería.

2.4.2 Búsqueda de datos

Cálculo del diámetro económico.

El primer paso a seguir para el calcular el diámetro económico, es buscar la potencia requerida para mover el fluido (W_r). La fórmula para calcular la potencia requerida es (Yunus A. Cengel):

$$W_r = \frac{m \cdot \Delta p}{\rho} \quad \text{Ec. 2.4.1.1}$$

Donde m es el flujo másico de vapor (kg/s). El Δp es la caída de presión (KN/m²) y ρ es la densidad (kg/m³). Esta tabla es necesaria porque se posee los precios unitarios de cada kg de acero st 37.0. Para hallar el peso de la tubería se entra en una página web que calcula el peso de la tubería entrando la distancia y el espesor. Luego se busca el costo de inversión (C_i), se tendrán en cuenta solo el costo de los accesorios (válvulas de globo y codos de 90°) y el de las tuberías según el diámetro.

Una vez determinada la W_r (kW) se busca el costo de operación (C_o) y se multiplica por el número de horas que se trabaja con vapor (4 horas). Para después multiplicarlo por 0.21 USD/kWh que es el costo de la energía en Cuba. Por último se construye un gráfico de diámetro de tubería contra C_i (\$) y C_o (kW). Después en el gráfico se deben cortar las líneas de C_i y C_o . El diámetro económico es el normalizado más cercano a donde se cruzan las líneas.

Una vez seleccionado el diámetro se entra en la tabla proporcionada por la norma DIN (ver anexo 5)

Datos.

Temperatura ambiente promedio en Santa Clara: 24,4 °C (Climate, 2018).

Velocidad del viento promedio en Santa Clara: 4,86 m/s (weatherspark, 2018).

Conductividad térmica del silicato de calcio según (Morvay and Gvozdenac, 2008)

**Tabla 2.4.2.1 Conductividad térmica del Silicato de calcio (Morvay and Gvozdenac, 2008).
Modificado por el autor.**

Material	Densidad [kg/m ³]	Conductividad térmica [W/(m K)]
----------	----------------------------------	------------------------------------

		50	100	300
Silicato de Calcio	210	0.055	0.058	0.083

Para obtener el valor real de la conductividad térmica a la temperatura de 210 °C se hace una interpolación.

$$\frac{300 - 100}{0.083 - 0.058} = \frac{300 - 210}{0.083 - k}$$

Para obtener un valor de k de **0,072 W/m k**.

Luego se calcula conductividad térmica del acero st 37.0. Este acero tiene una composición de 0,7% de carbono se escoge uno con una similitud en el porcentaje de carbono (ver Anexo 12). Se elige el acero al carbono con 0,5 % de carbono. Se realiza una interpolación.

$$\frac{300 - 200}{45 - 48} = \frac{300 - 210}{45 - k}$$

Obteniéndose como resultado **47,7 W/m k**.

Al terminar la búsqueda de los datos anteriores se comienza a trabajar con PIPEPHASE 9.6.

2.4.3 Trabajo con PIPEPHASE 9.6

Los pasos a seguir para un correcto uso del programa son:

- Introducir los datos en el Global Defaults (Anexo 13).
- Establecer la fuente de calor, la red de distribución de calor y el consumidor (Anexo 14).
- Introducir los datos estimados en la fuente de calor (Anexo 15).
- Introducir los datos en la red de distribución de calor (Anexo 16).
- Introducir los datos y fijarlos en el consumidor (Anexo 17).
- Chequear y correr el programa (Anexo 18).
- Generar reporte en Excel (Anexo 19).

Introducción de los datos en el Global Defaults

Este paso consiste en introducir los datos calculados en el subepígrafe anterior. En la siguiente figura se observa la ventana de diámetros interiores donde se introduce el diámetro interior ya normalizado por la norma DIN (ver Anexo 5):

Figura 2.4.2.1 Diámetro por defecto

Luego se entra a la ventana transferencia de calor por defecto (ver Figura 5) donde se introduce la temperatura promedio en cuba y se selecciona la opción de tubería al aire.

Figura 2.4.2.2. Transferencia de calor por defecto.

Después se selecciona la ventana de transferencia de calor en la tubería (ver Figura 2.4.2.3). Se introduce los valores del espesor del tubo (seleccionado en el anexo 5 entrando con el diámetro interior) y la conductividad térmica del mismo. Se introduce también el espesor del aislante y la conductividad térmica del mismo.

Pipe Heat Transfer Defaults

☒ Use User-Specified Defaults

Insulation		
Layer	Thickness mm	Conductivity W/m-C
1	35	0.072
2	0	0.026
3	0	0.026
4	0	0.026
5	0	0.026

Pipe Wall Thickness: 2.6 mm

Pipe Conductivity: 47.7 W/m-C

Inside Heat Transfer: 0 W/m2-C

Outside Heat Transfer: 0 W/m2-C

Radiation Heat Transfer: 0 W/m2-C

OK Cancel Help

Figura 2.4.2.3 Transferencia de calor, en la tubería, por defecto

Establecer la fuente de calor, la red de distribución de calor y el consumidor.

Para realizar este paso en el anexo 14 podemos observar un círculo de color negro que rodea al botón perteneciente a la fuente de calor. En azul se el círculo que rodea al botón perteneciente al consumidor de calor. Accionas cada botón y lo colocas en el área de trabajo como simulan las flechas con los respectivos colores. Para la red de distribución haces clic en la fuente dejándolo oprimido y arrastras la línea hasta el consumidor. Así quedan establecidas la fuente, la red de distribución y el consumidor. Para introducir los datos en cada uno lo único que se debe hacer es dar doble clic en cada uno de ellos e introduces los datos en las ventanas que emergen (ver anexos 15, 16, 17)

Realizar el chequeo, correr la simulación y generar el reporte en Excel.

En el anexo 14 encerrado en un círculo naranja se selecciona el botón que se refiere a Run. Luego emerge la ventana que aparece en el anexo 18. El primer paso es chequear los datos introducidos, se oprime el botón rodeado por un óvalo rojo. Luego se corre la simulación accionando el botón rodeado por un óvalo verde. Por último se presiona el botón rodeado por un óvalo amarillo para generar el reporte en Excel. Luego emerge la ventana que muestra el anexo 19 y se elige los datos que desees que aparezcan en el reporte.

2.5- Conclusiones parciales.

1. La distancia entre las empresas UEB Matadero “Chichi Padrón” y Grupos electrógenos Santa Clara 110 es de 688 m. Las mayores pendientes en el terreno son de 3.8 % y 2.5 %, presentando el terreno un tramo horizontal desde los 300 m hasta los 455 m.
2. El consumo de vapor de la empresa UEB Matadero “Chichi Padrón” es de 1,267.27 kg/h. De este solo se puede recuperar el condensado del 59 % producto de la contaminación del otro por ciento en las labores de limpieza y lavandería.
3. Se trabajará el diseño de la tubería en el PIPEPHASE con la ayuda de tablas proporcionadas por tablas de la metodología AESA, las cuales son extraídas de la norma DIN.

Capítulo III

Análisis de los resultados

Capítulo III: Análisis de los resultados

3.1 Introducción

En este capítulo se realiza un análisis de los resultados obtenidos en el Programa. También realizar un análisis de los diámetros de tubería para seleccionar uno de los tres simulados. Luego decidir la colocación de las trampas de vapor y los apoyos de la tubería.

3.2- Cálculo del diámetro económico.

En el software se realizó la simulación de tres diámetros de tubería (2, 2.5 y 3 pulgadas). En la siguiente tabla se muestran los valores de densidad, flujo másico y caída de presión, para cada diámetro, calculado por el software:

Tabla 3.2.1 Valores de densidad, flujo másico y caída de presión, para cada diámetro.
Fuente: Elaborado por el autor.

Diámetro	m	Densidad	Caída de presión
2"	0.35	0.0036	1,105.10
2.5"	0.35	0.0038	311.05
3"	0.35	0.0043	168.48

Después de obtenidos los datos anteriores se calcula la potencia requerida para mover el fluido mediante (ver tabla):

Tabla 3.2.2 Potencia requerida. Fuente: Elaborado por el autor.

Diámetro	Wr
2"	108,827.62
2.5"	29,019.28
3"	13,890.57

Para un metro de tubería de 2, 2.5 y 3 pulgada su peso es de 260.92, 373.23, 471.28 kg respectivamente (S.L.U., 2018). La distancia de la tubería es de 703 m. En la siguiente tabla se observa el costo de la tubería.

Tabla 3.2.3 Costo de la tubería. Fuente: Elaborado por el autor.

Tuberías y accesorios.	Precio unitario	Cantidad	Costo Total
Válvulas de globo	5.59	3.00	16.77
Codos 90°	5.95	22.00	130.90
Tubería de acero al carbono sin costura 3"	6.07	331,309.84	2,011,050.73
Tubería de acero al carbono sin costura 2"	6.07	183,426.76	1,113,400.43
Tubería de acero al carbono sin costura 2.5"	6.07	262,380.69	1,592,650.79

Donde en el caso de las válvulas de globo y los codos de 90°, la cantidad responde al número de accesorios utilizados para la construcción de la tubería. En las tuberías la cantidad responde a los kg totales de la tubería. Donde se tiene en cuenta el diámetro de cada una de ellas, su espesor característico y la densidad del material.

Luego se realiza la tabla donde se calcula para cada diámetro un valor de C_o y el C_i .

Tabla 3.2.4 Costo de operación y de inversión para cada diámetro de tubería. Fuente: Elaborado por el autor.

Diámetro	C_o (\$)	C_i (\$)
2"	91,415.20	1,113,548.10
2.5"	24,376.20	1,592,798.46
3"	11,668.08	2,011,198.40

Luego se grafica la tabla anterior:

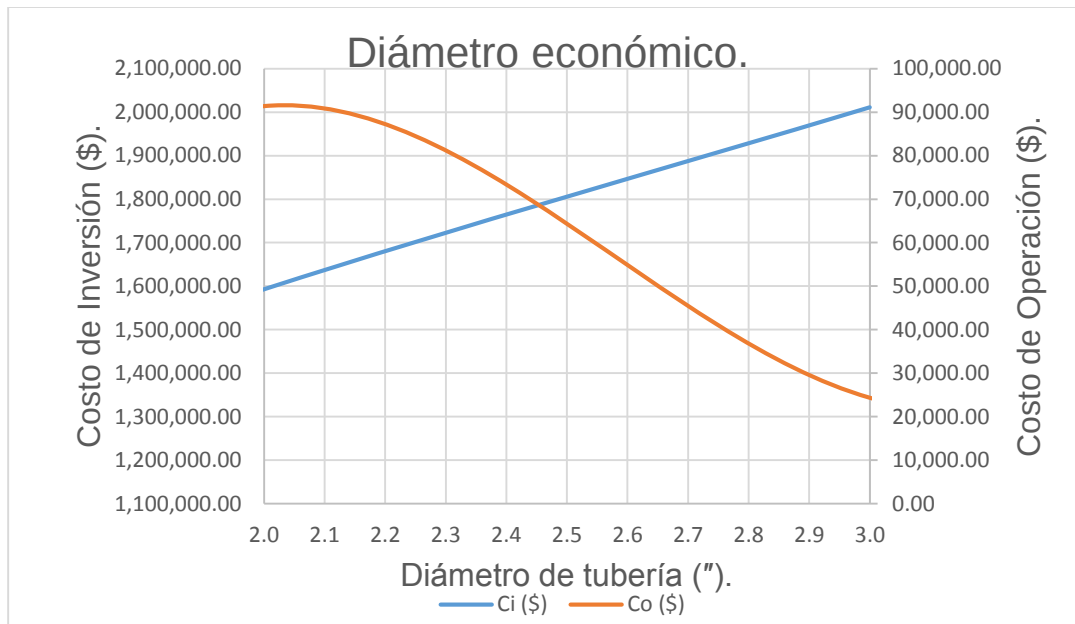


Gráfico 3.2.1 Diámetro económico. Fuente: Elaborado por el autor.

Según el gráfico anterior el diámetro económico sería el 2,5". Pero se elige el de 3" debido a que técnicamente es mejor que los dos anteriores, pues tiene la caída de presión más baja (168.48 kPa). Pues a una caída de presión más alta esto se traduce en aumentar la presión en el domo de la caldera. Con esto la temperatura de saturación del vapor aumenta, esto hace que la diferencia de temperatura entre el vapor y los gases de escape disminuya (disminuye el pinch point). Haciendo que la cantidad de calor extraído de los gases de escape disminuya y producto a esto los gases de escape salen más calientes, obteniéndose mayores pérdidas energéticas. Varios autores se han referido a esto (Butcher and Reddy, 2007, Moosazadeh Moosavi et al., 2018, Valiani et al., 2017) coincidiendo todos que a medida que disminuye el pinch point el calor recuperado en la generación de vapor va a ser menor (HRSG por sus siglas en ingles).

3.3- Análisis de los resultados obtenidos en PIPEPHASE 9.6

En el anexo 9 podemos observar que la caída de presión es de 168.48 KPa y la temperatura final es de 164.37 °C. EL vapor en estas condiciones y con una calidad de 92% es suficiente para cubrir la demanda de la empresa UEB

Matadero. La presión y la temperatura de entrada fueron modificadas por el software una vez realizada la simulación.

En la siguiente tabla podemos observar el comportamiento del fluido a lo largo de la tubería. El programa divide en segmentos cada uno de los dispositivos insertados en la red de transporte de vapor (ver anexo 16). Por la extensión de la tabla solo se pusieron tres dispositivos que presentaban distintos tipos de fluidos.

Tabla 3.3.1 Tipos de fluidos. Fuente: Adaptado por el autor de dos tablas de resultados obtenidas por PIPEPHASE.

Nombre	Tipo de dispositivo	Segmento del dispositivo	Distancia	Velocidad de la mezcla	Tipo de fluido
			m	m/s	
P001	PIPE	Entrada	0.00		
P001	PIPE	Seg 1	0.75	17.472	1-PH 1-PH
P001	PIPE	Seg 2	1.50	17.467	1-PH 1-PH
P001	PIPE	Seg 3	2.25	17.462	1-PH 1-PH
P001	PIPE	Salida	3.00	17.457	1-PH 1-PH
P012	PIPE	Salida	308.00	15.905	DIST STRT
P014	PIPE	Entrada	308.00		
P014	PIPE	Seg 1	314.25	15.928	DIST STRT
P014	PIPE	Seg 2	320.50	15.946	DIST STRT
P014	PIPE	Seg 3	326.75	15.964	DIST STRT
P014	PIPE	Salida	333.00	15.981	DIST STRT
P015	PIPE	Entrada	333.00		
P015	PIPE	Seg 1	333.38	15.996	DIST ANNU
P015	PIPE	Seg 2	333.75	15.998	DIST ANNU
P015	PIPE	Seg 3	334.13	15.999	DIST ANNU
P015	PIPE	Salida	334.50	16.001	DIST ANNU

El fluido varía a lo largo de la tubería en tres tipos distintos. Estos son: DIST STRT, 1-PH 1-PH y DIST ANNU, significa flujo estratificado, flujo en una fase y flujo anular respectivamente. Al tener este comportamiento el fluido, se descarta la posibilidad de golpe de ariete en la tubería. Pues para la ocurrencia de esto el programa identifica los siguientes comportamientos: DIST TRANS y DIST INT, siendo los fluidos tipo transición y de tapón. El fluido se encuentra en una fase hasta la distancia de 308 m y de ahí en adelante tiene un comportamiento

estratificado y anular. Comportándose de manera anular mayormente en las tuberías verticales y de manera estratificado en las de pendiente y horizontales.

A continuación se presenta un gráfico de velocidad contra tramo de tubería.

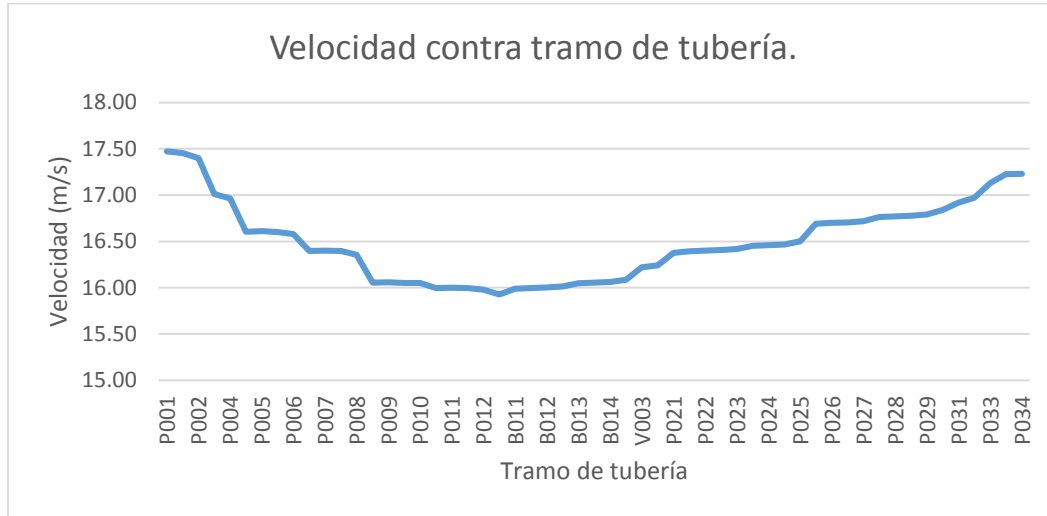


Gráfico 3.3.1 Velocidad contra tramo de tubería. Fuente: Elaborado por el autor a partir de datos entregados por el PIPEPHASE.

En el gráfico se muestra como la velocidad va disminuyendo hasta el tramo de tubería P014. Esto se debe a la diferencia de altura entre la fuente de vapor y el consumidor del mismo (9.5 m aproximadamente). Además de la resistencia que se opone al paso del fluido por la tubería.

Como pudimos observar en la tabla 3.3.1 este es el tramo perteneciente a la distancia de 308 m. A esta distancia, producto a la caída de presión y a la transferencia de calor comienza condensar el vapor, dando a lugar a un flujo mixto tipo anular y tipo estratificado. Producto esto el área por donde circula el fluido se estreche, produciendo un estrangulamiento del vapor y con esto un aumento de la velocidad.

Cada uno de los picos que presenta el grafico se debe a que en esos puntos hay un paso de calle, un cambio de dirección o una estrangulación del flujo. Esto provoca una disminución más rápida de la velocidad producto a la mayor resistencia que ofrecen los codos de 90° y las válvulas de bola.

En el siguiente gráfico podemos observar la caída de la presión respecto a la distancia de la tubería.

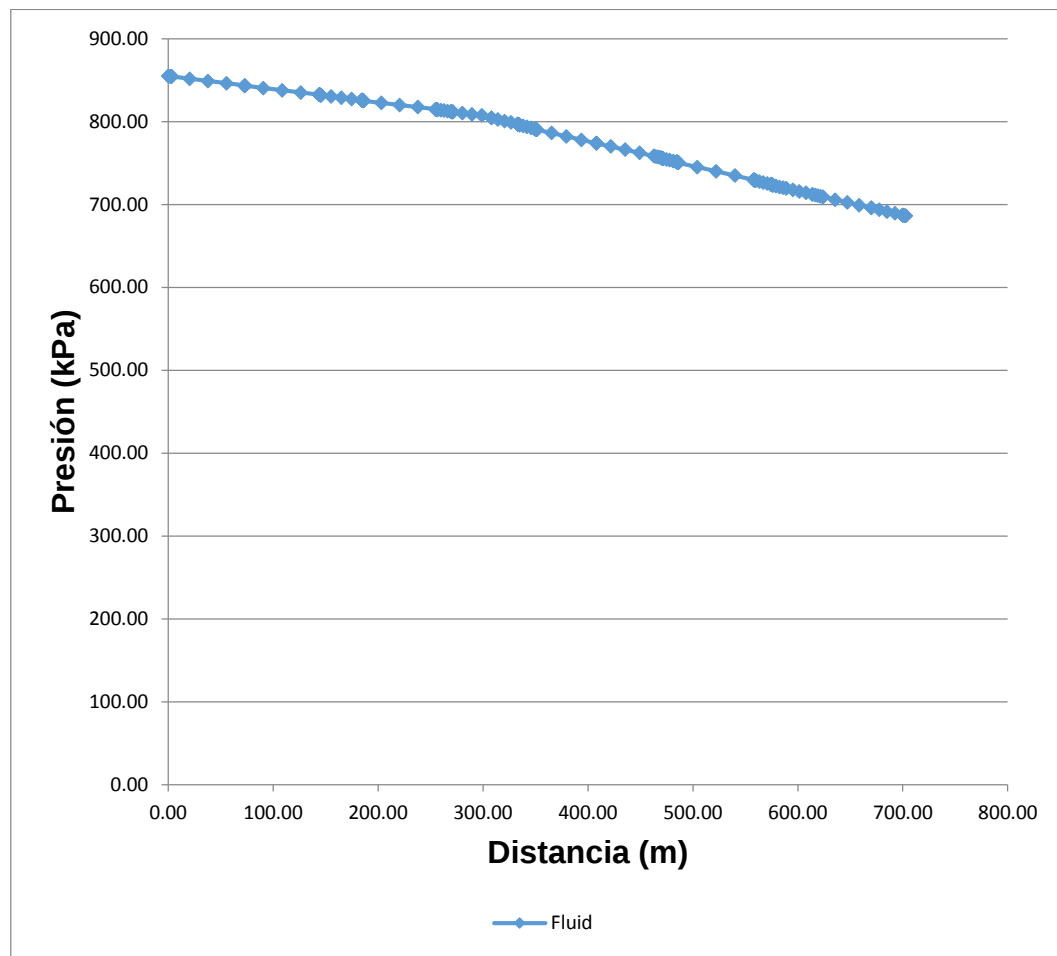


Gráfico 3.3.2. Distancia contra presión. Fuente: Resultado generado por PIPEHASE.

Podemos observar que la presión disminuye a un ritmo constante hasta la distancia de 308 m. Después comienza a caer de manera más rápida. Esto se debe que hasta esta distancia el fluido estaba en una sola fase. Por lo que la caída de presión solo se debía a la resistencia ofrecida por la fricción generada entre las paredes de la tubería y el vapor y la diferencia de altura. Después sufre una aceleración de la caída de la presión debido a que los factores anteriores se le suma un estrangulamiento del flujo. Debido a que el fluido tiene un comportamiento estratificado y uno anular desde esa distancia en adelante.

3.4 Colocación de las trampas de vapor y apoyos de la tubería.

Las trampas de vapor van a ser del tipo de balde invertido. Para colocar las trampas de vapor según (TLV, 2018) es en un intervalo de 30 a 50 metros. Debido a que el diámetro de la tubería es pequeño y a que el condensado en la tubería no es mucho se decide ponerse a 50 m una de otra. En el anexo 8 con puntos rojos se colocan las trampas de vapor. Se colocan un total de 14 trampas.

Se colocarán soportes de tubo del tipo simple (ver figura 2.4.3.1). Los soportes de tubo de tipo simple serán colocados según las recomendaciones de (González, 1987). Para diámetros entre 71 y 100 mm se recomienda que se coloquen a una distancia de 3,5 m. Por lo tanto se colocaran una cantidad aproximada de 197 soportes de tubo del tipo simple.

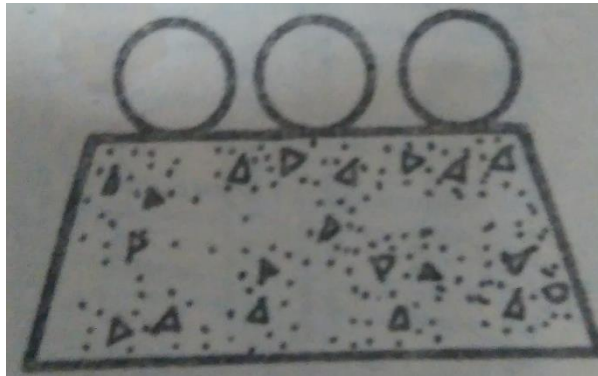


Figura 2.4.3.1 Soporte de tubería simple(González, 1987)

3.6- Conclusiones parciales

Cumplidos los objetivos trazados para este capítulo se puede mencionar lo siguiente:

1. El vapor suministrado por los Grupos Electrógeno Santa Clara 110 deberá tener las condiciones siguientes: Una presión de 855 KPa aproximadamente y una temperatura de 210 °C.
2. El diámetro seleccionado es el de 3 pulgadas debido a que posee una menor caída de presión, siendo más factible desde el punto de vista técnico.
3. La velocidad comienza a disminuir hasta la altura de 308 m y comienza a aumentar producto a que a partir de este punto el fluido es anular y estratificado, disminuyendo esto el área de flujo.
4. La caída de presión se mantiene casi constante a lo largo de la tubería. Presentando un cambio a partir de la distancia de 308 m, de la tubería, donde comienza a caer más rápido producto a un estrangulamiento del flujo.

Conclusiones generales

Conclusiones generales

1. Se utilizó para diseñar el sistema de transporte de calor el software PIPEPHASE 9.6, con ayuda de tablas de la norma DIN presentadas por la metodología desarrollada por AESA.
2. Es necesario suministrar desde la empresa Grupos Electrógenos Santa Clara 110 un flujo de vapor de 1 267.27 kg/h, a una presión de 855 kPa aproximadamente y una temperatura de 210 °C para cubrir la demanda de la empresa UEB Matadero “Chichi Padrón”.
3. El diámetro seleccionado es el de 3 pulgadas debido a que es más factible desde el punto de vista técnico, teniendo en cuenta que su caída de presión es menor respecto a los otros diámetros, lo cual puede incidir en un mejor aprovechamiento del calor de los gases de escape.

RECOMENDACIONES

Recomendaciones

Para el desarrollo de trabajos futuros, dedicados a este tema, se recomienda lo siguiente:

1. Realizar un estudio más amplio sobre las trampas de vapor y los cimientos de la tubería.
2. Diseñar un sistema de recolección y de retorno de condensado.
3. Realizar un estudio de factibilidad económica.
4. Realizar un estudio del dimensionamiento de la red de transporte de calor, teniendo en cuenta la variación del pinch point en la caldera recuperativa y la caída de presión en la red de transporte de vapor.

Bibliografía

Bibliografía

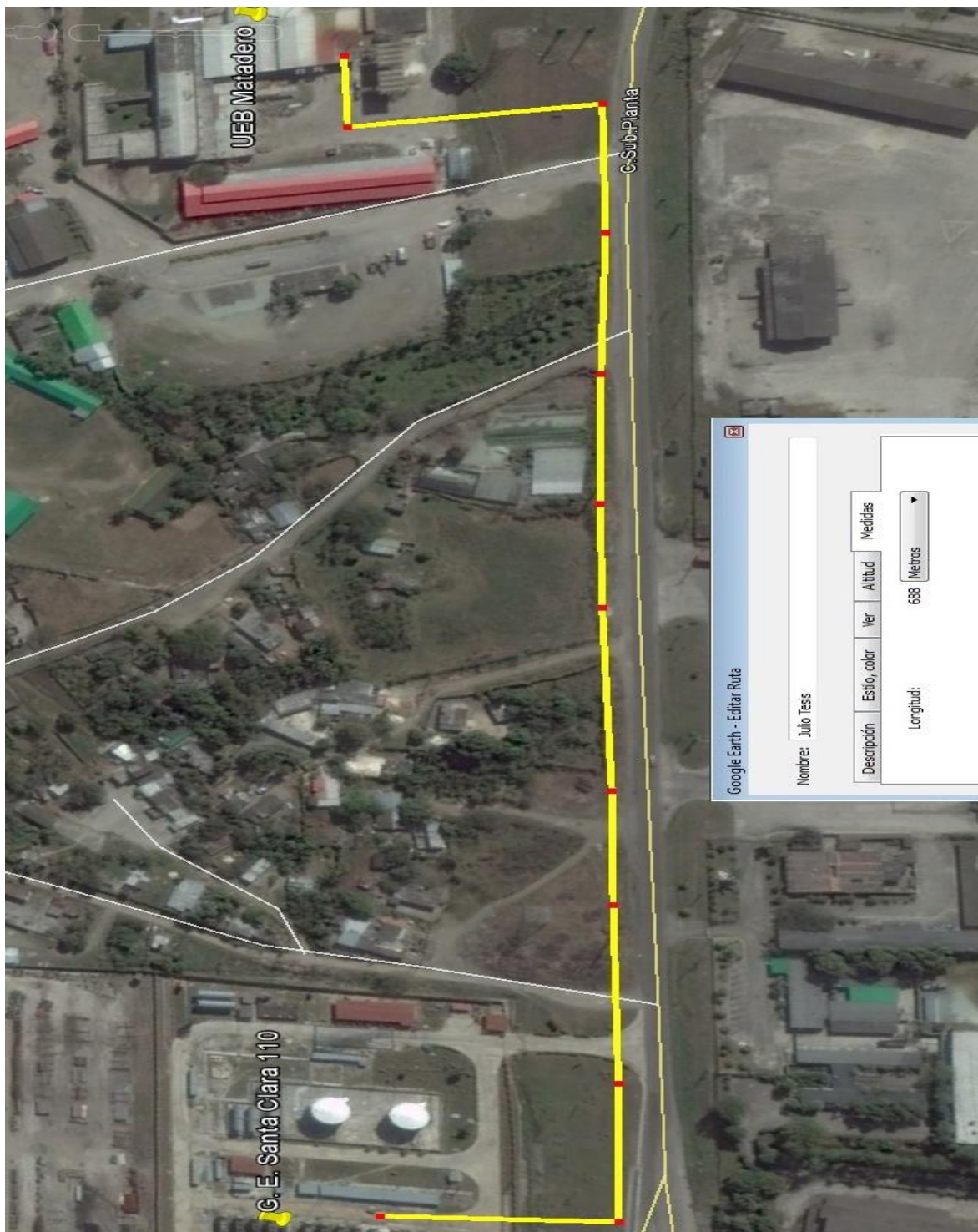
- ARROYO, V. 2006. Agenda for climate action. *Pew Centre on Global Climate Change, Arlington, VA*.
- BOHM, B. 1990. Simple methods for determining the heat loss from district heating pipes under normal operating conditions. *Report, Laboratory of Heating and Air Conditioning, Technical University of Denmark*.
- BOHM, B. 1991. Determination of heat losses from district heating networks. Report.
- BONILLA MONZÓN, C. 2011. *Metodología y estrategias para la elaboración de estimados de costos para el desarrollo de proyectos en México*.
- BORGSTRÖM, K. M. & BÖHM, B. 1996. A comparison of different methods for in-situ determination of heat losses from district heating pipes, Department of energy engineering, Technical University of Denmark.
- BOYCE, M. Handbook for Cogeneration and Combined Cycle Power Plants. 2004. New York, NY (ASME, Three Park Avenue. New York, NY 10016): American Society of Mechanical Engineers, 1.
- BUTCHER, C. & REDDY, B. 2007. Second law analysis of a waste heat recovery based power generation system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, 2355-2363.
- CLIMATE. 2018. *Clima Santa Clara. Temperatura, Climograma y Tabla climática para Santa Clara - Climate-Data.org* [Online]. Available: <https://es.climate-data.org/location/333/>.
- CRANE *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*.
- DIAMANT, R. M. E. & KUT, D. 1981. *District heating and cooling for energy conservation*, Architectural Press.
- DIFS, K., DANESTIG, M. & TRYGG, L. 2009. Increased use of district heating in industrial processes—impacts on heat load duration. *Applied Energy*, 86, 2327-2334.
- DIRECTIVE, E. 2004. Directive 2004/8/EC of the European Parliament and of the Council of 11 February 2004 on the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy market and amending Directive 92/42/EEC. *Official Journal of the European Union*, 50-60.
- GARCÍA-GUTIÉRREZ, A., MARTÍNEZ-ESTRELLA, J. I., HERNÁNDEZ-OCHOA, A. F., VERMA, M. P., MENDOZA-COVARRUBIAS, A. & RUIZ-LEMUS, A. SIMULACION NUMERICA DE LA RED DE VAPORDUCTOS DEL CAMPO GEOTERMICO DE LOS AZUFRES, MICHOACAN.
- GEBREMEDHIN, A. 2003. The role of a paper mill in a merged district heating system. *Applied Thermal Engineering*, 23, 769-778.
- GONZÁLES, A. R. 1987. *Instalación de Máquinas Industriales*, Santa Clara, Villa Clara, Cuba, Imprenta Universitaria Santa Clara.
- GUSTAFSSON, J., DELSING, J. & VAN DEVENTER, J. 2010. Improved district heating substation efficiency with a new control strategy. *Applied energy*, 87, 1996-2004.

- HANDBOOK, A. F. 2009. American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers. *Inc.: Atlanta, GA, USA*.
- HEAT, D. C. 2000. Power: a federal manager's resources guide. *Final report, US Department of Energy Federal Management Program, Washington, DC*.
- HOLMGREN, K. 2006. Role of a district-heating network as a user of waste-heat supply from various sources—the case of Göteborg. *Applied energy*, 83, 1351-1367.
- İBRAHİM, D. & ROSEN, M. A. 2007. Exergy: Energy, Environment, and Sustainable Development. *Applied Energy*, 64, 427-440.
- INSTITUTE, C. E. R. 1992. *Realizing the Benefits of Community Integrated Energy Systems: Executive Summary*, Calgary: Canadian Energy Research Institute.
- KLEINBACH, P. & HINRICHS, H. 2002. Energy: Its use and the environment. New York: Harcourt College Publishers.
- KLIMSTRA, J. 2008. Five years of operational experience—the Gy rh cogeneration plant. *Wartsila Tech J*, 2, 4-8.
- MARINOVA, M., BEAUDRY, C., TAOUSSI, A., TRÉPANIER, M. & PARIS, J. 2008. Economic assessment of rural district heating by bio-steam supplied by a paper mill in Canada. *Bulletin of Science, Technology & Society*, 28, 159-173.
- MARTÍN, L. P. 2016. *Evaluación del desempeño ambiental del Matadero "Chichi Padrón"*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- MOOSAZADEH MOOSAVI, S. A., MAFI, M., KAABI NEJADIAN, A., SALEHI, G. & TORABI AZAD, M. 2018. A new method to boost performance of heat recovery steam generators by integrating pinch and exergy analyses. *Advances in Mechanical Engineering*, 10, 1687814018777879.
- MORVAY, Z. & GVOZDENAC, D. 2008. Applied Industrial Energy and Environmental Management, Part III: Fundamentals for analysis and calculation of energy and environmental performance. Wiley-IEEE Press.
- NIJJAR, J. S., FUNG, A. S., HUGHES, L. & TAHERIAN, H. 2009. District heating system design for rural nova scotian communities using building simulation and energy usage databases. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 33, 51-64.
- PAVLAS, M., STEHLÍK, P., ORAL, J. & ŠIKULA, J. 2006. Integrating renewable sources of energy into an existing combined heat and power system. *Energy*, 31, 2499-2511.
- PERSSON, U. & WERNER, S. 2011. Heat distribution and the future competitiveness of district heating. *Applied Energy*, 88, 568-576.
- PHILIBERT, C. 2005. The present and future use of solar thermal energy as a primary source of energy. *International Energy Agency, Paris, France*.
- RAMSARRAN, S. 2016. *Caracterización de los portadores energéticos del Hospital Universitario "Arnaldo Milián Castro" de Villa Clara (HAMC)*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial. Departamento de Ingeniería Mecánica.
- REZAIE, B. & ROSEN, M. A. 2012. District heating and cooling: Review of technology and potential enhancements. *Applied Energy*, 93, 2-10.

- RODRÍGUEZ, H. P. 2009a. *Caracterización de la demanda de los principales portadores energéticos en un hotel de cuatro estrellas*. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
- RODRÍGUEZ, H. P. 2009b. *Caracterización del sistema energético del Hospital Provincial Universitario “Camilo Cienfuegos Gorriarán” de Sancti Spíritus.*, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
- ROSEN, M. A., LE, M. N. & DINCER, I. 2005. Efficiency analysis of a cogeneration and district energy system. *Applied thermal engineering*, 25, 147-159.
- S.L.U., B. A. 2018. *Calculadora de peso* [Online]. Available: <http://www.bagesacers.com/publico/informacion.aspx>.
- SARCO, S. 2006. Guía de referencia técnica. Distribución de vapor.
- SUMMERTON, J. 1992. District heating comes to town: The social shaping of an energy system. Linköping Univ.(Sweden). Dept. of Biomedical Engineering.
- TLV. 2018. *Las Mejores Practicas para la Remoción de Condensado en Líneas Principales de Vapor*
- TRYGG, L., GEBREMEDHIN, A. & KARLSSON, B. G. 2006. Resource-effective systems achieved through changes in energy supply and industrial use: The Volvo–Skövde case. *Applied energy*, 83, 801-818.
- ULRICH, G. D. 1988. Diseño y economía de los procesos de ingeniería química.
- VALIANI, S., TAHOUNI, N. & PANJESHAHI, M. H. 2017. Optimization of pre-combustion capture for thermal power plants using Pinch Analysis. *Energy*, 119, 950-960.
- WEATHERSPARK. 2018. *Clima promedio en Santa Clara, Cuba, durante todo el año* - Weather Spark [Online]. Available: <https://es.weatherspark.com/y/19475/Clima-promedio-en-Santa-Clara-Cuba-durante-todo-el-a%C3%B1o#Sections-Wind>.
- WEBER, C., MARÉCHAL, F. & FAVRAT, D. 2007. Design and optimization of district energy systems. *Computer Aided Chemical Engineering*. Elsevier.
- YUNUS A. CENGEL, A. J. G. *Transferencia de calor y masa*.

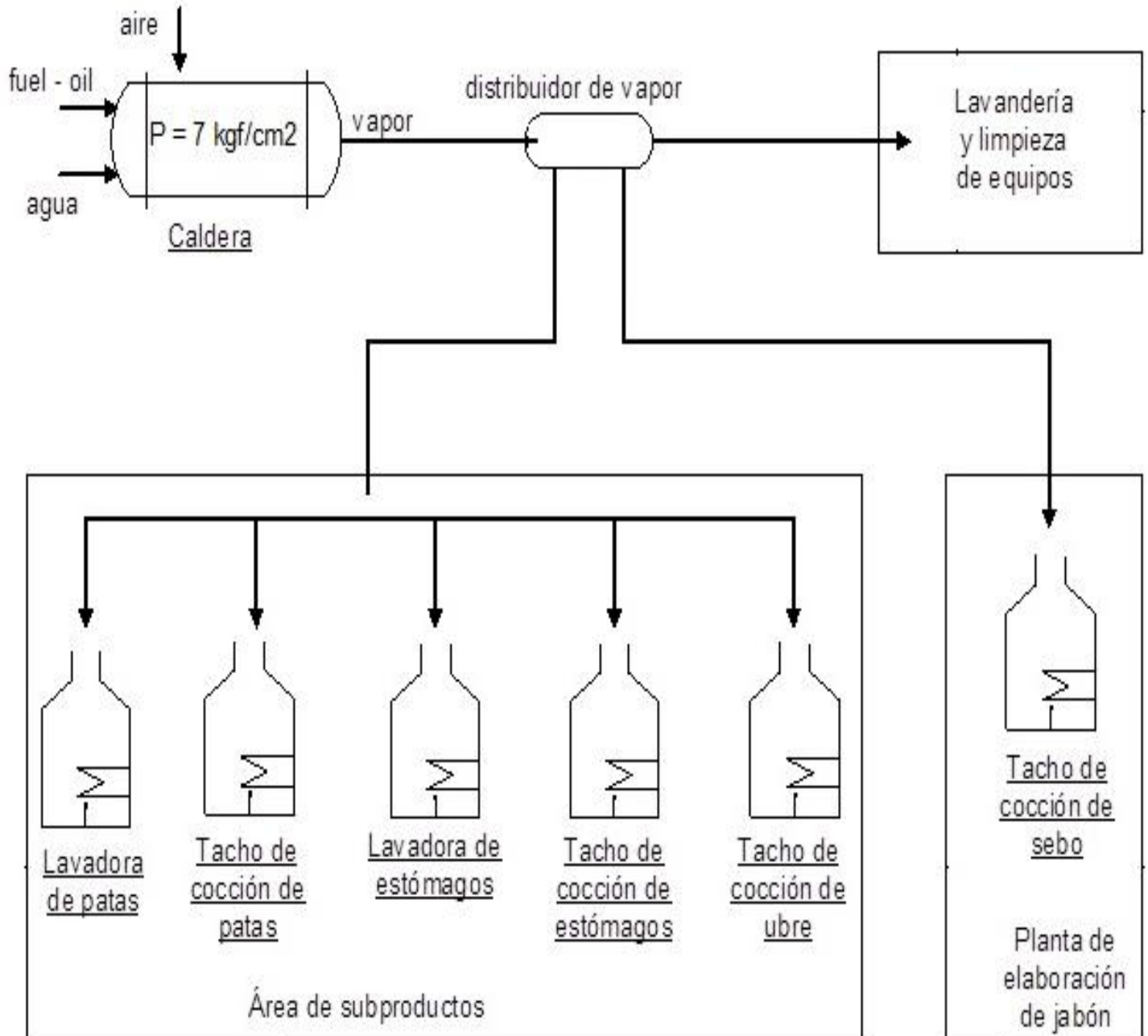
Anexos

Anexo 1. Distancia entre las empresas UEB Matadero y G. E. Santa Clara 110. Fuente: Google Earth Pro.



Estudio del transporte del calor residual de los grupos electrógenos Santa Clara 110 a la UEB Matadero “Chichi Padrón”.

Anexo 2. Diagrama de distribución de vapor en la empresa UEB Matadero.



Anexo 3. Sistema de distribución de calor de la refinería Camilo Cienfuegos de Cienfuegos.



Anexo 4. Límites de temperatura aplicables y resistencias de los aceros.

GRUPO	DESIGNACIÓN		Temp. máx.	LÍMITES DE FLUENCIA EN N/mm ² (MPa) ⁽¹⁾													Rm
	DIN			t °C													
	17007	17006	°C	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600		
Acero no aleado	1.0254	St 37.0	300	235	218	202	185	165	140	—	—	—	—	—	—	350	
	1.0427	C 22.3	350	240	210	190	170	150	130	110	—	—	—	—	—	410	
Aceros de construcción	1.0038	Rst 37-2	300	205	187	174	161	143	122	—	—	—	—	—	—	300	
	1.0050	St 50-2	300	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	470	
	1.0570	St 52-3	300	315	254	240	226	206	186	—	—	—	—	—	—	490	
Alta temperatura	1.0460	C 22.8	480	240	230	210	185	165	145	125	100	80	—	—	—	410	
Aceros aleados alta temperatura	1.0345	HI	480	235	218	202	185	165	140	120	110	105	—	—	—	360	
	1.0425	HI1	480	265	245	225	205	185	155	140	130	125	—	—	—	410	
	1.0481	17 Mn 4	500	290	275	260	245	225	205	180	155	135	—	—	—	460	
	1.5415	15 Mo 3	530	275	263	252	240	220	195	185	175	170	165	—	—	440	
	1.7335	13 Cr Mo 44	570	300	285	270	255	245	230	215	205	195	190	—	—	440	
	1.7380	10 Cr Mo 910	600	310	288	267	245	240	230	215	205	195	185	—	—	480	
	1.0305	St 35.8	480	235	218	202	185	165	140	120	110	105	—	—	—	360	
Aceros estructurales	1.0562	St E 355	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	480	
	1.0565	W StE 355	400	355	304	284	255	226	216	196	167	—	—	—	—	—	
	1.0566	TStE 355	(-50)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	1.1106	EstE 355	(-60)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Inox. Ferrítico	1.4511	X 6 Cr Nb 17	200	250	215	203	190	—	—	—	—	—	—	—	—	450	
	1.4512	X 5 Cr Ti 12	400	260	230	210	200	195	190	185	180	—	—	—	—	390	
Inox. Austenítico	1.4301	X 5 Cr Ni 1810	550	220	182	165	152	143	135	128	123	120	117	—	—	500	
	1.4306	X 2 Cr Ni 1911	550	220	182	165	152	143	135	128	123	120	117	80	—	460	
	1.4541	X 6 Cr Ni Ti 1810	550	230	196	186	177	164	156	147	145	147	139	118	—	500	
	1.4571	X 6 Cr Ni Mo Ti	550	240	205	197	187	175	165	157	155	151	149	127	—	500	
	1.4435	X 2 Cr Ni Mo 18143	550	240	186	172	157	147	138	133	128	123	120	—	—	450	
	1.4465	X 2 Cr Ni Mo N 2525	550	255	195	175	155	145	135	130	125	120	115	110	—	540	
	1.4539	X 2 Ni Cr Mo Cu 25205	400	220	175	165	155	145	135	130	125	—	—	—	—	520	
	1.4529	X 2 Ni Cr Mo Cu 25206	—	300	230	210	190	180	170	160	150	—	—	—	—	600	
Austenítico alta temperatura ⁽²⁾	1.4948	X 6 Cr Ni 1811	700	185	157	142	127	118	108	103	98	93	88	83	78	500	
	1.4919	X 6 Cr Ni Mo MB	700	205	175	160	145	135	127	120	115	112	110	108	98	500	
Acero resistente al calor ⁽³⁾	1.4828	X 15 Cr Ni Si 2012	1000	339	332	325	318	309	300	290	279	266	253	236	218	500	
	1.4876	X 10 Ni Cr Al Ti 3220	—	210	185	170	160	150	145	138	130	128	125	120	115	450	

Anexo 5. Espesores y diámetros interiores de distintos tubos normalizados DIN [mm].

DN (mm)	DE (mm)	DIN 2458		DIN 2448		DIN 2440		DIN 2441	
		Espesor	Dint	Espesor	Dint	Espesor	Dint	Espesor	Dint
10	17,2	1,8	13,6	1,8	13,6	2,35	12,5	2,9	11,4
15	21,3	2	17,3	2	17,3	2,65	16	3,25	14,8
20	26,9	2	22,9	2,3	22,3	2,65	21,6	3,25	19,4
25	33,7	2	29,7	2,6	28,5	3,25	27,2	4,05	25,6
32	42,4	2	38,4	2,6	37,2	3,25	35,9	4,05	34,3
40	48,3	2,3	43,7	2,6	43,1	3,25	41,8	4,05	40,2
50	60,3	2,3	55,7	2,9	54,5	3,65	53	4,5	51,3
63	76,1	2,6	70,9	2,9	70,3	3,65	68,8	4,5	67,1
80	88,9	2,9	83,1	3,2	82,5	4,05	80,8	4,85	79,2
100	114	3,2	107,9	3,6	107,1	4,5	105,3	5,4	103,5
125	140	3,6	132,5	4	131,7	4,85	130	5,4	128,9
150	168	4	160,3	4,5	159,3	4,85	155,4	5,4	154,3
200	219	4,5	210,1	5,9	207,3	-	-	-	-
250	273	5,1	263	6,3	260,4	-	-	-	-
300	324	5,6	312,7	7,1	309,7	-	-	-	-
350	356	5,6	344,4	8	339,6	-	-	-	-
400	406	6,3	393,8	8,8	388,8	-	-	-	-
500	508	6,3	495,4	11	486	-	-	-	-
600	610	6,3	597	12,5	584,6	-	-	-	-

Anexo 6. Valores de L/D de válvulas y accesorios. Fuente: CLARKE L., DAVIDSON R. (1962). Manual for Process Engineering Calculations. Mc Graw Hill.

TIPOS DE VÁLVULAS Y ACCESORIOS

Válvulas (datos con apertura 100%, excepto si se indica):

• De globo:		
Convencional	asiento plano, cónico o cilíndrico / disco guiado	340/450
Forma Y tija 60°	asiento plano / disco guiado	175/145
En ángulo	asiento plano / disco guiado	145/200
• De compuerta:		
De paso total		3
Fluidos normales	apertura 100% / 75% / 50% / 25%	13/35/160/900
Fluidos pulposos	apertura 100% / 75% / 50% / 25%	17/50/260/1200
• De retención:		
De clapeta	convencional / paso total	135/50
De bola		150
• De pie con filtro:		
Con disco guiado		420
Con visagra de cuero		75
• De mariposa:		
De más de 150 mm líquidos / gases		40 /24
En ductos	ángulo 5°/30°/45°/60°	9/160/800/4800
• Espitas:		
De paso directo	paso igual al diámetro de tubo	18
De tres vías	flujo: directo / por derivación	44/140
	Pase igual al 80% del tubo	
• De Bola:	Apertura 100%	3

Accesorios

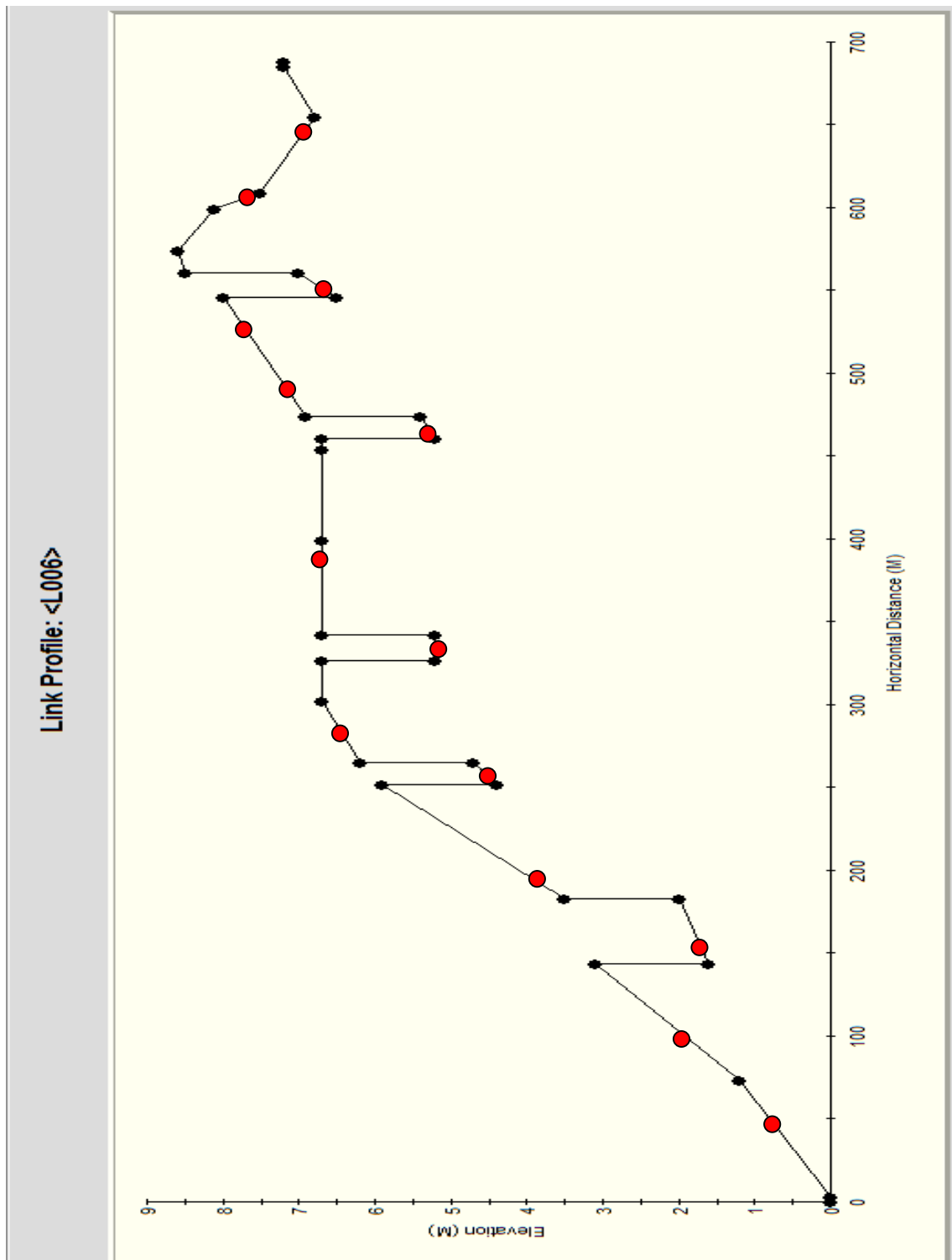
• Piezas de montaje (tubo liso):		
Curvas 45°	r/d= 1/2/4/6	6/4/3/3
Curvas 90°		9/6/5/4
• Codos:		
De 90°	estándar / radio largo / radio corto	30/20/50
De 45°	estándar / radio corto	16/26
En escuadra		57
• Curva 180°:	tipo cerrado	50
• T estándar:	flujo: directo / por derivación	20/60
• Ensanchamientos: (*)	brusco ¼ estándar ½ / estándar ¾	28/8
	brusco ¼ brusco ½ / brusco ¾	35/24/8
• Reducciones: (*)	estándar ½ / estándar ¾	7/2
	brusco ½ / brusco ¾	18/14/7
• Liras de dilatación:	tubo liso	50
	tubo corrugado	100

(*) Los valores de L/D se refieren al diámetro menor

Anexo 7. Perfil de elevación a lo largo de la tubería. Fuente: Google Earth Pro.



Anexo 8. Perfil de elevación realizado en el PIPEPHASE 9.6.



Anexo 9. Datos entregados por el programa PIPEPHASE 9.6 para la tubería de 3 pulgadas.

Resumen – Caso Base

Nodo	Presión	Temperatura	Flujo Másico	Calidad del vapor
	KPA	DEG C	KG/HR	Fracción
ELECTROGRNO	854.98	210.00	1276.27	1.00
MATADERO	<u>686.50</u>	164.37	<u>1276.27</u>	0.93
<i>Rates reported at standard conditions. Specified values are underlined.</i>				

Anexo 10. Datos entregados por el programa PIPEPHASE 9.6 para la tubería de 2 pulgadas.

Resumen – Caso Base

Nodo	Presión	Temperatura	Flujo Másico	Calidad del vapor
	KPA	DEG C	KG/HR	Fracción
ELECTROGRNO	1,791.60	400.00	1276.27	1.00
MATADERO	686.50	164.37	<u>1276.27</u>	1.00
<i>Rates reported at standard conditions. Specified values are underlined.</i>				

Anexo 11. Datos entregados por el programa PIPEPHASE 9.6 para la tubería de 2,5 pulgadas.

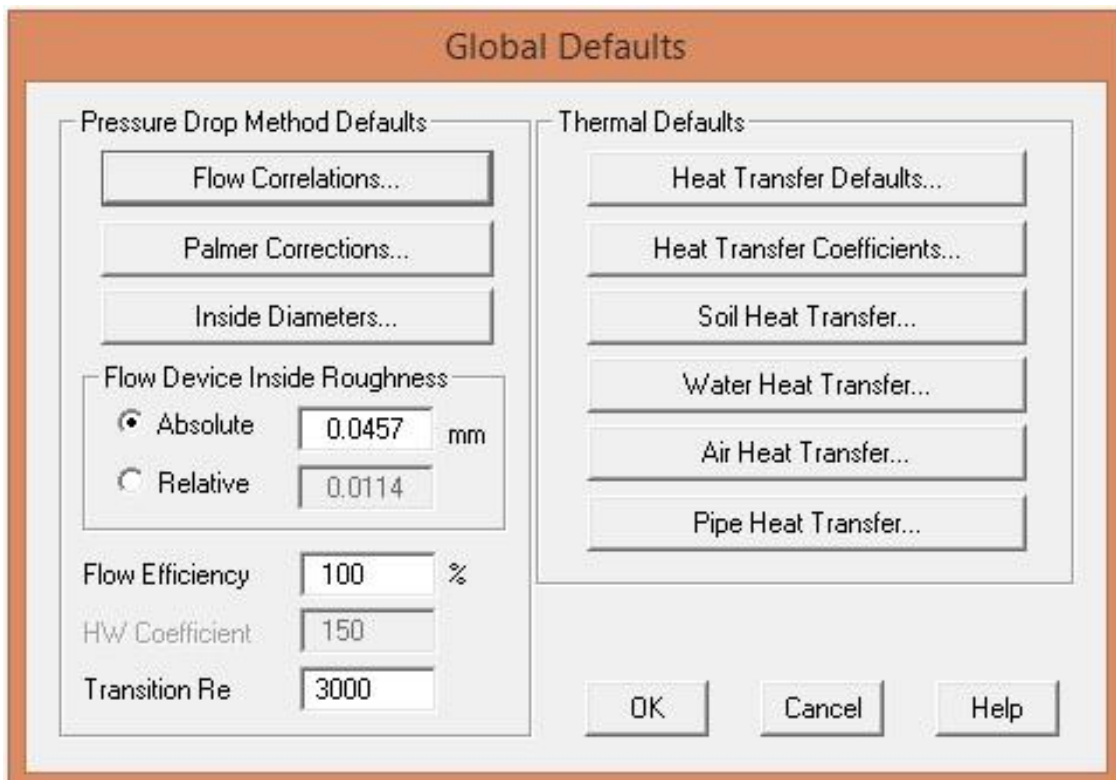
Resumen – Caso Base

Nodo	Presión	Temperatura	Flujo Másico	Calidad del vapor
	KPA	DEG C	KG/HR	Fracción
ELECTROGRNO	997.55	230.00	1276.27	1.00
MATADERO	<u>686.50</u>	164.38	<u>1276.27</u>	0.92
<i>Rates reported at standard conditions. Specified values are underlined.</i>				

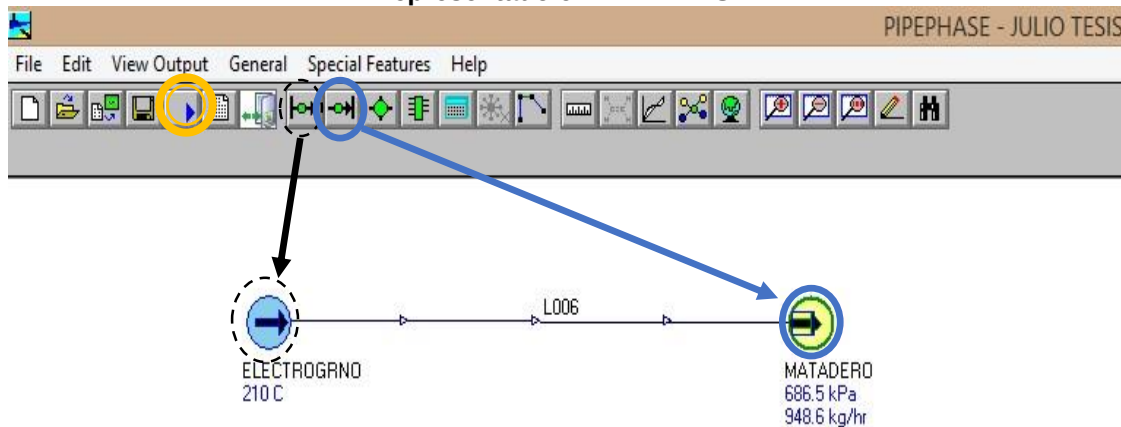
Anexo 12. Propiedades térmicas de algunos metales.

Propiedades a 20°C		Densidad ρ kg/m ³	Calor específico J/kg·K	Conduct. k W/m·K	Difusivid $\alpha \cdot 10^5$ m ² /seg	Conductividad térmica en (W/m·°C) a la temperatura en °C:								
Aleaciones	Composición					-100	0°C	100	200	300	400	600	800	1000
Duraluminio	94-96% Al; 3-5% Cu	2787	833	164	6,680	126	159	182	194					
Siluminio	87% Al; 1,33% Si	2659	871	164	7,100	119	137	144	152	161				
Alusil	80% Al; 20% Si	2627	854	161	7,172	144	157	168	175	178				
Al-Mg-Si	97% Al; 1% Mg; 1% Si	2707	8922	177	7,311		175	189	204					
Bronce de aluminio	95% Cu; 5% Al	8666	410	83	2,330									
Bronce	75% Cu; 25% Sn	8666	343	26	0,860									
Latón rojo	85% Cu; 9% Sn; 6% Zn	8714	385	61	1,804		59	71						
Latón	70% Cu; 30% Zn	8522	385	111	3,412	88		128	144	147	147			
Plata alemana	62% Cu; 15% Ni; 22% Zn	8618	394	24,9	0,733	19,2		31	40	45	48			
Constantán	60% Cu; 40% Ni	8922	410	22,7	0,612	21		22	26					
Fundición	4% C	7272	420	52	1,702									
Acero al carbono	0,5% C	7833	465	54	1,474		55	52	48	45	42	35	31	29
	1% C	7801	473	43	1,172		43	43	42	40	36	33	29	28
	1,5% C	7753	486	36	0,970		36	36	36	35	33	31	28	28

Anexo 13. Global Defaults.



Anexo 14. Fuente de calor, red de distribución de calor y consumidor de calor representado en PIPEPHASE.



Anexo 15. Fuente de calor.

Steam Source

Source Name: Short Name: PVT Property Set:

Mandatory Data

Pressure: ☐ Fixed kPa ☒ Estimated kPa

Enthalpy: Steam Quality % Temperature C

Standard Flowrate: ☐ Fixed kg/hr ☒ Estimated kg/hr

☐ Use Reference Source...

Source Priority:

☐ Disable Source

Anexo 16. Red de transporte de vapor.

Link <L006> Device Data

	Device Name	Data Entry Window	On?	Diameter (mm)	Length (m)	Elevation Change (m)	MWD (m)	Depth (m)	Inserts After
1	P001	Pipe	☒	70.900	3.000				Pipe
2	V001	Valve	☒	70.900					Pipeline
3	P002	Pipe	☒	70.900	70.000	1.200			Tubing
4	B001	Bend	☒	70.900					Annulus
5	P004	Pipe	☒	70.900	71.000	1.900			IPR
6	B002	Bend	☒	70.900					VFP
7	P005	Pipe	☒	70.900	1.500	-1.500			Choke
8	B003	Bend	☒	70.900					
9	P006	Pipe	☒	70.900	39.000	0.400			
10	B004	Bend	☒	70.900					

Anexo 17. Consumidor de calor.

Sink

Sink Name	Short Name
MATADERO	MATA

☐ Injection Well

Mandatory Data

Pressure

☒ Fixed 686.47 kPa

☐ Estimated kPa

Standard Flowrate

☒ Fixed 1276.27 kg/hr

☐ Estimated 1 kg/hr

☐ Disable Sink

OK Cancel Help

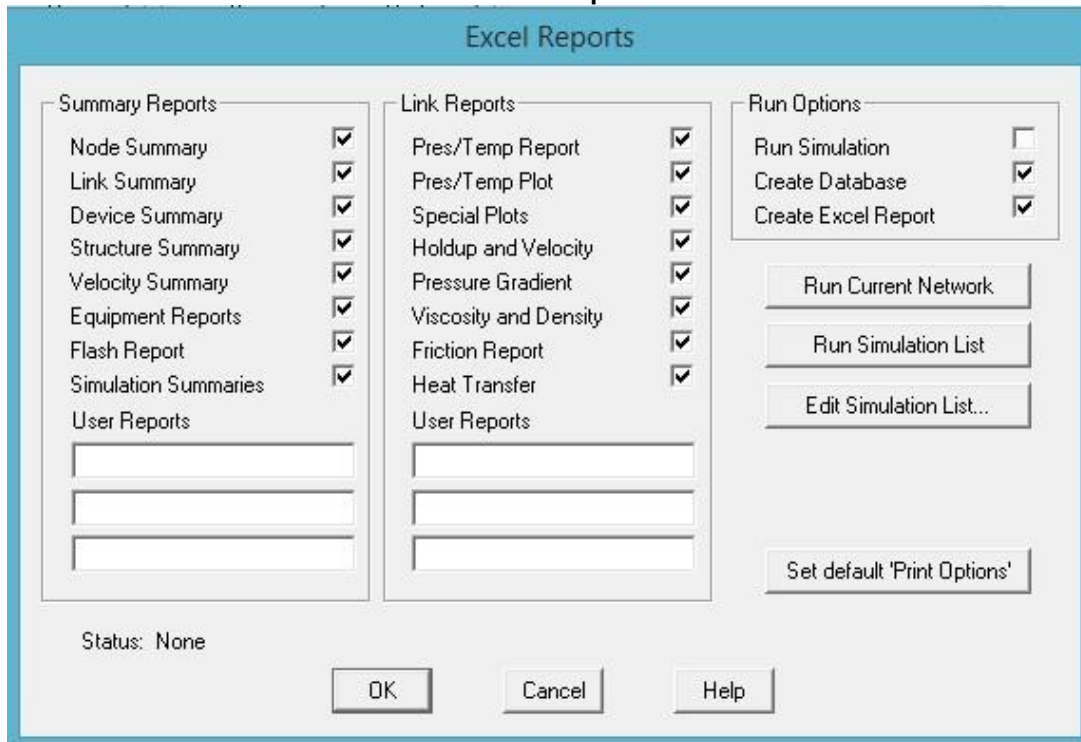
Anexo 18. Opción de chequeo y Correr.

Run Simulation and View Results

Run Configuration		Processing Tools	
Type	Network	File	Output File
Action	Run Simulation	View	Print
Link	L006	S4MPortal	EXCEL
	Stop	RAS	Run Other...

Run Status for File: JULIO TESIS

Close Help

Anexo 19. Generar reporte en Excel.

The image shows a software dialog box titled "Excel Reports". It is divided into three main sections: "Summary Reports", "Link Reports", and "Run Options".

- Summary Reports:** A list of report types with checkboxes. All are checked: Node Summary, Link Summary, Device Summary, Structure Summary, Velocity Summary, Equipment Reports, Flash Report, Simulation Summaries, and User Reports. Below the list are three empty text input fields.
- Link Reports:** A list of report types with checkboxes. All are checked: Pres/Temp Report, Pres/Temp Plot, Special Plots, Holdup and Velocity, Pressure Gradient, Viscosity and Density, Friction Report, Heat Transfer, and User Reports. Below the list are three empty text input fields.
- Run Options:** A list of options with checkboxes. "Run Simulation" is unchecked, while "Create Database" and "Create Excel Report" are checked. Below this list are three buttons: "Run Current Network", "Run Simulation List", and "Edit Simulation List...".

At the bottom of the dialog, there is a "Status: None" label and three buttons: "OK", "Cancel", and "Help". A "Set default 'Print Options'" button is also present on the right side.