

Trabajo de Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Análisis en régimen permanente de redes multienergéticas

MEMORIA

Autor: Jordi Gordillo Torres
Director: Juan José Mesas García
Codirector: Luis Sainz Sopera
Convocatoria: Septiembre 2022



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resumen

El presente TFM, titulado “Análisis en régimen permanente de redes multienergéticas”, pretende servir como referencia en el análisis en régimen permanente de redes que integran múltiples portadores de energía, contribuyendo a la evolución de los tradicionales modelos que analizan las distintas redes de forma aislada.

En los primeros capítulos, se pondrán en contexto los sistemas de suministro de energía, enfatizando en las características y diferencias entre las redes energéticas tradicionales y las redes multienergéticas. En cuanto a la redes multienergéticas, se explicará el valor añadido que poseen, su funcionamiento y los principios básicos que las caracterizan. Además, se expondrán dos aspectos actuales de gran relevancia: las tecnologías de almacenamiento y los elementos de acople que se utilizan para interconectar unas redes energéticas con otras. También, se tratarán los potenciales beneficios de las redes multienergéticas que, tanto en el presente como en el futuro, se acontecen cruciales debido a la crisis climática y energética que se está padeciendo a nivel global.

Posteriormente, se detallarán las ecuaciones características de las distintas redes energéticas necesarias para llevar a cabo el análisis en régimen permanente. La red eléctrica, la red de gas natural y la red térmica de calor y frío serán las consideradas en este estudio. Tras la presentación de las ecuaciones, se estudiará un caso particular del análisis en régimen permanente de una red multienergética concreta. Esta red se representará de forma gráfica, se describirán las interconexiones entre los distintos portadores de energía, se expondrán los sus datos técnicos y se formularán y desarrollarán las ecuaciones que anteriormente se han presentado de forma teórica.

A continuación, se presentarán los métodos numéricos iterativos de resolución considerados (FSOLVE y Newton-Raphson con jacobiano numérico), así como el procedimiento de resolución y los resultados obtenidos. Finalmente, se explicarán los pros y contras de la aplicación de ambos métodos y se verificará que los resultados obtenidos para la red eléctrica (voltajes en módulo y ángulos), la red de gas natural (presiones) y la red térmica (caudales máxicos y temperaturas) son correctos, ya que cumplen con la distribución, funcionamiento, consumos y las características técnicas de la red multienergética objeto de estudio.

Sumario

RESUMEN	3
SUMARIO	5
1. GLOSARIO	7
2. PREFACIO	9
2.1. Origen del TFM	9
2.2. Motivación	9
2.3. Requerimientos previos.....	9
3. INTRODUCCIÓN	11
3.1. Objetivos del TFM	11
3.2. Alcance del TFM	11
4. CONTEXTUALIZACIÓN E INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE SUMINISTRO DE ENERGÍA	13
4.1. Vectores energéticos.....	14
4.2. Redes energéticas tradicionales	15
4.3. Sistemas integrados de energía: redes multienergéticas	17
4.3.1. Definición de los sistemas integrados de energía o redes multienergéticas ...	18
4.3.2. Valor añadido de los sistemas integrados de energía o redes multienergéticas	19
4.3.3. Características, funcionamiento y principios básicos de las redes multienergéticas	20
4.3.4. Tecnologías de almacenamiento y acople entre redes energéticas.....	22
4.4. Retos en la integración de las redes multienergéticas	27
5. BENEFICIOS POTENCIALES DE LAS REDES MULTIENERGÉTICAS	29
5.1. Descarbonización del sistema energético mediante un incremento de su eficiencia global	29
5.2. Incremento de la generación y uso de las energías renovables	31
5.3. Reducción de costes	31
5.4. Mejora de la seguridad y operación de los sistemas de energía	32
5.4.1. Incremento en la flexibilidad del sistema energético	33
5.4.2. Incremento en la fiabilidad y la resiliencia del sistema energético.....	34
5.5. Métodos de análisis de redes multienergéticas	35

6. ECUACIONES CARACTERÍSTICAS EN RÉGIMEN PERMANENTE DE LAS DISTINTAS REDES ENERGÉTICAS QUE INTEGRAN UNA RED MULTIENERGÉTICA	37
6.1. Introducción al análisis en régimen permanente	37
6.2. Notación empleada en el análisis en régimen permanente.....	38
6.3. Modelo y ecuaciones de los elementos de acoplamiento	39
6.4. Modelo y ecuaciones de análisis de la red eléctrica.....	41
6.5. Modelo y ecuaciones de análisis de la red de gas natural	45
6.6. Modelo y ecuaciones de análisis de la red térmica de frío y calor.....	51
6.7. Resumen de las ecuaciones de balance para el análisis en régimen permanente en función del tipo de red energética.....	58
7. EXPLICACIÓN GENÉRICA DE LOS DOS MÉTODOS NUMÉRICOS ITERATIVOS CONTEMPLADOS	61
7.1. Motivo de la contemplación de métodos numéricos iterativos para la resolución de los sistemas de ecuaciones.....	62
7.2. Método iterativo FSOLVE (MATLAB)	62
7.3. Método iterativo Newton-Raphson con jacobiano numérico	63
8. ANÁLISIS EN RÉGIMEN PERMANENTE DE UNA RED MULTIENERGÉTICA PARTICULAR	67
8.1. Descripción y representación gráfica de la red multienergética objeto de estudio	67
8.2. Datos y parámetros técnicos de los elementos de acople, los nodos y las redes energéticas que forman parte de ella	68
8.3. Formulación y desarrollo de las ecuaciones necesarias para el análisis en régimen permanente de la red multienergética	78
8.4. Resolución numérica y resultados obtenidos	90
9. ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL	107
PLANIFICACIÓN TEMPORAL	109
PRESUPUESTO	111
CONCLUSIONES	113
AGRADECIMIENTOS	115
BIBLIOGRAFÍA	117
Referencias bibliográficas	117

1. Glosario

UE	Unión Europea
PNIEC	Plan Nacional Integrado de Energía y Clima
GEI	Gas de Efecto Invernadero
UN	<i>United Nations</i>
GNL	Gas Natural Licuado
AFS	Agua Fría Sanitaria
ACS	Agua Caliente Sanitaria
MAT	Muy Alta Tensión
AT	Alta Tensión
MT	Media Tensión
BT	Baja Tensión
ERM	Estación de Regulación y Medida
CHP	<i>Combined Heat and Power</i>
C-CHP	<i>Combined Cooling, Heat and Power</i>
EDAR	Estación Depuradora de Aguas Residuales
SNG	<i>Synthetic natural gas</i>
SMR	<i>Steam methane reforming</i>
GB	<i>Gas boiler</i>
AC	<i>Absorption chiller</i>

2. Prefacio

La ingeniería se caracteriza por la constante superación de fronteras científicas, lo que permite el desarrollo y la evolución de la humanidad. Este TFM toma esta filosofía como referencia, ya que su objetivo principal es ampliar el conocimiento en tecnologías recientes que se espera sean indispensables en la lucha contra el cambio climático y la crisis energética.

2.1. Origen del TFM

Tradicionalmente, la modelización y estudio de las redes de energía se ha llevado a cabo de forma independiente para cada portador de energía. Así pues, existen modelos y métodos bien establecidos para el análisis en régimen permanente de redes eléctricas, redes de gas y redes térmicas por separado. Este trabajo puede considerarse como una apuesta para la mejora de la modelización y análisis que se lleva a cabo en las redes portadoras de energía, integrándolas entre ellas y obteniendo resultados sobre su funcionamiento en régimen permanente.

2.2. Motivación

En los últimos años, está surgiendo un gran interés a todos los niveles en identificar y realizar las oportunidades de integrar redes de energía evitando impactos no deseados.

La motivación en la elaboración de este trabajo radica en la necesidad de las redes portadoras de energía de reducir pérdidas, mejorar rendimiento, optimizar su funcionamiento e intentar beneficiarse de la capacidad de interconexión con otras redes habilitadas para otros portadores de energía. Estas interconexiones generan interdependencias entre unas redes energéticas y otras, lo que requiere de herramientas y softwares de análisis. Sin embargo, las ofertas comerciales y las líneas de investigación son reducidas.

2.3. Requerimientos previos

Para la correcta comprensión de lo expuesto en esta memoria se requieren conocimientos en los principios básicos y en el funcionamiento de los sistemas energéticos integrados, así como en los principales métodos numéricos iterativos para la resolución de sistemas de ecuaciones no lineales. Finalmente, se requerirán conocimientos de programación en el *software* MATLAB.

3. Introducción

En el presente TFM se siguen las líneas de investigación que ya se iniciaron en estudios como la Tesis Doctoral “*Combined Analysis of Coupled Energy Networks*” de Muditha Abeysekera (*Institute of Energy, Cardiff School of Engineering, Cardiff University, 2016*) o en la investigación “*Unlocking the potential of Energy Systems Integration*” del *Imperial College London*.

3.1. Objetivos del TFM

El objetivo del presente estudio es desarrollar modelos y métodos para llevar a cabo el análisis en régimen permanente de redes que integran múltiples portadores de energía. Lo que se pretende es extenderlos y combinarlos adecuadamente para poder hacer frente de una forma integrada al análisis en régimen permanente de redes con múltiples portadores de energía. Los resultados proporcionados por el código que se programará permitirán analizar las características de este tipo de redes, así como determinar los beneficios de operación de las redes que integran diferentes sistemas energéticos. Además, se explicará el funcionamiento y los principios básicos de los sistemas integrados de energía y las principales tecnologías de acoplamiento entre redes energéticas distintas.

3.2. Alcance del TFM

El TFM partirá de la descripción, principios básicos y funcionamiento de las redes multienergía de forma teórica hasta la formulación mediante expresiones matemáticas del modelo de dichas redes. Posteriormente, se desarrollará un código mediante el *software* MATLAB que permitirá resolver los sistemas de ecuaciones no lineales asociados a las redes multienergía. Para el presente trabajo, serán consideradas las redes eléctricas, las redes de gas natural y las redes térmicas (refrigeración y calefacción) en régimen permanente como únicas integrantes de las redes multienergéticas.

Sin embargo, no se van a contemplar redes que sean malladas o que integren la red de hidrógeno. Finalmente, como elementos de acoplamiento se considerarán una cogeneración, una caldera de gas y un *absorption chiller*.

4. Contextualización e introducción a los sistemas de suministro de energía

Las actuales políticas de la Unión Europea (UE) en materia energética apuestan por la **descarbonización, digitalización y descentralización** de los sistemas energéticos. Por este motivo, los Estados miembros de la UE están elaborando planes de acción para ajustarse a las nuevas políticas y poder alcanzar los objetivos marcados para luchar contra el cambio climático.

El 8 de julio de 2020, la Comisión Europea publicaba un comunicado destinado al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones, titulado “*Impulsar una economía climáticamente neutra: Una estrategia de la UE para la Integración del Sistema Energético*” donde se proponían una serie de medidas políticas y legislativas concretas para configurar y acelerar la transición hacia un sistema energético más integrado [1].

En España, el Consejo de Ministros, a propuesta del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, aprobaba, el pasado 16 de marzo de 2021, el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC) [2]. Los principales focos de actuación del PNIEC hasta 2030 se recogen a continuación:

- **Reducción** de las **emisiones de gases de efecto invernadero** (GEI) en un 23% respecto a 1990, favoreciendo a la descarbonización de la economía [2].
- Incremento de **energías renovables**, alcanzando el 42% sobre el uso final de la energía [2].
- Mejorar la **eficiencia energética** en un 39,5% y la **seguridad energética** [2].
- 74% de energía renovable en la generación eléctrica [2].
- Alcanzar el 15% de **interconexión** eléctrica de los Estados miembros [2].

Con todas estas medidas, la Comisión Europea busca alcanzar “*una economía próspera, moderna, competitiva y climáticamente neutra en 2050*” (“Un planeta limpio para todos” COM 2018) [3].

Según informes publicados por las Naciones Unidas (UN), las ciudades son uno de los mayores contribuidores al cambio climático [4]. De acuerdo con el *UN Habitat*, las ciudades consumen entorno al 78% del total de la energía mundial y generan más de un 60% de las

emisiones de gases de efecto invernadero [4]. Además, según publicó la Comisión Europea el pasado 14 de julio de 2021 en el documento titulado “*Decarbonising our energy system to meet our climate goals*”, el 75% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero emitidas por la UE provienen del sector energético [5].

De esta forma, el presente trabajo adquiere suma importancia, puesto que permitirá integrar redes con diferentes portadores de energía (redes multienergéticas), provocando una mejora directa en los sistemas de suministro de energía y actuando, directamente, en los objetivos anteriormente comentados. La apuesta por las redes multienergéticas supondrá numerosas mejoras entre las que destacan el incremento del rendimiento global de los sistemas, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, el aumento de la generación mediante energías renovables, la construcción de una infraestructura moderna, sostenible y competitiva, la creación de nuevos puestos de trabajo y nuevas líneas de investigación e inversión o el suministro de energía limpia a los ciudadanos [6]. Todos estos aspectos, serán explicados a lo largo del documento.

La integración del sistema energético no solo tiene relevancia en el ámbito tecnológico, sino que también está siendo tratado por la Unión Europea como uno de los ejes principales de la recuperación económica tras la crisis de la COVID-19 [1].

4.1. Vectores energéticos

Un vector energético es capaz de almacenar energía para posteriormente liberarla de forma controlada [7]. En el presente apartado, se procede a explicar los distintos tipos de vectores energéticos y sus principales características.

Si los vectores son de origen natural [7], se puede diferenciar entre:

- **Carbón:** Combustible sólido extraído del suelo mediante un proceso de minería. El método de transporte habitual es por tierra o mar [7].
- **Gas Natural:** Mezcla de hidrocarburos en forma gaseosa compuesto principalmente de metano y extraído mediante perforaciones [7]. Se transporta mediante petroleros o gasoductos en forma de gas natural licuado (GNL).

Si los vectores energéticos provienen de fuentes de energía refinadas o procesadas [7], se distingue entre:

- **Derivados del petróleo:** El petróleo extraído de las formaciones geológicas se somete a un proceso de destilación y se refina en diferentes combustibles (gasolina, diésel...) [7]. Se transportan por tuberías, tierra o mar.
- **Combustibles sintéticos:** Obtenidos del procesamiento de biomasa o combustibles fósiles (biodiesel, *syngas*, biogás...) [7]. El método de transporte habitual es por carretera o mediante tuberías.

Finalmente, si se trata de vectores energéticos derivados [7], se puede diferenciar entre:

- **Electricidad:** Flujo de carga eléctrica a través de un material conductor. Se transmite a través de una red de líneas y cables hasta los puntos de consumo [7].
- **Hidrógeno:** Gas incoloro y muy inflamable con presencia mínima en la atmósfera. Se produce a partir del reformado de gas natural y la electrólisis del agua [7]. El método de transporte habitual es por carretera y tuberías de gas.
- **Agua fría sanitaria (AFS) y agua caliente sanitaria (ACS):** Capacidad para transportar y almacenar energía en forma de energía térmica. El transporte se realiza a través de una red de tuberías [7].

4.2. Redes energéticas tradicionales

En el presente trabajo, se considerarán las redes eléctricas, las redes de gas natural y las redes térmicas (calefacción y refrigeración). Tradicionalmente, este tipo de redes energéticas se han diseñado, desarrollado, controlado y operado de forma independiente [7]. A continuación, se procede a explicar brevemente cómo funcionan las actuales redes y cuáles son sus componentes principales, primordial para el posterior desarrollo de las redes multienergéticas (derivadas de la integración del sistema energético).

- **Red eléctrica:**

Las centrales generadoras son las encargadas de producir electricidad a niveles que oscilan entre 1 y 6 kV. Esta electricidad es conducida hasta las estaciones transformadoras elevadoras que elevan la tensión a valores de entre 132, 200 y 400 kV con el objetivo de reducir la intensidad que circula por las líneas eléctricas y evitar las pérdidas que se manifiestan siempre que circula una corriente por un cable. A través de líneas aéreas de muy alta tensión (MAT) la electricidad es llevada hasta las subestaciones transformadoras, rebajando la tensión hasta valores como 66, 45 o 30 kV, pasando de MAT a AT (alta tensión). Posteriormente, las líneas de distribución AT conducen la electricidad hasta las estaciones

transformadoras de distribución donde la tensión desciende hasta 25, 20, 15, 10 o 6 kV, valores de media tensión (MT). Finalmente, las líneas MT llevan la electricidad hasta algunos usuarios industriales o hasta los centros de transformación donde la electricidad se desciende a valores de baja tensión (BT), 230 o 400 V, aptos para usuarios residenciales (domésticos y comerciales). Además, la red eléctrica dispondrá de los elementos de seguridad, control y maniobrabilidad necesarios.

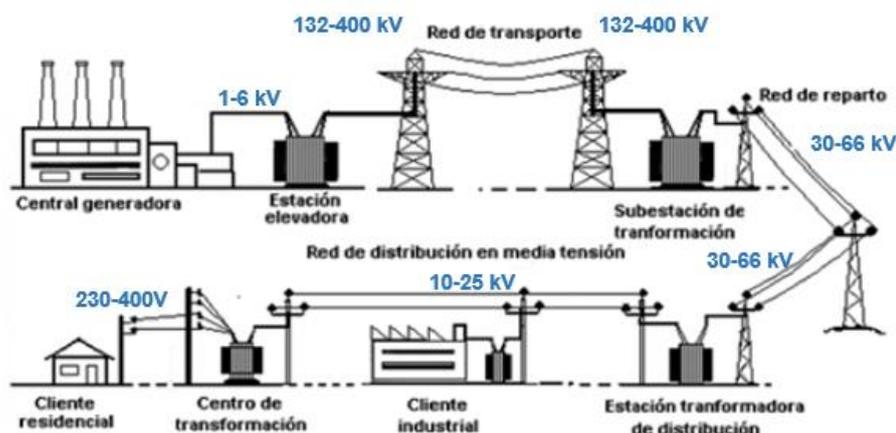


Figura 1. Proceso de distribución de energía eléctrica. Fuente: Wikipedia [8].

- **Red de gas natural:**

Cuando el gas natural es extraído, se procede a tratarlo y procesarlo dejándolo en condiciones óptimas para su transporte y comercialización. El transporte de gas natural se realizará mediante gasoductos, a altas presiones (36-70 atmósferas) y en estado gaseoso, o a través de buques metaneros (o criogénicos), previa conversión a gas natural licuado (GNL) [9]. En ocasiones, por cuestiones logísticas, el gas natural es almacenado de forma subterránea o en los tanques de las plantas de regasificación, en el caso del GNL. Cuando lo exija la demanda, el GNL será regasificado en la planta regasificadora e inyectado en la red de distribución, donde se mezclará con el gas proveniente de los gasoductos, previo paso por las estaciones de regulación y medida (ERM), situadas en los nodos que unen la red de transporte y las redes de distribución [9]. En el transporte del gas natural, la presión se va reduciendo a medida que va pasando por sucesivas plantas descompresoras, hasta que llega a los puntos de consumo, donde la presión es de, aproximadamente, 22 milibares (mbar) [9]. También podrán instalarse estaciones compresoras que se encargarán de elevar la presión del gas y asegurarse de que este llegue a su destino. El sistema de distribución de gas natural también dispone de dispositivos de seguridad, control y maniobrabilidad [9].

Si el transporte no puede realizarse vía gasoducto ni mediante buques metaneros, los encargados del transporte serán los camiones cisterna, en forma de GNL.

- **Red térmica (calor y frío):**

La red térmica de frío y calor se ha diseñado para suministrar energía térmica, dotando de calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria a los puntos de consumo, logrando prescindir de los equipos convencionales que se utilizan para estas finalidades [10]. La producción de la energía térmica se centraliza en centrales con altos rendimientos y reducido impacto ambiental. La distribución se realiza mediante agua que circula por tuberías, tanto de agua caliente como agua fría. La introducción de este tipo de redes en el sistema energético permite reducir costes, garantizar el suministro, incrementar la flexibilidad y la adaptabilidad, reducir las emisiones (por ejemplo, cuando se aprovecha el calor de un incineradora para calentar el agua que posteriormente se suministrará a los puntos de consumo), reaprovechar energías o disminuir el consumo eléctrico total necesario para satisfacer la demanda [10]. Un ejemplo de este tipo de red es la situada en Barcelona y Sant Adrià de Besòs llamada “*Districlima*” [10].

El sistema energético actual presenta flujos de energía lineales en una sola dirección, causantes de elevadas pérdidas de energía [6].

Según algunos estudios realizados, si las redes energéticas son tratadas de forma individualizada, como en el presente, cada una de estas redes son responsables de entre un 25 y un 60% de pérdidas de energía [11]. Como se determinará en los próximos apartados, el concepto de multienergía pretende mejorar sustancialmente los sistemas de suministro de energía.

4.3. Sistemas integrados de energía: redes multienergéticas

Tal y como se ha presentado en el anterior apartado, tradicionalmente, las redes que portan distintos vectores energéticos han sido desarrolladas y operadas de forma individualizada (ver Figura 1), sin dependencias entre estas [7]. Sin embargo, en los últimos años, se han incrementado considerablemente las **interacciones** entre los diferentes sistemas de suministro de energía, incluyendo a los usuarios, ciudades y regiones [11]. Las redes que protagonizan la mayor parte de estas interacciones son las redes objeto de estudio en el presente trabajo (red eléctrica, de gas natural y térmica). La **interconexión** entre las distintas redes da lugar a las redes multienergéticas (ver Figura 2). La creación de estos vínculos entre sistemas requiere de acciones basadas en la optimización, la transformación y el almacenamiento de energía, con el objetivo de evitar las actuales limitaciones del sistema [11].

La concepción de este tipo de redes surge de la necesidad de cumplir con los objetivos ambientales, económicos y políticos derivados de la crisis ambiental actual. Para poder instalar y utilizar más energías renovables y reducir las emisiones de carbono es necesario que el sistema energético sea más flexible, versátil y fiable [11]. La integración de las redes energéticas implica a numerosos agentes: electricidad, energía térmica, combustible (principalmente gas natural), agua, datos (para una correcta comunicación) y transporte [11].

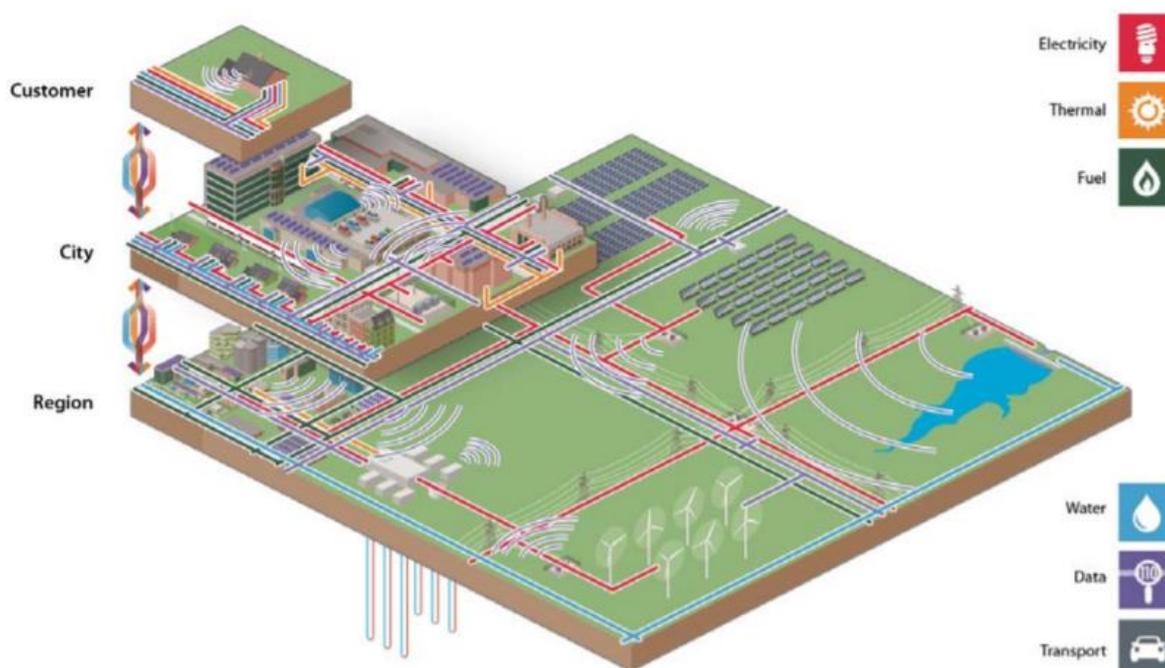


Figura 2. Propuesta de sistemas energéticos integrados a nivel regional, urbano y doméstico. Fuente: *Energy Systems Integration* [12].

4.3.1. Definición de los sistemas integrados de energía o redes multienergéticas

La integración de sistemas de energía (redes multienergéticas) es aquel proceso que permite coordinar la operación y la planificación de los sistemas de energía a través de múltiples vías [12]. Este proceso, con un impacto ambiental mínimo, permitirá garantizar el suministro de servicios energéticos de forma rentable [12].

Las redes multienergéticas requieren de la interacción entre los distintos vectores energéticos que se han presentado en el apartado 4.1, las infraestructuras energéticas y los sectores de consumo. Actualmente, se considera que la integración de los sistemas energéticos es uno de los retos tecnológicos más importantes que se pueden llevar a cabo y que pueden reportar

mayores beneficios en numerosos ámbitos que serán detallados en los próximos apartados. La integración de las redes energéticas es un proceso multidisciplinar en el que interviene la ingeniería, la tecnología, la ciencia, la economía, la política y los factores sociales [12].

Para poder llevar a cabo la instalación de redes multienergéticas, se deberán tener en cuenta numerosos aspectos técnicos en los que influyen la geografía, el entorno o la capacidad tecnológica y económica del lugar donde se quieren implantar [12].

4.3.2. Valor añadido de los sistemas integrados de energía o redes multienergéticas

El valor añadido de las redes multienergéticas radica en su capacidad para coordinar la producción y el suministro entre las distintas redes para satisfacer la demanda de forma económica y ambientalmente viable [12]. Una correcta gestión de las redes multienergéticas puede proporcionar información valiosa sobre las mejores estrategias para lograr estos objetivos [12]. Es decir, se puede obtener información para determinar qué redes energéticas y qué elementos de acople entre redes hay que utilizar para producir energía de la forma más eficiente en un determinado momento.

Se espera que las redes multienergéticas puedan ser un canal a través del cual se puedan resolver una buena parte de los problemas energéticos mediante las siguientes áreas (ver Figura 3) [12]:

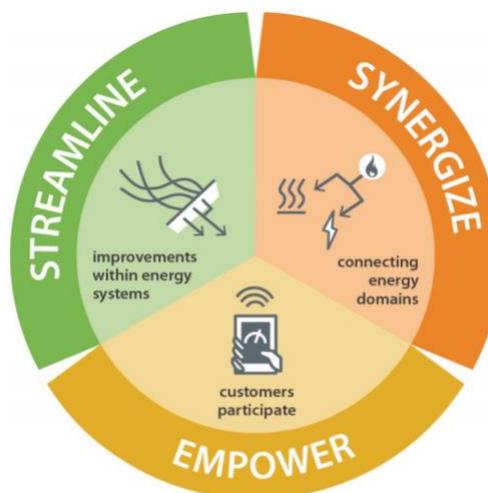


Figura 3. Áreas de innovación para los sistemas integrados de energía. Fuente: Energy Systems Integration [12].

- **Modernizar/tecnificar** ("streamline"): La integración de las redes energéticas supondrá una reestructuración, una reorganización y una modernización del sistema energético actual, dando lugar a un nuevo paradigma energético (ver Figura 2) [12].

Las interconexiones que se llevarán a cabo permitirán aumentar la eficiencia tanto en la producción como en el suministro, lo que repercutirá positivamente en la gestión del sistema energético [12]. Se eliminarán barreras y restricciones del actual sistema que hacen que sea un sistema rígido y unidireccional [12].

- **Sinergizar** (“*synergize*”): La sinergia entre distintas redes energéticas permitirá conectar portadores energéticos que hasta el momento no habían interactuado entre ellos (o al menos de forma habitual) reportando un aumento en la eficiencia y el rendimiento [12].
- **Empoderar** (“*empower*”): Las redes multienergéticas abrirán la posibilidad a que los usuarios sean un activo de estas. Los usuarios podrán invertir (apostando, por ejemplo, en una planta de generación renovable doméstica), participar de forma activa (a través de los coches eléctricos o híbridos) o cambiar sus modos de energía [12].

4.3.3. Características, funcionamiento y principios básicos de las redes multienergéticas

La Comisión Europea, en el documento titulado “*EU Energy System Integration Strategy*” que publicó el pasado 8 de julio de 2020, expone los puntos clave de las redes multienergéticas [6]. En este documento se destaca que la futura integración de los sistemas energéticos permitirá que la energía fluya entre los usuarios, productores y distintas redes, reduciendo el desperdicio de los recursos y provocando un ahorro económico [6].

El flujo energético entre distintas redes dará lugar a un sistema energético más eficiente y circular, aprovechando sinergias entre sectores [6]. El sistema energético actual desperdicia una parte importante de la energía que genera. Sin embargo, la instalación de redes multienergéticas permitirá reducir sustancialmente este residuo [6]. De esta forma, se incentiva la eficiencia energética o el reaprovechamiento de los recursos (por ejemplo, generando biogás o biocombustibles) [6].

La integración de las redes energéticas permitirá acelerar la producción mediante energías renovables y progresar hacia la sustitución de los combustibles fósiles [6]. Esta característica permitirá reducir considerablemente las emisiones de CO₂ y formar parte de la lucha contra el cambio climático [6].

La dificultad de algunos sectores para electrificarse puede ser remediada a través de la integración de los sistemas energéticos incluyendo combustibles de bajas emisiones o

apostando por el hidrógeno como vector energético [6].

Además, las redes multienergéticas permitirán tratar de forma equitativa a todos los portadores de energía, informar a los usuarios sobre sus consumos o digitalizar los servicios energéticos, entre otros [6].

La siguiente figura adjunta (ver Figura 4) muestra las posibles interacciones entre los distintos sistemas portadores de energía:

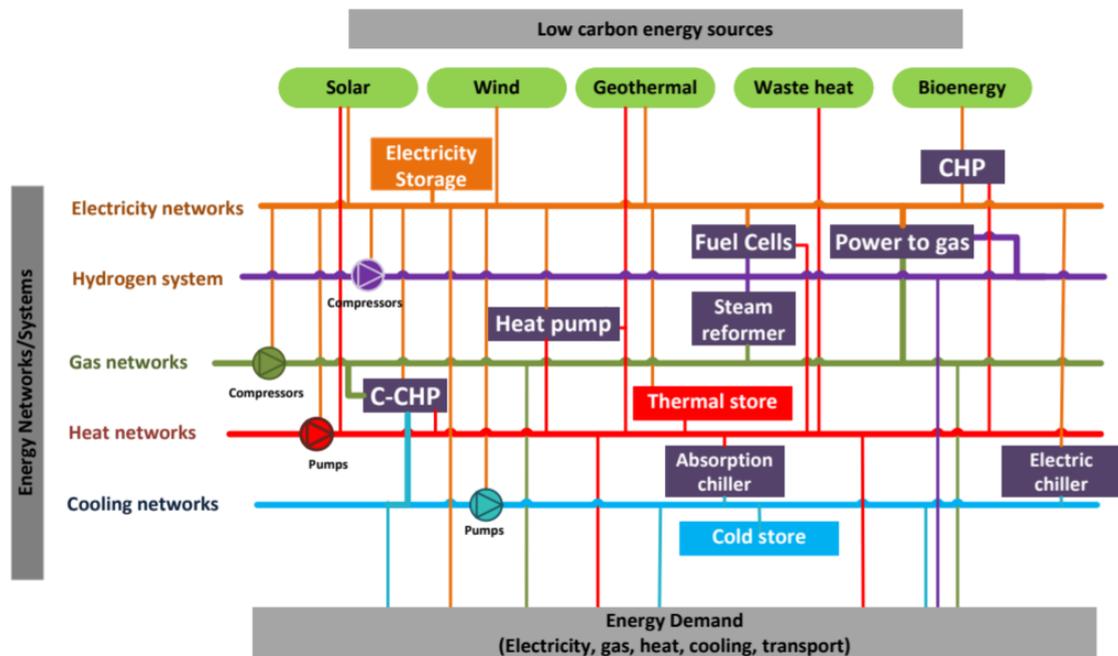


Figura 4. Relación entre las fuentes de suministro de energía y las redes y posibilidades de interconexión y transformación entre distintas redes energéticas. Fuente: Muditha Abeysekera [7].

La Figura 4 determina, a modo esquemático, el funcionamiento (multidireccional), las características y los sistemas de acoplamiento principales (desarrollados con mayor detalle en el subapartado 4.3.4) de las redes multienergía. Como se puede observar, cada una de las redes está representada por un color diferente en función de la energía que transportan, y las tecnologías o componentes de acople entre redes se representan a través de recuadros coloreados. El funcionamiento de las redes multienergía se basa en el uso de las energías bajas en emisiones de carbono y en la regulación de estas en función de la demanda.

Según se afirma en la Tesis Doctoral de Muditha Abeysekera, “se espera que la integración de los sistemas de suministro de energía influya en el diseño y en la operación técnica y económica de los sistemas energéticos” (Institute of Energy, Cardiff School of Engineering, Cardiff University, 2016) [7].

La implantación de las redes multienergéticas tiene como objetivos principales [1]:

- Incrementar la eficiencia global del sistema energético provocando una reducción de las emisiones de carbono en un sector difícil de descarbonizar [1].
- Reducción de la cantidad de energía necesaria y las repercusiones medioambientales y climáticas consecuentes [1].
- Incrementar la generación y utilización de energías renovables (el desarrollo de los sistemas de almacenaje permitirá aumentar tanto la generación como la utilización de las renovables ya que los sistemas dispondrán de capacidad para adaptarse a las oscilaciones entre producción y demanda) [1].
- Incrementar la flexibilidad, la resiliencia y fiabilidad del sistema energético [1].
- Impulsar las tecnologías de almacenamiento de energía [1].
- Reforzar la competitividad de la economía europea [1].
- Reducir los costes asociados a la gestión, operación y mantenimiento de las redes energéticas [1].
- Dar lugar a nuevas áreas de negocio, nuevos mercados energéticos y nuevas líneas de investigación [1].

4.3.4. Tecnologías de almacenamiento y acople entre redes energéticas

La interacción entre las distintas redes energéticas se produce a través de unidades de conversión de energía (turbina de gas, por ejemplo) y de tecnologías de soporte a la red (compresor de gas, por ejemplo). De esta forma, los dos ejemplos que se han destacado en este subapartado interconectan la red eléctrica con la red de gas natural introduciendo interdependencias técnicas y económicas. A continuación, se detallan los distintos elementos o tecnologías que permiten realizar interacciones entre distintos sistemas portadores de energía o que dan soporte a la red (según la información mostrada en la Figura 4):

- **Electricity storage** (almacenamiento de electricidad): Capacidad para almacenar energía eléctrica producida en un determinado momento para consumir con posterioridad. Permite contrarrestar las fluctuaciones entre la producción y la demanda

[7]. En ocasiones, el almacenamiento proporciona beneficios económicos, ambientales y fiabilidad a la red. En la actualidad, cobra mayor importancia ya que permite aumentar el uso de recursos renovables (esencial para el desarrollo de las redes multienergía) [7]. La energía eléctrica puede ser almacenada por diferentes vías entre las que destacan la hidroeléctrica de bombeo, el aire comprimido, volantes de inercia, baterías o almacenamiento de energía térmica.

- **Combined Heat and Power (CHP):** La cogeneración es una tecnología energéticamente eficiente ya que permite la generación de electricidad y el aprovechamiento del calor producido para obtener energía térmica útil, que en otras circunstancias sería desaprovechado, a partir de un combustible, generalmente, gas natural. Por ejemplo, una aplicación de la cogeneración es en las Estaciones Depuradoras de Agua Residuales (EDAR). En estas instalaciones, aprovechan el biogás generado en la descomposición anaeróbica de los lodos extraídos de la depuración de las aguas residuales (bioenergía). El biogás es utilizado en una turbina conectada a un alternador eléctrico que producirá la electricidad que será inyectada en la red eléctrica. Por otro lado, el sistema de recuperación de los gases de escape aprovechará su energía térmica para devolver el calor al proceso de digestión de los lodos, calentar agua o generar vapor para otros procesos de la planta (a través de la red térmica).
- **Fuel Cell** (pila de combustible): Dispositivo electroquímico que transforma, directamente, la energía química en eléctrica. Sus componentes principales son los electrodos, el electrolito y las placas bipolares [13]. Generalmente, el combustible utilizado es el hidrógeno y el comburente suele ser el oxígeno [13]. Permite producir agua, electricidad en forma de corriente continua y calor [13]. Por tanto, este dispositivo consumirá hidrógeno de la red e inyectará electricidad y calor a las correspondientes redes.
- **Power to gas:** Este concepto se refiere a la conversión de electricidad en energía térmica en forma de metano, que podrá ser almacenado e introducido a la red gasista cuando sea requerido. La clave de este proceso es el aprovechamiento de los excedentes de electricidad que se producen en los sistemas de energía renovable, convirtiendo la electricidad y, posteriormente, almacenándola en forma de hidrógeno, obtenido de la electrólisis del agua (separación de hidrógeno y oxígeno) [14]. El hidrógeno será utilizado para producir metano a partir de CO_2 [14]. Como resultado se obtiene un gas natural sintético (SNG por sus siglas en inglés, o *syngas*) con las mismas funcionalidades que el gas natural convencional [14]. Por tanto, esta tecnología de acople entre redes energéticas consumirá electricidad de la red eléctrica y suministrará hidrógeno y gas natural al sistema de hidrógeno y a la red de gas

respectivamente. El gas que se introducirá en el sistema podrá ser almacenado o utilizado para la generación de calor o electricidad (ver Figura 5).

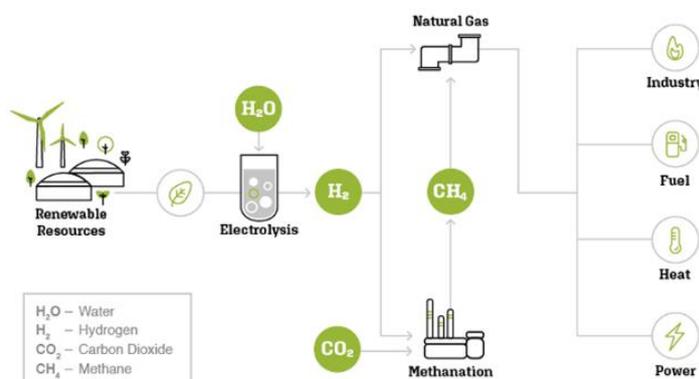


Figura 5. Funcionamiento de un sistema "Power to gas". Fuente: Key Technology [15].

- **Heat Pump** (bomba de calor): Dispositivo normalmente accionado por energía eléctrica (fuente de energía externa) a partir de la cual puede suministrar calor y/o frío mediante un ciclo de refrigeración reversible [16]. Si se analizan los componentes de las bombas de calor, se determina que el elemento que posee un mayor consumo es el compresor [16]. La energía térmica producida es considerablemente superior a la energía eléctrica consumida, dando lugar a un sistema de alta eficiencia [16]. Otras ventajas considerables son el bajo mantenimiento que requieren, el valor añadido de su instalación y el bajo impacto ambiental, gracias a la fácil implementación junto a energías renovables y a las bajas emisiones de CO₂ que provoca en comparación con las habituales calderas [16]. De forma resumida, las bombas de calor consumirán electricidad de la red eléctrica e inyectarán calor a la red térmica.
- **Steam reformer** (reformador de vapor): Dispositivo rentable y energéticamente eficiente que se encarga de aplicar la tecnología de Reformado de Metano con Vapor (SMR) para la producción de hidrógeno. Por lo tanto, el reformador de vapor consumirá gas natural y proporcionará hidrógeno a la red. Empresas del sector como *Air Liquide Engineering & Construction* garantizan que gracias a la "tecnología interna de purificación mediante adsorción por oscilación de presión, pueden alcanzarse altos niveles de pureza" [17]. El gas natural recibe un tratamiento térmico y, posteriormente, es mezclado con vapor [17]. En ocasiones, se reforma previamente "antes de pasar por un catalizador en un reformador a vapor exclusivo con quemadores en la parte superior, para producir hidrógeno, monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂)" [17]. A continuación, se desplaza el vapor y el CO se convierte en hidrógeno y

CO₂ adicional. Después, el hidrógeno se separará utilizando la adsorción por oscilación de presión [17].

- **Combined Cooling, Heat & Power (C-CHP):** La trigeneración es un avance de la cogeneración, ya que además de producir electricidad y calor, también tiene la capacidad de generar frío (refrigeración) a partir de una parte del calor producido. Los componentes principales de los sistemas de trigeneración son el motor de gas (generalmente gas natural) que activa un generador de electricidad, un intercambiador de calor y un enfriador de absorción (*absorption chiller*, explicado en este mismo subapartado) [18]. Por lo tanto, la trigeneración consumirá energía de la red de gas natural y aportará energía a la red de electricidad y a la red térmica (calor y frío). Los sistemas C-CHP tienen numerosas ventajas entre las que destacan una alta eficiencia (ya que a partir de un solo recurso se obtienen tres fuentes distintas de energía), pueden ser utilizados como equipos de respaldo o emergencia en caso de corte del suministro habitual, poseen unos costes de combustible, energía y operación reducidos y son sistema de producción de energía de bajas emisiones en comparación con otros recursos como el carbón [18].
- **Thermal storage** (almacenamiento térmico): El almacenamiento térmico es la forma óptima de gestionar el calor hasta que sea requerido. El funcionamiento de este tipo de almacenamiento se basa en los mismos principios que el almacenamiento eléctrico y su máximo potencial ocurre cuando se utiliza para almacenar y gestionar varias entradas y salidas de calor diferentes [19]. Los principales beneficios de disponer de un acumulador de calor son la gestión en el tiempo de la producción y la demanda de calor, permitir a los sistemas de calentamiento renovables trabajar de forma más eficiente, reducción de la dependencia de combustibles fósiles, mínimo mantenimiento y facilidad de instalación [19]. De esta forma, el almacenamiento térmico intervendrá en dos redes portadoras de energía: la red eléctrica, para complementar la calefacción cuando otras fuentes no puedan suministrar suficiente energía, y la red térmica para extraer o suministrar calor [19].
- **Absorption chiller** (enfriador de absorción): Dispositivo encargado de consumir calor de la red térmica y generar e inyectar frío en la misma red. No requiere de un compresor eléctrico lo que permite la no contribución a un incremento en la demanda de energía eléctrica [20]. Los enfriadores de absorción utilizan refrigerantes no contribuyentes al calentamiento global ni al agotamiento de la capa de ozono [20].
- **Electric chiller** (enfriador eléctrico): El enfriador eléctrico convierte energía eléctrica en frío para satisfacer la demanda de refrigeración [21].

- **Cold storage** (almacenamiento de frío): El objetivo y funcionalidad del almacenamiento de frío es el mismo que el de electricidad y calor, aprovechar el excedente de frío en un determinado momento para utilizarlo cuando la demanda lo requiera.
- **Compressor** (compresor): Un compresor es el elemento diseñado para aumentar la presión de fluidos compresibles (gases y vapores). Se instalan en las redes de gas natural y de hidrógeno, con el objetivo de garantizar que se suministran y alcanzan los puntos de consumo con las especificaciones técnicas establecidas. Los compresores consumirán energía eléctrica para su funcionamiento y ejercerán de soporte de control de la red de gas natural e hidrógeno.
- **Pump** (bomba): La bomba transfiere fluidos transformando en energía hidráulica la energía suministrada por el motor. En este trabajo, las bombas se encuentran instaladas en la red térmica (tanto para el circuito de calefacción como el de refrigeración). Actuarán como elementos de soporte de control de la red térmica con el objetivo de garantizar que se cumplen las especificaciones técnicas de suministro. Para su funcionamiento requieren de un consumo de energía eléctrica.

La Figura 6 resume lo explicado en el subapartado 4.3.4. En ella se detallan las tecnologías de acople que permiten la integración de los sistemas de energía y el modo de interacción entre el elemento de acople y las distintas redes energéticas. El símbolo ‘+’ se refiere a la energía suministrada, el símbolo ‘o’ se refiere a la energía consumida y el símbolo ‘M’ se refiere al soporte de control de la red.

Network coupling technology										
	Gas Fired C-CHP	Gas fired CHP	Heat pump	Fuel Cell	Power to Gas	Steam reform	Absorption chiller	Electric chiller	Electric Compressor	Pump
Electricity network	+	+	o	+	o			o	o	o
Hydrogen system				o	+	+			M	
Natural gas network	o	O			+	o			M	
Heat network	+	+	+	+			o			M
Cooling network	+						+	+		M

Figura 6. Suministro y demanda de energía en función del elemento de acoplamiento utilizado y la red energética analizada. Fuente: Muditha Abeysekera [7].

Tras analizar los elementos que permiten el acople entre redes, se determina que aportan numerosas ventajas al sistema, ya que su funcionamiento se basa en el aprovechamiento de recursos que en la actualidad no se están teniendo en cuenta y de excedentes de energía en momentos donde la producción es mayor que la demanda. Además, permiten optimizar la operación de las redes y mejorar su regulación gracias a tecnologías como el desarrollo del almacenamiento, entre otras. Por otro lado, también se comprueba que la integración de los sistemas de energía, gracias a las tecnologías de acoplamiento que se han presentado en este subapartado, permiten actuar, directamente, sobre dos ámbitos en los que se centran las actuales políticas energéticas: la reducción de las emisiones de carbono y el incremento del uso de las energías renovables.

La integración de los sistemas de energía aporta grados de libertad al diseño y operación de las redes energéticas. También aportan muchos otros beneficios que se desarrollarán en los posteriores apartados del TFM.

4.4. Retos en la integración de las redes multienergéticas

La integración de los sistemas de suministro de energía es un ámbito poco conocido y desarrollado en la actualidad. Por este motivo, a la hora de implantar las redes multienergéticas, todavía quedan por resolver algunas cuestiones relacionadas con el desarrollo, la operación o la interacción entre redes que integran múltiples portadores de energía. A continuación, se detallan los principales retos que todavía faltan por afrontar y resolver en lo relacionado con esta tecnología:

- No se conocen en detalle las afectaciones técnicas, económicas y de mercado resultado de las complejas interacciones e interdependencias entre los sistemas energéticos [7].
- Las interacciones y las interdependencias también afectan al diseño y a la planificación de las redes multienergéticas. Sin embargo, todavía no se han desarrollado herramientas comerciales [7].
- La compleja estructura de los mercados energéticos e instituciones dificulta la obtención de beneficios a partir de la integración de las redes energéticas [7].
- La gestión y operación compartida de las redes multienergéticas implica una mayor complejidad y cobra mayor importancia en comparación con las redes energéticas que se tratan de forma individualizada. Avanzados *softwares* y herramientas de cálculo y análisis serán requeridos. De no conseguirse, las redes multienergéticas podrían provocar el efecto contrario por el que han sido ideadas, dando lugar a un sistema energético más susceptible a fallos, poco robusto y poco fiable [7].
- Desarrollo de modelos y métodos para llevar a cabo el análisis en régimen

permanente de redes que integran múltiples portadores de energía. Este punto es el objetivo principal del presente TFM.

5. Beneficios potenciales de las redes multienergéticas

Tras hacer una introducción a los sistemas integrados de suministro de energía, en el presente capítulo se pretende exponer, de forma detallada, los principales beneficios de las redes multienergéticas. De la misma forma, se expondrán los métodos de análisis de las redes multienergéticas en cuanto a planificación, diseño, operación y control se refiere. Tal y como se ha mencionado anteriormente, en el presente trabajo se considerará la red eléctrica, la red de gas natural y la red térmica (calor y frío).

La integración de los sistemas de energía podría ser un medio para mejorar la eficiencia de los recursos, hacer viable económicamente la mejora de la flexibilidad, la seguridad y la fiabilidad de la red eléctrica y ser un impulso más hacia la transición energética y la descarbonización del sistema energético [7]. La estrategia de integración de las redes portadoras de energía se llevará a cabo en función del entorno. Es decir, se deberá valorar si se trata de un área urbana o rural, un país desarrollado o en vías de desarrollo, entre otros. De forma general, el incremento de la generación y uso de las energías renovables es el principal impulsor de los sistemas integrados de energía [7].

5.1. Descarbonización del sistema energético mediante un incremento de su eficiencia global

Las redes multienergéticas posibilitan el uso de la cogeneración (CHP, por sus siglas en inglés), sistema que permitirá generar de forma simultánea energía térmica y energía eléctrica, afectando positivamente a la eficiencia del sistema, lo que repercute en la reducción de las emisiones. Según datos de *COGEN Europe*, la Asociación Europea para la Promoción de la Cogeneración [22], esta tecnología es un 40% más eficiente que la generación separada de calor y energía eléctrica y, gracias a la reducción de emisiones, los países de la UE evitan la emisión de 200 millones de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) anuales [22].

En las centrales productoras donde la electricidad y el calor se generan de forma separada, una parte considerable de la energía aportada por el combustible es desperdiciada, liberándose a la atmósfera (las pérdidas más significativas se producen en los gases de combustión y en los sistemas de refrigeración de los condensadores). Estas pérdidas pueden llegar a ser un 50% superiores en comparación con las de una central de cogeneración [7]. Esta reducción tan significativa de las pérdidas se consigue gracias al aprovechamiento de la energía que en otros casos sería desperdiciada, traduciéndose en un suministro de calor o de agua caliente a los puntos de consumo que lo demanden. De esta forma, se pueden alcanzar

del orden de un 20-30% en la reducción de emisiones [7].

Por otra parte, la cogeneración se considera una tecnología con capacidad de producción flexible y distribuida, adaptándose a las necesidades de la red [22]. Esto provoca, principalmente, un ahorro de energía, una reducción de las pérdidas y un incremento en la autonomía energética [22].

En otras ocasiones, contar con sistemas productores centralizados (generalmente cerca de los puntos de consumo, pero fuera del núcleo urbano) permite instalar equipos de mayor envergadura, los cuales disponen de mejores rendimientos de funcionamiento [7]. Esta centralización de la producción provocará, a su vez, una centralización de la operación y el mantenimiento del sistema, facilitando el control de las emisiones e incrementando la eficiencia del proceso [7].

Además, la integración de las redes energéticas facilita e incrementa la posibilidad de usar energías renovables y residuales (tal y como se explicará en el apartado 5.2), reduciendo notoriamente las emisiones de gases de efecto invernadero. Por ejemplo, la tecnología actual permite aprovechar el calor residual generado por una incineradora e inyectarlo en la red térmica (circuito de calefacción) para ser aprovechado por los consumidores conectados a la red local [7].

Como ya se ha presentado en el subapartado 4.3.4, la integración de los sistemas portadores de energía provoca que aparezcan tecnologías de acople entre redes que, precisamente, se aprovechan de las emisiones de CO₂ [14]. Por ejemplo, el proceso “*Power to gas*” es capaz de producir metano a partir de hidrógeno y CO₂ [14].

En los últimos tiempos, la cogeneración ha trascendido en la trigeneración, tecnología capaz de, a partir de una sola fuente de combustible, suministrar electricidad, calor y frío, lo que provoca un aumento en la eficiencia y en la reducción de las emisiones por un mayor aprovechamiento de los recursos [7].

El incremento de la eficiencia global del sistema y la reducción de emisiones también puede llevarse a cabo a través de estrategias de operación integradas, que son posibles gracias a que las redes multienergéticas son capaces de suministrar distintos tipos de energía a través de múltiples rutas [7].

5.2. Incremento de la generación y uso de las energías renovables

Desde que aparecieron las energías renovables, principalmente dos factores, han sido los causantes de una no implementación masiva de este tipo de energía: la complejidad técnica y económica del almacenamiento de la energía y las restricciones técnicas de la actual red eléctrica que, tal y como se ha explicado en el apartado 4.2, es un sistema lineal y rígido, por lo tanto, con poca capacidad de adaptación a posibles modificaciones (desde un punto de vista de variación de sus parámetros) [23].

De forma habitual, los operadores de la red dictan una serie de condiciones para llevar a cabo la implementación de las energías renovables. Entre las medidas habituales, se encuentra limitar la capacidad de generación (controlando la energía que puede ser conectada a la red), dotar a las centrales de producción de energía renovables de capacidad para cortar o reducir la producción en caso de congestión de la red o cobrar la adaptabilidad de la red a los productores renovables [23]. Evidentemente, estas medidas no crean el mejor ambiente para apostar por las energías renovables.

Sin embargo, la integración de los sistemas de energía permite, a través algunas de las tecnologías de acople que se han descrito en el subapartado 4.3.4, incrementar la generación de energía renovable sin causar efectos negativos sobre la red. Por ejemplo, la tecnología *Power-to-X*, utiliza un vector de energía (normalmente hidrógeno) como interfaz entre diferentes vectores de energía [23]. Esto permitiría, directamente, aumentar la capacidad instalada de las plantas renovables de generación (aún por encima de la capacidad de la red), ya que cuando la red eléctrica estuviese saturada, la electricidad podría convertirse en hidrógeno (mediante un electrolizador) para, posteriormente, reconvertirla en otra fuente energética como el gas natural (*Power-to-Gas*) [23].

Además, el desarrollo y la mejora de los sistemas de almacenamiento de energía también podrían favorecer un mayor uso de las energías renovables pues, en momentos donde se genera por encima de la demanda, se podría almacenar en grandes cantidades, a la espera de picos de consumo que no puedan satisfacerse con la generación que se esté llevando a cabo en ese momento [23].

5.3. Reducción de costes

La integración de las distintas redes energéticas ofrece numerosas alternativas para obtener ahorros. Una forma directa se consigue a partir de la aplicación de lo explicado en los dos anteriores apartados: incremento de la eficiencia de los recursos energéticos e incremento de

la generación a partir de energías renovables, consiguiendo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y la dependencia de los combustibles fósiles. En la actualidad, se podrían conseguir importantes ahorros en estos aspectos, debido a la fuerte crisis energética que sufren una gran cantidad de países.

A medida que se invierte en la integración de las redes, van surgiendo muchas otras alternativas para reducir costes. Entre estas oportunidades, destaca la capacidad para maximizar el uso de las infraestructuras existentes y evitar duplicidades mediante una correcta planificación del sistema energético [23]. Intercambiar y compartir activos cobra suma importancia en este apartado, ya que permitirá distribuir el coste de los equipos entre una mayor cantidad de energía producida y reducirá el período de retorno de la inversión inicial [23].

Se abre la posibilidad de **compartir la capacidad de almacenamiento**, beneficiando, directamente, a los sistemas de energía con bajas capacidades que podrían acceder al almacenamiento existente en otros sistemas [23]. Se espera que el almacenaje energético incremente su valor añadido en los próximos años puesto que continuará la apuesta por las energías renovables y será habitual producir por encima de la demanda. Sin embargo, en la actualidad, los costes del almacenaje de energía eléctrica son muy elevados y su ejecución técnica es muy compleja, ya que no se ha conseguido almacenar grandes cantidades de electricidad en un espacio reducido. Es decir, es inviable desde un punto de vista técnico. Por otra parte, el almacenaje de gas natural, hidrógeno o energía térmica se ha conseguido desarrollar considerablemente a un coste asequible, lo que permitiría a la red eléctrica acceder a la capacidad de almacenamiento de energía de estos sistemas energéticos [23]. Una aplicación real de lo explicado en el presente párrafo es posible gracias a la tecnología “*Power to gas*”.

La generación de energía también puede ser compartida entre distintas redes, como es el caso de la cogeneración o la trigeneración, ya explicadas con anterioridad.

5.4. Mejora de la seguridad y operación de los sistemas de energía

Otra de las grandes ventajas de las redes multienergéticas es el incremento de la seguridad y la mejora en el funcionamiento del sistema [7]. La integración de los sistemas de energía dota a las redes energéticas de mayor flexibilidad, fiabilidad y robustez frente a posibles distorsiones o anomalías tanto en la generación como en la demanda [7]. En los subapartados

5.4.1 y 5.4.2 se detallan cada uno de estos aspectos.

5.4.1. Incremento en la flexibilidad del sistema energético

Tradicionalmente, el sistema de distribución eléctrico ha tenido un rol pasivo. Sin embargo, en la actualidad se está produciendo un incremento de la demanda de flexibilidad y la necesidad de mantener una gestión activa del sistema debido a la progresiva instalación de generación distribuida a partir de energías renovables [23]. Como ya se ha mencionado en el apartado 5.2, la integración de los sistemas de energía provocaría un incremento de la generación mediante energías renovables, lo que requeriría de una mayor flexibilidad de los sistemas energéticos para poder equilibrar el suministro y la demanda en todo momento, con el objetivo de no interrumpir el suministro eléctrico al consumidor final [23].

Por ejemplo, las plantas de generación de respuesta rápida permitirían contrarrestar la variación entre la generación y la demanda en un determinado instante, lo que haría incrementar la flexibilidad del sistema a corto plazo [7]. De otra forma, si se requiere incrementar la flexibilidad a largo plazo, se deberá apostar por el almacenaje de grandes cantidades de energía para poder satisfacer la demanda en períodos de baja generación y alto consumo [7].

La flexibilidad de los sistemas energéticos se verá notablemente incrementada cuando éstos integren las distintas redes de suministro de energía ya que la demanda energética interactuará entre los distintos sistemas al diversificar los flujos de entrada y salida (recordar que se puede pasar de una red a otra a través de distintos sistemas de acople) [23].

Para evidenciar la importancia y la suma de valor añadido que supone para los sistemas energéticos disponer de flexibilidad, se hará hincapié en la actual situación mundial. En la actualidad, se están desarrollando numerosos conflictos geopolíticos que agravan la ya establecida crisis energética. Por este motivo, disponer de redes multienergéticas, permitirá asegurar el suministro al poder explotar vías alternativas en periodos donde ciertos recursos no estén disponibles, brindando seguridad y flexibilidad al sistema [23]. Por ejemplo, la cogeneración es capaz de producir electricidad y calor a partir de gas natural (o derivados) y las pilas de combustible (*fuel cells*) que son capaces de, a partir de hidrógeno, producir electricidad y calor. Analizando este aspecto y el actual panorama mundial, se determina que este grado de flexibilidad podría jugar un papel fundamental en futuras crisis energéticas como la actual.

A modo de síntesis, se adjunta la Figura 7, donde se pueden observar una serie de cargas para cada una de las redes representadas y cómo dichas redes energéticas interactúan entre ellas gracias a su elevado nivel de integración. Todos los sistemas de enlace entre redes se han descrito en el subapartado 4.3.4.

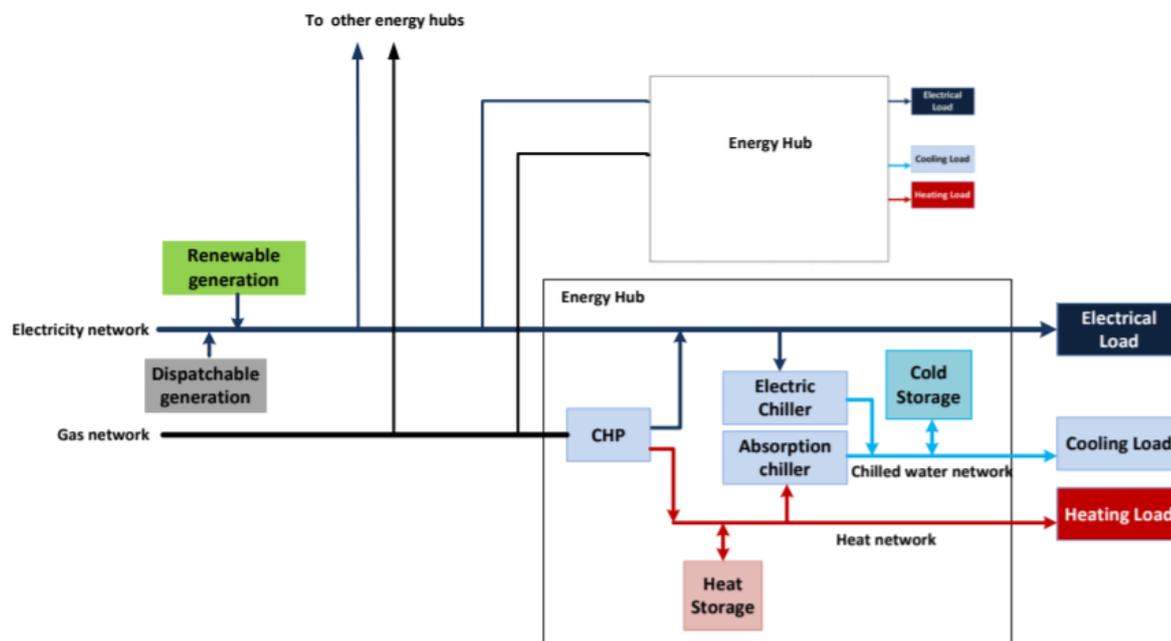


Figura 7. Ejemplo de interconexión entre la red eléctrica y la red de gas natural. Fuente: Muditha Abeyssekera [7].

Para poder gestionar correctamente la flexibilidad del sistema, se requerirá de una óptima infraestructura de comunicación y control que permita dar respuesta al operador del sistema eléctrico [7].

5.4.2. Incremento en la fiabilidad y la resiliencia del sistema energético

La fiabilidad y la resiliencia de los sistemas energéticos son dos de los principales aspectos a tener en cuenta en el dimensionado de una infraestructura energética, ya que se debe garantizar el suministro al consumidor final [7]. Tal y como se viene describiendo en los anteriores apartados, la integración de los suministros de energía provoca que la demanda pueda ser atendida por diferentes vías, lo que provoca un incremento en la fiabilidad y resiliencia del sistema energético al fortalecer la capacidad de suministro [23].

En los últimos años, el concepto de resiliencia ha ido adquiriendo importancia, puesto que dota al sistema energético de capacidad para recuperarse rápidamente y adaptar su estructura y operación en caso de una o varias fallas de gran alcance [23]. Las redes energéticas tradicionales poseen diseños fiables, pero no resilientes. La integración de redes energéticas aportaría este valor añadido [23].

Otro de los aspectos que puede mejorar la fiabilidad y la resiliencia de los sistemas

energéticos es la óptima gestión del almacenamiento de energía ya que permite controlar eficazmente parámetros como el voltaje y la frecuencia o servir de respaldo en la restauración o en el arranque del sistema [7]. La trigeneración y las microrredes son algunos de los sistemas de interconexión que dotan de resiliencia a las redes energéticas ya que diversifican la oferta energética [7]. Según estudios realizados, las microrredes juegan un papel importante en la protección de la infraestructura, permitiendo el aislamiento y la recuperación de esta [23]. Por otra parte, la posibilidad de operación aislada de algunas partes del sistema eléctrico aumenta la fiabilidad en momentos de fallas [7].

Pese a las grandes ventajas que se obtienen al integrar las redes energéticas, cabe destacar que su integración requiere de un riguroso análisis ya que, al incrementar la interdependencia entre sistemas, también se incrementa la posibilidad de fallos en cascada [23].

5.5. Métodos de análisis de redes multienergéticas

Las redes multienergéticas requieren de métodos de análisis integrados que permitan combinar unas redes con otras. Con motivo de las interacciones entre redes, el control (centralizado o distribuido), la operación, la planificación y la optimación se deberá ejecutar teniendo en cuenta las interdependencias del sistema, lo que supone una evolución respecto a los métodos actuales [7]. Se convierte en indispensable que exista una correcta coordinación a todos los niveles, con el objetivo de evitar conflictos técnicos entre redes. Para esto, se necesita conocer con exactitud el estado de la red a tiempo real en cuanto a generación, transporte, distribución, consumos, interacciones entre redes o capacidad de almacenamiento, entre muchos otros [7].

En la actualidad, las investigaciones que se están llevando a cabo se dedican al análisis de los flujos de potencia, tanto en estado estacionario como en estado transitorio, y al desarrollo de softwares que permitan controlar, operar y planificar las redes multienergéticas [7].

6. Ecuaciones características en régimen permanente de las distintas redes energéticas que integran una red multienergética

En el presente capítulo, se exponen las ecuaciones y modelos en estado estacionario que caracterizan las distintas redes energéticas que integran una red multienergética. Toda la información contenida en este capítulo se basa en la Tesis Doctoral “*Combined Analysis of Coupled Energy Networks*” de Muditha Abeysekera (*Institute of Energy, Cardiff School of Engineering, Cardiff University, 2016*) [7], que se ha sido el principal recurso bibliográfico en el que se ha basado el presente TFM.

6.1. Introducción al análisis en régimen permanente

Como es habitual en este tipo de estudios, el análisis se lleva a cabo en régimen permanente, puesto que se garantiza la no variación de los parámetros con el tiempo (es decir, se garantiza estabilidad).

En la línea de lo explicado con anterioridad, el análisis de redes en régimen permanente, generalmente, se gestionaba de forma individualizada. Sin embargo, la evolución del sistema energético ha provocado que se estén incrementando, y cada vez más, las dependencias entre unas redes energéticas y otras, favorecido por las tecnologías ya existentes de acople e interconexión entre redes que portan distintos vectores energéticos [7]. De esta forma, es necesario que se cree documentación y se investigue sobre los métodos que permiten analizar las redes multienergéticas en régimen permanente.

Según se ha podido determinar a partir de la bibliografía consultada, en el pasado reciente sí que se han desarrollado líneas de investigación que analizan las interconexiones entre dos redes energéticas diferentes [7]. Sin embargo, son muy pocas las líneas de investigación que se centran en la interconexión de más de dos redes energéticas diferentes [7]. Además, se conoce que la inclusión de la red térmica complica notablemente la resolución a través de métodos numéricos iterativos. Por este motivo, el presente TFM, buscará utilizar métodos numéricos resolutivos avanzados (presentados en el capítulo 7) y crear una base que se pueda reaprovechar en el futuro análisis de otras redes multienergéticas.

Las redes de electricidad, gas natural y térmica (calor y frío) serán las consideradas en el análisis de flujos de potencia en estado estacionario.

6.2. Notación empleada en el análisis en régimen permanente

Tanto para la explicación teórica de las fórmulas que se van a proponer en el presente capítulo como en el ejemplo de cálculo del siguiente capítulo, es necesario entender correctamente la notación que se emplea en estas fórmulas, puesto que, debido a la magnitud del estudio, contiene mucha información que permitirá interpretar y analizar correctamente qué es lo que se está calculando. Tal y como se podrá observar más adelante, el esquema de una red se compondrá de tres elementos principales:

- **Ramas:** Encargadas del transporte y distribución de la energía ya sea a través de cables, en el caso de la red eléctrica, o tuberías, tanto para la red de gas natural como la red térmica. En los extremos de estas ramas se situarán los nodos de la red, que a continuación se describen. La representación de las ramas se lleva a cabo a partir de una línea continua (suministro) o discontinua (retorno) [7].
- **Nodos:** Elementos terminales que se sitúan en los extremos de cada una de las ramas. Sus funciones principales son ejercer como elemento de enlace entre dos o más ramas diferentes y servir como un punto de conexión entre un elemento de acoplamiento y una rama [7]. Además, en los nodos se encontrarán conectados los puntos de suministro o demanda.
- **Elementos de acoplamiento:** Dispositivos encargados de la transformación energética necesaria para poder pasar de una red energética a otra [7]. Los elementos de acople se instalarán entre dos nodos de redes diferentes.

A continuación, se procede a explicar la notación matemática que se utiliza en cada una de las fórmulas y expresiones matemáticas que se van a detallar en los siguientes subapartados. La información que se recoge en los siguientes párrafos es fundamental para poder hacer un correcto seguimiento del estudio que se va a llevar a cabo.

El **superíndice** proporciona información relativa al tipo de red energética. Tal y como se ha mencionado en los primeros compases de este documento, en este trabajo solo se tendrán en cuenta las siguientes redes:

Tabla 1. Notación del superíndice en función del tipo de red. Fuente: Muditha Abeysekera [7].

Tipo Red		Notación
Red Eléctrica		E
Red Gas Natural		G
Red Térmica	Calor	H
	Frío	C

El **subíndice** proporciona numerosa información sobre la red energética en cuestión. Concretamente, sobre el nodo, rama o elemento de acoplamiento (C).

Tabla 2. Notación y significado de los subíndices. Fuente: Muditha Abeysekera [7].

Descripción	Notación	Significado
Letra minúscula latina	i, j	Número del nodo
Número entre paréntesis	(1)	Número de identificación de la red
Dos letras minúsculas latinas entre paréntesis	(ij)	Identificación de una rama y del sentido del flujo energético (de “i” a “j”)
Letra C con un número como subíndice	C_i	Identificación/número del elemento de acoplamiento
Letra “g” minúscula	g	Suministro o generación de potencia
Letra “d” minúscula	d	Demanda de potencia
Letra “L” mayúscula	L	Pérdidas en la red de distribución

Finalmente, destacar que, en ocasiones, también se puede utilizar la notación “k” para referirse a una determinada rama [7].

6.3. Modelo y ecuaciones de los elementos de acoplamiento

Como se ha determinado con anterioridad, los elementos de acoplamiento (C_k) son elementos fundamentales para interconectar unas redes energéticas con otras de distinto tipo. Estas interconexiones entre redes distintas se modelan a través conversiones energéticas mediante

factores de eficiencia [7].

A continuación, se adjunta la Figura 8, donde se detalla el modelo de los elementos de acoplamiento y los flujos energéticos que provocan estos sistemas:

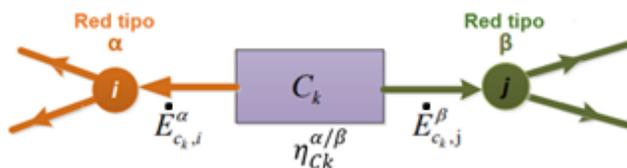


Figura 8. Modelo y flujos energéticos de los elementos de acoplamiento. Fuente: Muditha Abeysekera [7].

Tabla 3. Parámetros del modelo de los elementos de acoplamiento. Fuente: Muditha Abeysekera [7].

Notación	Significado
i	Nodo i de la red α conectado al elemento de acoplamiento
j	Nodo j de la red β conectado al elemento de acoplamiento
α	Red energética de tipo α
β	Red energética de tipo β
$\dot{E}_{Ck,i}^\alpha$	Flujo energético existente entre el elemento de acoplamiento y la red energética α
$\dot{E}_{Ck,j}^\beta$	Flujo energético existente entre el elemento de acoplamiento y la red energética β
$C_{Ck,i}^\alpha$	Coefficiente que marca la dirección del flujo energético entre el nodo i y la red energética α
$C_{Ck,j}^\beta$	Coefficiente que marca la dirección del flujo energético entre el nodo j y la red energética β

El coeficiente que marca la dirección del flujo energético puede tomar tres valores diferentes (ejemplo para el nodo i y la red α). Si el flujo de energía sale de C_k y se inyecta en el nodo i (se suministra al nodo i y, por lo tanto, a la red α): $C_{Ck,i}^\alpha = +1$ [7]. Por el contrario, si el flujo de energía sale del nodo i y se inyecta en C_k (se consume del nodo i y, por lo tanto, de la red α):

$C_{Ck,i}^\alpha = -1$ [7]. Finalmente, si C_k y el nodo i no se encuentran conectados: $C_{Ck,i}^\alpha = 0$ [7].

A través de las ecuaciones 1 y 2, se puede calcular el rendimiento de la conversión de energía entre una red denominada α y otra red distinta denominada β ($\eta_{Ck}^{\alpha/\beta}$). Si se considera que se consume energía de la red α y, tras pasar por C_k , se inyecta en la red β con las características requeridas por esta y que han sido acondicionadas por C_k , se determina que el flujo de energía que se inyecta en la red β se calcula a través de la siguiente expresión [7]:

$$\dot{E}_{Ck,j}^\beta = \eta_{Ck}^{\alpha/\beta} \cdot \dot{E}_{Ck,i}^\alpha \quad (1)$$

$$\eta_{Ck}^{\alpha/\beta} = \left| \frac{\dot{E}_{Ck,j}^\beta}{\dot{E}_{Ck,i}^\alpha} \right| \quad (2)$$

6.4. Modelo y ecuaciones de análisis de la red eléctrica

Como es característico en el análisis de los sistemas eléctricos, el esquema PI equivalente es el utilizado para modelar las líneas de distribución eléctrica. En la Figura 9, se muestra este esquema:

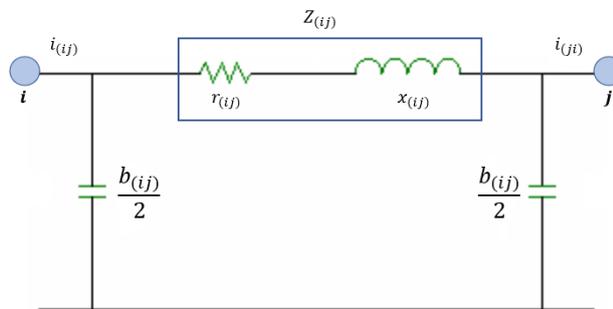


Figura 9. Modelo en forma de esquema pi equivalente de una línea de distribución eléctrica. Fuente: Propia.

Para poder interpretar correctamente la anterior figura, se determinan las siguientes expresiones necesarias para llevar a cabo los cálculos que se indicarán a continuación [7]:

$$Z_{(ij)} = R_{(ij)} + j \cdot X_{(ij)} \quad (3)$$

$$Y_{(ij)} = \frac{1}{Z_{(ij)}} = G_{(ij)} + j \cdot B_{(ij)} \quad (4)$$

La impedancia ($Z_{(ij)}$) de una línea eléctrica se puede expresar como la suma de su resistencia ($R_{(ij)}$) en la parte real y de su reactancia ($X_{(ij)}$) en la parte imaginaria [7]. Por otra parte, la inversa

de la impedancia permite obtener el valor de la admitancia ($Y_{(ij)}$) que, a su vez, se define como la suma de la conductancia ($G_{(ij)}$) en la parte real y de la susceptancia ($B_{(ij)}$) en la parte imaginaria [7].

A partir de los componentes que se muestran en el esquema de la anterior figura, se puede determinar la matriz de admitancias de bus (Y_{bus}), cuya dimensión ($N \times N$) vendrá fijada en función del número de buses N que compongan la red (ecuación 5) [24]. El estudio de flujo de energía se puede llevar a cabo a partir de la matriz Y_{bus} .

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Para la construcción de la matriz Y_{bus} , será necesario convertir el esquema unifilar de la red eléctrica en un diagrama de impedancias (Z). Posteriormente, las fuentes de voltaje se transformarán en sus fuentes de corriente equivalentes (ecuación 6), de forma que las corrientes inyectadas se calculan en función de las admitancias de las ramas y de los voltajes de los nodos terminales [7]. De esta forma, se pasará de un diagrama de impedancia a un diagrama de admitancia. Para el cálculo de Y_{bus} se considerarán las siguientes expresiones matemáticas [7]:

$$\begin{bmatrix} i_{(ij)} \\ i_{(ji)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{(ij)} & -y_{(ij)} \\ -y_{(ij)} & y_{(ij)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_i \\ v_j \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$Y_{ij} = \begin{cases} Y_{ii} = \sum_j y_{(ij)} & (1) \\ Y_{ij} = -y_{(ij)} & (2) \\ Y_{ij} = 0 & (3) \end{cases} \quad (7)$$

Según lo indicado en la ecuación 6 (que aplicará a la ecuación 7), existen tres casos posibles para cada uno de los elementos que forman la matriz de admitancias de bus. En el primer caso (1), se sumarán todas las admitancias de bus conectadas al nodo "i", mientras que en el segundo caso (2), se computa el negativo de la admitancia conectada entre el nodo "i" y el nodo "j". Finalmente, si no existe ningún bus que conecte los nodos "i" y "j" se aplicará el tercer caso (3). Posteriormente, la matriz de admitancias de bus deberá expresarse también en forma polar.

Una vez expuesto el modelado del flujo energético de las líneas de distribución eléctricas, se procede a formular las ecuaciones que rigen las redes eléctricas en sistemas

multienergéticos.

En primer lugar, la corriente eléctrica inyectada (i_i) en un determinado nodo (i) deberá ser calculada realizando un sumatorio, para todos los nodos de la red eléctrica (n_{elec}), del producto de la admitancia de la rama que se encuentra conectada a dicho nodo ($Y_{i,n}$) y el voltaje complejo en ese nodo (v_n) [7]. La ecuación 8 muestra la expresión que se utilizará para el cálculo de la corriente inyectada [7]:

$$i_i = \sum_{n=1}^{n_{elec}} Y_{i,n} \cdot v_n \quad (8)$$

El valor de $Y_{i,n}$ quedará definido según lo indicado en la ecuación 7.

En segundo lugar, también se tendrá que definir la potencia eléctrica aparente inyectada (s_i) en un determinado nodo (i). Esta potencia aparente inyectada podrá ser calculada a partir del producto del voltaje nodal (v_i) y el conjugado de la corriente eléctrica (i_i^*), ecuación 9 [7]. La s_i también podrá ser calculada a partir de la potencia eléctrica aparente generada y demandada en un nodo " i " y el efecto del elemento de acoplamiento sobre dicho nodo (ecuación 10) [7]:

$$s_i = v_i \cdot i_i^* \quad (9)$$

$$s_i = s_{g,i}^E - s_{d,i}^E + C_{Ck,i}^E \cdot |s_{Ck,i}^E| \quad (10)$$

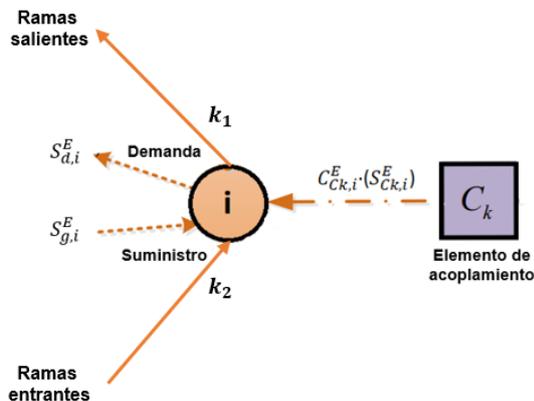


Figura 10. Interconexiones nodales propias de una red eléctrica y relación con el elemento de acoplamiento. Fuente: Muditha Abeysekera [7].

Si se sustituye el término i_i en la ecuación 9, se obtiene la siguiente expresión [7]:

$$s_i = v_i \cdot \left[\sum_{n=1}^{n_{elec}} Y_{i,n} \cdot v_n \right]^* \quad (11)$$

A partir de la combinación de las ecuaciones 10 y 11 e igualando a 0, se puede determinar el flujo de potencia real (ecuación 12) y reactiva (ecuación 13) [7]:

$$p_{g,i}^E - p_{d,i}^E + C_{Ck,i}^E \cdot |p_{Ck,i}^E| - \text{real} \left[v_i \cdot \left(\sum_{n=1}^{n_{elec}} Y_{i,n} \cdot v_n \right)^* \right] = 0 \quad (12)$$

$$q_{g,i}^E - q_{d,i}^E + C_{Ck,i}^E \cdot |q_{Ck,i}^E| - \text{imag} \left[v_i \cdot \left(\sum_{n=1}^{n_{elec}} Y_{i,n} \cdot v_n \right)^* \right] = 0 \quad (13)$$

Con el objetivo de clarificar la notación que se ha empleado en las dos anteriores fórmulas, se desarrolla la siguiente tabla donde se expone el significado de los distintos parámetros que intervienen:

Tabla 4. Parámetros de los flujos de potencia activa y reactiva (red eléctrica). Fuente: Muditha Abeysekera [7].

Notación	Significado	Unidad
$p_{g,i}^E$	Potencia eléctrica activa suministrada al nodo i	[MW]
$p_{d,i}^E$	Demanda de potencia eléctrica activa en el nodo i	[MW]
$p_{Ck,i}^E$	Flujo de potencia activa desde/al nodo i debido al elemento de acoplamiento C_k^E	[MW]
$q_{g,i}^E$	Potencia eléctrica reactiva suministrada al nodo i	[MVar]
$q_{d,i}^E$	Demanda de potencia eléctrica reactiva en el nodo i	[MVar]
$q_{Ck,i}^E$	Flujo de potencia reactiva desde/al nodo i debido al elemento de acoplamiento C_k^E	[MVar]
$C_{Ck,i}^E$	Coefficiente de dirección del flujo de potencia	-

	$(p_{Ck,i}^E \text{ o } q_{Ck,i}^E)$. Valor según apartado 6.3.	
--	--	--

Los nodos que forman la red eléctrica se pueden clasificar en tipo “*Slack*”, PV o PQ en función de los parámetros especificados y sus incógnitas (según el tipo de nodo aplicarán unas ecuaciones u otras) [7].

Los nodos tipo “*Slack*” ejercen como los nodos de referencia de la red eléctrica analizada ya que suelen estar conectados a la principal fuente de generación/suministro de esta. Las variables conocidas de este tipo de nodo son el módulo del voltaje (v_i), el ángulo del voltaje (δ_i), las potencias activa y reactiva demandadas ($p_{d,i}^E$ y $q_{d,i}^E$ respectivamente) [7]. Por el contrario, las incógnitas que deberán calcularse son las potencias activa y reactiva generadas ($p_{g,i}^E$ y $q_{g,i}^E$ respectivamente) [7].

Por otra parte, los nodos tipo PV son aquellos que, de forma genérica, están conectados a un elemento de generación eléctrica que permite controlar el módulo del voltaje en dicho nodo. La potencia eléctrica activa generada ($p_{g,i}^E$) y demandada ($p_{d,i}^E$), la potencia reactiva demandada ($q_{d,i}^E$) y el módulo del voltaje (v_i) son las variables conocidas en los nodos PV [7]. Por el contrario, el ángulo del voltaje (δ_i) es incógnita y deberá ser hallada, de la misma forma que la potencia reactiva generada ($q_{g,i}^E$) [7]. La ecuación 12 deberá aplicarse en los nodos PV.

Finalmente, los nodos tipo PQ son aquellos que, de forma genérica, están conectados a una carga eléctrica o un punto de generación con potencia activa y reactiva. La potencia eléctrica activa generada ($p_{g,i}^E$) y demandada ($p_{d,i}^E$) y la potencia eléctrica reactiva generada ($q_{g,i}^E$) y demandada ($q_{d,i}^E$) son las variables conocidas en los nodos PQ [7]. Por el contrario, el módulo del voltaje (v_i) y su correspondiente ángulo (δ_i) son incógnitas y deberán ser halladas [7]. Las ecuaciones 12 y 13 deberán aplicarse en los nodos PQ.

6.5. Modelo y ecuaciones de análisis de la red de gas natural

El modelado de la red de gas natural se basa, fundamentalmente, en la longitud y en el diámetro interno de la tubería que transporta el gas natural (k) [7]. También es necesario conocer el punto de inicio (i) y el punto final (j) de la tubería por la que se canalizará el gas natural, así como posibles elementos de enlace que se sitúen entre ambos puntos [7].

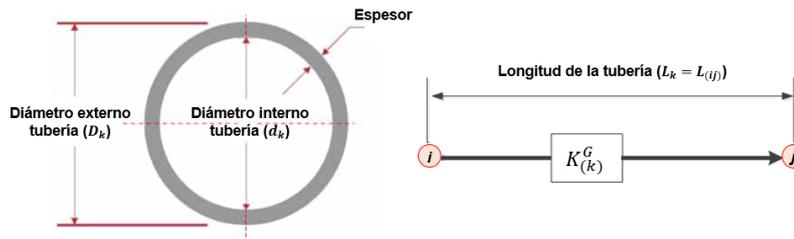


Figura 11. Parámetros principales para el modelado de las redes de gas natural. Fuente Muditha Abeyskera [7].

Existe una relación entre el flujo volumétrico de gas natural y la presión nodal [7]. Esta relación vendrá definida por la siguiente expresión (ecuación 14):

$$\dot{V}_{(k)}^G = S_{(ij)}^G \cdot \left(S_{(ij)}^G \cdot \frac{(Pr_i^G - Pr_j^G)}{K_{(k)}^G} \right)^{\frac{1}{m^G}} \tag{14}$$

En la Tabla 5, se muestra el significado de la notación que se emplea en la ecuación 14:

Tabla 5. Parámetros de la relación entre el flujo de gas y la presión nodal. Fuente: Muditha Abeyskera [7].

Notación	Significado	Unidad
$\dot{V}_{(k)}^G$	Caudal volumétrico de gas natural en una tubería a condiciones estándar de presión y temperatura	[m ³ /h]
Pr_i^G	Presión nodal inicial (nodo i)	[mbar]
Pr_j^G	Presión nodal final (nodo j)	[mbar]
$K_{(k)}^G$	Constante de una tubería de gas natural	-
$L_{(k)}^G$	Longitud de la tubería	[m]
$d_{(k)}^G$	Diámetro interno de la tubería	[mm]
m^G	Exponente del flujo	-
$S_{(ij)}^G$	Coficiente según la dirección del flujo de la tubería	-

El valor y, por lo tanto, la forma de calcular algunos parámetros depende del rango de presiones a las que trabaja la red de gas natural. Estos parámetros son: Pr_i^G , $K_{(k)}^G$ y m^G . A continuación, se describen las dos posibles casuísticas [7].

Si la red de gas natural trabaja entre 0 y 100 mbar (baja presión), los parámetros anteriormente mencionados, se calculan a través de las siguientes ecuaciones [7]:

- La presión nodal se calcula mediante la siguiente expresión [7]:

$$Pr_i^G = pr_i^G \quad (15)$$

- El valor de la constante de la tubería de gas se obtiene aplicando la siguiente ecuación [7]:

$$K_{(k)}^G = 11,7 \cdot 10^3 \cdot \frac{L_{(k)}^G}{d_{(k)}^G{}^5} \quad (16)$$

- El valor del exponente del flujo es [7]:

$$m^G = 2 \quad (17)$$

Si la red de gas natural trabaja entre 100 mbar y 7 bar (media presión), los parámetros en cuestión se calculan mediante las siguientes expresiones [7]:

- La presión nodal se calcula mediante la siguiente expresión [7]:

$$Pr_i^G = (pr_i^G)^2 \quad (18)$$

- El valor de la constante de la tubería de gas se obtiene aplicando la siguiente ecuación [7]:

$$K_{(k)}^G = 27,24 \cdot \frac{L_{(k)}^G}{d_{(k)}^G{}^{4,848}} \quad (19)$$

- El valor del exponente del flujo es [7]:

$$m^G = 1,848 \quad (20)$$

Como se indicará en el ejemplo de red multienergética propuesto en el capítulo 8, todas las presiones serán inferiores a 100 mbar.

Además, cabe destacar que el valor de $S_{(ij)}^G$ puede oscilar entre +1 y -1. Si la presión en el

punto inicial es mayor que la del punto final, el valor de $S_{(ij)}^G$ será de +1, mientras que, de lo contrario, el valor será de -1 [7].

Una vez expuesto el modelado del flujo de gas natural en tuberías, se procede a formular las ecuaciones (de conservación del flujo volumétrico de gas en un determinado punto) que rigen las redes de gas natural en sistemas multienergéticos considerando que el gas natural se encuentra a condiciones estándar de presión y temperatura [7].

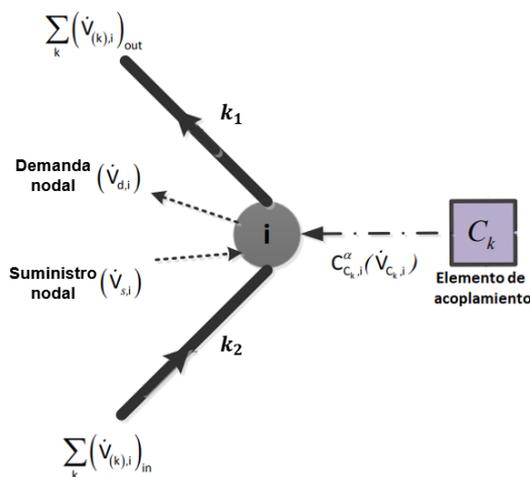


Figura 12. Interconexiones nodales propias de una red de gas natural y relación con el elemento de acoplamiento. Fuente: Muditha Abeysekera [7].

La demanda neta nodal de gas natural viene determinada por la cantidad de tuberías que están conectadas a dicho nodo, por la matriz de incidencia de la red de gas natural y por la ecuación 14 [7]. Se expresa mediante la siguiente ecuación 21 [7]:

$$\dot{V}_i^G = \sum_{k=1}^{n_{gaspipe}} A_{i,k}^G \cdot \dot{V}_{(k)}^G \tag{21}$$

En la Tabla 6, se muestra el significado de la notación que se emplea en la ecuación 21:

Tabla 6. Parámetros que intervienen en demanda neta nodal de gas natural. Fuente: Muditha Abeysekera [7].

Notación	Significado	Unidad
$n_{gaspipe}$	Número de tuberías de gas natural conectadas a un determinado nodo	-

$A_{l,k}^G$	Matriz de incidencia de la red de gas natural	-
$\dot{V}_{(k)}^G$	Flujo volumétrico de gas natural (según ecuación X)	[m ³ /h]

Según lo expuesto en la ecuación 21, los elementos de la matriz de incidencia de la red de gas natural intervienen en el cálculo de este tipo de redes. Por este motivo, a continuación, se procede a explicar cómo se definen las matrices de incidencia.

Las matrices de incidencia son elementos utilizados para la representación de relaciones binarias de grafos o redes. Las filas de esta matriz representan los nodos que conforman la red energética, mientras que las columnas se refieren a las aristas que, en este caso, hacen referencia a las tuberías de gas natural. Como ya se ha mencionado, se trata de una relación binaria donde los elementos de la matriz pueden ser de valor 0 o 1 (con su correspondiente signo). Este valor vendrá definido en función de la dirección del flujo de gas natural ($\dot{V}_{(k)}^G$), según las siguientes casuísticas [7]:

- Si no hay conexión entre dos nodos, el valor será 0.
- Si $\dot{V}_{(k)}^G$ sale del nodo, el valor será -1.
- Si $\dot{V}_{(k)}^G$ entra al nodo, el valor será +1.

Como se podrá comprobar en el capítulo 8, en ocasiones será necesario determinar la matriz de incidencia reducida de una red. Para obtener la matriz reducida, se elimina la fila correspondiente al nodo que se considera como el nodo de referencia en dicha red (partiendo de la matriz de incidencia calculada previamente) [7].

Por otra parte, el intercambio de energía en un elemento de acople (C_k) determina la cantidad de gas suministrado y/o demandado en un determinado nodo (i) [7]. Esta relación puede expresarse mediante la siguiente ecuación [7]:

$$\dot{V}_{Ck,i}^G = \frac{\dot{E}_{Ck,i}^G}{GCV} \cdot 3600 \quad (22)$$

En la Tabla 7, se muestra el significado de la notación que se emplea en la ecuación 22:

Tabla 7. Parámetros del flujo volumétrico de gas natural según elemento de acople. Fuente: Muditha Abeysekera [7].

Notación	Significado	Unidad
$\dot{V}_{Ck,i}^G$	Flujo de gas suministrado y/o demandado en un nodo "i" debido al elemento de acople	[m ³ /h]

$\dot{E}_{Ck,i}^G$	Potencia inyectada o liberada en un nodo “i” debido al elemento de acople	[kW]
GCV	Poder calorífico superior del gas natural	[kJ/m ³]

Considerando todo lo descrito en los anteriores párrafos, se puede determinar el balance de flujos de gas natural en un determinado punto “i” de la red de gas natural a través de la siguiente expresión [7]:

$$\dot{V}_{s,i}^G - \dot{V}_{d,i}^G + C_{Ck,i}^G \cdot |\dot{V}_{Ck,i}^G| + \dot{V}_i^G = 0 \tag{23}$$

En la Tabla 8, se muestra el significado de la notación que se emplea en la ecuación 8:

Tabla 8. Parámetros del balance de los flujos de gas natural. Fuente: Muditha Abeysekera [7].

Notación	Significado	Unidad
$\dot{V}_{s,i}^G$	Suministro de gas natural al nodo “i”	[m ³ /h]
$\dot{V}_{d,i}^G$	Demanda de gas natural del nodo “i”	[m ³ /h]
$C_{Ck,i}^G$	Parámetro que determina el sentido de $\dot{V}_{Ck,i}^G$	-

Sustituyendo la ecuación 14, 21 y 22 en la ecuación 23 se obtiene la siguiente expresión:

$$\dot{V}_{s,i}^G - \dot{V}_{d,i}^G + C_{Ck,i}^G \cdot \left| \frac{\dot{E}_{Ck,i}^G}{GCV} \cdot 3600 \right| + \sum_{k=1}^{n_{gaspipe}} A_{i,k}^G \cdot S_{(ij)}^G \cdot \left(S_{(ij)}^G \cdot \frac{(Pr_i^G - Pr_j^G)}{K_{(k)}^G} \right)^{\frac{1}{m}} = 0 \tag{24}$$

Los distintos nodos que componen una red de gas natural se pueden clasificar en función de las variables conocidas y desconocidas (tipo “carga” y tipo “suministro”) [7]. Para esta clasificación se considera que la red funciona en régimen permanente.

De la misma forma que se ha procedido en la red eléctrica, los nodos de la red de gas natural también se pueden categorizar. En este tipo de redes se diferencian entre los nodos de alimentación (suministran) y los nodos de carga (consumen) [7]. En los nodos de alimentación se conoce el valor de la presión nodal (Pr_i^G) mientras que en los nodos de carga este valor es la incógnita [7]. Por otra parte, en los nodos de carga se especifican los valores del suministro y la demanda nodal de gas natural ($\dot{V}_{s,i}^G$ y $\dot{V}_{d,i}^G$ respectivamente) [7]. Finalmente, la ecuación

24 deberá ser aplicada a los nodos de carga [7].

6.6. Modelo y ecuaciones de análisis de la red térmica de frío y calor

Para modelar las redes térmicas de calor y frío se deberán conocer con detalle el punto inicial (i) y final de la red (j), la existencia de algún elemento entre estos dos puntos y las características de la tubería que transporta el fluido (en este caso se trata de agua), tanto de suministro como de retorno [7]. Entre estas características destacan el caudal másico que circula por la tubería, la longitud de esta, el diámetro interno, externo, la rugosidad de la tubería y el coeficiente de transmisión de calor radial [7].

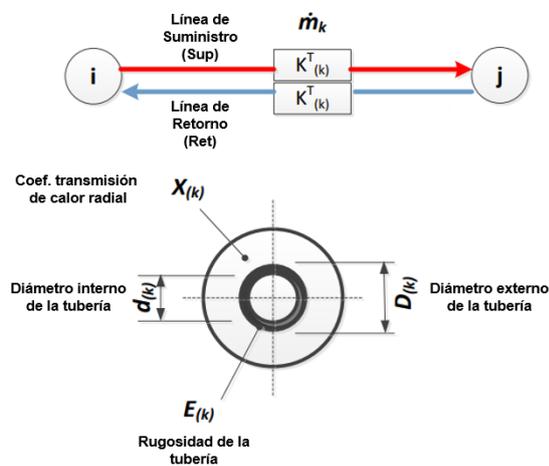


Figura 13. Parámetros principales para el modelado de las redes térmicas. Fuente Muditha Abeysekera [7].

Como es habitual en este tipo de instalaciones, el calor y el frío se transportan mediante agua hasta la carga que lo requiera mediante las líneas de suministro. Posteriormente, el fluido, haciendo uso de la línea de retorno, vuelve hasta el elemento que lo acondiciona según la necesidad. Para asegurar el correcto funcionamiento, se considera que tanto la línea de suministro como la de retorno están separadas y aisladas entre ellas (es decir, no hay efecto de una sobre la otra) [7]. Además, se considera que el caudal que circula por ambas líneas es el mismo, suponiendo que no existen pérdidas en el transporte. Como es evidente, si se tratase de un caso real, habría que considerar un rendimiento.

La mecánica de fluidos establece que, dada una tubería circular (k), existe una relación entre el caudal másico ($\dot{m}_{(k)}^T$) que circula por ella y la caída de presión (Δp_r) [7]. Por ejemplo, cuanto más grande sea la caída de presión entre dos puntos de la tubería, más caudal circulará por esta. De esta forma, dicha relación queda definida por la siguiente expresión (como se podrá

observar, la relación sigue el mismo criterio que la ecuación 14 expuesta en la explicación de la red de gas natural) [7]:

$$\dot{m}_{(k)}^T = S_{(ij)}^T \cdot \left(S_{(ij)}^T \cdot \frac{(pr_i^T - pr_j^T)}{K_{(k)}^T} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

En la Tabla 9, se muestra el significado de la notación que se emplea en la ecuación 25:

Tabla 9. Parámetros derivados de la relación entre el caudal volumétrico de gas natural y la caída de presión entre dos puntos de la red. Fuente: Muditha Abeysekera [7].

Notación	Significado	Unidad
$\dot{m}_{(k)}^T$	Caudal másico del fluido que transporte la energía térmica	[kg/s]
$S_{(ij)}^T$	Coficiente según la dirección del flujo en la tubería	-
pr_i^T	Presión nodal al inicio (i) de la tubería	Pa
pr_j^T	Presión nodal al final (j) de la tubería	Pa
$K_{(k)}^T$	Constante de una tubería térmica. Se calcula según la ecuación 26.	-

Cabe destacar que el valor de $S_{(ij)}^T$ puede oscilar entre +1 y -1 [7]. Si la presión en el punto inicial es mayor que la del punto final, el valor de $S_{(ij)}^T$ será de +1, mientras que, de lo contrario, el valor será de -1 [7].

Por otra parte, el valor de $K_{(k)}^T$ se calcula mediante la siguiente ecuación 26 [7]:

$$K_{(k)}^T = \frac{8 \cdot \lambda_{(k)}^T \cdot L_{(k)}^T}{(K_{(k)}^T)^5 \cdot \pi^2 \cdot \rho} \quad (26)$$

La densidad del agua se mide en kg/m³ y, en la anterior ecuación, se representa mediante el símbolo ρ . El coeficiente por rozamiento (λ) en una rama de la red térmica se define según la rugosidad interior de la tubería y según el número de Reynolds (determinados a través del diagrama de Moody) [7].

Las ganancias y pérdidas radiales de calor en una tubería aislada y no soterrada (que a efectos prácticos se refleja en un cambio de temperatura del agua) se pueden calcular utilizando la ecuación 27 [7]:

$$\dot{E}_{L,(k)}^T = \chi_{(k)}^T \cdot \pi \cdot D_{(k)}^T \cdot L_{(k)}^T \cdot (T_{avg,(k)}^T - T_{amb}) \quad (27)$$

En la Tabla 10, se muestra el significado de la notación que se emplea en la ecuación 27:

Tabla 10. Parámetros referentes a las ganancias y pérdidas de calor. Fuente: Muditha Abeysekera [7].

Notación	Significado	Unidad
$\chi_{(k)}^T$	Coefficiente de transmisión de calor radial (referido a la superficie exterior)	[W/m ² ·°C]
$D_{(k)}^T$	Diámetro exterior de la tubería	[m]
$L_{(k)}^T$	Longitud de la tubería	[m]
$T_{avg,(k)}^T$	Temperatura media del agua en la tubería	[°C]
T_{amb}	Temperatura ambiente del lugar de instalación	[°C]

Por otra parte, conociendo la temperatura (en °C) del agua a la entrada ($T_{start,(k)}^T$) y a la salida ($T_{end,(k)}^T$) de una determinada rama (k), se puede calcular la variación de temperatura que se produce en el agua a su paso por la rama mediante la ecuación 28 [7]:

$$(T_{start,(k)}^T - T_{end,(k)}^T) = \frac{\chi_{(k)}^T \cdot \pi \cdot D_{(k)}^T \cdot L_{(k)}^T \cdot (T_{avg,(k)}^T - T_{amb})}{\dot{m}_{(k)}^T \cdot C_p} \quad (28)$$

Como el fluido que circulará por la red térmica es agua, el poder calorífico (C_p) considerado es el habitual del agua donde:

$$C_p = 4,18 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} \quad (29)$$

Tras analizar el modelado de las redes térmicas de frío y calor, se procede a formular las ecuaciones de balance de este tipo de redes. En la Figura 14, se representan los parámetros principales que intervienen en la formulación de este tipo de red. La notación \dot{M} se refiere al caudal másico que sale o se dirige a una conexión desde un nodo mientras que la notación \dot{m} se refiere al caudal másico que circula por las ramas que conforman la red térmica [7].

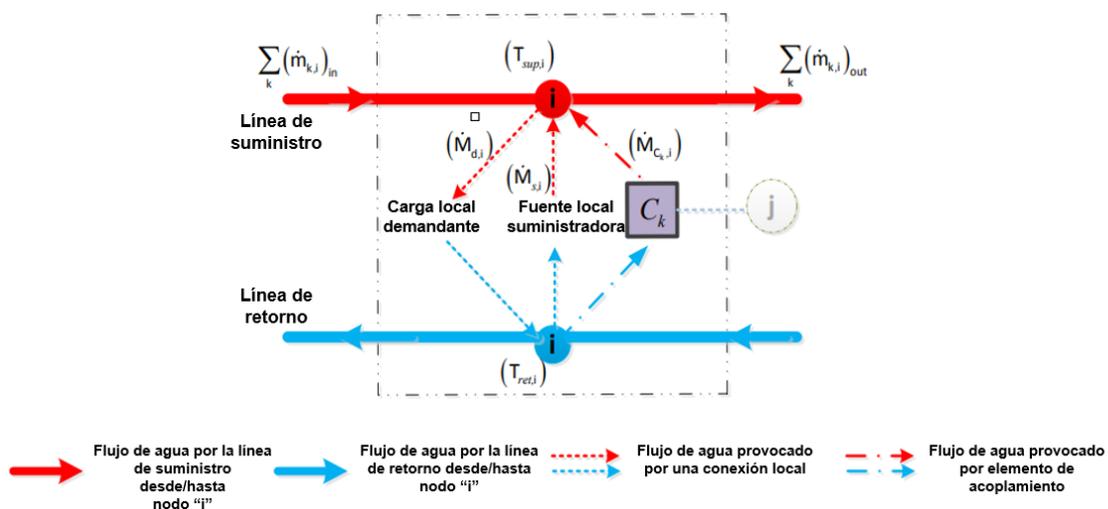


Figura 14. Interconexiones nodales propias de una red térmica y relación con el elemento de acoplamiento. Fuente: Muditha Abeysekera [7].

En la ecuación 30, se propone la expresión para calcular el caudal másico que inyecta/suministra una fuente térmica externa a un nodo de la red térmica [7]:

$$\dot{M}_{s,i}^T = \frac{\dot{Q}_{s,i}^T}{C_p \cdot (T_{s,i}^T - T_{ret,i}^T)} \tag{30}$$

En la Tabla 11, se muestra el significado de la notación que se emplea en la anterior ecuación:

Tabla 11. Parámetros necesarios para el cálculo del caudal másico suministrado a un nodo por una fuente externa. Fuente: Muditha Abeysekera [7].

Notación	Significado	Unidad
$\dot{M}_{s,i}^T$	Caudal másico suministrado por una fuente térmica conectada al nodo "i"	[kg/s]
$\dot{Q}_{s,i}^T$	Potencia térmica suministrada al nodo "i" por una fuente térmica	[kW _T]
$T_{s,i}^T$	Temperatura del agua suministrada al nodo "i" por una fuente térmica (parámetro conocido)	[°C]
$T_{ret,i}^T$	Temperatura del agua en el nodo "i" en la línea de retorno	[°C]

A continuación, en la ecuación 31, se propone una expresión que permite calcular el caudal másico demandado a un nodo “ i ” por una fuente térmica externa conectada a dicho nodo [7]:

$$\dot{M}_{d,i}^T = \frac{\dot{Q}_{d,i}^T}{C_p \cdot (T_{sup,i}^T - T_{out,i}^T)} \quad (31)$$

En la Tabla 12, se muestra el significado de la notación que se emplea en la ecuación 31:

Tabla 12. Parámetros necesarios para el cálculo del caudal másico demandado a un nodo por una carga local. Fuente: Muditha Abeysekera [7].

Notación	Significado	Unidad
$\dot{M}_{d,i}^T$	Caudal másico demandado en el nodo “ i ” por una carga local conectada a dicho nodo	[kg/s]
$\dot{Q}_{d,i}^T$	Potencia térmica demandada por una carga local conectada al nodo “ i ”	[kW _T]
$T_{sup,i}^T$	Temperatura del agua en el nodo “ i ” en la línea de suministro	[°C]
$T_{out,i}^T$	Temperatura del agua a la salida de la carga local (parámetro conocido)	[°C]

Con el objetivo de mejorar la comprensión de las dos últimas ecuaciones propuestas, a continuación, se expone un ejemplo que clarifica cuándo debe usarse la ecuación del caudal másico suministrado o el caudal másico demandado. Por ejemplo, si se analiza una caldera de gas natural convencional, se determina que, si se observa desde la red de gas natural, este dispositivo actúa como un elemento demandante (ya que requiere de gas natural para su funcionamiento), mientras que, si se observa desde la red térmica de calor, el elemento ejerce una función de suministro al inyectar calor en esta red [7]. De esta forma, $\dot{M}_{Ck,i}^T$ (caudal másico suministrado o demandado por un elemento de acoplamiento) se calcula aplicando las ecuaciones 30 y 31 respectivamente.

La ecuación 32, determina la suma algebraica de los caudales másicos de las ramas que se encuentran conectadas a un nodo “ i ” [7]:

$$\dot{m}_i^T = \sum_{k=1}^{ntubterm} A_{i,k}^T \cdot \dot{m}_{(k)}^T \quad (32)$$

En la Tabla 13, se muestra el significado de la notación que se emplea en la anterior ecuación:

Tabla 13. Parámetros que intervienen en la suma de los caudales másico que confluyen en un nodo.
Fuente: Muditha Abeyssekera [7].

Notación	Significado	Unidad
$ntubterm$	Número total de ramas que conforman la red térmica	[ramas]
$A_{i,k}^T$	Matriz de incidencia de la red térmica	-
$\dot{m}_{(k)}^T$	Caudal másico que circula por una rama "k"	[kg/s]

De la misma forma que se ha explicado en el apartado 6.5 (red de gas natural), la matriz de incidencia de la red térmica ($A_{i,k}^T$) se construye teniendo en cuenta las ramas existentes, a qué nodos se conectan estas ramas y el sentido de los flujos másicos que circulan por ellas [7]. Si el caudal másico ($\dot{m}_{(k)}^T$) sale del nodo "i", el valor que se deberá computar en la matriz de incidencia es -1, mientras que, si la dirección del caudal es entrante al nodo, el valor computado será +1. En caso de no disponer de conexión entre un nodo (i) y una rama (k) el valor es 0 [7].

Una vez definidas todas las anteriores ecuaciones, se propone la ecuación de balance que caracteriza las redes térmicas [7]:

$$\dot{M}_{s,i}^T - \dot{M}_{d,i}^T + C_{ck,i}^T \cdot |\dot{M}_{ck,i}^T| + \sum_{k=1}^{ntubterm} A_{i,k}^T \cdot \dot{m}_{(k)}^T = 0 \quad (33)$$

El parámetro $C_{ck,i}^T$ de la ecuación 33 denota la dirección de $\dot{M}_{ck,i}^T$, según lo descrito en el apartado 6.3 (elementos de acoplamiento).

Cuando se dispone de más de una rama conectada a un determinado nodo, se puede calcular la temperatura a la salida de dicho nodo (T_i) aplicando la siguiente ecuación (donde "k" hace referencia a las ramas conectadas al nodo "i" [7]:

$$\left(\sum_k \dot{m}_{(k)} \right) \cdot T_i = \left(\sum_k \dot{m}_{(k)} \cdot T_{i,(k)} \right) \quad (34)$$

A continuación, se proponen las distintas casuísticas que existen para determinar la temperatura en la línea de suministro del nodo "i". En primer lugar, si una fuente térmica se encuentra conectada al nodo "i" [7]:

$$T_{sup,i} = T_{s,i} \quad (35)$$

En segundo lugar, si no existen unidades conectadas al nodo “ i ” [7]:

$$T_{sup,i} = \frac{(\sum_k \dot{m}_{(k)} \cdot T_{i,(k)})}{\sum_k \dot{m}_{(k)}} \quad (36)$$

Finalmente, si el elemento de acoplamiento actúa de unidad suministradora [7]:

$$T_{sup,i} = T_{s,Ck} \quad (37)$$

El parámetro $T_{s,Ck}$ de la ecuación 37 denota la temperatura del agua suministrada por un elemento de acoplamiento (C_k) cuando ejerce de unidad térmica suministradora.

En el caso de determina la temperatura en la línea de retorno del nodo “ i ” se aplicará la ecuación 38 [7]:

$$T_{ret,i} = \frac{(\sum_k \dot{m}_{(k)} \cdot T_{i,(k)}) + \dot{M}_{d,i}^T \cdot T_{out,i}^T + \dot{M}_{Ck,i}^T \cdot T_{out,Ck}^T}{(\sum_k \dot{m}_{(k)}) + \dot{M}_{d,i}^T + \dot{M}_{Ck,i}^T} \quad (38)$$

El parámetro $\dot{M}_{Ck,i}^T$ propuesto en la anterior ecuación, hace referencia al caudal másico demandado por el elemento de acoplamiento, mientras que el parámetro $T_{out,Ck}^T$ se refiere a la temperatura del agua a la salida de C_k [7].

A partir de las ecuaciones que se han propuesto en el presente apartado, se pueden determinar todas las temperaturas que intervienen en el sistema.

Finalmente, se expone una clasificación de los distintos tipos de nodos que pueden conformar la red térmica en función de sus características principales.

El nodo de referencia en la red térmica se denomina “*Slack*” y su función principal es regular y mantener estable dicha red, tanto en términos energéticos como en el control de pérdidas [7]. En este tipo de nodos, siempre se conectará una fuente térmica de la que se conocerá el parámetro $T_{s,i}^T$ (explicado en la Tabla 11). Por otra parte, el parámetro $T_{ret,i}^T$ ejercerá de incógnita en los nodos tipo “*Slack*” [7].

En los nodos denominados “*Suministro*”, se conectará un elemento que se encargará de suministrar potencia calorífica ($\dot{Q}_{s,i}^T$) a dicho nodo, que será de valor conocido [7]. De la misma forma, la temperatura del agua a la salida del elemento conectado a este nodo, también se conocerá su valor ($T_{s,i}^T$), mientras que el valor de $T_{ret,i}^T$ se deberá hallar puesto que se trata de una incógnita [7].

Finalmente, existen los nodos del tipo “*Demanda*”, caracterizados por conocerse la potencia calorífica ($\dot{Q}_{d,i}^T$) que les demanda una determinada carga local que se encuentra conectado a ellos [7]. A diferencia de las otras tipologías descritas, el valor de $T_{sup,i}^T$ se convierte en incógnita, de la misma forma que $T_{ret,i}^T$ [7].

6.7. Resumen de las ecuaciones de balance para el análisis en régimen permanente en función del tipo de red energética

En el presente apartado, se exponen las ecuaciones de balance finales para la red eléctrica, la red de gas natural y la red térmica de calor y frío. Estas ecuaciones de balance se van a clasificar de la siguiente forma, donde i hace referencia al número del nodo correspondiente [7]:

$$F = \begin{bmatrix} F_{1,i} \\ F_{2,i} \\ F_{3,i} \\ F_{4,i} \\ F_{5,i} \end{bmatrix} = 0$$

La notación $F_{1,i}$ se refiere a una ecuación de balance de la red eléctrica. Concretamente, se hace referencia al flujo de potencia activa (inyectada especificada y calculada) de los nodos tipo PV y PQ [7]:

$$F_{1,i} = p_{g,i}^E - p_{d,i}^E + C_{Ck,i}^E \cdot |p_{Ck,i}^E| - \text{real} \left[v_i \sum_{n=1}^{nelec} Y_{in} \cdot v_n \right] = 0 \quad (39)$$

En cuanto a la notación $F_{2,i}$, también se hace referencia a una ecuación de balance relacionada con la red eléctrica. No obstante, en este caso, la ecuación propuesta considera el flujo de potencia reactiva (inyectada especificada y calculada) de los nodos tipo PQ [7]:

$$F_{2,i} = q_{g,i}^E - q_{d,i}^E + C_{Ck,i}^E \cdot |q_{Ck,i}^E| - \text{imag} \left[v_i \sum_{n=1}^{nelec} Y_{in} \cdot v_n \right] = 0 \quad (40)$$

De esta forma, a modo de resumen, un nodo tipo PV queda completamente definido por la ecuación de balance $F_{1,i}$, mientras que un nodo del tipo PQ quedará parcialmente definido ya que solo se contempla la parte activa (real). Para completar la caracterización de los nodos PQ deberá utilizarse la ecuación de balance $F_{2,i}$ [7].

La ecuación de balance $F_{3,i}$ hace referencia a la red de gas natural. Se computa el flujo volumétrico de gas natural existente en la red para los nodos tipo “Carga” (que solo con esta ecuación quedan completamente definidos) [7]:

$$F_{3,i} = \dot{V}_{s,i}^G - \dot{V}_{d,i}^G + C_{Ck,i}^G \cdot \left| \frac{(\dot{E}_{Ck,i}^G)}{GCV} \cdot 3600 \right| + \sum_{k=1}^{ntubgas} A_{i,k}^G \cdot S_{ij} \cdot \left(S_{ij} \cdot \frac{(Pr_i - Pr_j)}{K_{(k)}^G} \right)^{\frac{1}{m}} = 0 \quad (41)$$

Los nodos (tipo “Suministro” y “Demanda”) de la red térmica de calor se definirán con la ecuación de balance $F_{4,i}$, mientras que los nodos de la red térmica de frío se definirán con $F_{5,i}$ [7]:

$$F_{4,i} = F_{5,i} = \dot{M}_{s,i}^T - \dot{M}_{d,i}^T + C_{Ck,i}^T \cdot |\dot{M}_{Ck,i}^T| + \sum_{k=1}^{ntubterm} A_{i,k}^T \cdot \dot{m}_{(k)}^T = 0 \quad (42)$$

El caudal másico suministrado por una fuente al nodo “ i ” ($\dot{M}_{s,i}^T$) y el caudal másico demandado en el nodo “ i ” por una carga local ($\dot{M}_{d,i}^T$), que se encuentran dentro de $F_{4,i}$, se calculan mediante las ecuaciones 43 y 44 [7]:

$$\dot{M}_{s,i}^T = \frac{\dot{Q}_{s,i}^T}{C_p \cdot (T_{s,i}^T - T_{ret,i}^T)} \quad (43)$$

$$\dot{M}_{d,i}^T = \frac{\dot{Q}_{d,i}^T}{C_p \cdot (T_{sup,i}^T - T_{out,i}^T)} \quad (44)$$

Por otro lado, la temperatura de la línea de suministro en el nodo “ i ” ($T_{sup,i}$) puede tomar diferentes valores en función de las siguientes casuísticas. En el caso de que una fuente o unidad suministradora se encuentre directamente conectada al nodo “ i ”, $T_{sup,i}$ se calcula aplicando la ecuación 45 [7]:

$$T_{sup,i} = T_{s,i} \quad (45)$$

Si no existe ningún elemento conectado a dicho nodo, se aplicará la siguiente expresión [7]:

$$T_{sup,i} = \frac{(\sum_k \dot{m}_{(k)} \cdot T_{i,(k)})}{\sum_k \dot{m}_{(k)}} \quad (46)$$

Finalmente, si el elemento de acoplamiento (C_k) ejerce de fuente o unidad generadora, $T_{sup,i}$ se calculará aplicando la siguiente igualdad [7]:

$$T_{sup,i} = T_{s,Ck} \quad (47)$$

En cuanto a la temperatura de la línea de retorno en el nodo “ l ” ($T_{ret,i}$) se refiere, se aplicará la ecuación 48 para su cálculo [7]:

$$T_{ret,i} = \frac{(\sum_k \dot{m}_{(k)} \cdot T_{i,(k)}) + \dot{M}_{d,i}^T \cdot T_{out,i}^T + \dot{M}_{Ck,i}^T \cdot T_{out,Ck}^T}{(\sum_k \dot{m}_{(k)}) + \dot{M}_{d,i}^T + \dot{M}_{Ck,i}^T} \quad (48)$$

Para el cómputo de las partes de las ecuaciones de balance que hacen referencia a los elementos de acoplamiento, se procederá en función de los dos métodos que se presentarán en los siguientes párrafos.

En el primer método, si se especifica la inyección de flujo de energía ($\dot{E}_{Ck,i}^\alpha$ y $\dot{E}_{Ck,j}^\beta$) se podrá calcular según las ecuaciones 1 y 2 [7].

En el segundo método, se deberá tener en cuenta si el elemento de acoplamiento se encuentra conectado a un nodo de referencia (*Slack*) de la red eléctrica o de la red térmica. En este caso, $\dot{E}_{Ck,i}^\alpha$ y $\dot{E}_{Ck,j}^\beta$ deberán calcularse siguiendo las siguientes ecuaciones. Si C_K se encuentra conectado al nodo de referencia de la red eléctrica se aplicará la ecuación 49 [7]:

$$\dot{E}_{Ck,slack}^\alpha = real \left\{ V_{slack} \cdot \left(\sum_{n=1}^{nrama_elec} Y_{slack,n} \cdot V_n \right)^* \right\} \quad (49)$$

En caso contrario, si C_K se encuentra conectado al nodo de referencia de la red térmica se calculará a través de la ecuación 50 [7]:

$$\dot{E}_{Ck,slack}^\alpha = \left[\sum_{j=1}^{nrama_term} a_{ij} \cdot \dot{m}_j \right] \cdot C_p \cdot (T_{s,slack} - T_{r,slack}) \quad (50)$$

7. Explicación genérica de los dos métodos numéricos iterativos contemplados

En el presente capítulo, se exponen de forma genérica los dos métodos numéricos iterativos que se han contemplado en el TFM. En primer lugar, se explicará un método iterativo llamado FSOLVE, que se encuentra dentro del software MATLAB. Se trata de una rutina que ya viene programada y que, cumpliendo una serie de requisitos, se obtienen resultados sin necesidad de programación manual. En segundo lugar, se explicará el método iterativo de Newton-Raphson con jacobiano numérico de forma más detallada, ya que es el método que, finalmente, se ha utilizado para obtener los resultados de este TFM.

El motivo por el cual se ha optado por el Newton-Raphson con jacobiano numérico en lugar del FSOLVE es debido a que las ecuaciones que se presentarán en el apartado 8.3, quedan en función de una serie de parámetros no constantes que dependen de los valores de las incógnitas de dichas ecuaciones (temperaturas que dependen de caudales máxicos y las " S_{ij} " que depende de las presiones nodales). Es decir, cuando el método numérico iterativo va actualizando los valores de las incógnitas en cada iteración, dichos parámetros no constantes deben ser actualizados en función de esos valores en cada iteración. Tanto las incógnitas como los parámetros no constantes serán detallados en los apartados 8.3 y 8.4.

Si se comparan los dos métodos numéricos iterativos descritos en el presente capítulo con el utilizado en la Tesis de referencia titulada "*Combined Analysis of Coupled Energy Networks*" de Muditha Abeysekera (*Institute of Energy, Cardiff School of Engineering, Cardiff University, 2016*) [7], se concluye que los métodos contemplados en este TFM se preparan con mayor rapidez, mientras que el método propuesto en la Tesis de referencia [7] es más lento de preparar para su posterior aplicación. Sin embargo, los métodos iterativos propuestos en este TFM requieren de más iteraciones para alcanzar la solución en comparación con el método propuesto en la Tesis de referencia [7], las cuales suponen un aumento de tiempo despreciable frente al ahorro de tiempo en la preparación antes mencionada. El motivo del incremento de iteraciones es debido a que el Newton-Raphson con jacobiano numérico calcula de forma aproximada las derivadas parciales de cada una de las funciones del sistema con respecto a cada una de las incógnitas de dicho sistema, mientras que el Newton-Raphson con jacobiano analítico que se usa en la Tesis de referencia [7] determina dichas derivadas parciales de forma exacta.

7.1. Motivo de la contemplación de métodos numéricos iterativos para la resolución de los sistemas de ecuaciones

Como se puede observar en las ecuaciones presentadas a lo largo del capítulo 6, conforman un sistema de ecuaciones no lineales que requiere de métodos numéricos iterativos para su correcta resolución.

A modo de recordatorio, se considera que un sistema de ecuaciones es no lineal cuando al menos una de las ecuaciones que forma el sistema no trazan un gráfico lineal, es decir, no es de primer grado.

7.2. Método iterativo FSOLVE (MATLAB)

En el presente apartado, se describen los principios básicos de utilización de la rutina FSOLVE que ya viene programada de base en el software MATLAB y que sirve para resolver sistemas de ecuaciones no lineales:

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ \vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \end{cases} \quad (51)$$

En el sistema que se ha presentado en la ecuación 51, el objetivo es determinar qué valores de x_1 hasta x_n hacen que todas las f_i se igualen a cero [25]. También, se puede expresar en formato matricial, de forma que F sea un vector que contenga una serie de funciones (n funciones) y X sea otro vector que contenga variables independientes (n variables independientes). Esta última casuística puede expresarse a través de la siguiente expresión:

$$F(X) = 0 \quad (52)$$

Para usar FSOLVE deberá programarse la siguiente expresión:

$$x = fsolve(fun, x0, param_ctes); \quad (53)$$

Partiendo de la ecuación 53, el primer argumento (fun) de la rutina FSOLVE es la función que contiene las f_i del sistema de ecuaciones (es necesario que se exprese en forma de vector de

entrada), el segundo argumento (x_0) es el vector de estimaciones iniciales y el tercer argumento ($param_ctes$) es el vector de parámetros constantes. El resultado obtenido se devolverá en forma de vector y contendrá las incógnitas resueltas, de forma que se dispone de un vector de entrada y un vector de salida.

$$function F = fun(x,param_ctes); \quad (54)$$

Tras la ejecución de la rutina FSOLVE se observa que, al tratarse de un código cerrado programado por el personal de MATLAB [25], no se puede modificar para adaptarlo a las necesidades del TFM, ya que existen una serie de parámetros no constantes ($param_no_ctes$) que dependen del valor de las incógnitas y que deberán actualizarse iteración tras iteración.

7.3. Método iterativo Newton-Raphson con jacobiano numérico

Tras determinar que el anterior método iterativo no se podía aplicar al presente caso de estudio, se optó por aplicar en su lugar el método iterativo Newton-Raphson con jacobiano numérico (código que se adjunta en el volumen Anexos, Anexo A).

En el método de Newton-Raphson con jacobiano analítico, dado un sistema de “ n ” ecuaciones no lineales con “ n ” incógnitas (ecuación 51), la solución (x_1, \dots, x_n) deberá satisfacer a las “ n ” ecuaciones consideradas, ya que, si fuesen tratadas de forma independiente, el número de soluciones posibles serían infinitas.

Para poder iniciar este método numérico se deberán proponer estimaciones (apartado 8.4) para cada una de las incógnitas que compongan el sistema. Estas estimaciones se deberán proponer de la forma más ajustada posible, ya que, de lo contrario, el método Newton-Raphson con jacobiano analítico podría no funcionar.

En segundo lugar, se deberá determinar la matriz Jacobiana del sistema, cuyos coeficientes se calculan analíticamente como las derivadas parciales de las funciones propuestas con respecto a cada una de las incógnitas. La matriz Jacobiana del sistema para la iteración “ k ” es la siguiente [7]:

$$JF(X(k)) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}_{X(k)} \quad (55)$$

A continuación, se calcula el vector de funciones del sistema en la iteración “ k ” [7]:

$$F(X(k)) = \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix}_{X(k)} \quad (56)$$

Posteriormente, debe aplicarse la siguiente ecuación y obtener el valor de $\Delta X(k)$ [7]:

$$JF(X(k)) \cdot \Delta X(k) = -F(X(k)) \quad (57)$$

Finalmente, se deberá calcular $X(k + 1)$ aplicando la siguiente fórmula [7]:

$$X(k + 1) = X(k) + \Delta X(k) \quad (58)$$

Se deberán repetir los pasos descritos hasta que se converja la solución.

Sin embargo, tal y como se hace evidente, el método Newton-Raphson con jacobiano analítico presenta importantes inconvenientes, principalmente, en lo referido a la gran cantidad de derivadas parciales que deberían calcularse analíticamente ante un sistema $n \times n$. Por este motivo, cuando se presentan sistemas de ecuaciones no lineales con numerosas ecuaciones e incógnitas se elige el método de Newton-Raphson con jacobiano numérico, de forma que se pueden realizar aproximaciones de estas derivadas parciales (diferenciación numérica):

$$\frac{\partial f_j}{\partial x_i}(X(k)) \approx \frac{f_j(x_1(k), x_2(k), \dots, x_i(k) + h_i, \dots, x_n(k)) - f_j(x_1(k), x_2(k), \dots, x_i(k) - h_i, \dots, x_n(k))}{2 \cdot h_i} \quad (59)$$

A continuación, se indica la estructura (*Inputs* y *Outputs*) que se ha seguido para programar

en MATLAB el método numérico iterativo escogido (se adjunta el código integro programado en el volumen Anexos, Anexo A, del presente TFM).

En primer lugar, se presentan los *Inputs*:

- **F** = Vector de funciones que, igualadas a 0, constituyen el sistema de ecuaciones.

El vector **F** contiene todas las funciones que se presentan en el apartado 6.7 ($F_{1,1}, F_{1,2}, F_{2,2}, F_{3,1}, F_{3,3}, F_{3,4}, F_{4,2}, F_{4,3}, F_{4,4}, F_{5,1}, F_{5,3}$), las cuales deben acabar valiendo 0 o lo más cercano posible a ese valor.

- **X(0)** = Estimación inicial de las incógnitas.

Vector que contiene el valor de las estimaciones iniciales de las incógnitas que presenta el sistema de ecuaciones.

- **TolX** = Tolerancia en las X's.

Su función principal es permitir que se detenga el proceso iterativo en el momento en el que la diferencia entre dos aproximaciones consecutivas a la solución (norma del vector ΔX) quede por debajo del valor especificado en TolX.

- **TolFX** = Tolerancia en las F(X)'s.

Su función principal es permitir que se detenga el proceso iterativo en el momento en el que el valor del conjunto de funciones que contiene el vector F(X) (norma del vector F(X)) quede por debajo del valor especificado en TolFX.

- **p** = Tipo de norma (normalmente, 2 o infinito)

La norma **p** seleccionada, aplicada al vector correspondiente, permite obtener una medida de si se está por encima o por debajo de una tolerancia fijada por el usuario.

- **MaxIter** = Número máximo de iteraciones.

El valor especificado como tal permite limitar el número de iteraciones para evitar que, en caso de no convergencia a la solución, el método numérico entre en bucle infinito.

Finalmente, se presentan los *Outputs*:

- **X** = Vector X obtenido en la última iteración ejecutada.
- **FX** = Vector F(X) obtenido en la última iteración ejecutada.
- **normFX** = Norma del vector F(X) obtenido en la última iteración ejecutada.

- **normdX** = Norma del vector ΔX obtenido en la última iteración ejecutada.
- **detJFX** = Determinante de la matriz $JF(X)$ obtenida en la última iteración ejecutada.
- **Xhi** = Histórico del vector X .
- **normFXhi** = Histórico de la norma del vector $F(X)$.
- **normdXhi** = Histórico de la norma del vector ΔX .
- **detJFXhi** = Histórico del determinante de la matriz $JF(X)$.
- **FXhi** = Histórico del vector $F(X)$.
- **dXhi** = Histórico del vector ΔX .
- **JFXhi** = Histórico de la matriz $JF(X)$.
- **param_no_cteshi** = Histórico del vector de parámetros no constantes.

Al contrario que la rutina FSOLVE, el método de Newton-Raphson con jacobiano numérico se trata de un código abierto programado por el autor de este trabajo, por lo que ha sido posible su modificación para adaptarlo a las necesidades del TFM en lo que concierne al tratamiento de los parámetros no constantes (`param_no_ctes`). De esta forma, el código mostrado en el volumen Anexos, Anexo A, permite que estos parámetros, cuyos valores dependen de las incógnitas del sistema, vayan actualizando sus valores iteración tras iteración a medida que las incógnitas también van cambiando de valor.

8. Análisis en régimen permanente de una red multienergética particular

Los principales objetivos que se persiguen el presente apartado son los que se detallan a continuación:

- Representación gráfica de la red multienergética concreta, a partir de la cual se realizará un estudio en régimen permanente de su funcionamiento.
- Descripción de la red y de las interconexiones entre la red eléctrica, la red de gas natural y las redes térmicas (frío y calor).
- Presentación de los datos técnicos de los elementos de acople, de los datos nodales (energía demandada y generada, voltajes, presiones y temperaturas) y parámetros técnicos de las distintas redes que componen el sistema.
- Formulación y desarrollo de las ecuaciones presentadas en el anterior apartado aplicadas a este ejemplo concreto de red multienergética.
- Desarrollo de los procedimientos y métodos necesarios para analizar correctamente este tipo de redes.
- Presentación del método iterativo de resolución y de los resultados obtenidos.

8.1. Descripción y representación gráfica de la red multienergética objeto de estudio

Como se puede observar en la Figura 15, el sistema multienergético propuesto dispone de tres tipos principales de redes energéticas: red eléctrica, red de gas natural y red térmica (que a su vez se descompone en la red de frío y en la red de calor). La red eléctrica está compuesta por tres nodos (E1, E2 y E3). El nodo E1 recibe energía en forma de electricidad desde la cogeneración (CHP, por sus siglas en inglés) y distribuye al nodo E2, que dispone de una carga local conectada, mientras que en el nodo E3 se inyecta potencia a través del DG (*Diesel Generator*). El gas natural se inyecta a la red a través del nodo G2 y mediante tuberías es transportado al resto de nodos (G1, G3 y G4) en cuyos terminales se encuentran las cargas locales. El nodo G1 suministrará a la cogeneración y el nudo G4 suministrará a la caldera de gas (GB, por sus siglas en inglés). La red térmica de calor también está compuesta por cuatro nodos (H1, H2, H3 y H4). Los nodos H1 y H4 recibirán la energía térmica en forma de calor de la cogeneración y la caldera respectivamente. Las cargas se encuentran conectadas en los nodos H2 (carga local) y H3 (conexión con el enfriador de absorción, AC, por sus siglas en inglés). Finalmente, el enfriador de absorción inyecta frío en el nodo C2 y se distribuye hasta C1 y C3. Ambas redes térmicas disponen de una línea de retorno (línea discontinua) que vuelve a conectar cada uno de los nodos con los elementos de acople mencionados

anteriormente (CHP, GB y AC). Según estas especificaciones se puede diferenciar entre nodos que suministran energía y nodos que demandan energía (representados con un punto relleno y un punto vacío respectivamente).

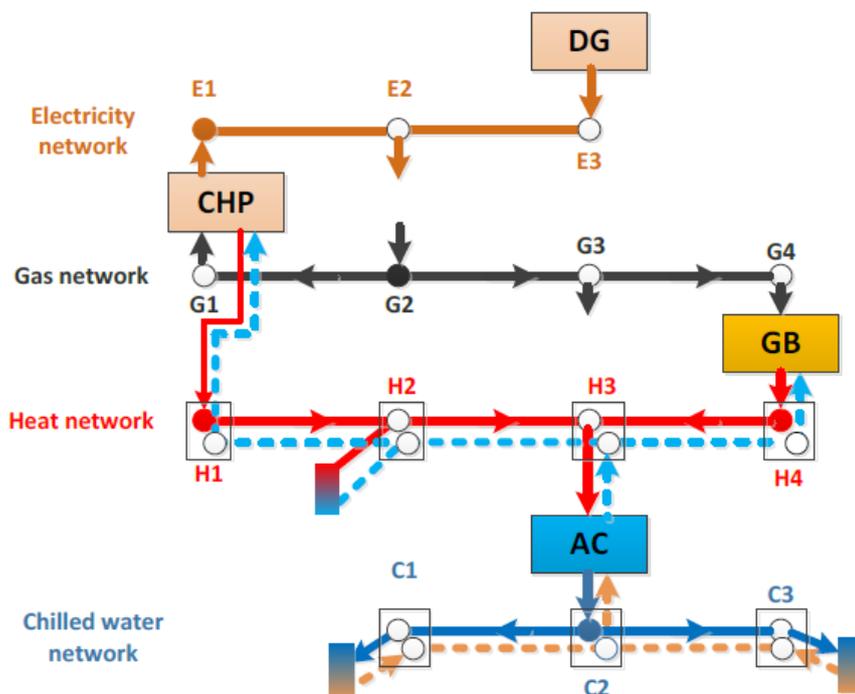


Figura 15. Representación gráfica de la red multienergética objeto de estudio. Fuente: Muditha Abeysekera [7].

8.2. Datos y parámetros técnicos de los elementos de acople, los nodos y las redes energéticas que forman parte de ella

A continuación, se procede a detallar los datos técnicos de los elementos de acople. Como ya se ha mencionado en el apartado 8.1, existen tres elementos de acople entre redes, la cogeneración (CHP), la caldera de gas (GB) y el enfriador de absorción (AC). A lo largo de este apartado, CHP se denominará como C_1 , mientras que la GB y el AC se denominarán como C_2 y C_3 respectivamente. Además, siguiendo lo indicado en la explicación teórica de las redes multienergéticas del capítulo 6, si el elemento de acople entre redes suministra energía a un determinado nodo, el valor de "C" será igual a 1. Por el contrario, si el elemento de acople requiere de energía proveniente de un determinado nodo, el valor de "C" será igual a -1. En la Tabla 14, se detallan los valores de "C" en función del conexionado y la eficiencia de la conversión entre unas redes y otras (en función del elemento de acople que las enlaza):

Tabla 14. Datos técnicos de los elementos de acople. Fuente: Muditha Abeysekera [7].

Elemento de acople	CHP	GB	AC
Denominación	C ₁	C ₂	C ₃
$C_{C_k,i}^\alpha$	$C_{C_{1,1}}^E = +1$ $C_{C_{1,1}}^G = -1$ $C_{C_{1,1}}^H = +1$	$C_{C_{2,4}}^G = -1$ $C_{C_{2,4}}^H = +1$	$C_{C_{3,3}}^H = -1$ $C_{C_{3,2}}^C = +1$
Eficiencia de la conversión	$\eta_{C_1}^{G/E} = 0,35$ $\eta_{C_1}^{G/H} = 0,4$ $\eta_{C_1}^{H/E} = \frac{0,35}{0,4} = 0,875$	$\eta_{C_2}^{G/H} = 0,9$	$\eta_{C_3}^{H/C} = 0,65$
Método aplicable (según apartado 6.7)	2º	1º	2º

En las Tablas 15, 16 y 17 se detallan los datos nodales en función del tipo de nodo y del tipo de red energética en la que se encuentran:

Tabla 15. Datos nodales de la red eléctrica. Fuente: Muditha Abeysekera [7].

Nodo		E1	E2	E3
Tipo		PV	PQ	Slack
Generación	$p_{g,i}^E$ [MW]	0	0	-
	$q_{g,i}^E$ [MVar]	-	0	-
Demanda	$p_{d,i}^E$ [MW]	0,8	0,8	0,4
	$q_{d,i}^E$ [MVar]	0,1	0,1	0,25
Voltaje (v_1)	Mag [pu]	1,02	-	1,0
	Ángulo [°]	-	-	0

Tal y como se ha determinado en la anterior tabla, se ha especificado el tipo de nodo para cada uno de los existentes en la red eléctrica. De esta forma, enlazando con lo detallado en el apartado 6.4, debido a que el nodo E1 es de tipo PV, se conocen y proporcionan los datos de módulo de voltaje (v_1) y la potencia eléctrica activa generada ($p_{g,1}^E$) y demandada ($p_{d,1}^E$). El ángulo correspondiente a dicho voltaje (δ_1) es una incógnita que deberá ser hallada a través de la fórmulas y procedimientos que se expondrán en el apartado 8.3 y 8.4. Por otra parte, el nodo E2, al tratarse de un nodo de tipo PQ, los valores de la potencia eléctrica activa y reactiva, tanto demandada como generada, son conocidos ($p_{g,2}^E, p_{d,2}^E, q_{g,2}^E, q_{d,2}^E$). El módulo y el ángulo del voltaje de este nodo (v_2 y δ_2 respectivamente) son incógnitas cuyos valores serán determinados en este ejemplo de red multienergética que se está tratando. Finalmente, el nodo E3 se trata de un nodo tipo *Slack*, cuyo módulo y ángulo de voltaje son valores conocidos (v_3 y δ_3 respectivamente). También se proporcionan los valores de la potencia eléctrica activa y reactiva demandada ($p_{d,3}^E$ y $q_{d,3}^E$ respectivamente).

Tabla 16. Datos nodales de la red de gas natural. Fuente: Muditha Abeysekera [7].

Nodo		G1	G2	G3	G4
Tipo		Carga	<i>Slack (Gas infeed)</i>	Carga	Carga
Suministro	$\dot{V}_{s,i}^G$ [m³/h]	0	-	0	0
Demanda	$\dot{V}_{d,i}^G$ [m³/h]	200	50	100	180
Presión	Mag [mbar]	-	100	-	-

En cuanto a los datos nodales de la red de gas natural, si se relaciona con lo expuesto en el apartado 6.5, se observa que para los nodos que son del tipo “carga” (G1, G3 y G4), los valores conocidos son los de suministro ($\dot{V}_{s,i}^G$) y demanda ($\dot{V}_{d,i}^G$) de gas natural. En cuanto al nodo G2, al tratarse de un tipo “*infeed*”, se conoce la presión en este punto (Pr_2^G) además demanda de gas natural ($\dot{V}_{d,2}^G$). Las presiones de los nodos G1, G3 y G4 (Pr_1^G, Pr_3^G y Pr_4^G respectivamente) son incógnitas cuyo valor será hallado a través de las fórmulas que se exponen a lo largo de este apartado y a través del método iterativo que se explicará con posterioridad.

Tabla 17. Datos nodales de la red térmica de calor. Fuente: Muditha Abeysekera [7].

Nodo		H1	H2	H3	H4
Tipo		Slack	Demanda	Demanda	Suministro
Suministro	$\dot{Q}_{s,i}^H$ [kW]	-	0	0	500
Demanda	$\dot{Q}_{d,i}^H$ [kW]	400	1200	0	0
Temperaturas	$T_{s,i}^H$ [°C]	100	-	-	100
	$T_{out,i}^H$ [°C]	-	50	50	-

Por otra parte, si se analiza la red térmica de calor, se determina, tal y como se ha expuesto en el apartado 6.6, que los nodos de esta red se pueden dividir en tres tipos. En el caso del nodo tipo “Slack”, se proporciona el valor de la temperatura de la línea de suministro en dicho nodo ($T_{s,1}^H$), además de la potencia térmica demandada ($\dot{Q}_{d,1}^H$). Para los nodos H2 y H3, ambos del tipo “Demanda”, se conoce la demanda térmica de cada uno de estos nodos ($\dot{Q}_{d,2}^H$ y $\dot{Q}_{d,3}^H$ respectivamente), además de su temperatura de salida ($T_{out,2}^H$ y $T_{out,3}^H$). Por su condición de nodos demandantes, las potencias térmicas suministradas ($\dot{Q}_{s,2}^H$ y $\dot{Q}_{s,3}^H$) serán 0. Finalmente, en cuanto al nodo H4 que es del tipo “Suministro”, se conocen los valores de potencia térmica suministrada ($\dot{Q}_{s,4}^H$) y la temperatura de la línea de suministro en dicho nodo ($T_{s,4}^H$). Tal y como es característico en este tipo de nodos, la demanda térmica ($\dot{Q}_{d,4}^H$) es nula.

Las incógnitas vinculadas a la red térmica de calor serán los caudales máscos de las ramas H1-H2 ($\dot{m}_{(1)}^H$), H2-H3 ($\dot{m}_{(2)}^H$) y H4-H3 ($\dot{m}_{(3)}^H$). En la línea de lo mencionado con anterioridad, estas incógnitas serán halladas mediante las fórmulas que se proponen a lo largo de este apartado y a través del método iterativo que se presentará con posterioridad. Además, de la red térmica de calor, surgen una serie de parámetros que no son constantes y que van actualizándose iteración tras iteración (explicado con más detalle en el apartado 8.4). Para los nodos H1 y H4 se tendrá que actualizar, con el paso de las iteraciones, el valor de la temperatura de la línea de retorno de cada nodo ($T_{ret,1}^H$ y $T_{ret,4}^H$ respectivamente) mientras que para los nodos H2 y H3, se tendrán que actualizar los valores tanto de la línea de retorno como de la línea de suministro ($T_{ret,2}^H$, $T_{sup,2}^H$, $T_{ret,3}^H$ y $T_{sup,3}^H$).

Tabla 18. Datos nodales de la red térmica de frío. Fuente: Muditha Abeysekera [7].

Nodo		C1	C2	C3
Tipo		Demanda	Slack	Demanda
Suministro	$\dot{Q}_{s,i}^C$ [kW]	0	-	0
Demanda	$\dot{Q}_{d,i}^C$ [kW]	400	0	400
Temperaturas	$T_{s,i}^C$ [°C]	-	5	-
	$T_{out,i}^C$ [°C]	12	-	12

En la red térmica de frío se aplica la misma lógica que en su antítesis, la red térmica de calor. Según lo indicado en la Tabla 18, los nodos de esta red se clasifican, también en “Slack” y “Demanda” (en este caso no existe un nodo tipo “Suministro”). Por tanto, del nodo C2 se conoce la temperatura de la línea de suministro en dicho nodo ($T_{s,2}^C$) además de la potencia térmica demandada ($\dot{Q}_{d,2}^C$), mientras que para los nodos C1 y C3 se conocen el valor de la demanda térmica correspondiente a cada uno de ellos ($\dot{Q}_{d,1}^C$ y $\dot{Q}_{d,3}^C$ respectivamente), así como la temperatura de salida del correspondiente nodo ($T_{out,1}^C$ y $T_{out,3}^C$). Por su condición de nodos demandantes, las potencias térmicas suministradas ($\dot{Q}_{s,1}^C$ y $\dot{Q}_{s,3}^C$) serán 0.

Los caudales máxicos de las ramas C2-C1 ($\dot{m}_{(1)}^C$) y C2-C3 ($\dot{m}_{(2)}^C$) serán las incógnitas relacionadas con esta red. Los parámetros no constantes que deberán actualizarse iteración tras iteración son las temperaturas de la línea de suministro de los nodos C1 ($T_{sup,1}^C$) y C3 ($T_{sup,3}^C$) y la temperatura de la línea de retorno del nodo C2 ($T_{ret,2}^C$).

Las incógnitas y parámetros no constantes que se han ido mencionando a lo largo de los anteriores párrafos, serán recogidos en una tabla final (apartado 8.4) donde se mostrarán los resultados en función de la iteración en la que se encuentran. De esta forma, se podrá comprobar el buen funcionamiento del proceso iterativo y la lógica de los resultados obtenidos.

En las Tablas 19, 20 y 21, se detallan los parámetros técnicos de las distintas redes energéticas que componen la red multienergética:

Tabla 19. Parámetros técnicos de la red eléctrica. Fuente: Muditha Abeysekera [7].

Rama		1	2
Nodo	Inicial	E1	E2
	Final	E2	E3
Impedancia Serie	R (p.u.)	0.02	0.01
	X (p.u.)	0.04	0.02
Admitancia Serie	G (p.u.)	10	20
	B (p.u.)	-20	-40

Los valores que se proponen en la anterior tabla, pertenecientes a la red eléctrica, se utilizarán para calcular la matriz de admitancias de bus que caracteriza esta red, y que se utilizará a lo largo de las ecuaciones y fórmulas que se proponen a lo largo de este apartado (concretamente en aquellas ecuaciones relacionadas con la red eléctrica).

Tabla 20. Parámetros técnicos de la red de gas natural. Fuente: Muditha Abeysekera [7].

Rama		1	2	3
Nodo	Inicial	G2	G2	G3
	Final	G1	G3	G4
Diámetro tubería [mm]		150	150	150
Longitud tubería [m]		680	500	420

En cuanto a la red de gas natural, el diámetro y la longitud de la tubería serán los parámetros técnicos necesarios para computar los valores de las constantes de la tubería de gas en cada una de las ramas que componen la red (ecuaciones 16 y 19).

Tabla 21. Parámetros técnicos de la red térmica de calor. Fuente: Muditha Abeysekera [7].

Rama		1	2	3
Nodo	Inicial	H1	H2	H4
	Final	H2	H3	H3
Diámetro tubería [mm]		150	150	150
Longitud tubería [m]		3000	3000	3000
Coeficiente de transmisión de calor radial [W/m ² K]		0,9	0,9	0,9

Tabla 22. Parámetros técnicos de la red térmica de frío. Fuente: Muditha Abeysekera [7].

Rama		1	2
Nodo	Inicial	C2	C2
	Final	C1	C3
Diámetro tubería [mm]		160	160
Longitud tubería [m]		100	100
Coeficiente de transmisión de calor radial [W/m ² K]		0,9	0,9

En el caso de las redes térmicas, tanto de calor como de frío, se indica el diámetro y la longitud de la tubería y el coeficiente de transmisión de calor radial. Estos serán los parámetros técnicos necesarios para computar los valores de las temperaturas que se han indicado con anterioridad en este mismo apartado (ecuaciones 27 y 28).

A continuación, se procede a calcular la matriz de admitancias de bus que caracteriza la red eléctrica. Cabe recordar que la matriz de admitancias es una matriz $N \times N$ que describe un sistema eléctrico con N buses.

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{(12)} & -y_{(12)} & 0 \\ -y_{(12)} & y_{(12)} + y_{(23)} & -y_{(23)} \\ 0 & -y_{(23)} & y_{(23)} \end{bmatrix} \quad (60)$$

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} G_1 + jB_1 & -(G_1 + jB_1) & 0 \\ -(G_1 + jB_1) & (G_1 + jB_1) + (G_2 + jB_2) & -(G_2 + jB_2) \\ 0 & -(G_2 + jB_2) & G_2 + jB_2 \end{bmatrix} \quad (61)$$

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} 10 - j20 & -10 + j20 & 0 \\ -10 + j20 & (10 - j20) + (20 - j40) & -20 + j40 \\ 0 & -20 + j40 & 20 - j40 \end{bmatrix} \quad (62)$$

$$= \begin{bmatrix} 10 - j20 & -10 + j20 & 0 \\ -10 + j20 & 30 - j60 & -20 + j40 \\ 0 & -20 + j40 & 20 - j40 \end{bmatrix}$$

Si se expresa la matriz de admitancias en forma polar, se obtiene [7]:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} 22,36|_{-63,43^\circ} & 22,36|_{116,56^\circ} & 0 \\ 22,36|_{116,56^\circ} & 67,08|_{-63,43^\circ} & 44,72|_{116,56^\circ} \\ 0 & 44,72|_{116,56^\circ} & 44,72|_{-63,43^\circ} \end{bmatrix} \quad (63)$$

Para caracterizar el sistema energético de gas natural se utilizará la matriz de incidencia, siguiendo el procedimiento que se ha descrito en el apartado 6.5. En este caso, la matriz de incidencia estará compuesta por cuatro filas, ya que la red de gas natural consta de cuatro nodos (siendo la primera fila el nodo G1 y la última fila el nodo G4), y tres columnas debido a las tres ramas que forman dicha red (siendo la primera columna la rama uno y la tercera columna la tercera rama) y cuyos nodos inicial y final se indican en la Tabla 20. Para mejorar la comprensión de la construcción y análisis de las matrices de incidencia, se procede a explicar, con algunos ejemplos, cómo se determina la siguiente matriz de incidencia [7]:

$$A^G = \begin{bmatrix} +1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 \\ 0 & +1 & -1 \\ 0 & 0 & +1 \end{bmatrix} \quad (64)$$

Como ya se ha indicado en el capítulo 6, cada parámetro de la matriz puede tomar como valores el -1, el 0 y el +1 en función del sentido del caudal volumétrico. Por ejemplo, el parámetro situado en la primera fila y columna es un +1 ya que el caudal volumétrico de la rama 1 (de G2 a G1) “entra” en el nodo G1. Por el contrario, el parámetro situado en la segunda fila y primera columna es un -1 ya que el caudal volumétrico de la rama 1 “sale” del nodo G2. El parámetro de la matriz situado en la última fila y segunda columna es un 0 ya que el caudal volumétrico de G4 no interacciona con la segunda rama de la red de gas natural.

Dada una matriz de incidencia de una red, para obtener la matriz de incidencia reducida de la misma red, se elimina la fila correspondiente al nodo que se considera como el nudo de referencia en dicha red. En el caso de la red de gas, el nodo que se considera como referencia es el nodo G2, tal y como se ha expuesto en la Tabla 16. Por tanto, en este caso, se eliminará la segunda fila de la matriz presentada en la ecuación 64 [7]:

$$A_1^G = \begin{bmatrix} +1 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & -1 \\ 0 & 0 & +1 \end{bmatrix} \quad (65)$$

Según lo presentado en el apartado 6.5, las tuberías de gas disponen de una constante para el flujo de gas natural. Así pues, en las siguientes tres ecuaciones, se calculan estas constantes para cada una de las tuberías que forman la red de gas natural (según el detalle propuesto en la Tabla 20). La constante para la rama 1 (G2-G1) se calcula mediante la siguiente expresión:

$$K_{(1)}^G = 11,7 \times 10^3 \frac{L_{(1)}^G}{(d_{(1)}^G)^5} = 11,7 \times 10^3 \frac{680}{150^5} = 1,047 \cdot 10^{-4} \quad (66)$$

El valor de la constante para la rama 2 (G2-G3) se obtiene mediante la aplicación de la siguiente expresión:

$$K_{(2)}^G = 11,7 \times 10^3 \frac{L_{(2)}^G}{(d_{(2)}^G)^5} = 11,7 \times 10^3 \frac{500}{150^5} = 7,704 \cdot 10^{-5} \quad (67)$$

La tercera rama de la red de gas natural (G3-G4) tiene la siguiente constante:

$$K_{(3)}^G = 11,7 \times 10^3 \frac{L_{(3)}^G}{(d_{(3)}^G)^5} = 11,7 \times 10^3 \frac{420}{150^5} = 6,471 \cdot 10^{-5} \quad (68)$$

Cabe destacar que, según las condiciones que se han definido en la presente red multienergética, la fórmula utilizada para el cálculo de la constante del flujo de gas natural de la tubería es la considerada en las ecuaciones 66, 67 y 68, ya que, tal y como se demostrará en la presentación de resultados, no hay ninguna presión que supere los 100 mbar (límite para seleccionar la fórmula de la constante relacionada con las redes de media presión). Esto se debe a que en el enunciado del caso se considera que la presión en el nodo G2 es de 100 mbar. Por la estructura, distribución, funcionamiento y pérdidas de presión que se van produciendo a lo largo de cada una de las ramas, ninguna presión en los nodos G1, G3 y G4 podrá ser superior a los 100 mbar de presión del nodo G2. En la presentación de los

resultados finales que se dispondrá al final de este apartado, se podrá observar lo que se explica en este párrafo.

Siguiendo con el procedimiento de las matrices de incidencia, se procede a caracterizar la parte de calor de la red térmica. De la misma forma que en la red de gas, la red térmica de calor está formada por cuatro nodos y tres ramas, lo que provoca que existan cuatro filas y tres columnas en la matriz de incidencia de dicha red. El orden y numeración de cada una de las filas y columnas sigue la lógica que se ha explicado con anterioridad [7]:

$$A^H = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ +1 & -1 & 0 \\ 0 & +1 & +1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (69)$$

Por ejemplo, el parámetro situado en la segunda fila y columna es un -1 ya que el caudal másico de la rama 2 (de H2 a H3) “sale” del nodo H2. Por el contrario, el parámetro situado en la tercera fila y segunda columna es un +1 ya que el caudal másico de la rama 2 “entra” en el nodo H3. El parámetro de la matriz situado en la última fila y primera columna es un 0 ya que el caudal másico de H4 no interacciona con la primera rama de la red térmica de calor.

En este caso, el nodo de referencia es el H1, de forma que se eliminará la primera fila de la matriz A^H [7]:

$$A_1^H = \begin{bmatrix} +1 & -1 & 0 \\ 0 & +1 & +1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (70)$$

Por la parte de frío de la red térmica, se determina que la matriz de incidencia correspondiente para dicha red es la propuesta en la ecuación 70. La red térmica de frío está formada por tres nodos y dos ramas, lo que provoca que la matriz de incidencia de esta red esté compuesta por tres filas y dos columnas. El orden y numeración de cada una de las filas y columnas sigue el mismo criterio de las otras matrices de incidencia [7]:

$$A^C = \begin{bmatrix} +1 & 0 \\ -1 & -1 \\ 0 & +1 \end{bmatrix} \quad (71)$$

Con el objetivo de ejemplificar la matriz de incidencia que se acaba de determinar para la red térmica de frío, se analizarán todos los valores contenidos en la primera columna (referentes a la rama 1). El primer valor +1, viene dado porque el flujo másico de la rama “entra” en el nodo C1. El segundo valor de la primera columna es un -1 ya que el caudal másico de la rama “sale” del nodo C2. Finalmente, el último valor de dicha columna es un 0 debido a que no hay interacción entre nodo C3 y la rama 1.

Como ya se ha determinado anteriormente, el nodo de referencia para la parte de frío de la red térmica es el nodo C2. De esta forma, se procede a eliminar la fila 2 de la matriz A^C [7]:

$$A_1^C = \begin{bmatrix} +1 & 0 \\ 0 & +1 \end{bmatrix} \quad (72)$$

A partir de todos los datos que se han propuesto en el presente apartado, se procede a desarrollar las ecuaciones que caracterizan las redes multienergéticas (ecuaciones de balance para el estudio en régimen permanente).

8.3. Formulación y desarrollo de las ecuaciones necesarias para el análisis en régimen permanente de la red multienergética

En el apartado 8.3. se formulan y se desarrollan las ecuaciones de balance que caracterizan cada uno de los nodos de la red multienergética (a excepción de los nodos de referencia de cada red energética, que queden excluidos del sistema) y permiten analizar la red multienergética en régimen permanente.

En primer lugar, se exponen las ecuaciones de los nodos que componen la red eléctrica, excepto el nodo E3, que es considerado el nodo de referencia (*slack*). El balance de flujo de potencia eléctrica real (activa) se analizará para los nodos tipo PV y PQ ($F_{1,1}$ y $F_{1,2}$).

El **nodo E1** (PV) queda definido por la siguiente expresión (desarrollada a partir de las fórmulas propuestas en el apartado 6.4) [7]. En la ecuación de balance del nodo E1 interviene una potencia activa inyectada demandada ($p_{d,1}^E$), una potencia activa inyectada provocada por el elemento de acoplamiento ($p_{c,1,1}^E$) que, al estar conectado al nodo de referencia de la red térmica (ver Tabla 17) se calcula según la ecuación 12 (apartado 6.4), y una potencia activa calculada (solo la parte real) que depende del voltaje nodal (v_i), el número de nodos (*nelec*) de la red eléctrica y las admitancias de bus (Y_{in}). En el cálculo de la potencia activa inyectada por el elemento de acoplamiento solo se tiene en cuenta el caudal másico en la rama 1 de la red térmica de calor ($m_{(1)}^H$), puesto que el nodo H1 no se conecta con ninguna otra rama de la red, según lo especificado en la primera fila de la matriz de incidencia propuesta para la red térmica de calor (A^H). Tal y como se explicará posteriormente, $T_{sup,1}^H = T_{s,1}^H$ puesto que la CHP suministra calor a una temperatura constante, mientras que $T_{ret,1}^H$ es incógnita, puesto que se desconocen las pérdidas por convección en la línea de retorno.

$$F_{1,i} = p_{g,i}^E - p_{d,i}^E + C_{Ck,i}^E \cdot |p_{Ck,i}^E| - \text{real} \left[v_i \cdot \left(\sum_{n=1}^{n_{elec}} Y_{i,n} \cdot v_n \right)^* \right] = 0 \quad (73)$$

$$F_{1,1} = p_{g,1}^E - p_{d,1}^E + C_{C1,1}^E \cdot |p_{C1,1}^E| - \text{real} \left[v_1 \cdot \left(\sum_{n=1}^{n_{elec}} Y_{1,n} \cdot v_n \right)^* \right] = 0 \quad (74)$$

$$F_{1,1} = p_{g,1}^E - p_{d,1}^E + C_{C1,1}^E \cdot \left| \frac{\dot{Q}_{C1,1}^H}{\eta_{C1}^E} \right| - \text{real}[v_1 \cdot (Y_{11} \cdot v_1 + Y_{12} \cdot v_2 + Y_{13} \cdot v_3)^*] = 0 \quad (75)$$

$$F_{1,1} = \frac{p_{g,1}^E}{S_b} - \frac{p_{d,1}^E}{S_b} + \frac{C_{C1,1}^E}{S_b} \cdot \left| \frac{\dot{m}_{(1)}^H \cdot C_p \cdot (T_{sup,1}^H - T_{ret,1}^H)}{\eta_{C1}^E \cdot 1000} \right| - (|v_1^2 \cdot Y_{11}| \cdot \cos(\delta_1 - \delta_1 - \theta_{11}) + |v_1 \cdot v_2 \cdot Y_{12}| \cdot \cos(\delta_1 - \delta_2 - \theta_{12})) = 0 \quad (76)$$

$$F_{1,1} = \frac{0}{100} - \frac{0,8}{100} + \frac{+1}{100} \cdot \left| \frac{\dot{m}_{(1)}^H \cdot 4,18 \cdot (100 - T_{ret,1}^H)}{0,875 \cdot 1000} \right| - (|1,02^2 \cdot 22,36| \cdot \cos(-(-63,43^\circ)) + |1,02 \cdot v_2 \cdot 22,36| \cdot \cos(\delta_1 - \delta_2 - 116,56^\circ)) = 0 \quad (77)$$

$$F_{1,1} = -0,008 + \frac{\dot{m}_{(1)}^H \cdot 4,18 \cdot (100 - T_{ret,1}^H)}{87,5 \cdot 1000} - (10,4 + 22,8|v_2| \cdot \cos(\delta_1 - \delta_2 - 116,56^\circ)) = 0 \quad (78)$$

El **nodo E2** (PQ) queda definido en parte por la siguiente expresión (también desarrollada a partir de las fórmulas propuestas en el apartado 6.4) [7]. Cabe tener en cuenta que el presente nodo no está conectado a ningún elemento de acople, por lo que la parte de la ecuación relacionada con dicho elemento de acople ($p_{Ck,i}^E$) será anulada, tal y como se indica en la ecuación 80. Además, en la primera ecuación de balance del nodo E2 interviene una potencia activa inyectada demandada ($p_{d,2}^E$) y una potencia activa calculada que depende de los mismos parámetros especificados en el nodo E1.

$$F_{1,i} = p_{g,i}^E - p_{d,i}^E + C_{Ck,i}^E \cdot |p_{Ck,i}^E| - \text{real} \left[v_i \cdot \left(\sum_{n=1}^{n_{elec}} Y_{i,n} \cdot v_n \right)^* \right] = 0 \quad (79)$$

$$F_{1,2} = p_{g,2}^E - p_{d,2}^E - \text{real} \left[v_2 \cdot \left(\sum_{n=1}^{n_{elec}} Y_{2,n} \cdot v_n \right)^* \right] = 0 \quad (80)$$

$$F_{1,2} = p_{g,2}^E - p_{d,2}^E - \text{real}[v_2 \cdot (Y_{21} \cdot v_1 + Y_{22} \cdot v_2 + Y_{23} \cdot v_3)^*] = 0 \quad (81)$$

$$F_{1,2} = \frac{p_{g,2}^E}{S_b} - \frac{p_{d,2}^E}{S_b} - (|v_2 \cdot v_1 \cdot Y_{21}| \cdot \cos(\delta_2 - \delta_1 - \theta_{21}) + |v_2^2 \cdot Y_{22}| \cdot \cos(\delta_2 - \delta_2 - \theta_{22}) + |v_2 \cdot v_3 \cdot Y_{23}| \cdot \cos(\delta_2 - \delta_3 - \theta_{23})) = 0 \quad (82)$$

$$F_{1,2} = \frac{0}{100} - \frac{0,8}{100} - (|v_2 \cdot 1,02 \cdot 22,36| \cdot \cos(\delta_2 - \delta_1 - 116,56^\circ) + |v_2^2 \cdot 67,08| \cdot \cos(-(-63,43^\circ)) + |v_2 \cdot 1 \cdot 44,72| \cdot \cos(\delta_2 - 116,56^\circ)) = 0 \quad (83)$$

$$F_{1,2} = -0,008 - (|v_2 \cdot 22,8| \cdot \cos(\delta_2 - \delta_1 - 116,56^\circ) + |v_2^2| \cdot 30,00 + |v_2 \cdot 44,72| \cdot \cos(\delta_2 - 116,56^\circ)) = 0 \quad (84)$$

Según la Tabla 15, la red multienergética objeto de estudio en este capítulo, solo dispone de un nodo tipo PQ. Esto significa que, para este nodo en concreto, habrá una parte de potencia real (activa) y otro de potencia imaginaria (reactiva). De este modo, en las siguientes ecuaciones se propone el balance del flujo de potencia eléctrica imaginaria (reactiva), $F_{2,2}$.

El **nodo E2** (PQ) queda completamente definido considerando adicionalmente a la expresión anterior la siguiente expresión (desarrollada a partir de las fórmulas propuestas en el apartado 6.4) [7]. Como ya se ha mencionado anteriormente, la parte de la ecuación referente al elemento de acople es inexistente puesto que este nodo no está conectado a ningún elemento de acople. De esta forma, en la segunda ecuación de balance del nodo E2 interviene una potencia reactiva inyectada demandada ($q_{d,2}^E$) y una potencia reactiva calculada (solo parte imaginaria) que depende de los parámetros ya especificados con anterioridad (v_i , n_{elec} y Y_{in}).

$$F_{2,i} = q_{g,i}^E - q_{d,i}^E + C_{Ck,i}^E \cdot |q_{Ck,i}^E| - \text{imag} \left[v_i \cdot \left(\sum_{n=1}^{n_{elec}} Y_{i,n} \cdot v_n \right)^* \right] = 0 \quad (85)$$

$$F_{2,2} = q_{g,2}^E - q_{d,2}^E - \text{imag} \left[v_2 \cdot \left(\sum_{n=1}^{n_{elec}} Y_{2,n} \cdot v_n \right)^* \right] = 0 \quad (86)$$

$$F_{2,2} = q_{g,2}^E - q_{d,2}^E - \text{imag}[v_2 \cdot (Y_{21} \cdot v_1 + Y_{22} \cdot v_2 + Y_{23} \cdot v_3)^*] = 0 \quad (87)$$

$$F_{2,2} = \frac{q_{g,2}^E}{S_b} - \frac{q_{d,2}^E}{S_b} - (|v_2 \cdot v_1 \cdot Y_{21}| \cdot \sin(\delta_2 - \delta_1 - \theta_{21}) + |v_2^2 \cdot Y_{22}| \cdot \sin(\delta_2 - \delta_2 - \theta_{22}) + |v_2 \cdot v_3 \cdot Y_{23}| \cdot \sin(\delta_2 - \delta_3 - \theta_{23})) = 0 \quad (88)$$

$$F_{2,2} = \frac{0}{100} - \frac{0,1}{100} - (|v_2 \cdot 1,02 \cdot 22,36| \cdot \sin(\delta_2 - \delta_1 - 116,56^\circ) + |v_2^2 \cdot 67,08| \cdot \sin(-(-63,43^\circ)) + |v_2 \cdot 1 \cdot 44,72| \cdot \sin(\delta_2 - 116,56^\circ)) = 0 \quad (89)$$

$$F_{2,2} = -0,001 - (|v_2 \cdot 22,81| \cdot \sin(\delta_2 - \delta_1 - 116,56^\circ) + |v_2^2| \cdot 60,00 + |v_2 \cdot 44,72| \cdot \sin(\delta_2 - 116,56^\circ)) = 0 \quad (90)$$

A continuación, se procede al análisis de la red de gas natural. En las siguientes ecuaciones, se propone el balance del flujo de volumen de gas en todos aquellos nodos tipo "Carga" ($F_{3,1}$, $F_{3,3}$ y $F_{3,4}$), según lo indicado en la Tabla 16.

El **nodo G1** queda definido por la siguiente expresión (desarrollado a partir de las fórmulas propuestas en el apartado 6.5) [7]. Cabe recordar que, a este nodo, se conecta el elemento de acople C_1 (en concreto, la cogeneración, CHP). Por lo tanto, la parte de la ecuación relacionada con este elemento ($\dot{E}_{Ck,i}^G$) se deberá tener en cuenta y computar. El método de cálculo utilizado para la parte de la ecuación relacionada con el elemento de acoplamiento será el mismo que se ha utilizado en el nodo E1, simplemente teniendo en cuenta que el rendimiento es el de gas a calor y que en el denominador se incluye el GCV del gas natural. Además, en la ecuación de balance del nodo G1 interviene un caudal volumétrico inyectado demandado ($\dot{V}_{d,1}^G$) y las demandas nodales de gas natural (ecuación 21) cuya dependencia radica en la matriz de incidencia de esta red ($A_{i,k}^G$), la dirección del flujo (S_{ij}) y las presiones de los nodos que se conectan a la rama conectada a G1 (Pr_2 y Pr_1). La presión en el nodo G1 será incógnita ya que la caída de presión de G2 (presión constante) a G1 es desconocida.

$$F_{3,i} = \dot{V}_{s,i}^G - \dot{V}_{d,i}^G + C_{Ck,i}^G \cdot \left| \frac{(\dot{E}_{Ck,i}^G)}{GCV} \cdot 3600 \right| + \sum_{k=1}^{ntubgas} A_{i,k}^G \cdot S_{ij} \cdot \left(S_{ij} \cdot \frac{(Pr_i - Pr_j)}{K_{(k)}^G} \right)^{\frac{1}{m}} = 0 \quad (91)$$

$$F_{3,1} = \dot{V}_{s,1}^G - \dot{V}_{d,1}^G + C_{C1,1}^G \cdot \left| \frac{(\dot{Q}_{C1,1}^H)}{GCV \cdot \eta_{C1}^H} \cdot 3600 \right| + A_{1,1}^G \cdot S_{21} \cdot \left(S_{21} \cdot \frac{(Pr_2 - Pr_1)}{K_{(1)}^G} \right)^{\frac{1}{m}} = 0 \quad (92)$$

$$F_{3,1} = \dot{V}_{s,1}^G - \dot{V}_{d,1}^G + C_{C1,1}^G \cdot \left| \frac{\dot{m}_{(1)}^H \cdot C_p \cdot (T_{sup,1}^H - T_{ret,1}^H)}{GCV \cdot \eta_{C1}^G} \cdot 3600 \right| + A_{1,1}^G \cdot S_{21} \quad (93)$$

$$\cdot \left(S_{21} \cdot \frac{(Pr_2 - Pr_1)}{K_{(1)}^G} \right)^{\frac{1}{m}} = 0$$

$$F_{3,1} = 0 - 200 + (-1) \cdot \left| \frac{\dot{m}_{(1)}^H \cdot 4,18 \cdot (100 - T_{ret,1}^H)}{(41,04 \cdot 10^3) \cdot 0,4} \cdot 3600 \right| + (+1) \cdot S_{21} \quad (94)$$

$$\cdot \left(S_{21} \cdot \frac{(100 - Pr_1)}{(1,047 \cdot 10^{-4})} \right)^{\frac{1}{2}} = 0$$

$$F_{3,1} = -200 - 0,9166 \cdot \dot{m}_{(1)}^H \cdot (100 - T_{ret,1}^H) + S_{21} \cdot \left(S_{21} \cdot \frac{(100 - Pr_1)}{(1,047 \cdot 10^{-4})} \right)^{\frac{1}{2}} = 0 \quad (95)$$

El **nodo G3** también es de tipo “Carga”, por lo que deben analizarse sus ecuaciones [7]. Sin embargo, ningún elemento de acople se conecta a este nodo. De esta forma, la ecuación de balance de G3 queda definida por un caudal volumétrico inyectado demandado especificado ($\dot{V}_{d,3}^G$), la matriz de incidencia de la red de gas natural (igual que en G1), la dirección del flujo tanto en la rama 2 como en la rama 3 y las presiones de los nodos que se encuentran situados en los extremos de las ramas especificadas (Pr_2 , Pr_3 y Pr_4). Las incógnitas en esta ecuación de balance serán Pr_3 y Pr_4 que deberán ser halladas calculando la caída de presión de G2 a G3 y de G3 a G4.

$$F_{3,i} = \dot{V}_{s,i}^G - \dot{V}_{d,i}^G + C_{Ck,i}^G \cdot \left| \frac{(\dot{E}_{Ck,i}^G)}{GCV} \cdot 3600 \right| + \sum_{k=1}^{ntubgas} A_{i,k}^G \cdot S_{ij} \cdot \left(S_{ij} \cdot \frac{(Pr_i - Pr_j)}{K_{(k)}^G} \right)^{\frac{1}{m}} = 0 \quad (96)$$

$$F_{3,3} = \dot{V}_{s,3}^G - \dot{V}_{d,3}^G + A_{3,2}^G \cdot S_{23} \cdot \left(S_{23} \cdot \frac{(Pr_2 - Pr_3)}{K_{(2)}^G} \right)^{\frac{1}{m}} + A_{3,3}^G \cdot S_{34} \cdot \left(S_{34} \cdot \frac{(Pr_3 - Pr_4)}{K_{(3)}^G} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (97)$$

$$= 0$$

$$F_{3,3} = 0 - 100 + (+1) \cdot S_{23} \cdot \left(S_{23} \cdot \frac{(100 - Pr_3)}{7,704 \cdot 10^{-5}} \right)^{\frac{1}{2}} + (-1) \cdot S_{34} \cdot \left(S_{34} \cdot \frac{(Pr_3 - Pr_4)}{6,471 \cdot 10^{-5}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (98)$$

$$= 0$$

$$F_{3,3} = -100 + S_{23} \cdot \left(S_{23} \cdot \frac{(100 - Pr_3)}{7,704 \cdot 10^{-5}} \right)^{\frac{1}{2}} - S_{34} \cdot \left(S_{34} \cdot \frac{(Pr_3 - Pr_4)}{6,471 \cdot 10^{-5}} \right)^{\frac{1}{2}} = 0 \quad (99)$$

La ecuación de balance del **nodo G4** queda definida completamente por la ecuación 104 [7]. En esta, se tiene en cuenta el caudal volumétrico inyectado demandado especificado ($\dot{V}_{d,4}^G$) y el caudal volumétrico de gas natural demandado/suministrado por el elemento de acoplamiento C₂ (GB) debido a un intercambio de energía ($\dot{E}_{Ck,i}^G$). En este caso, como el elemento de acoplamiento se encuentra directamente conectado a H4 que no se trata de un nodo de referencia, se puede hacer el cálculo directamente con la potencia calorífica suministrada al nodo H4 ($\dot{Q}_{s,4}^H$) por el elemento "GB". Además, de la misma forma que se ha especificado en G1 y G3, se considerará la matriz de incidencia que caracteriza la red de gas natural, la dirección del flujo de la rama 3 (puesto que es la única rama que se conecta al nodo G4), y las presiones de los nodos conectados a los extremos de dicha rama (G3 y G4), Pr_3 y Pr_4 .

$$F_{3,i} = \dot{V}_{s,i}^G - \dot{V}_{d,i}^G + C_{Ck,i}^G \cdot \left| \frac{(\dot{E}_{Ck,i}^G)}{GCV} \cdot 3600 \right| + \sum_{k=1}^{ntubgas} A_{i,k}^G \cdot S_{ij} \cdot \left(S_{ij} \cdot \frac{(Pr_i - Pr_j)}{K_{(k)}^G} \right)^{\frac{1}{m}} = 0 \quad (100)$$

$$F_{3,4} = \dot{V}_{s,4}^G - \dot{V}_{d,4}^G + C_{C2,4}^G \cdot \left| \frac{(\dot{Q}_{s,4}^H)}{GCV \cdot \eta_{C2}^H} \cdot 3600 \right| + A_{4,3}^G \cdot S_{34} \cdot \left(S_{34} \cdot \frac{(Pr_3 - Pr_4)}{K_{(3)}^G} \right)^{\frac{1}{m}} = 0 \quad (101)$$

$$F_{3,4} = \dot{V}_{s,4}^G - \dot{V}_{d,4}^G + C_{C2,4}^G \cdot \left| \frac{(500)}{GCV \cdot \eta_{C2}^H} \cdot 3600 \right| + A_{4,3}^G \cdot S_{34} \cdot \left(S_{34} \cdot \frac{(Pr_3 - Pr_4)}{K_{(3)}^G} \right)^{\frac{1}{m}} = 0 \quad (102)$$

$$F_{3,4} = 0 - 180 + (-1) \cdot \left| \frac{500}{(41,04 \cdot 10^3) \cdot 0,9} \cdot 3600 \right| + (+1) \cdot S_{34} \cdot \left(S_{34} \cdot \frac{(Pr_3 - Pr_4)}{6,471 \cdot 10^{-5}} \right)^{\frac{1}{2}} = 0 \quad (103)$$

$$F_{3,4} = -228,73 + S_{34} \cdot \left(S_{34} \cdot \frac{(Pr_3 - Pr_4)}{6,471 \cdot 10^{-5}} \right)^{\frac{1}{2}} = 0 \quad (104)$$

Seguidamente, se procede a determinar y calcular el balance de los flujos de los caudales máxicos en todos los nodos tipo "Suministro" y "Demanda" de la red térmica de calor ($F_{4,2}$, $F_{4,3}$ y $F_{4,4}$), según lo dispuesto en la Tabla 17.

En el **nodo H2** no existe elemento de acople, por lo que la parte de la ecuación de balance que hace referencia a este elemento será de valor 0 [7]. Por otra parte, como el nodo H2 es de tipo “Demanda”, se considerará el caudal másico demandado inyectado ($\dot{M}_{d,2}^H$) a la carga local que se encuentra conectada a este mismo nodo, pero no el caudal másico suministrado inyectado ($\dot{M}_{s,2}^H$) ya que, debido a la tipología del nodo, no existe un suministro de potencia calorífica ($\dot{Q}_{s,2}^H = 0$) a dicho nodo por parte de ninguna fuente o elemento generador. En cuanto al cálculo de $\dot{M}_{d,2}^H$, se conocen la potencia térmica demandada a H2 ($\dot{Q}_{d,2}^H$) y la temperatura del agua a la salida de la carga local, $T_{out,2}^H$, que se especifican en la Tabla 17, mientras que la temperatura de la línea de suministro en dicho nodo es incógnita (más adelante se procederá a calcular las pérdidas por convección que se producen en el transporte de H1 a H2, además de tener en cuenta que se trata de un parámetro no constante). Finalmente, también se deberán tener en cuenta las ramas que se conectan a dicho nodo, la dirección del flujo de cada una de estas ramas (información proporcionada por la matriz de incidencia de la red térmica de calor) y el valor de los caudales que circulan por cada una de estas ramas ($\dot{m}_{(1)}^H$ y $\dot{m}_{(2)}^H$). Así pues, la ecuación de balance del nodo H2 queda definida por la ecuación 112.

$$F_{4,i} = \dot{M}_{s,i}^T - \dot{M}_{d,i}^T + C_{Ck,i}^T \cdot |\dot{M}_{Ck,i}^T| + \sum_{k=1}^{ntubterm} A_{i,k}^T \cdot \dot{m}_{(k)}^T = 0 \quad (105)$$

$$\dot{M}_{s,i}^T = \frac{\dot{Q}_{s,i}^T}{C_p \cdot (T_{s,i}^T - T_{ret,i}^T)} \quad (106)$$

$$\dot{M}_{d,i}^T = \frac{\dot{Q}_{d,i}^T}{C_p \cdot (T_{sup,i}^T - T_{out,i}^T)} \quad (107)$$

$$F_{4,2} = \dot{M}_{s,2}^H - \dot{M}_{d,2}^H + (A_{2,1}^H \cdot \dot{m}_{(1)}^H + A_{2,2}^H \cdot \dot{m}_{(2)}^H) = 0 \quad (108)$$

$$\dot{M}_{s,2}^H = \frac{\dot{Q}_{s,2}^H}{C_p \cdot (T_{s,2}^H - T_{ret,2}^H)} = \frac{0}{C_p \cdot (T_{s,2}^H - T_{ret,2}^H)} = 0 \quad (109)$$

$$\dot{M}_{d,2}^H = \frac{\dot{Q}_{d,2}^H}{C_p \cdot (T_{sup,2}^H - T_{out,2}^H)} = \frac{1200}{4,18 \cdot (T_{sup,2}^H - 50)} \quad (110)$$

$$F_{4,2} = 0 - \frac{1200}{4,18 \cdot (T_{sup,2}^H - 50)} + ((+1) \cdot \dot{m}_{(1)}^H + (-1) \cdot \dot{m}_{(2)}^H) = 0 \quad (111)$$

$$F_{4,2} = -\frac{1200}{4,18 \cdot (T_{sup,2}^H - 50)} + \dot{m}_{(1)}^H - \dot{m}_{(2)}^H = 0 \quad (112)$$

La ecuación de balance del **nodo H3** queda completamente definida por la ecuación 123 [7]. En este caso, la potencia térmica suministrada ($\dot{Q}_{s,3}^H$) y demandada por el nodo H3 ($\dot{Q}_{d,3}^H$) son de valor 0, puesto que no existe ninguna fuente o carga local, respectivamente, conectada al nodo H3. Sin embargo, el elemento de acoplamiento C_3 (AC) sí que se encuentra conectado al nodo H3. De esta forma, tanto el caudal másico suministrado al presente nodo ($\dot{M}_{s,3}^H$) como el caudal másico demandado ($\dot{M}_{d,3}^H$) no se considerarán en la ecuación de balance de dicho nodo por ser de valor nulo, pero sí se deberá computar la parte que hace referencia al elemento de acoplamiento. En primer lugar, se determina que en el nodo H3 existe una demanda de potencia calorífica provocada por el elemento de acoplamiento C_3 , que se puede calcular aplicando la ecuación 1 presentada con anterioridad. A su vez, hay que tener en cuenta que C_3 se conecta al nodo de referencia de la red térmica de frío, por lo que se deberá aplicar la ecuación 50 y proceder de la misma forma que se ha explicado en otros nodos en los que aparecía esta casuística. De esta forma, la ecuación de balance del nodo H3 queda en función de las incógnitas determinadas en la ecuación 123.

$$F_{4,i} = \dot{M}_{s,i}^T - \dot{M}_{d,i}^T + C_{Ck,i}^T \cdot |\dot{M}_{Ck,i}^T| + \sum_{k=1}^{ntubterm} A_{i,k}^T \cdot \dot{m}_{(k)}^T = 0 \quad (113)$$

$$\dot{M}_{s,i}^T = \frac{\dot{Q}_{s,i}^T}{C_p \cdot (T_{s,i}^T - T_{ret,i}^T)} \quad (114)$$

$$\dot{M}_{d,i}^T = \frac{\dot{Q}_{d,i}^T}{C_p \cdot (T_{sup,i}^T - T_{out,i}^T)} \quad (115)$$

$$F_{4,3} = \dot{M}_{s,3}^T - \dot{M}_{d,3}^T + C_{C3,3}^H \cdot |\dot{M}_{Ck,3}^H| + (A_{3,2}^H \cdot \dot{m}_{(2)}^H + A_{3,3}^H \cdot \dot{m}_{(3)}^H) = 0 \quad (116)$$

$$\dot{M}_{s,3}^H = \frac{\dot{Q}_{s,3}^H}{C_p \cdot (T_{s,3}^H - T_{ret,3}^H)} = \frac{0}{C_p \cdot (T_{s,3}^H - T_{ret,3}^H)} = 0 \quad (117)$$

$$\dot{M}_{d,3}^H = \frac{\dot{Q}_{d,3}^H}{C_p \cdot (T_{sup,3}^H - T_{out,3}^H)} = \frac{0}{4,18 \cdot (T_{sup,3}^H - 50)} = 0 \quad (118)$$

$$|\dot{M}_{C3,3}^H| = \left| \frac{\dot{Q}_{d,3}^H}{C_p \cdot (T_{sup,3}^H - T_{out,3}^H)} \right| = \left| \frac{\dot{Q}_{C3,2}^C / \eta_{C3}^H}{C_p \cdot (T_{sup,3}^H - T_{out,3}^H)} \right| \quad (119)$$

$$|\dot{M}_{C3,3}^H| = \frac{[\sum_{k=1}^{n_{Cpipe}} A_{i,k}^C \cdot \dot{m}_{(k)}^C] \cdot C_p \cdot (T_{s,2}^C - T_{ret,2}^C) / \eta_{C3}^H}{C_p \cdot (T_{sup,3}^H - T_{out,3}^H)} \quad (120)$$

$$|\dot{M}_{C3,3}^H| = \frac{[A_{2,1}^C \cdot \dot{m}_{(1)}^C + A_{2,2}^C \cdot \dot{m}_{(2)}^C] \cdot (T_{s,2}^C - T_{ret,2}^C)}{\eta_{C3}^H \cdot (T_{sup,3}^H - T_{out,3}^H)} \quad (121)$$

$$|\dot{M}_{C3,3}^H| = \frac{[(-1) \cdot \dot{m}_{(1)}^C + (-1) \cdot \dot{m}_{(2)}^C] \cdot (5 - T_{ret,2}^C)}{0,65 \cdot (T_{sup,3}^H - 50)} \quad (122)$$

$$F_{4,3} = (-1) \cdot \left| \frac{[\dot{m}_{(1)}^C + \dot{m}_{(2)}^C] \cdot (5 - T_{ret,2}^C)}{0,65 \cdot (T_{sup,3}^H - 50)} \right| + \dot{m}_{(2)}^H + \dot{m}_{(3)}^H = 0 \quad (123)$$

Cuando se analiza el **nodo H4**, el elemento de acople C₂ (GB) no debe considerarse en su ecuación de balance, puesto que ya se ha tenido en cuenta en la ecuación de balance del nodo G4 (ecuación 104) [7]. No obstante, sí que debe considerarse el caudal másico suministrado ($\dot{M}_{s,4}^H$) y demandado ($\dot{M}_{d,4}^H$). El caudal másico suministrado por GB al nodo H4, se puede calcular como el cociente de la potencia calorífica suministrada a dicho nodo ($\dot{Q}_{s,4}^H$) entre el producto del poder calorífico del agua y la diferencia de la temperatura de suministro al nodo H4 ($T_{s,4}^H$ que en este caso es igual que $T_{sup,4}^H$) y la temperatura del fluido en la línea de retorno de este nodo ($T_{ret,4}^H$). Finalmente, también se deberán tener en cuenta las ramas (tuberías) conectadas a H4 (únicamente la rama 3 de la red térmica de calor) y el sentido del flujo ($\dot{m}_{(3)}^H$) que, en este caso, va en dirección saliente hacia H3.

$$F_{4,i} = \dot{M}_{s,i}^T - \dot{M}_{d,i}^T + C_{Ck,i}^T \cdot |\dot{M}_{Ck,i}^T| + \sum_{k=1}^{ntubterm} A_{i,k}^T \cdot \dot{m}_{(k)}^T = 0 \quad (124)$$

$$\dot{M}_{s,i}^T = \frac{\dot{Q}_{s,i}^T}{C_p \cdot (T_{s,i}^T - T_{ret,i}^T)} \quad (125)$$

$$\dot{M}_{d,i}^T = \frac{\dot{Q}_{d,i}^T}{C_p \cdot (T_{sup,i}^T - T_{out,i}^T)} \quad (126)$$

$$F_{4,4} = \dot{M}_{s,4}^H - \dot{M}_{d,4}^H + (A_{4,3}^H \cdot \dot{m}_{(3)}^H) = 0 \quad (127)$$

$$\dot{M}_{s,4}^H = \frac{\dot{Q}_{s,4}^H}{C_p \cdot (T_{s,4}^H - T_{ret,4}^H)} = \frac{500}{4,18 \cdot (100 - T_{ret,4}^H)} \quad (128)$$

$$\dot{M}_{d,4}^H = \frac{\dot{Q}_{d,4}^H}{C_p \cdot (T_{sup,4}^H - T_{out,4}^H)} = \frac{0}{4,18 \cdot (100 - T_{out,4}^H)} = 0 \quad (129)$$

$$F_{4,4} = \frac{500}{4,18 \cdot (100 - T_{ret,4}^H)} - \dot{m}_{(3)}^H = 0 \quad (130)$$

Finalmente, se determinan las ecuaciones de balance de los flujos másicos de los nodos tipo “Demanda” de la red térmica de frío. Los nodos objeto de estudio en este caso, serán los nodos C1 y C3 ($F_{5,1}$ y $F_{5,3}$).

La ecuación de balance que define al **nodo C1** se expone a continuación (ecuación 139) [7]. Tal y como se puede deducir de la Figura 15, no intervendrá la parte relacionada con el elemento de acople, puesto que no existe ninguno de estos elementos conectado al nodo C1, pero sí deberán considerarse el resto de los elementos de la ecuación 131. El caudal másico suministrado a dicho nodo es 0 pues que el nodo C1 no está directamente conectado a ningún elemento de acoplamiento o elemento suministrador que realice esta inyección. Sin embargo, el caudal másico demandado en el presente nodo (se dispone de una carga conectada a este nodo) se calcula como el cociente de la potencia calorífica demandada a dicho nodo ($\dot{Q}_{d,1}^C$) entre el producto del poder calorífico del agua y la diferencia de la temperatura en la línea de suministro de C1 ($T_{sup,1}^C$, su cálculo se detallará con posterioridad) y la temperatura de salida del agua de la carga conectada a este nodo ($T_{out,1}^C$). Finalmente, tal y como se ha comentado con anterioridad, la ecuación de balance también dependerá de las ramas (tuberías) conectadas a C1 (únicamente la rama 1 de la red térmica de frío) y el sentido del flujo ($\dot{m}_{(1)}^C$) que, en este caso, va en dirección entrante hacia el propio nodo C1.

$$F_{5,i} = \dot{M}_{s,i}^T - \dot{M}_{d,i}^T + C_{ck,i}^T \cdot |\dot{M}_{ck,i}^T| + \sum_{k=1}^{ntubterm} A_{i,k}^T \cdot \dot{m}_{(k)}^T = 0 \quad (131)$$

$$\dot{M}_{s,i}^T = \frac{\dot{Q}_{s,i}^T}{C_p \cdot (T_{s,i}^T - T_{ret,i}^T)} \quad (132)$$

$$\dot{M}_{d,i}^T = \frac{\dot{Q}_{d,i}^T}{C_p \cdot (T_{sup,i}^T - T_{out,i}^T)} \quad (133)$$

$$F_{5,1} = \dot{M}_{s,1}^C - \dot{M}_{d,1}^C + (A_{1,1}^C \cdot \dot{m}_{(1)}^C) = 0 \quad (134)$$

$$\dot{M}_{s,1}^C = \frac{\dot{Q}_{s,1}^C}{C_p \cdot (T_{s,1}^C - T_{ret,1}^C)} = \frac{0}{C_p \cdot (T_{s,1}^C - T_{ret,1}^C)} = 0 \quad (135)$$

$$\dot{M}_{d,1}^C = \frac{\dot{Q}_{d,1}^C}{C_p \cdot (T_{sup,1}^C - T_{out,1}^C)} = \frac{400}{4,18 \cdot (T_{sup,1}^C - 12)} \quad (136)$$

$$F_{5,1} = -\dot{M}_{d,1}^C + (A_{1,1}^C \cdot \dot{m}_{(1)}^C) = 0 \quad (137)$$

$$F_{5,1} = -\frac{400}{4,18 \cdot (T_{sup,1}^C - 12)} + ((+1) \cdot \dot{m}_{(1)}^C) = 0 \quad (138)$$

$$F_{5,1} = -\frac{400}{4,18 \cdot |T_{sup,1}^C - 12|} + \dot{m}_{(1)}^C = 0 \quad (139)$$

Finalmente, la última de las ecuaciones de balance propuesta es la correspondiente al nodo C3 (ecuación 148) [7]. Tal y como se puede determinar de la Figura X, el caso **nodo C3** es idéntico, en cuanto a formulación de refiere, al caso del nodo C1.

$$F_{5,i} = \dot{M}_{s,i}^T - \dot{M}_{d,i}^T + C_{Ck,i}^T \cdot |\dot{M}_{Ck,i}^T| + \sum_{k=1}^{ntubterm} A_{i,k}^T \cdot \dot{m}_{(k)}^T = 0 \quad (140)$$

$$\dot{M}_{s,i}^T = \frac{\dot{Q}_{s,i}^T}{C_p \cdot (T_{s,i}^T - T_{ret,i}^T)} \quad (141)$$

$$\dot{M}_{d,i}^T = \frac{\dot{Q}_{d,i}^T}{C_p \cdot (T_{sup,i}^T - T_{out,i}^T)} \quad (142)$$

$$F_{5,3} = \dot{M}_{s,3}^C - \dot{M}_{d,3}^C + (A_{3,2}^C \cdot \dot{m}_{(2)}^C) = 0 \quad (143)$$

$$\dot{M}_{s,3}^C = \frac{\dot{Q}_{s,3}^C}{C_p \cdot (T_{s,3}^C - T_{ret,3}^C)} = \frac{0}{C_p \cdot (T_{s,3}^C - T_{ret,3}^C)} = 0 \quad (144)$$

$$\dot{M}_{d,3}^C = \frac{\dot{Q}_{d,3}^C}{C_p \cdot (T_{sup,3}^C - T_{out,3}^C)} = \frac{400}{4,18 \cdot (T_{sup,3}^C - 12)} \quad (145)$$

$$F_{5,3} = -\dot{M}_{d,3}^C + (A_{3,2}^C \cdot \dot{m}_{(2)}^C) = 0 \quad (146)$$

$$F_{5,3} = -\frac{400}{4,18 \cdot (T_{sup,3}^C - 12)} + ((+1) \cdot \dot{m}_{(2)}^C) = 0 \quad (147)$$

$$F_{5,3} = -\frac{400}{4,18 \cdot |T_{sup,3}^C - 12|} + \dot{m}_{(2)}^C = 0 \quad (148)$$

Según se puede deducir del conjunto de ecuaciones mostrado en el presente apartado 8.3, una vez han sido sustituidos en ellas los valores de todos los parámetros constantes, han quedado sin sustituir las incógnitas del sistema de ecuaciones, así como ciertos parámetros que dependen de los valores de dichas incógnitas (temperaturas que dependen de caudales másicos y S_{ij} que dependen de presiones). Estos parámetros reciben el nombre de parámetros no constantes, ya que cuando el método numérico iterativo va actualizando los valores de las incógnitas en cada iteración, dichos parámetros deben ser actualizados en función de esos valores en cada iteración. Para tratar de clarificar y sintetizar esta información, se hace uso de las Tablas 23 y 24, donde se indican cuáles son las incógnitas del sistema de ecuaciones y cuáles son los parámetros no constantes asociados al mismo, junto con sus correspondientes unidades:

Tabla 23. Incógnitas que aparecen en las ecuaciones de balance de la red multienergética analizada junto con sus unidades. Fuente: Muditha Abeysekera [7].

δ_1	δ_2	v_2	Pr_1	Pr_3	Pr_4	$\dot{m}_{(1)}^H$	$\dot{m}_{(2)}^H$	$\dot{m}_{(3)}^H$	$\dot{m}_{(1)}^C$	$\dot{m}_{(2)}^C$
°	°	p.u.	mbar	mbar	mbar	kg/s	kg/s	kg/s	kg/s	kg/s

Tabla 24. Parámetros no constantes que aparecen en el análisis de la red térmica y de la red de gas natural junto con sus unidades. Fuente: Muditha Abeysekera [7].

$T_{sup,2}^H$	$T_{sup,3}^H$	$T_{ret,1}^H$	$T_{ret,2}^H$	$T_{ret,3}^H$	$T_{ret,4}^H$	$T_{sup,1}^C$	$T_{sup,3}^C$	$T_{ret,2}^C$	S_{21}	S_{23}	S_{34}
°C	-	-	-								

Una parte de los parámetros no constantes son determinadas temperaturas que aparecen en las ecuaciones (las S_{ij} serán mencionadas más adelante), temperaturas que se pueden calcular a través de las fórmulas dispuestas en el capítulo 6 y a partir de los datos que se proporcionan al inicio del capítulo 8. De esta forma, estas temperaturas no siempre tendrán un mismo valor, sino que irán actualizando su valor iteración tras iteración a medida que también varían los caudales másicos que les influyen. Cabe destacar que la aparición de parámetros no constantes de temperatura viene provocada por la red térmica, tanto de calor

como de frío.

8.4. Resolución numérica y resultados obtenidos

En el presente apartado, se procede a describir el procedimiento numérico que se ha llevado a cabo para la resolución de las ecuaciones que se han desarrollado y calculado en el apartado 8.3. Continuando con lo indicado en los últimos párrafos del anterior apartado, el procedimiento numérico que se llevará a cabo depende los siguientes puntos:

- Estimaciones iniciales de las incógnitas, $\mathbf{X(0)}$.
- Valores de los parámetros constantes, \mathbf{PC} .
- Valores conocidos de partida de los parámetros no constantes, $\mathbf{PNC(0)}$.

Como la resolución del sistema de ecuaciones necesita de la aplicación de un método numérico iterativo por tratarse de un sistema de ecuaciones no lineales, es necesario realizar una serie de estimaciones iniciales para cada una de las incógnitas ($\mathbf{X(0)}$).

Las estimaciones iniciales para las incógnitas de la red eléctrica son las siguientes:

Tabla 25. Estimaciones iniciales para las incógnitas de la red eléctrica. Fuente: Muditha Abeysekera [7].

Incógnita	Valor	Unidad
δ_1	0	°
δ_2	0	°
v_2	1	p.u.

Por otro lado, el cálculo de las estimaciones iniciales para las incógnitas de la red de gas natural, supone tener que llevar a cabo una serie de cálculos relacionados con la demanda (consumo) de gas de la cogeneración, CHP, y de la caldera de gas, GB (elementos de acople vinculados a esta red).

El consumo de gas de la cogeneración se puede aproximar considerando la demanda neta total de potencia térmica requerida por la red térmica de calor. La demanda neta total de potencia térmica (en kW_{th}^H) puede ser calculada a través de las potencias térmicas suministradas (restan) y demandadas (suman) [7]:

$$\dot{V}_{C1,1}^H = \frac{\dot{Q}_{d,net}^H}{\eta_{C1}^{G/H} \cdot GCV} \cdot 3600 = \frac{\dot{Q}_{d,1}^H + \dot{Q}_{d,2}^H - \dot{Q}_{s,4}^H}{\eta_{C1}^{G/H} \cdot GCV} \cdot 3600 \quad (149)$$

$$\dot{V}_{C1,1}^H = \frac{400 + 1200 - 500}{0,4 \cdot 41,04 \cdot 1000} \cdot 3600 = 241,23 \left[\frac{m^3}{h} \right] \quad (150)$$

A continuación, se procede a calcular el consumo de la caldera de gas instalada entre los nodos G4 y H4 [7]. En este caso, el cálculo es inmediato puesto que se conoce la potencia térmica en forma de calor que la caldera de gas suministra a la red térmica de calor (conectada directamente al nodo H4) [7]:

$$\dot{V}_{C2,4}^G = \frac{\dot{Q}_{C2,4}^H}{\eta_{C2}^{G/H} \cdot GCV} \cdot 3600 \quad (151)$$

$$\dot{V}_{C2,4}^G = \frac{500}{0,9 \cdot 41,04 \cdot 1000} \cdot 3600 = 48,73 \left[\frac{m^3}{h} \right] \quad (152)$$

Por tanto, una vez determinada la demanda de gas de la cogeneración y la caldera, se procede a recalcular las demandas nodales de gas. A la demanda inicial de gas de cada nodo ($\dot{V}_{d,i}^G$), se lo sumará la demandada provocada por el elemento de acople en cuestión ($\dot{V}_{d,ck}^G$). En este caso, y como ya se ha visto a lo largo del caso estudiado, solo los nodos G1 y G4 disponen de elemento de acople. De esta forma, las presiones nodales revisadas ($\dot{V}_{d,i,rev}^G$) se calculan mediante las siguientes expresiones [7]:

$$\dot{V}_{d,1,rev}^G = \dot{V}_{d,1}^G + \dot{V}_{d,c1}^G = 200 + 241,23 = 441,23 \left[\frac{m^3}{h} \right] \quad (153)$$

$$\dot{V}_{d,2,rev}^G = \dot{V}_{d,2}^G = 50 \left[\frac{m^3}{h} \right] \quad (154)$$

$$\dot{V}_{d,3,rev}^G = \dot{V}_{d,3}^G = 100 \left[\frac{m^3}{h} \right] \quad (155)$$

$$\dot{V}_{d,4,rev}^G = \dot{V}_{d,4}^G + \dot{V}_{d,c2}^G = 180 + 48,73 = 228,73 \left[\frac{m^3}{h} \right] \quad (156)$$

Tras calcular las demandas nodales de gas revisadas, se procede al cálculo de los caudales volumétricos de cada rama. Para proceder con este cálculo se hará uso de las siguientes ecuaciones y de la matriz de incidencia reducida [7].

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{(1)}^G \\ \dot{V}_{(2)}^G \\ \dot{V}_{(3)}^G \end{bmatrix} = A_1^{G^{-1}} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_{d,1,rev}^G \\ \dot{V}_{d,3,rev}^G \\ \dot{V}_{d,4,rev}^G \end{bmatrix} \quad (157)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{(1)}^G \\ \dot{V}_{(2)}^G \\ \dot{V}_{(3)}^G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +1 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & -1 \\ 0 & 0 & +1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 441,23 \\ 100 \\ 228,73 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 441,23 \\ 328,73 \\ 228,73 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m^3 \\ h \end{bmatrix} \quad (158)$$

También, se procede a determinar la caída de presión (a partir de la ecuación 14) en cada una de las tuberías que componen la red de gas natural. La caída de presión en la rama 1 viene definida por la siguiente ecuación [7]:

$$\Delta_{rama_1}^{pr} = K_{(1)}^G \cdot \dot{V}_{(1)}^G{}^2 = 1,047 \cdot 10^{-4} \cdot 441,23^2 = 20,40 \text{ [mbar]} \quad (159)$$

$$\Delta_{rama_2}^{pr} = K_{(2)}^G \cdot \dot{V}_{(2)}^G{}^2 = 7,704 \cdot 10^{-5} \cdot 328,73^2 = 8,33 \text{ [mbar]} \quad (160)$$

$$\Delta_{rama_3}^{pr} = K_{(3)}^G \cdot \dot{V}_{(3)}^G{}^2 = 6,471 \cdot 10^{-5} \cdot 228,73^2 = 3,39 \text{ [mbar]} \quad (161)$$

De esta forma, sabiendo que la presión en el punto 2 es de 100 mbar y las caídas de presión en cada rama son conocidas, se pueden calcular fácilmente las estimaciones iniciales de las presiones nodales como incógnitas de la red de gas natural [7]:

$$pr_1^G = pr_2^G - \Delta_{rama_1}^{pr} = 100 - 20,40 = \mathbf{79,60 \text{ [mbar]}} \quad (162)$$

$$pr_3^G = pr_2^G - \Delta_{rama_2}^{pr} = 100 - 8,33 = \mathbf{91,67 \text{ [mbar]}} \quad (163)$$

$$pr_4^G = pr_3^G - \Delta_{rama_3}^{pr} = (100 - 8,33) - 3,39 = \mathbf{88,31 \text{ [mbar]}} \quad (164)$$

Seguidamente, se computan las estimaciones iniciales para las incógnitas de la red térmica (basado en los valores de las referencias consultadas) [7], tanto de calor como de frío. En el caso de la red térmica de calor se tienen en cuenta las siguientes estimaciones (Tabla 26):

Tabla 26. Estimaciones iniciales para las incógnitas de la red térmica de calor. Fuente: Muditha Abeysekera [7].

Incógnita	Valor	Unidad
$\dot{m}_{(1)}^H$	1	kg/s
$\dot{m}_{(2)}^H$	1	kg/s
$\dot{m}_{(3)}^H$	1	kg/s

En la Tabla 27 se detallan las estimaciones iniciales para las incógnitas de la red térmica de frío:

Tabla 27. Estimaciones iniciales para las incógnitas de la red térmica de frío. Fuente: Muditha Abeysekera [7].

Incógnita	Valor	Unidad
$\dot{m}_{(1)}^C$	5	kg/s
$\dot{m}_{(2)}^C$	5	kg/s

De esta forma se puede determinar el vector de estimaciones iniciales para las incógnitas ($X(0)$):

$$X(0) = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ v_2 \\ pr_1^G \\ pr_3^G \\ pr_4^G \\ \dot{m}_{(1)}^H \\ \dot{m}_{(2)}^H \\ \dot{m}_{(3)}^H \\ \dot{m}_{(1)}^C \\ \dot{m}_{(2)}^C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 79,603 \\ 91,675 \\ 88,289 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 5 \\ 5 \end{bmatrix} \quad (165)$$

Por otra parte, todos los valores de los parámetros constantes (**PC**) se encuentran detallados en las tablas mostradas en el apartado 8.2.

En cuanto a los valores conocidos de partida de los parámetros no constantes (**PNC(0)**), se adjuntan las siguientes tablas.

Tabla 28. Valores conocidos de partida de los parámetros no constantes de la red térmica de calor.

Fuente: Muditha Abeysekera [7].

Parámetro no constante	Valor	Unidad
$T_{sup,2}^H$	100	°C
$T_{sup,3}^H$	100	°C
$T_{ret,1}^H$	50	°C
$T_{ret,2}^H$	50	°C
$T_{ret,4}^H$	50	°C

Tabla 29. Valores conocidos de partida de los parámetros no constantes de la red térmica de frío.

Fuente: Muditha Abeysekera [7].

Parámetro no constante	Valor	Unidad
$T_{sup,1}^C$	5	°C
$T_{sup,3}^C$	5	°C
$T_{ret,2}^C$	12	°C

Tabla 30. Valores conocidos de partida de los parámetros no constantes de la red de gas natural.
Fuente: Muditha Abeysekera [7].

Parámetro no constante	Valor	Unidad
S_{21}	1	-
S_{23}	1	-
S_{34}	1	-

El punto de partida seleccionado para las “S” es de valor 1, puesto que conocida la presión en el nodo G2 (100 mbar) y la dirección de los flujos de la red de gas natural, en ninguno de los nodos restantes (G1, G3 y G4) aparecerá una presión superior a la mencionada debido a las pérdidas de presión que se producen en el transporte (además, no se menciona que la red disponga de ningún elemento para contrarrestar este efecto).

De esta forma se puede determinar el vector de valores conocidos de partida de los parámetros no constantes (PNC(0)):

$$PNC(0) = \begin{bmatrix} T_{sup,2}^H \\ T_{sup,3}^H \\ T_{ret,1}^H \\ T_{ret,2}^H \\ T_{ret,4}^H \\ T_{sup,1}^C \\ T_{sup,3}^C \\ T_{ret,2}^C \\ S_{21} \\ S_{23} \\ S_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 100 \\ 100 \\ 50 \\ 50 \\ 50 \\ 5 \\ 5 \\ 12 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (166)$$

Llegados a este punto, se puede iniciar el método numérico iterativo. A continuación, se describe el procedimiento que este sigue.

- Se evalúan $F(X(0), PC, PNC(0))$ y $JF(X(0), PC, PNC(0))$:

$$F(X(0), PC, PNC(0)) = \begin{bmatrix} F_{1,1} \\ F_{1,2} \\ F_{2,2} \\ F_{3,1} \\ F_{3,3} \\ F_{3,4} \\ F_{4,2} \\ F_{4,3} \\ F_{4,4} \\ F_{5,1} \\ F_{5,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,2096 \\ 0,1920 \\ 0,3990 \\ 195,3947 \\ 0 \\ 0 \\ -5,7416 \\ -0,1538 \\ 1,3923 \\ -8,6705 \\ -8,6705 \end{bmatrix} \quad (167)$$

A continuación, se muestra la matriz jacobiana $JF(X(0), PC, PNC(0))$:

JFXhi(:, :, 1) =

-0.3642	0.3642	10.2000	0	0	0	0.0024	0	0	0	0	0
0.3730	-1.0658	-29.8000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0.1776	0.5329	-59.6000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	-10.8160	0	0	-45.8333	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-53.5239	33.7802	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	33.7802	-33.7802	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1.0000	-1.0000	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1.0000	1.0000	-0.2154	-0.2154	0
0	0	0	0	0	0	0	0	-1.0000	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.0000	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.0000	0

Figura 16. Resultado de la matriz jacobiana en la iteración 0 (inicial). Fuente: Propia.

- Se halla $X(1) = X(0) + (JF(X(0), PC, PNC(0)))^{-1} * F(X(0), PC, PNC(0))$:

$$X(1) = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ v_2 \\ pr_1^G \\ pr_3^G \\ pr_4^G \\ \dot{m}_{(1)}^H \\ \dot{m}_{(2)}^H \\ \dot{m}_{(3)}^H \\ \dot{m}_{(1)}^C \\ \dot{m}_{(2)}^C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,5248 \\ -0,1876 \\ 1,0066 \\ 62,7590 \\ 91,6750 \\ 88,2894 \\ 9,2381 \\ 3,4965 \\ 2,3923 \\ 13,6705 \\ 13,6705 \end{bmatrix} \quad (168)$$

- Se determinan los PNC(1), los cuales dependen de X(1):

A continuación, se computan todas las temperaturas de las líneas de suministro y de retorno de la red térmica de calor y frío para la primera iteración (PNC(1)). Como se ha mencionado, el valor obtenido en las siguientes ecuaciones corresponde a la primera iteración del proceso iterativo e irá variando a medida que también se actualicen los valores de $\dot{m}_{(1)}^H$, $\dot{m}_{(2)}^H$, $\dot{m}_{(3)}^H$, $\dot{m}_{(1)}^C$ y $\dot{m}_{(2)}^C$. Para el cálculo de dichas temperaturas, se tendrá en cuenta el sentido del flujo en cada una de las ramas, según lo indicado en la Figura 15.

Además, para el cálculo de las temperaturas de la Tabla 24, se tendrán en cuenta las fórmulas expuestas en el apartado 6.7. La aplicación de la fórmula en cuestión dependerá de las condiciones en las que se encuentre el nodo de referencia. Finalmente, se ha considerado que la temperatura ambiente (T_{amb}) a la que se encuentra la red energética objeto de estudio es de 10 °C.

En primer lugar, se calculan las temperaturas relacionadas con las **líneas de suministro de la red térmica de calor**.

En el **nodo H2**, situado al final de la rama 1 (de H1 a H2) y al inicio de la rama 2 (de H2 a H3), se considera que $T_{sup,1}^H = T_{s,1}^H$. Esta consideración se puede llevar a cabo ya que en el nodo H1 se inyecta la potencia térmica (calor) que proviene de la cogeneración. Como es un análisis en régimen estacionario o permanente, se deduce que la producción de calor de la cogeneración es constante y siempre suministra al nodo H1 a la misma temperatura. Con esta consideración se puede aplicar la fórmula de $\Delta T_{sup,(1)}^H$, ya que $T_{s,1}^H$ es conocida (valor de suministro proporcionado por el fabricante de la cogeneración). De esta forma, se procede a calcular el valor de $T_{sup,2}^H$ [7].

$$\Delta T_{sup,(1)}^H = \frac{\pi \cdot \chi_{(1)}^H \cdot L_{(1)}^H \cdot D_{(1)}^H \cdot (T_{sup,1}^H - T_{amb})}{\dot{m}_{(1)}^H \cdot C_p} \quad \text{donde } T_{sup,1}^H = T_{s,1}^H \quad (169)$$

$$\Delta T_{sup,(1)}^H = \frac{\pi \cdot 0,9 \cdot 3000 \cdot 0,15 \cdot (100 - 10)}{9,2381 \cdot 4,18 \cdot 1000} = 2,96 \text{ °C} \quad (170)$$

$$T_{sup,2}^H = T_{sup,1}^H - \Delta T_{sup,(1)}^H = 100 - 2,96 = 97,03 \text{ °C} \quad (171)$$

Tras la aplicación de las ecuaciones 169 y 170, se obtiene un resultado de 97,03 °C para $T_{sup,2}^H$. Este valor es lógico y razonable puesto que entre H1 y H2 existen pérdidas por convección (la tubería disipa el calor que transporta) en la tubería que transporte el fluido por valor de 2,96 °C ($\Delta T_{sup,(1)}^H$).

Respecto al **nodo H3**, situado al final de la rama 2 (de H2 a H3) y de la rama 3 (de H4 a H3),

se considera que la temperatura inicial en el nodo 2 es $T_{sup,2}^H$ (calculada anteriormente) ya que es la temperatura que hay en la entrada de dicho nodo (temperatura inicial de la rama 2). Por otra parte, se determina que la temperatura inicial de la rama 3 es la correspondiente al nodo H4, puesto que es el inicio de esta rama. Así pues, se considera que $T_{sup,4}^H = T_{s,4}^H$ ya que la caldera de gas (que al igual que la cogeneración, también se encarga de la producción de calor) suministra calor a la rama 3. Al tratarse de un estudio en régimen permanente, la temperatura en el nodo H4 es siempre constante puesto que la caldera de gas se puede regular a una temperatura determinada en función de sus especificaciones. Conocidas las temperaturas $T_{sup,2}^H$ y $T_{sup,4}^H$, se pueden calcular las pérdidas por convección en cada una de las ramas ($\Delta T_{sup,(2)}^H$ y $\Delta T_{sup,(3)}^H$, respectivamente). De esta forma, se podrá calcular el valor de $T_{sup,3}^H$ [7].

$$\Delta T_{sup,(2)}^H = \frac{\pi \cdot \chi_{(2)}^H \cdot L_{(2)}^H \cdot D_{(2)}^H \cdot (T_{sup,2}^H - T_{amb})}{\dot{m}_{(2)}^H \cdot C_p} \quad (172)$$

$$\Delta T_{sup,(2)}^H = \frac{\pi \cdot 0,9 \cdot 3000 \cdot 0,15 \cdot (97,03 - 10)}{3,4965 \cdot 4,18 \cdot 1000} = 7,57 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (173)$$

$$\Delta T_{sup,(3)}^H = \frac{\pi \cdot \chi_{(3)}^H \cdot L_{(3)}^H \cdot D_{(3)}^H \cdot (T_{sup,4}^H - T_{amb})}{\dot{m}_{(3)}^H \cdot C_p} \text{ donde } T_{sup,4}^H = T_{s,4}^H \quad (174)$$

$$\Delta T_{sup,(3)}^H = \frac{\pi \cdot 0,9 \cdot 3000 \cdot 0,15 \cdot (100 - 10)}{2,3923 \cdot C_p \cdot 1000} = 11,45 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (175)$$

$$\begin{aligned} T_{sup,3}^H &= \frac{(\dot{m}_{(2)}^H \cdot (T_{sup,2}^H - \Delta T_{sup,(2)}^H) + \dot{m}_{(3)}^H \cdot (T_{sup,4}^H - \Delta T_{sup,(3)}^H))}{\dot{m}_{(2)}^H + \dot{m}_{(3)}^H} \\ &= \frac{(3,4965 \cdot (97,03 - 7,57) + 2,3923 \cdot (100 - 11,45))}{3,4965 + 2,3923} \\ &= 89,09 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (176)$$

Tras la aplicación de la ecuación 176, se obtiene un resultado de 89,09 °C para $T_{sup,3}^H$. El resultado calculado es lógico puesto que, si se analiza la configuración de la red, se observa que en los nodos H2 y H4 existen temperaturas más elevadas que en el nodo H3. Esto es debido a las pérdidas por convección que se producen cuando el flujo circula por las ramas 2 y 3.

Una vez calculadas las temperaturas de las líneas de suministro, se calculan, también, las

temperaturas correspondientes a las **líneas de retorno** (como ya se ha indicado en el capítulo 6, las líneas térmicas disponen tanto de línea de suministro como de retorno):

Continuando con el análisis del **nodo H3**, se conoce la temperatura de salida de dicho nodo ($T_{out,3}^H$), influenciada por el paso del flujo por el elemento de acople “AC” (como el flujo pasa por este elemento de acople, se puede regular su temperatura). De esta forma, la temperatura de salida del flujo del elemento de acople es la misma con la que el flujo sale del nodo H3. Por lo tanto, se determina lo siguiente [7]:

$$T_{ret,3}^H = T_{out,3}^H = 50 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (177)$$

El razonamiento que se ha hecho en la ecuación 177, es lógico puesto que la distancia entre el elemento de acople y el nodo H3 se puede despreciar y, por lo tanto, no existen pérdidas por convección.

Si se analiza el **nodo H4**, teniendo en cuenta que se trata de la línea de retorno, interesa determinar las pérdidas por convección que se producen en la rama 3, pero esta vez en el trayecto desde H3 a H4. Por lo tanto, la temperatura de inicio será la contemplada en la ecuación 178 ($T_{ret,3}^H$). Con el objetivo calcular el valor de la temperatura de retorno en el nodo H4 ($T_{ret,4}^H$), se calcula la caída de presión en la rama 3 de retorno ($\Delta T_{ret,(3)}^H$) [7].

$$\Delta T_{ret,(3)}^H = \frac{\pi \cdot \chi_{(3)}^H \cdot L_{(3)}^H \cdot D_{(3)}^H \cdot (T_{ret,3}^H - T_{amb})}{\dot{m}_{(3)}^H \cdot C_p} \text{ donde } T_{ret,3}^H = T_{out,3}^H \quad (178)$$

$$\Delta T_{ret,(3)}^H = \frac{\pi \cdot 0,9 \cdot 3000 \cdot 0,15 \cdot (50 - 10)}{2,3923 \cdot 4,18 \cdot 1000} = 5,09 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (179)$$

$$T_{ret,4}^H = T_{ret,3}^H - \Delta T_{ret,(3)}^H = 50 - 5,11 = 44,91 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (180)$$

Analizando los valores obtenidos al aplicar las ecuaciones 178 y 179, se concluye que el valor es coherente ya que la temperatura al inicio de la rama 3 de retorno era de 50 °C mientras que el valor final (en el nodo H4) es de 44,91 °C (valor inicial descontando el calor que disipa la tubería al ambiente).

Respecto al **nodo H2**, visto desde la línea de retorno, se proceden a calcular las pérdidas por convección de la rama 2, que en este caso se inicia en el nodo H3 y finaliza en el nodo H2, teniendo en cuenta que entre medias hay una carga local ($\dot{M}_{d,2}^H$) que afectará a la temperatura de retorno del nodo H2. A través de la fórmula propuesta en la ecuación 186, se determina que la temperatura de retorno en el nodo H2 ($T_{ret,2}^H$) es de 48,73 °C [7].

$$\Delta T_{ret,(2)}^H = \frac{\pi \cdot \chi_{(2)}^H \cdot L_{(2)}^H \cdot D_{(2)}^H \cdot (T_{ret,3}^H - T_{amb})}{\dot{m}_{(2)}^H \cdot C_p} \quad (181)$$

$$\Delta T_{ret,(2)}^H = \frac{\pi \cdot 0,9 \cdot 3000 \cdot 0,15 \cdot (50 - 10)}{3,4965 \cdot 4,18 \cdot 1000} = 3,48 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (182)$$

$$\dot{M}_{d,2}^H = \frac{\dot{Q}_{d,2}^H}{C_p \cdot (T_{sup,2}^H - T_{out,2}^H)} \quad (183)$$

$$\dot{M}_{d,2}^H = \frac{1200}{4,18 \cdot (97,03 - 50)} = 6,104 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (184)$$

$$T_{ret,2}^H = \frac{(\dot{m}_{(2)}^H \cdot (T_{ret,3}^H - \Delta T_{ret,(2)}^H) + \dot{M}_{d,2}^H \cdot T_{out,2}^H)}{\dot{m}_{(2)}^H + \dot{M}_{d,2}^H} \quad (185)$$

$$T_{ret,2}^H = \frac{(3,4965 \cdot (50 - 3,48) + 6,104 \cdot 50)}{3,4965 + 6,104} = 48,73 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (186)$$

Analizando la lógica del resultado obtenido se determina que es acorde con lo esperado. De la misma forma que ocurría en el anterior caso, la temperatura inicial es de 50 °C pero debido a las pérdidas por convección de la rama 2 de retorno ($\Delta T_{ret,(2)}^H$), esta temperatura se ve reducida hasta los 48,73 °C.

Si se analiza la temperatura de la línea de retorno en el **nodo H1** ($T_{ret,1}^H$), se observa que antes de llegar a este nodo, el fluido transportador del calor tiene que pasar tanto por la rama 2 (de H3 a H2) como por la rama 1 (de H2 a H1). Por lo tanto, se espera que el valor de la temperatura de la línea de retorno en el nodo H1 sea menor que $T_{ret,2}^H$, debido a las pérdidas que se continúan acumulando en la rama 1 ($\Delta T_{ret,(1)}^H$) [7].

$$\Delta T_{ret,(1)}^H = \frac{\pi \cdot \chi_{(1)}^H \cdot L_{(1)}^H \cdot D_{(1)}^H \cdot (T_{ret,2}^H - T_{amb})}{\dot{m}_{(1)}^H \cdot C_p} \quad (187)$$

$$\Delta T_{ret,(1)}^H = \frac{\pi \cdot 0,9 \cdot 3000 \cdot 0,15 \cdot (48,73 - 10)}{9,2381 \cdot 4,18 \cdot 1000} = 1,276 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (188)$$

$$T_{ret,1}^H = T_{ret,2}^H - \Delta T_{ret,(1)}^H = 48,73 - 1,28 = 47,45 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (189)$$

De esta forma, se obtiene un valor de 47,45 °C para $T_{ret,1}^H$.

Una vez finalizado el cálculo de las temperaturas de la red térmica de calor (primera iteración) se concluye que todas las “deltas” analizadas son positivas puesto que la temperatura ambiente es inferior a la temperatura del fluido que circula por las ramas de esta red. Esta situación, provoca que el ambiente “enfríe” el fluido que circula por las tuberías a una mayor temperatura.

De la misma forma que se ha procedido con la parte de calor, se calculan las temperaturas relacionadas con las **líneas de suministro** de la **red térmica de frío**. Tal y como se había descrito anteriormente, las temperaturas relacionadas con la red térmica de frío también son parámetros no constantes que varían su valor iteración tras iteración debido a los diferentes valores que toman los caudales máxicos.

Como ya se ha venido analizando en los anteriores casos, el **nodo C1** debería poseer una temperatura en la línea de suministro inferior a la temperatura de salida del nodo C2, una vez más, con motivo de las pérdidas por convección que se producen en el transporte del fluido térmico por la tubería ($\Delta T_{sup,(1)}^C$). En este caso, la rama 1 de la red térmica de frío empieza en C2 y desemboca en C1. La temperatura de suministro en el nodo C2 viene determinada por el elemento de acople “AC” y se cumple que $T_{sup,2}^C = T_{s,2}^C$, por lo que la temperatura inicial en la rama objeto de estudio en este caso es conocida [7].

$$\Delta T_{sup,(1)}^C = \frac{\pi \cdot \chi_{(1)}^C \cdot L_{(1)}^C \cdot D_{(1)}^C \cdot (T_{sup,2}^C - T_{amb})}{\dot{m}_{(1)}^C \cdot C_p} \text{ donde } T_{sup,2}^C = T_{s,2}^C \quad (190)$$

$$\Delta T_{sup,(1)}^C = \frac{\pi \cdot 0,9 \cdot 100 \cdot 0,16 \cdot (5 - 10)}{13,6705 \cdot 4,18 \cdot 1000} = -0,004 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (191)$$

$$T_{sup,1}^C = T_{sup,2}^C - \Delta T_{sup,(1)}^C = 5 - (-0,004) = 5,004 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (192)$$

Cuando se calculan la ecuación 192, se determina que $T_{sup,1}^C$ tiene un valor de 5,004 °C. Cabe recordar que se está analizando la red térmica de frío y es coherente que, durante el transporte del fluido de C2 a C1, este adquiera un pequeño incremento en la temperatura, puesto que la temperatura ambiente es superior a la temperatura de suministro (salida) del nodo C2.

Por la configuración de la red multienergética objeto de estudio propuesta en la Figura 15, el **nodo C3** es idéntico a lo explicado para el nodo C1. Como la tubería que va desde C2 a C3 tiene las mismas características constructivas que la tubería que va desde C2 a C1, la ganancia de temperatura que se produce por convección en la tubería 2 ($\Delta T_{sup,(2)}^C$) y la temperatura de la línea de suministro del nodo C3 ($T_{sup,3}^C$) tienen el mismo valor que $\Delta T_{sup,(1)}^C$ y $T_{sup,1}^C$ respectivamente [7].

$$\Delta T_{sup,(2)}^C = \frac{\pi \cdot \chi_{(2)}^C \cdot L_{(2)}^C \cdot D_{(2)}^C \cdot (T_{sup,2}^C - T_{amb})}{\dot{m}_{(2)}^C \cdot C_p} \text{ donde } T_{sup,2}^C = T_{s,2}^C \quad (193)$$

$$\Delta T_{sup,(2)}^C = \frac{\pi \cdot 0,9 \cdot 100 \cdot 0,16 \cdot (5 - 10)}{13,6705 \cdot 4,18 \cdot 1000} = -0,004 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (194)$$

$$T_{sup,3}^C = T_{sup,2}^C - \Delta T_{sup,(2)}^C = 5 - (-0,004) = 5,004 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (195)$$

Finalmente, se calculan las temperaturas asociadas a las **líneas de retorno** de la **red térmica de frío**.

En este caso, solo es necesario analizar la temperatura de retorno del **nodo C2** ($T_{ret,2}^C$), puesto que las temperaturas de retorno (o también de salida) de los nodos C1 y C3 son conocidos y se proporcionan en la Tabla 18 (ya que ambos nodos son terminales y están conectados a una carga local). En el caso de las líneas de retorno, la tubería 1 va desde C1 a C2 mientras que la tubería 2 va de C3 a C2. Por lo tanto, a la salida del nodo C1 ($T_{ret,1}^C = T_{out,1}^C$) y C3 ($T_{ret,3}^C = T_{out,3}^C$), el fluido tendrá una temperatura de 12 °C. Como esta temperatura es ligeramente superior a la temperatura ambiente (10 °C), se determina que la tubería cederá calor al exterior. Por lo tanto, la temperatura en el nodo C2 de la línea de retorno ($T_{ret,2}^C$) se podrá calcular una vez se determinen las “deltas” ($\Delta T_{ret,(1)}^C$ y $\Delta T_{ret,(2)}^C$). El efecto de estas “deltas” es indeseable, puesto que el elemento de acople “AC” deberá incrementar su funcionamiento para alcanzar los 50 °C ($T_{out,3}^H$) que se desean obtener a su salida [7].

$$\Delta T_{ret,(1)}^C = \frac{\pi \cdot \chi_{(1)}^C \cdot L_{(1)}^C \cdot D_{(1)}^C \cdot (T_{ret,1}^C - T_{amb})}{\dot{m}_{(1)}^C \cdot C_p} \text{ donde } T_{ret,1}^C = T_{out,1}^C \quad (196)$$

$$\Delta T_{ret,(1)}^C = \frac{\pi \cdot 0,9 \cdot 100 \cdot 0,16 \cdot (12 - 10)}{13,6705 \cdot 4,18 \cdot 1000} = 1,59 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (197)$$

$$\Delta T_{ret,(2)}^C = \frac{\pi \cdot \chi_{(2)}^C \cdot L_{(2)}^C \cdot D_{(2)}^C \cdot (T_{ret,3}^C - T_{amb})}{\dot{m}_{(2)}^C \cdot C_p} \text{ donde } T_{ret,3}^C = T_{out,3}^C \quad (198)$$

$$\Delta T_{ret,(2)}^C = \frac{\pi \cdot 0,9 \cdot 100 \cdot 0,16 \cdot (12 - 10)}{13,6705 \cdot 4,18 \cdot 1000} = 1,59 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (199)$$

$$T_{ret,2}^C = \frac{\dot{m}_{(1)}^C \cdot (T_{ret,1}^C - \Delta T_{ret,(1)}^C) + \dot{m}_{(2)}^C \cdot (T_{ret,3}^C - \Delta T_{ret,(2)}^C)}{\dot{m}_{(1)}^C + \dot{m}_{(2)}^C} \quad (200)$$

$$T_{ret,2}^C = \frac{13,6705 \cdot (12 - 1,59^{-3}) + 13,6705 \cdot (12 - 1,59^{-3})}{13,6705 + 13,6705} = 11,99 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (201)$$

Una vez aplicadas las anteriores ecuaciones, el valor de $T_{ret,2}^C$ es de 11,99 °C, prácticamente idéntico al valor de la temperatura de salida de los nodos C1 y C3. Esto se debe a que la temperatura ambiente y la temperatura de salida de dichos nodos es similar.

Los tres parámetros no constantes restantes especificados en la Tabla 24 correspondientes a los valores de “S”, variarán entre +1 y -1 dependiendo de las presiones del nodo de “salida” y de “entrada” (tal y como se ha explicado en la teoría del capítulo 6). Es decir, si el nodo de partida tiene una presión mayor que el nodo de llegada, el valor de la “S” será +1. En caso contrario, su valor será de -1. En el caso que se ha estudiado, las presiones de los nodos de partida serán en todas las iteraciones mayores que las presiones de los nodos de llegada. Por tanto, los valores de las “S” consideradas siempre será +1 (se podrá comprobar en la presentación de resultados finales).

De esta forma queda determinado el nuevo vector de valores de los parámetros no constantes (PNC(1)):

$$PNC(1) = \begin{bmatrix} T_{sup,2}^H \\ T_{sup,3}^H \\ T_{ret,1}^H \\ T_{ret,2}^H \\ T_{ret,4}^H \\ T_{sup,1}^C \\ T_{sup,3}^C \\ T_{ret,2}^C \\ S_{21} \\ S_{23} \\ S_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 97,0346 \\ 89,0885 \\ 47,4556 \\ 48,7317 \\ 44,9106 \\ 5,0040 \\ 5,0040 \\ 11,9984 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (202)$$

El método numérico iterativo sigue como se indica a continuación:

- Se evalúan $F(X(1), PC, PNC(1))$ y $JF(X(1), PC, PNC(1))$
- Se halla $X(2) = X(1) + (JF(X(1), PC, PNC(1)))^{-1} * F(X(1), PC, PNC(1))$
- Se determinan los PNC(2), los cuales dependen de X(2)

Y así hasta que todas las funciones propuestas en el apartado 8.3 se aproximen lo máximo posible a 0 y dos aproximaciones consecutivas a la solución sean lo más parecidas posible

según las respectivas tolerancias fijadas, iteración en la que se habrá llegado a la solución definitiva (en el presente TFM se alcanza la solución en X(13), lo que se traduce en 13 iteraciones).

Finalmente, se aportan los resultados obtenidos tras ejecutar al completo el código MATLAB mostrado en el volumen Anexos, Anexo A, del presente TFM. Dichos resultados son un extracto de los aportados en el volumen Anexos, Anexo B, del TFM.

En primer lugar, se muestra la matriz Xhi , que contiene el histórico de los valores que adquieren las incógnitas (mismo orden que la Tabla 23) en función de la iteración. Cada una de las filas corresponde a una iteración, empezando por la (0) y finalizando en la (13).

$x_{hi} =$	δ_1	δ_2	v_2	pr_1^c	pr_3^c	pr_4^c	m_1^H	m_2^H	m_3^H	m_1^c	m_2^c
x(0)	0	0	1.0000	79.6031	91.6750	88.2894	1.0000	1.0000	1.0000	5.0000	5.0000
x(1)	-0.5248	-0.1876	1.0066	62.7590	91.6750	88.2894	9.2381	3.4965	2.3923	13.6705	13.6705
	-0.4977	-0.1739	1.0066	43.2522	91.6750	88.2894	11.4676	5.3639	2.1713	13.6783	13.6783
	-0.5032	-0.1756	1.0066	44.5866	91.6750	88.2894	11.0408	5.0111	2.1511	13.6783	13.6783
	-0.5023	-0.1753	1.0066	43.8478	91.6750	88.2894	11.1258	5.0844	2.1491	13.6783	13.6783
	-0.5025	-0.1754	1.0066	43.9876	91.6750	88.2894	11.1096	5.0706	2.1489	13.6783	13.6783
	-0.5025	-0.1754	1.0066	43.9595	91.6750	88.2894	11.1129	5.0734	2.1488	13.6783	13.6783
	-0.5025	-0.1754	1.0066	43.9649	91.6750	88.2894	11.1122	5.0728	2.1488	13.6783	13.6783
	-0.5025	-0.1754	1.0066	43.9639	91.6750	88.2894	11.1124	5.0729	2.1488	13.6783	13.6783
	-0.5025	-0.1754	1.0066	43.9641	91.6750	88.2894	11.1123	5.0729	2.1488	13.6783	13.6783
	-0.5025	-0.1754	1.0066	43.9640	91.6750	88.2894	11.1123	5.0729	2.1488	13.6783	13.6783
	-0.5025	-0.1754	1.0066	43.9640	91.6750	88.2894	11.1123	5.0729	2.1488	13.6783	13.6783
	-0.5025	-0.1754	1.0066	43.9640	91.6750	88.2894	11.1123	5.0729	2.1488	13.6783	13.6783
x(13)	-0.5025	-0.1754	1.0066	43.9640	91.6750	88.2894	11.1123	5.0729	2.1488	13.6783	13.6783

Figura 17. Resultados de la variable Xhi . Fuente: Propia.

En segundo lugar, se muestra la matriz $param_no_cteshi$, que contiene el histórico de los valores que adquieren los parámetros no constantes (mismo orden que la Tabla 24, obviando $T_{ret,3}^H$, que es un valor constante, según ecuación 177) en función de la iteración. Cada una de las filas corresponde a una iteración, empezando por la (0) y finalizando en la (13).



param_no_cteshi =											
	$T_{sup,2}^H$	$T_{sup,3}^H$	$T_{ret,1}^H$	$T_{ret,2}^H$	$T_{ret,4}^H$	$T_{sup,1}^C$	$T_{sup,3}^C$	$T_{ret,2}^C$	S_{21}	S_{23}	S_{34}
PNC(0)	100.0000	100.0000	50.0000	50.0000	50.0000	5.0000	5.0000	12.0000	1.0000	1.0000	1.0000
PNC(1)	97.0346	89.0885	47.4556	48.7317	44.9106	5.0040	5.0040	11.9984	1.0000	1.0000	1.0000
	97.6111	91.1248	47.8980	48.9314	44.3926	5.0040	5.0040	11.9984	1.0000	1.0000	1.0000
	97.5187	90.7195	47.8260	48.8984	44.3399	5.0040	5.0040	11.9984	1.0000	1.0000	1.0000
	97.5377	90.7983	47.8410	48.9054	44.3345	5.0040	5.0040	11.9984	1.0000	1.0000	1.0000
	97.5341	90.7829	47.8382	48.9041	44.3339	5.0040	5.0040	11.9984	1.0000	1.0000	1.0000
	97.5348	90.7859	47.8387	48.9044	44.3339	5.0040	5.0040	11.9984	1.0000	1.0000	1.0000
	97.5347	90.7853	47.8386	48.9043	44.3339	5.0040	5.0040	11.9984	1.0000	1.0000	1.0000
	97.5347	90.7854	47.8387	48.9043	44.3339	5.0040	5.0040	11.9984	1.0000	1.0000	1.0000
	97.5347	90.7854	47.8387	48.9043	44.3339	5.0040	5.0040	11.9984	1.0000	1.0000	1.0000
	97.5347	90.7854	47.8387	48.9043	44.3339	5.0040	5.0040	11.9984	1.0000	1.0000	1.0000
	97.5347	90.7854	47.8387	48.9043	44.3339	5.0040	5.0040	11.9984	1.0000	1.0000	1.0000
PNC(13)	97.5347	90.7854	47.8387	48.9043	44.3339	5.0040	5.0040	11.9984	1.0000	1.0000	1.0000

Figura 18. Resultados de la variable "param_no_cteshi". Fuente: Propia.

A modo de conclusión, se determina que los resultados obtenidos son los esperados en función de las características y el funcionamiento de la red multienergética propuesta. Respecto a la red eléctrica, las fases (ángulos) de los voltajes en los nodos 1 y 2 son muy cercanos a 0 y el módulo del voltaje en el nodo 2 es prácticamente 1 en pu, por lo que se certifica que los resultados de esta red son correctos. En cuanto a los resultados de la red de gas natural, se determina que también son correctos, puesto que todas las presiones son inferiores a la presión nodal del nodo de referencia G2 (100 mbar), debido a las pérdidas de presión que se producen en el transporte del gas y por las cargas demandantes que se conectan a estos nodos. Finalmente, se concluye que los valores obtenidos para las incógnitas y los parámetros no constantes de la red térmica son correctos, ya que los caudales máxicos son coherentes conforme la distribución de la red y las cargas locales conectadas a los nodos y las temperaturas también cumplen con la distribución de los elementos de la red y las pérdidas o ganancias por convección que pueden aparecer en el transporte por las ramas de esta red.

9. Análisis del impacto ambiental

El presente TFM no requiere de gestiones excepcionales para prevenir y evitar posibles accidentes, averías o residuos contaminantes, entre otros, que puedan ocasionar daños al medioambiente, ya que se trata de un estudio teórico que no necesita de maquinaria u otros utensilios especiales que puedan provocar dichos incidentes.

En cuanto al consumo energético necesario para la ejecución del TFM, se ha hecho uso de la iluminación estándar (luz de techo y flexo) de una habitación común, la energía necesaria para la carga y funcionamiento de los dispositivos electrónicos utilizados (ordenador y móvil) y uso puntual del transporte público (autobús y metro) para asistir a las reuniones programadas con el director del TFM. Aunque en el presente capítulo no serán considerados algunos pequeños materiales (como puedan ser bolígrafos, grapas, clips, entre otros), que pese a ser consumibles y generar residuos plásticos, la cantidad utilizada es tan reducida que es difícil de cuantificar, sí que se considerarán otros recursos materiales como útiles de oficina o artículos informáticos.

Tanto los folios como la tinta de impresión consumidos durante la elaboración del TFM sí se considerarán como recursos materiales. A continuación, se especifican las características técnicas de estos materiales:

- Se han utilizado folios blancos no reciclados de 80 gramos por unidad para realizar resúmenes, cálculos, anotaciones varias y para las diversas impresiones que se han llevado a cabo.
- La impresora utilizada funciona con cartuchos desechables de 15 ml de tinta, lo que permite realizar 1.000 impresiones por cartucho.

Como ya se ha mencionado con anterioridad, también se requerirán recursos energéticos como la electricidad (cargas de los dispositivos electrónicos) y combustibles fósiles (consumidos por el transporte público). Con el objetivo de cuantificar los recursos energéticos, se exponen los siguientes puntos:

- Para iluminar la habitación se ha utilizado tecnología LED cuya potencia instalada es de 14 W. Se tendrán en cuenta las horas de funcionamiento para calcular el consumo eléctrico.
- Para redactar la memoria y programar el código MATLAB se ha utilizado un ordenador de la marca Acer, modelo Nitro 5 AN515-45-R95V. En la ejecución de los cálculos se considerarán cargas y descargas completas de la batería, cuya potencia máxima de alimentación es de 180 W, el tiempo máximo de funcionamiento de la batería es de 10 horas y se necesitan 2 horas para cargarla completamente.

- Para realizar las impresiones se ha hecho uso de una impresora EPSON WF-7710DWF cuya potencia es de 19 W y cuyo tiempo de impresión por folio es de 4 segundos.

En futuros TFMs que se lleven a cabo, se tratará de aplicar las medidas que se expondrán a continuación para tratar de reducir al máximo la huella ambiental que ocasiona su elaboración. Los folios blancos se podrían sustituir por folios reciclados además de contar con una impresora que disponga de cartuchos recargables y que no sea necesario desechar cuando se agota la tinta. También, se podrán plantear medidas de más calado, como sustituir las reuniones presenciales por reuniones virtuales en las que no sea necesario desplazarse.

En la Tabla 31, se calculan los consumibles utilizados según los distintos capítulos contemplados (los capítulos 6, 7 y 8 se consideran individualmente y separados del resto, ya que son los de mayor envergadura):

Tabla 31. Consumibles que se han necesitado para realizar el TFM.

Consumibles	Capítulos del trabajo			
	Capítulo 6	Capítulo 7	Capítulo 8	Otros capítulos
Folios	24	6	40	49
Impresiones	4	4	4	3
Folios totales	96	24	160	147
Tinta [ml]	1,44	0,36	2,40	2,21
Tiempo de impresión [h]	0,11	0,03	0,18	0,16
Tiempo de iluminación [h]	50	100	135	75
Tiempo cargas ordenador [h]	10	20	27	15
Energía consumida [Wh]	2.502,1	5.000,6	6.753,4	3.753,0
Energía consumida [kWh]	2,502	5,001	6,753	3,753

Planificación temporal

La planificación temporal del TFM se ha realizado a través de un diagrama de Gantt dividido en diez tareas que se especifican a continuación:

- **Tarea 1:** Lectura de la bibliografía
- **Tarea 2:** Capítulos 1, 2 y 3
- **Tarea 3:** Capítulo 4
- **Tarea 4:** Capítulo 5
- **Tarea 5:** Capítulo 6
- **Tarea 6:** Programación del código a través de MATLAB
- **Tarea 7:** Capítulo 7
- **Tarea 8:** Capítulo 8
- **Tarea 9:** Capítulo 9, planificación temporal y presupuesto
- **Tarea 10:** Resto de capítulos

A continuación, se muestra la fecha de inicio y fin, y duración de cada una de estas tareas, así como el cómputo total de días en los que se ha trabajado sobre cada tarea:

Tabla 32. Fecha de inicio y fin y duración en días de cada una de las tareas ejecutadas. Fuente: Propia.

Nombre tarea	Fecha de inicio	Duración en días	Fecha de fin
Tarea 1	01-mar	21	22-mar
Tarea 2	15-mar	14	29-mar
Tarea 3	25-mar	25	19-abr
Tarea 4	04-abr	20	24-abr
Tarea 5	10-abr	40	20-may
Tarea 6	02-may	90	31-jul
Tarea 7	15-jul	20	04-ago
Tarea 8	20-jul	30	19-ago
Tarea 9	15-ago	12	27-ago

Tarea 10	25-ago	18	12-sep
-----------------	--------	----	--------

Finalmente se propone el diagrama de Gantt en base a la expuesto en la Tabla 32:

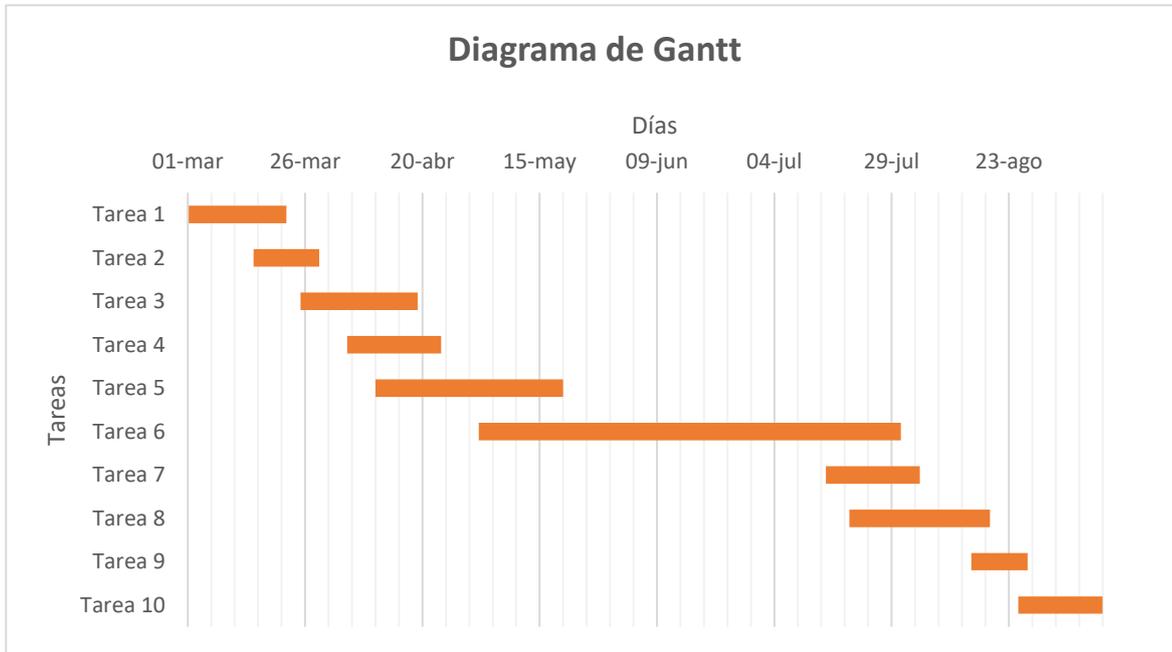


Figura 19. Diagrama de Gantt del TFM. Fuente: Propia.

Presupuesto

El objetivo del presente capítulo es calcular el coste económico de este TFM y que se utilice como base en caso de interés de compra por parte de alguna persona o entidad que requiera de los conocimientos expuestos.

Para calcular el coste económico se considerará el coste de los recursos humanos y el coste de los recursos materiales e informáticos.

En la Tabla 33, se detalla el coste asociado a los recursos humanos. Este coste, incluye las horas dedicadas a la búsqueda y análisis de información, redacción de la documentación, programación del código y reuniones llevadas a cabo.

Tabla 33. Detalle del coste asociado a los recursos humanos. Fuente: Propia.

	Concepto	Dedicación (h)	Coste hora (€/h)	Coste total (€)
Memoria y anexos	Búsqueda y lectura de bibliografía	40	30,00	1.200,00
	Estudio y análisis de ecuaciones y cálculos	50	30,00	1.500,00
	Redacción de la memoria	160	30,00	4.800,00
	Programación del código en MATLAB	130	30,00	3.900,00
	Revisión y maquetado del contenido	30	30,00	900,00
	Impresión de la documentación	0,5	30,00	15,00
Dirección TFM	Gestión, dirección y asesoramiento	40	60,00	2.400,00
			SUBTOTAL	14.715,00

El coste total (impuestos excluidos) vinculado a los recursos humanos es de: 14.175,00 €.

En la Tabla 34, se detalla el coste asociado a los recursos materiales e informáticos, concretamente de los consumos eléctricos y a las licencias de los softwares utilizados.

Tabla 34. Detalle del coste asociado a los recursos materiales e informáticos. Fuente: Propia.

	Concepto	Uds.	Coste unidad (€/Ud.)	Coste total (€)
Memoria y anexos	Impresión y maquetado	119 folios	0,20	23,80
Energía eléctrica	Ejecución del TFM	18,01 kWh	0,35	6,30
Licencias	MATLAB R2021a	1 unidad	2.500,00	2.500,00
	Microsoft Office	1 unidad	150,00	150,00
			SUBTOTAL	2.680,10

El coste total (impuestos excluidos) vinculado a los recursos materiales e informáticos es de: 2.680,10 €.

Finalmente, en la Tabla 35, se suman los dos totales anteriores especificados (base imponible) y se aplican los impuestos:

Tabla 35. Detalle del coste total del TFM. Fuente: Propia.

Concepto	Importe (€)
Coste de los recursos humanos	14.715,00
Coste de los recursos materiales e informáticos	2.680,10
Subtotal	17.395,10
IVA (21%)	3.652,97
Total	21.048,07

El coste total del TFM considerando impuestos es de: 21.048,07 €.

Conclusiones

El presente TFM es una contribución para fomentar el cambio del actual panorama energético y una apuesta por el uso de tecnologías basadas en el aprovechamiento y en la gestión eficiente de los recursos energéticos, lo que permite luchar contra el cambio climático y contra la crisis energética actual. Además, se contribuye a la generación de bibliografía que permite seguir desarrollando las redes multienergéticas.

Durante la ejecución de este trabajo se ha observado que la consideración de la red térmica provoca la aparición de una serie de temperaturas en las líneas de suministro y de retorno que dificultan, notablemente, el análisis de la red multienergética, ya que dependen de otros parámetros que son las incógnitas del sistema, concretamente, de los caudales máxicos que circulan por dicha red. Además, en la red de gas natural también aparecen las S_{ij} , parámetros no constantes que dependen de las presiones nodales de esta red. La consideración de estos parámetros no constantes provoca que no se haya podido utilizar con éxito la rutina FSOLVE de MATLAB, ya que no permite que los parámetros de entrada dependan de las mismas incógnitas que se introducen en esta función y que se vayan actualizando iteración tras iteración. De esta forma, se ha escogido un método numérico iterativo que permitiese analizar la red multienergética propuesta. Se optó por el Newton-Raphson con jacobiano numérico, lo que permitió resolver el sistema, obteniendo el valor de las incógnitas y de los parámetros no constantes. Sin embargo, la utilización de este método en comparación con el propuesto en la Tesis de Abeysekera (Newton-Raphson con jacobiano analítico) supone un incremento de las iteraciones necesarias para resolver el sistema (6 iteraciones frente a 13 iteraciones respectivamente). Sin embargo, este incremento de iteraciones permite ahorrarse las complicaciones de derivar parcialmente de forma analítica cada una de las funciones del sistema con respecto a cada una de las incógnitas del sistema. Por lo tanto, se determina que el método numérico propuesto en este TFM supone una gran ventaja y que el incremento de tiempo (décimas de segundo) que supone realizar más iteraciones es irrelevante frente al ahorro de tiempo que supone preparar el Newton-Raphson con jacobiano numérico frente al Newton-Raphson con jacobiano analítico.

A título personal se considera que el trabajo realizado ha sido enriquecedor en cuanto a conocimientos aportados y que se ha sido capaz de solventar los problemas e imprevistos que fueron apareciendo durante la elaboración del TFM.

Finalmente, se considera que con el presente TFM se da pie futuras líneas de investigación que podrían dotarse del presente trabajo como base o punto de partida. Una de las propuestas que podrían plantearse es el análisis en régimen permanente de redes que contemplen nuevos elementos de acoplamiento con el objetivo de verificar las afectaciones que se obtienen sobre los parámetros de la red analizados en este trabajo, así como añadir la red

energética de hidrógeno (tema de actualidad en auge). También se podría plantear un estudio similar al presente pero que considere un análisis en régimen transitorio (delicado para numerosos elementos tecnológicos). Además, se podrían analizar redes multienergéticas malladas, tanto en régimen permanente como en régimen transitorio.

Agradecimientos

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a Juan José Mesas García por todo lo que me ha enseñado y ayudado durante la realización del TFM. Has sido un excelente profesor y para mí ha sido un orgullo poder trabajar contigo durante mi etapa universitaria.

Agradecer el trabajo a todo el equipo de profesores del Máster Universitario en Ingeniería Industrial de la *Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (Universitat Politècnica de Catalunya)*. También, agradecer el apoyo y cariño a todos los compañeros y amigos del MUEI.

Gracias de todo corazón a mi madre y a mi padre, Juana y Antonio, y a mi hermano, Andreu, por su amor y apoyo incondicional. Gracias a vosotros he podido cumplir mi sueño. Siempre seréis esenciales.

Finalmente, dar las gracias a familiares y amigos que siempre me han animado y seguido en todo este camino.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [1] Comisión Europea. *Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones: Impulsar una economía climáticamente neutra: Una Estrategia de la UE para la Integración del Sistema Energético*. COM(202)299, 08 de julio de 2020.
- [2] España. Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030. *Boletín Oficial del Estado*, 31 de marzo de 2021, núm. 77, páginas 36796 a 37220.
- [3] Comisión Europea. *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Artificial intelligence for Europe*. COM(2018) 237, 25 de abril de 2018.
- [4] United Nations. *Generating power* [en línea]. [Consulta: 02 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://www.un.org/en/climatechange/climate-solutions/cities-pollution>
- [5] European Union. *Decarbonising our energy system to meet our climate goals* [en línea]. Bruselas, 14 de julio de 2021. [Consulta: 03 de marzo de 2022]. ISBN: 978-92-76-39782-3. Disponible en: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_21_3672
- [6] Comisión Europea. *EU Energy System Integration Strategy* [en línea]. 08 de julio de 2020. [Consulta: 03 de marzo de 2022]. Disponible en: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_20_1295
- [7] ABEYSEKERA, Muditha. *Combined analysis of coupled energy networks*. PhD Thesis. Cardiff University, 2016.
- [8] Wikipedia. *Red de Distribución de Energía Eléctrica* [en línea]. [Consulta: 05 de marzo de 2022]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Red_de_distribuci%C3%B3n_de_energ%C3%ADa_el%C3%A9ctrica
- [9] Lucera Energía. *¿Cómo llega el gas natural a casa?* [en línea]. 3 de agosto del 2022. [Consulta: 5 de agosto de 2022]. Disponible en: <https://lucera.es/blog/el-viaje-del-gas-natural>

- [10] DISTRICLIMA. *Guía de l'Usuari*. 1ª edición. Barcelona, 2012. 28 pág. [Consulta: 20 de agosto de 2022]. Disponible en: <https://www.districtlima.com/es>
- [11] Teréga. *What is multi-energy?* [en línea]. [Consulta: 15 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://www.terega.fr/en/lab/what-is-multi-energy>
- [12] O'MALLEY, Mark; KROPOSKI, Benjamin; HANNEGAN, Bryan; MADSEN, Henrik; ANDERSSON, Mattias; D'HAESELEER, William; McGRANAGHAN, Mark F.; DENT, Chris; STRBAC, Goran; BASKARAN, Suresh & RINKER, Michael. *Energy Systems Integration: Defining and Describing the Value Proposition* [en línea]. Golden, CO, United States: NREL, 2016. 12 pág. NREL/TP-5D00-66616. [Consulta: 16 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://doi.org/10.2172/1257674>
- [13] Centro Nacional de Hidrógeno. *Pilas de Combustible* [en línea]. [Consulta: 17 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://www.cnh2.es/pilas-de-combustible/>
- [14] Eni España Comercializadora de Gas, S.A.U. *Newsletter - Qué es el 'Power to gas'. Binomio electricidad y gas* [en línea]. [Consulta: 20 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://www.xn--eniespaa-j3a.com/es/Newsletter/NoticiaNewsletter/power-to-gas-renovable-nl-septiembre-2019?p=SEPTIEMBRE2019>
- [15] BMP GREENGAS. *Key Technology – Power-to-gas*. [en línea]. 23 de diciembre de 2020. [Consulta: 20 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://www.bmp-greengas.com/knowledge/key-technology-power-to-gas/>
- [16] Naturgy. *Las Bombas de Calor* [en línea]. 23 de noviembre de 2018. [Consulta: 21 de marzo de 2022]. Disponible en: https://www.naturgy.es/empresas/blog/sabes_lo_que_es_una_bomba_de_calor
- [17] *Producción de Hidrógeno por reformado de metano con vapor*. Air Liquide [en línea]. 10 de julio de 2018. [Consulta: 21 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://www.engineering-airliquide.com/es/produccion-hidrogeno-por-reformado-metano-con-vapor>
- [18] CCHP: *Combined Cooling, Heat & Power*. Energyst [en línea]. 15 de septiembre de 2016. [Consulta: 22 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://www.energyst.com/news/combined-cooling-heat-power/>
- [19] Thermal Energy Stores. *Energy Saving Trust* [en línea]. 1 de abril de 2022. [Consulta: 01 de mayo de 2022]. Disponible en: <https://energysavingtrust.org.uk/advice/thermal-energy-stores/>

- [20] LIN, Yujing. *How absorption chillers work*. EnergyLink [en línea]. 3 de abril de 2019. [Consulta: 10 de mayo de 2022]. Disponible en: <https://goenergylink.com/blog/how-absorption-chillers-work/>
- [21] ScienceDirect Topics. *Electric chiller* [en línea]. [Consulta: 15 de mayo de 2022]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/electric-chiller>
- [22] COGEN EUROPE. *What is Cogeneration?* [en línea]. [Consulta: 17 de mayo de 2022]. Disponible en: <https://www.cogeneurope.eu/knowledge-centre/what-is-cogeneration>
- [23] HANNA, Richard; GAZIS, Evangelos; EDGE, Jacqueline; RHODES, Aidan; GROSS, Rob. *Unlocking the potential of Energy Systems Integration* [en línea]. Imperial College London - Energy Futures Lab. 40 pág. [Consulta: 01 de abril de 2022]. Disponible en: <https://www.imperial.ac.uk/energy-futures-lab/policy/briefing-papers/paper-2/>
- [24] TOK WIKI. *Matriz de Admitancia Nodal: Contexto y construcción* [en línea]. [Consulta: 15 de abril de 2022]. Disponible en: https://hmong.es/wiki/Ybus_matrix
- [25] MATLAB - MathWorks España. *Resuelva un sistema de ecuaciones no lineales* [en línea]. [Consulta: 10 de julio de 2022]. Disponible en: <https://es.mathworks.com/help/optim/ug/fsolve.html>