

Universidad de Matanzas
Facultad de Ciencias Técnicas
Departamento de Química e Ingeniería Química



Tesis de Grado en opción al Título de Ingeniera Química

**Integración energética en la sección de destilación
atmosférica de una refinería de petróleo**

Autor: Heydi Liliet Rivero Gutiérrez

Matanzas, Cuba
2016

Universidad de Matanzas
Facultad de Ciencias Técnicas
Departamento de Química e Ingeniería Química



Tesis de Grado en opción al Título de Ingeniera Química

**Integración energética en la sección de destilación
atmosférica de una refinería de petróleo**

Autor: Heydi Liliet Rivero Gutiérrez

Tutores: Ing. Roberto Angel Lugo Martínez.

Ing. Yoney López Hervis, DrC.

Matanzas, Cuba
2016

A mis padres...

*... si no podemos hacer nada para cambiar el pasado hagamos algo en el presente
para mejorar el futuro...*

Che

Declaración de autoridad

Yo, Heydi Liliet Rivero Gutiérrez, declaro ser la única autora de esta investigación realizada en la Universidad de Matanzas, como requisito parcial para optar por el título de Ingeniera Química y autorizo que la misma sea utilizada por la mencionada Institución como material de consulta. Para que así conste, firma:

Heydi Liliet Rivero Gutiérrez

Agradecimientos

- ❖ A Mamita y Papá, por ser mi ejemplo e inspiración desde siempre, por darme todo y hacerme quien soy, por ser mi orgullo y lo que más amo en la vida.
- ❖ A mis abuelos Ñeñi, Enguito, Walkiria y Rivero, por quererme, malcriarme y aconsejarme.
- ❖ A Gabriel, por su amor, apoyo y comprensión sobre todo en estos momentos, y por hacerme saber que siempre está ahí para mí.
- ❖ A Sheyla y Pipo, por su alegría y por entender que era más urgente terminar la tesis que ver *Digimon*.
- ❖ A tía Walky y Tomás por su ayuda y su cariño.
- ❖ A mi familia en general, por estar siempre conmigo y animarme en los momentos más difíciles.
- ❖ A Niurka, Eliette, Mima, Pipo, David y Kevin, por ser otra familia para mí.
- ❖ A mis compañeros de aula, por todos los momentos que hemos compartido juntos en estos años de carrera y por los maravillosos recuerdos que llevaré conmigo siempre.
- ❖ A Dayamí, Anita, Leysis, Laurie, Alianny, Nathalie, Yuliet, Lilita, Leonel, Addiel, Eduardo, Basulto y Onel, por demostrarme su amistad incondicional y por quererme como soy.
- ❖ A Yaisys, y en especial a Laura, por ayudarme tanto con la tesis, por animarme y por hacer posible que terminara a tiempo.
- ❖ A todos los profesores de la carrera, por haber contribuido de un modo u otro a mi formación profesional y personal, especialmente a Orozco, Agustín, Santiago, Leiby, Yamilé, Roberto, Yoney, Mayito, Ena, Hassan, Marcelo e Irina.
- ❖ A Roberto, por su dedicación, por trabajar a mi lado, por haber creído en mí y por ofrecerme su confianza. Me siento realmente orgullosa de haber sido su primera diplomante.
- ❖ A Yoney, por brindarme sus conocimientos y su experiencia, y por ser capaz de darme ánimo y mostrarme soluciones ante cada obstáculo.
- ❖ A Adielis (mi tercera tutora), por su ayuda, comprensión y paciencia, por abrirme las puertas de su casa, y sobre todo por sus dotes culinarias.
- ❖ A todos aquellos que se interesaron y preocuparon por la realización de este trabajo.

A todos muchas gracias

Resumen

En la investigación se desarrolla la integración energética a través del método de programación lineal en la sección de destilación atmosférica de una refinería de petróleo, con el propósito de minimizar el consumo de utilidades. Mediante la caracterización del proceso en estudio se definen 35 corrientes energéticas, de las cuales 24 son calientes y 11 son frías. Estas corrientes garantizan un intercambio térmico de 4 517 kW, donde las necesidades de calentamiento presentan un valor de 17 880 kW y las necesidades de enfriamiento 22 398 kW. Se propone una red óptima con 67 intercambiadores de calor que reduce el consumo de portadores energéticos anuales; en el caso del agua de enfriamiento el ahorro es superior al 95% y para el *fuel oil* es 31%, mientras el ahorro de energía eléctrica es de 90%. La nueva red de intercambio de calor garantiza un beneficio anual de 25 millones de CUC, con un plazo de recuperación de seis meses para los equipos que se adquieren y un retorno de 160%.

Abstract

In the investigation, it has developed the energy integration through the method of lineal programming in the section of atmospheric distillation of a refinery of petroleum, with the objective of minimizing the consumption of utilities. By means of the characterization of the process in study are defined 35 energy streams, of which 24 are hot and 11 are cold streams. These streams guarantee a thermal exchange of 4 517 kW, where the heating necessities present 17 880 kW and the necessities of cooling 22 398 kW. It is proposed an optimum net with 67 heat exchangers that decrease the consumption of annual energy bearers; in the case of the cooling water the saving it's upper to 95% and for the fuel oil it's 31%, while the electric power saving is 90%. The new net of heat exchange guarantees an annual profit of 25 million of CUC, with a term of recovery of six months for the equipment that are purchase and a return of 160%.

Tabla de contenidos

Contenido	Página
Introducción	1
Capítulo 1: Análisis bibliográfico	4
1.1. Refinerías de crudos	4
1.1.1. El crudo. Principales productos derivados	4
1.1.2. Importancia de la refinación de crudos	6
1.1.3. Etapas del proceso de refinación	7
1.1.4. Esquemas de refinación	9
1.2. Destilación atmosférica de crudos	9
1.2.1. Fundamentos del proceso	10
1.2.2. Equipos involucrados en el proceso de fraccionamiento	11
1.2.3. Descripción general del proceso	12
1.2.4. Limitaciones	14
1.3. Integración Energética	14
1.3.1. Definición	14
1.3.2. Necesidad de la integración energética en las refinerías de petróleo	15
1.3.3. Importancia de la integración energética	16
1.3.4. Métodos de integración energética	17
1.3.4.1. Método <i>Pinch</i>	17
1.3.4.2. Método de programación matemática	19
1.3.4.3. Método exergético	20
1.3.4.4. Método exergoeconómico	21
1.4. Optimización matemática por programación lineal	22
1.4.1. Definición y elementos fundamentales	23
1.4.2. Aplicaciones de la programación lineal	24
1.5. Conclusiones parciales del capítulo	26
Capítulo II: Materiales y métodos	27
2.1. Descripción del proceso tecnológico	27
2.2. Metodología para la aplicación de la programación lineal	31
2.2.1. Desintegración energética del proceso (etapa preliminar)	32

2.2.2. Identificación de las corrientes energéticas (etapa 1)	32
2.2.3. Extracción de los datos de las corrientes (etapa 2)	33
2.2.4. Selección de la ΔT_{\min} inicial (etapa 3)	34
2.2.5. Construcción del diagrama de intervalos de temperaturas (etapa 4)	35
2.2.6. Construcción del diagrama de cascada (etapa 5)	37
2.2.7. Optimización de las restricciones generales y establecimiento de la función objetivo (etapa 6)	38
2.2.8. Construcción del modelo de transporte ampliado (etapa 7)	38
2.2.9. Distribución de la cantidad de calor a intercambiar (etapa 8)	40
2.2.10. Diseño preliminar de la red de intercambio de calor (etapa 9)	40
2.2.11. Diseño final del diagrama de flujo integrado energéticamente (etapa 10)	41
2.2.12. Análisis económico de la nueva red de intercambio de calor (etapa 11)	42
2.3. Conclusiones parciales del capítulo	46
Capítulo III: Resultados y discusión	47
3.1. Desintegración energética del proceso	47
3.2. Identificación de las corrientes energéticas	47
3.3. Extracción de los datos térmicos de las corrientes	49
3.4. Selección de la ΔT_{\min} inicial	50
3.5. Construcción del diagrama de intervalos de temperaturas	50
3.6. Construcción del diagrama de cascada	51
3.7. Optimización de las restricciones generales y establecimiento de la función objetivo	52
3.8. Construcción del modelo de transporte ampliado	53
3.9. Distribución de la cantidad de calor a intercambiar	54
3.10. Diseño preliminar de la red de intercambio de calor	56
3.11. Diseño final del diagrama de flujo integrado energéticamente	57
3.12. Análisis económico de la nueva red de intercambio de calor	60
3.13. Conclusiones parciales del capítulo	64
Conclusiones	65
Recomendaciones	66
Bibliografía	67
Anexos	76

Introducción

La humanidad depende de la energía para su desarrollo, y el suministro energético para un país dado es el resultado del balance de su producción doméstica, exportaciones e importaciones. En la mayoría de los casos el petróleo y sus productos derivados constituyen las principales fuentes de energía sobre las cuales descansa la confiabilidad del suministro energético (Visbal y Proaño, 2014).

Se plantea que nuestro futuro no depende de una solución única, sino de diversas medidas, entre las que debe destacar la mejora de la eficiencia energética, que consiste en reducir los consumos de energía para un mismo servicio prestado (Pontoni, 2004).

La demanda energética crece de forma continua, especialmente en productos petrolíferos, y se aprecia una disminución del aporte de la energía nuclear y del carbón, mientras que cobran importancia el gas natural y las energías renovables, aunque estas últimas de manera menos acentuada. El precio del crudo se eleva sensiblemente a partir del año 2004. Además, manifiesta variaciones en tiempos de escasez y sobreoferta, y sobre estas fluctuaciones inciden aspectos como la percepción de escasez, los desastres naturales, los conflictos políticos en países productores, o el aumento en los precios de los productos combustibles. La demanda de productos petrolíferos, sin embargo, es inelástica al precio; muestra de ello es que actualmente los precios se muestran a la baja como pocas veces en la historia (Castillo, 2014).

En la actualidad existe total acuerdo en que la justificación social del petróleo deriva de su utilización como carburante de automoción o materia prima para la industria petroquímica y la generación de electricidad, aplicaciones de difícil sustitución. Consumir derivados petrolíferos donde se pueden reemplazar con facilidad por carbón, gas natural, biomasa y energía solar, parece desaprovechar un recurso que, por desgracia, es agotable (Grupo Alfonso Gallardo, 2007).

Resulta por ello de vital importancia el ahorro de este recurso natural y el empleo de tecnologías más eficientes para obtener sus derivados.

En la actualidad, existen más de 660 refinerías en 116 países, que superan los 85 millones de barriles de productos refinados por día (CEPAL, 2013). Los factores que marca la refinación de petróleo en el siglo XX se determinan en respuesta a la constante

presión social por mejorar su calidad de vida y se impulsan, en gran parte, por la industria automotriz y la industria aeronáutica (ICCT, 2011).

Para AIP (2015), una refinería de crudo es un arreglo organizado y coordinado de procesos de fabricación, diseñado para producir cambios físicos y químicos en el crudo, con el objetivo de convertirlo a productos comercializables; los procesos que la integran se han desarrollado en respuesta a las exigencias cambiantes del mercado.

La estructura de una refinería y sus características de funcionamiento se determinan por su ubicación, antigüedad, disponibilidad de fondos para inversiones de capital, petróleos crudos disponibles, demanda del producto (de los mercados locales y/o de exportación), requisitos de calidad del producto, normativa y estándares ambientales, así como las especificaciones y requisitos del mercado para los productos refinados (ICCT, 2011).

En la industria de refinación de crudo existen varias magnitudes críticas a tener en cuenta: la energía, la economía de escala, el personal y el mantenimiento (Guinea, 2006). Según Romero (2011) dichas industrias presentan diferentes esquemas para la refinación de crudo, como son: *topping*, *hydroskimming*, de conversión media (o craqueo) y de conversión profunda (o coquización); en función del tipo de crudo o crudos a tratar, las especificaciones exigidas por el mercado, la demanda de los productos, la tecnología disponible y la flexibilidad requerida.

Los esquemas de refinación se inician por el proceso de destilación atmosférica (luego del tratamiento previo) y representa una etapa clave e imprescindible en la refinación (Kunt, 2010).

La destilación atmosférica es el primer proceso que ocurre en una refinería de petróleo, a la vez que resulta ser la etapa fundamental en este tipo de industrias. Las unidades de destilación son grandes consumidoras de energía calorífica y, de hecho, representan el mayor consumo energético en las refinerías, donde intervienen cuatro elementos fundamentales: los intercambiadores de calor, los hornos, la columna de fraccionamiento y las torres despojadoras (Heredia, 2008).

Castillo (2014) expone que si en un proceso se logran reducir los consumos de utilidades y de energía eléctrica, entonces se obtiene una mayor eficiencia energética y económica por disminución de los costos de operación. Por ello es de gran importancia realizar investigaciones que favorezcan la reducción del consumo energético en las secciones de

destilación atmosférica en refinerías de petróleo, con el objetivo de lograr la mayor eficiencia posible de las mismas. De ahí la necesidad de realizar una integración energética que permita ese fin.

En respuesta a lo que se expresa anteriormente, es posible plantear como **Problema** de la investigación:

¿Cómo reducir el consumo de energía en la sección de destilación atmosférica de una refinería de petróleo?

Para dar solución al problema se establece la siguiente **Hipótesis**:

Si se integran las corrientes del proceso mediante programación lineal se podrá disminuir el consumo de energía en la sección de destilación atmosférica de una refinería de petróleo.

Como **Objetivo General** de la investigación se presenta:

Aplicar la integración energética por el método de programación lineal en la sección de destilación atmosférica de una refinería de petróleo.

Con el propósito de dar cumplimiento al objetivo general, se proponen los siguientes **Objetivos Específicos**:

1. Profundizar en los temas de integración energética.
2. Describir el proceso de destilación atmosférica objeto de estudio.
3. Proponer la red óptima de intercambio de calor que reduzca el consumo energético de la unidad.
4. Evaluar técnica y económicamente la red de intercambiadores de calor propuesta.

Capítulo 1: Análisis bibliográfico

En el presente capítulo se efectúa una búsqueda bibliográfica acerca de los principales aspectos relacionados con la temática a tratar, con el objetivo de desarrollar la fundamentación teórica de la investigación. Para su realización se consultan materiales de las Bibliotecas Científico-Técnicas de la Universidad de Matanzas, de la Biblioteca Virtual de la Facultad de Ingenierías y de la red universitaria. También se emplean buscadores como el *Scholar Google*, se accede a bases de datos remotas disponibles en Internet como *SciELO* y *Elsevier*, y se emplean otros medios de información tales como revistas, tesis de grado, de maestría y doctorales.

1.1. Refinerías de crudos

Con respecto a las plantas de refinación de crudos se plantean las características del mismo como materia prima, los principales productos derivados, la importancia del proceso y sus etapas, así como los esquemas fundamentales de refinación.

1.1.1. El crudo. Principales productos derivados

Uno de los problemas más importantes que enfrenta la humanidad, derivado del modelo tecnológico adoptado, es la dependencia del petróleo como fuente de energía (Pontoni, 2004). Según AIP (2015), el petróleo es una mezcla compleja de líquidos orgánicos y gas natural, que se encuentra naturalmente en la tierra formado hace millones de años. Es un compuesto más denso que el agua, de un olor fuerte y característico. En numerosas ocasiones se utiliza la palabra “crudo” para denominar al petróleo sin refinar. El crudo varía de un yacimiento petrolífero a otro en cuanto a la composición y el color, el cual puede ir de un líquido amarillo pálido de baja viscosidad hasta uno pesado de color negro. Se extrae de la superficie terrestre y después es almacenado en grandes depósitos y enviado mediante oleoductos (vía terrestre) o por los grandes barcos petrolíferos (vía marítima) a las partes del mundo donde es necesario (Alcorta, 2011).

Se conoce que está formado por miles de moléculas diferentes, pero varía en composición en las diferentes partes del mundo en dependencia de la edad y las condiciones de su formación. Según el propio AIP (2015), el crudo está constituido por

una mezcla de hidrocarburos y cantidades relativamente pequeñas de otros materiales como oxígeno, nitrógeno, azufre, sal y agua. Mientras, Lluch (2008) considera que se compone fundamentalmente de carbono (84-87%) e hidrógeno (11-14%), con un pequeño porcentaje de otros elementos como azufre (0-5%), nitrógeno (0-0,2%) y metales integrados en hidrocarburos de estructuras más o menos complejas. Cepero (2013) afirma también que las moléculas de hidrocarburos que lo componen son más complejas a medida que aumenta el punto de ebullición de las mismas, y desde el punto de vista estructural están presentes, en mayor o menor proporción, hidrocarburos parafínicos, aromáticos y nafténicos. Como su formación ha tenido lugar en una atmósfera reductora, anaeróbica, no se encuentran hidrocarburos olefínicos en su composición. Además, reafirma la gran proporción de compuestos hidrogenocarbonados al agregar que algunos crudos contienen hasta un 98% de hidrocarburos, y coincide con AIP (2015) en cuanto a la presencia de oxígeno y especifica que los metales presentes en la mezcla, mencionados por Lluch (2008), son el níquel, el hierro y el vanadio.

El petróleo en su estado natural no puede utilizarse prácticamente en ninguna aplicación, debido a que requiere de altas temperaturas para arder. Con el objetivo de poder aprovecharlo como fuente de energía o materia prima es necesario separarlo en fracciones adecuadas para preparar, a partir de ellas, los productos para las diferentes aplicaciones que requiere el mercado, por lo que es necesario transformarlo en productos de mayor valor agregado (Hernández, 2008). Por esta razón se emplea como materia prima en la industria de refino, y las unidades de tratamiento se diseñan en función de un tipo de crudo específico (Lluch, 2008).

Tanto ICCT (2011), como Barberi (2012) y Pemex (2013) coinciden en que entre los derivados se encuentran: gas licuado de petróleo (GLP) (el cual se utiliza como combustible doméstico e industrial), gasolina (para consumo en los vehículos automotores de combustión interna, entre otros usos), combustible pesado (para hornos y calderas industriales), queroseno (para iluminación y calefacción), combustible *diesel* (de uso común en camiones y buses), materias primas de petroquímicos (como bencina industrial, disolventes alifáticos, polietileno, alquitrán aromático, ácido nafténico, benceno, ciclohexano, tolueno, xilenos mezclados, alquilbenceno, ortoxileno), aceites lubricantes y ceras (materia prima para la producción de velas y similares, ceras para

pisos, fósforos, papel parafinado, vaselinas, etc.), aceite combustible (para generación de energía eléctrica, combustible marino, calefacción industrial y urbana) y asfalto (para pavimentación, techado y como material sellante en la industria de la construcción). Barberi (2012) agrega como subproductos al turbocombustible o turbosina (gasolina para aviones jet, también conocida como Jet-A) y a la gasolina de aviación (para uso en aviones con motores de combustión interna). El Grupo Alfonso Gallardo (2007) y Romero (2011) consideran que otro de los productos típicos de las refinerías es el azufre líquido (que según Hernández (2008) sirve para la vulcanización del caucho, fabricación de algunos tipos de acero y preparación de ácido sulfúrico). Mientras, Guerra (2013) refiere que los gases obtenidos al inicio del proceso (metano y etano) también tienen aplicación como combustible en hornos y calderas.

Entre los subproductos mencionados, los combustibles para transporte son los de mayor valor, mientras que los aceites combustibles y el asfalto son los menos valiosos. Muchos productos refinados, como la gasolina, se producen en diferentes grados, para cumplir con diversas especificaciones y estándares (por ejemplo: índices de octano o contenido de azufre) (ICCT, 2011).

1.1.2. Importancia de la refinación de crudos

Las refinerías son plantas de producción de gran densidad de capital, con sistemas de procesamiento extremadamente complejos. En ellas se convierte el petróleo crudo y otros flujos de entrada en diversos subproductos refinados, mediante la separación del crudo en diferentes fracciones (cada una con un punto de ebullición y distribución de la cantidad de carbono únicos) (Berger y Anderson, 1978). El procesamiento de estas fracciones en productos terminados se realiza mediante transformaciones físicas y químicas (Gary *et al.*, 2007). Mientras, Kraus (2013) ofrece una explicación más detallada, cuando plantea que el proceso de refinación de hidrocarburos consiste en el empleo de sustancias químicas, catalizadores, calor y presión para separar y combinar los tipos básicos de moléculas de hidrocarburos que se hallan de forma natural en el petróleo crudo, transformándolos en grupos de moléculas similares. Es decir, se reorganizan las estructuras y los modelos de enlaces de las moléculas básicas y se convierten en moléculas y compuestos de hidrocarburos con mayor valor.

La industria del petróleo está en constante evolución (Guinea, 2006). La refinación del crudo es un eslabón único y fundamental de la cadena de suministro de petróleo desde el pozo hasta la bomba. El resto de las operaciones le agregan valor, principalmente mediante su traslado y almacenamiento (extracción del petróleo crudo a la superficie, traslado desde el yacimiento petrolífero a los depósitos y luego a las refinerías, traslado de los productos refinados desde las refinerías a las terminales de despacho e instalaciones de productos de consumo final, etc.) (Boyce *et al.*, 2008), pero la refinación lo hace mediante la conversión del petróleo crudo en productos refinados. El principal objetivo económico del proceso es maximizar el valor agregado en la conversión del petróleo crudo en productos terminados (ICCT, 2011).

1.1.3. Etapas del proceso de refinación

El petróleo, una vez en la refinería, es almacenado en depósitos de gran tamaño, donde generalmente se separan los crudos en función de su contenido de azufre. El refino del petróleo se lleva a cabo en instalaciones específicas diseñadas para obtener el máximo rendimiento en cada una de ellas, denominadas “unidades”. Estas se clasifican en: unidades de proceso, de servicios auxiliares y de operaciones fuera del proceso (Grupo Alfonso Gallardo, 2007). Según Kraus (2013) dichas unidades de proceso se clasifican básicamente en: separación, conversión, tratamiento, formulación y mezcla.

En el proceso de separación física no se altera la estructura molecular (Guerra, 2013). El crudo se hace pasar por un horno, donde se calienta y una parte se convierte en vapor, y luego continúa hacia las torres de destilación atmosférica y de vacío (PDVSA, 2011), donde se separa mediante fraccionamiento en grupos de moléculas de hidrocarburos con diferentes intervalos de temperaturas de ebullición, denominados “fracciones” (Kraus, 2013). La destilación del crudo es el punto de partida de cualquier refinería, más allá de su tamaño o configuración total. Es una función específica que afecta a todos los procesos de refinación, desde su origen (ICCT, 2011).

Según Kraus (2013) y AFPM (2015), los procesos de conversión más utilizados para modificar el tamaño y/o la estructura de las moléculas de hidrocarburos son los siguientes: descomposición (división) mediante hidrocraqueo, craqueo térmico y catalítico, coquización y ruptura de la viscosidad; unificación (combinación) mediante

alquilación y polimerización; alteración (rectificación) con isomerización y reformación catalítica; y tratamiento.

Una sección muy importante dentro del proceso la constituye la planta Merox, que tiene como objetivo el tratamiento de solventes, queroseno, gasolina de la unidad de destilación atmosférica y de vacío, viscorreducción y craqueo catalítico, lo cual permite controlar los compuestos azufrados convirtiéndolos en elementos no corrosivos (Garrido, 2010). Los procesos involucrados son: neutralización de ácidos nafténicos, separación del agua, reacción con oxígeno en presencia de catalizador (organometálico de cobalto sobre carbón activado en medio alcalino), separación de la soda, lavado, filtrado y secado (ANCAP, 2013).

Una refinería moderna debe contar con infraestructura suficiente para mantener la continuidad de su operación (Pemex, 2013). Según Romero (2011), las operaciones más habituales de soporte al procesamiento de hidrocarburos son: la generación de calor y energía, la recuperación de residuos ligeros, la eliminación del agua amarga, el tratamiento de residuos sólidos, aguas residuales y de proceso, la producción de hidrógeno, la recuperación de azufre, el tratamiento de gases ácidos y gas residual, el movimiento de productos, el almacenamiento en depósitos, la expedición y manipulación, las llamas y sistemas de descarga de presión, los hornos y calentadores, las alarmas y sensores, entre otros. Kraus (2013) plantea que entre las instalaciones y sistemas que no forman parte del proceso están los sistemas de lucha contra incendios, de abastecimiento de agua y de protección, controles de ruido y contaminación, laboratorios, salas de control, almacenes, e instalaciones de mantenimiento y administrativas.

Un esquema del proceso de refinación de crudo, ofrecido por OSHA (1996), se puede observar en el **Anexo 1**.

Al criterio de Pemex (2013) la refinación de petróleo requiere una serie de insumos adicionales, tales como: gas natural, energía eléctrica, agua (que se emplea básicamente como un medio de enfriamiento en los procesos y como suministro a las calderas generadoras de vapor), isobutano (materia prima de las plantas de alquilación), ácidos (para catalizar las plantas de alquilación) y ácido sulfúrico y sosa cáustica como materias primas para la obtención de agua desmineralizada en la generación de vapor.

1.1.4. Esquemas de refinación

ICCT (2011) plantea que cada refinería tiene una estructura física diferente, así como determinadas características operativas y una economía particular. Para Romero (2011) se denomina “esquema de refino” al conjunto de procesos que constituyen una refinería de petróleo y opina que el mismo puede variar de unas refinerías a otras en función del tipo de crudo o crudos a tratar, las especificaciones exigidas por el mercado, la demanda de los productos, la tecnología disponible y la flexibilidad requerida.

- Las refinerías con unidades de destilación atmosférica o *topping* sólo realizan la destilación del crudo y ciertas operaciones de apoyo esenciales.
- Las refinerías con esquema de *hydroskimming* (**Anexo 2**) no sólo incluyen la destilación del crudo y los servicios de apoyo, sino que agregan el reformado catalítico, diferentes unidades de hidrotratamiento y mezcla de productos. Estos procesos permiten controlar el contenido de azufre de los productos refinados.
- Las refinerías de conversión media (o craqueo) incluyen no sólo todos los procesos presentes en las que poseen esquema de *hydroskimming*, sino también, y lo que es más importante, el craqueo catalítico y/o hidrocraqueo. Estas tienen la capacidad de mejorar los patrones de rendimiento natural de los crudos que procesan.
- Las refinerías de conversión profunda (o coquización) son, según lo indica su nombre, una clase especial de refinerías de conversión, donde se incorpora la coquización. Las que poseen suficiente capacidad de coquización destruyen básicamente todo el aceite residual de sus crudos para refinación y los convierten en productos livianos.

En los Estados Unidos y otros países, como: Brasil, China, India y México, las refinerías de conversión media y de conversión profunda representan más del 95% de la capacidad total de producción de crudo (ICCT, 2011).

1.2. Destilación atmosférica de crudos

Para una mejor comprensión del proceso de destilación atmosférica se presentan a continuación los fundamentos del proceso, los equipos tecnológicos involucrados, las variables fundamentales, la descripción general de dicho proceso de separación y sus principales limitaciones.

1.2.1. Fundamentos del proceso

La destilación es un proceso fundamental en la industria de refinación del petróleo, debido a que permite hacer una separación de los hidrocarburos aprovechando las propiedades físico-químicas de las materias primas para separarlas en fracciones de diferentes características, sin introducir cambios en la estructura química original de los componentes (IMP, 2014).

Seader y Henley (1998) y Parkash (2003) mencionan que la destilación como proceso de separación de mezclas líquidas es el más difundido a nivel industrial, al ser el más estudiado, el más económico y por tanto, el más desarrollado tecnológicamente. Mientras, Morlote (2012) plantea que el empleo de calor como medio de separación hace que el estudio de la destilación sea relativamente sencillo.

Para Kunt (2010) la destilación atmosférica es el primer proceso de refino al que es sometido un crudo (luego del tratamiento previo) y representa una etapa clave e imprescindible en la refinación. La destilación de un crudo en cualquiera de sus fracciones no genera compuestos puros sino grupos de estos, denominados indistintamente cortes y fracciones.

Este proceso se basa en las diferencias de volatilidades, porque se realiza aprovechando los diferentes puntos de ebullición de los componentes del crudo. Es por esta razón que en las columnas fraccionadoras se facilitan las condiciones termodinámicas para obtener o condensar los combustibles perfectamente especificados (Cabrera *et al.*, 2012).

El objetivo de la sección o unidad de destilación atmosférica es extraer los componentes hidrogenocarbonados presentes en el crudo de forma natural, donde se obtienen combustibles terminados y cortes de hidrocarburos que serán procesados en otras unidades para convertirlos en productos más valiosos. Para que se produzca la separación o fraccionamiento de los cortes se debe alcanzar el equilibrio entre la fase líquida y la fase vapor, de modo que los componentes más livianos o de menor peso molecular se concentren en la fase vapor y los más pesados en la líquida. Las unidades se diseñan para que dicho equilibrio se establezca de forma controlada y durante el tiempo necesario para obtener los productos deseados (Gerardo, 2010).

El equilibrio depende principalmente de los parámetros termodinámicos presión y temperatura del sistema, razón por la cual se consideran como variables del proceso todas aquellas que puedan afectarlo. Según Martínez (2007), las mismas son:

- Temperatura de salida de crudo del horno
- Temperatura en la zona flash
- Presión en el tope de la torre
- Temperatura en los platos de retiro
- Temperatura en el tope
- Temperatura en el fondo de la torre
- Nivel de líquido en tambor acumulador de tope
- Nivel de líquido en el fondo de la torre
- Vapor de despojamiento

1.2.2. Equipos involucrados en el proceso de fraccionamiento

La unidad donde se lleva a cabo la destilación atmosférica es una enorme columna que puede medir hasta 60 metros de altura. El interior de la misma se divide en una serie de platos agujereados y colocados en posición horizontal (Repsol, 2012) (**Anexo 3**). En la sección de tope (o de condensación) los vapores de tope son condensados en un intercambiador de calor que utiliza agua como medio de enfriamiento, mientras que la sección de fondo (o de despojamiento) posee un rehervidor que introduce calor en el fondo de la torre mediante el uso de parte de la corriente que sale del fondo y que es regresado a la columna (Cabrera *et al.*, 2012). Su misión es conseguir que las corrientes ascendentes de vapor y las descendentes de líquido entren en contacto y se produzca una mejor separación (Repsol, 2012). Frente a otras operaciones de transferencia de masa, la destilación presenta la gran ventaja de que no necesita la adición de otros componentes para efectuar la separación (Polledo, 2011).

Según PDVSA (2007), el crudo debe ser sometido a un proceso de calentamiento aprovechando el calor contenido en las corrientes de productos, por lo cual es necesario el uso de intercambiadores de calor, así como de hornos capaces de suministrar suficiente energía calórica faltante bajo un estricto control de temperatura antes de hacer su entrada a la torre de fraccionamiento. También deben protegerse los equipos de la

corrosión debida a las sales que posee el crudo, para lo cual existen ciertos equipos que remueven sales y agua (desaladores). Dichas impurezas podrían acortar o interrumpir las operaciones, dañar los catalizadores, taponear y corroer los condensadores de tope, etc.; incluso (yendo más allá de la refinería) podrían llegar a inutilizar los equipos que usan combustibles o lubricantes contaminados. Al precalentar la carga se logra un mejor funcionamiento de los desaladores y un ahorro de combustible en el horno. De igual manera se necesita un tanque de alimentación, debido a que en una torre de destilación la carga debe cumplir con los requisitos establecidos en el diseño de la misma y debe ser de constitución homogénea.

1.2.3. Descripción general del proceso

El esquema general de una unidad de destilación atmosférica se puede observar en el **Anexo 4**. A la torre de destilación atmosférica (o unidad de *topping*) entra el crudo libre de agua y otras impurezas (como sales) que se eliminan previamente, y calentado hasta una temperatura de 643 K (Repsol, 2012). La presión de trabajo es 101,3 kPa (Gerardo, 2010). No obstante, Díaz (2011) aclara que la temperatura es variable de acuerdo al tipo de crudo, rendimiento de destilados, presión de operación, y su intervalo máximo de operación limitada es de 623–723 K. Indica también que se debe trabajar con presiones no mayores de 5 atm, mientras que Guerra (2015) plantea que la presión debe oscilar entre 40,5 y 557,3 kPa.

Según PDVSA (2011), en estas torres los vapores suben desde la parte inferior hasta llegar a las bandejas, ubicadas en distintos niveles. Al subir los vapores, se van enfriando (perdiendo calor), hasta que se depositan en sus respectivos platos. En estos, cada sustancia tiene su lugar determinado, mientras que el resto del petróleo que no se evaporó queda en la base. Cada plato actúa como una barrera al paso del vapor hacia la parte superior de la columna (Cabrera *et al.*, 2012).

La vaporización o fase vapor se produce en el horno y zona de carga de la columna fraccionadora. En el primero se transfiere la energía térmica necesaria para que se produzca el cambio de fase, mientras que en la llamada zona de carga se reduce la presión del sistema, lo que ocasiona el flasheo de la carga y se obtiene la vaporización definitiva (Gerardo, 2010).

Cabrera *et al.* (2012) explican que el grado de separación depende del número de platos que tiene la columna. La misma opera con varias salidas laterales para extraer la fracción condensada correspondiente y obtener el producto con una determinada calidad.

En este proceso de separación física se obtienen individualmente las distintas fracciones que forman el crudo, cada una con un intervalo de puntos de ebullición diferente (Repsol, 2012). Según Martínez (2007), dichas fracciones se mencionan a continuación:

- Gas Combustible (Fuel Gas): Constituido por metano, etano y etileno. Por el contenido de mercaptanos se envía a la unidad de Merox. Punto de ebullición de 273 K.
- GLP o Gas Licuado de Petróleo: Constituido por propano y butano. Pueden ser separados para la comercialización de los productos en forma individual. Intervalo de ebullición de 231 a 273 K.
- Gasolina o Nafta Liviana: Constituida por cadenas de hidrocarburos C5 y C6. Intervalo de ebullición de 305 a 361 K. Se envía a la unidad de isomerización.
- Gasolina o Nafta Pesada: Constituida por cadenas de hidrocarburos C7 a C11. Intervalo de ebullición de 361 a 466 K. Se envía al reformador catalítico.
- Queroseno o Jet Fuel: Constituido por cadenas de hidrocarburos C10 a C14. Intervalo de ebullición de 466 a 544 K. Se envía a la unidad de Merox.
- Gasoil Liviano: Constituido por cadenas de hidrocarburos C13 a C24. Intervalo de ebullición de 544 a 594 K. Se envía a hidrotratamiento o hidrodeshidrosulfuración.
- Gasoil Mediano: Constituido por cadenas de hidrocarburos C13 a C24. Intervalo de ebullición de 594 a 700 K. Se envía a hidrotratamiento o craqueo catalítico.
- Residuo Atmosférico: Constituido por cadenas de hidrocarburos mayores de 25 átomos de carbono (C25+). Intervalo de ebullición superior a 700 K. Se envía a destilación al vacío.

Dichos intervalos de puntos de ebullición de los componentes en la mezcla no son exactos. Por ejemplo, Guerra (2015) menciona valores distintos para algunos de ellos, aunque no se encuentran demasiado distantes:

- Gasolina: 333-453 K
- Queroseno: 433-533 K
- Gasoil liviano 523-583 K
- Gasoil pesado: 573-653 K

- Residuo largo: mayor que 643 K

Se debe tener en cuenta que tales imprecisiones pueden estar influenciadas por los parámetros citados al inicio por Díaz (2011), relacionados fundamentalmente con la presión de operación y el tipo de crudo.

1.2.4. Limitaciones

La unidad de destilación atmosférica (y de destilación en general) constituye el mayor consumidor de energía de una refinería de crudo, según Barker (2007) y Castillo (2014). Además, no es posible destilar en ella los crudos pesados. Gran parte del crudo procesado en la torre de destilación atmosférica no se vaporiza, ya que para ello se necesitaría elevar la temperatura de trabajo por encima del umbral de descomposición térmica. Es decir que dicho residuo no se puede destilar en condiciones normales porque se descompone, por lo que es necesario enviarlo a otra columna de destilación, esta vez al vacío, la cual permite separar distintos compuestos (Repsol, 2012).

El denominado “crudo reducido”, se bombea a la unidad de vacío donde se reduce la presión a 2,6 kPa, lo que permite destilar a mayores temperaturas sin descomponer la estructura molecular (Gerardo, 2010).

Los diseños internos de algunas torres de vacío se diferencian de los de las torres atmosféricas, pues en lugar de platos se utiliza relleno al azar (Cabrera *et al.*, 2012).

1.3. Integración Energética

Dada la importancia de la integración energética, se muestra su definición según diversos autores, se plantea su importancia y se especifica su necesidad en las refinerías de petróleo; así como se enuncian y desarrollan brevemente los principales métodos que permiten efectuar dicha integración: método *Pinch*, de programación matemática, exergético y exergoeconómico.

1.3.1. Definición

Según la Agencia Internacional de Energía (IEA, 1993), la integración de procesos (IP) consiste en una serie de métodos sistemáticos y generales para diseñar sistemas de producción integrados, que oscilan desde procesos individuales hasta emplazamientos

totales, con énfasis especial en el uso eficiente de energía y en reducir los efectos ambientales.

Al respecto, El-Halwagi (1997) plantea que un proceso químico es un sistema integrado de unidades y corrientes interconectadas, y debe ser tratado como tal. En vista de la fuerte interacción entre las unidades de proceso, corrientes y objetivos, la integración de procesos ofrece un marco de referencia único para comprender fundamentalmente los elementos globales del proceso, determinar metódicamente sus objetivos de desempeño y tomar decisiones sistemáticamente para la realización de los mismos.

Según NAMP (2003), la integración de procesos es la síntesis de control, ingeniería, modelación y simulación de procesos con herramientas que pueden lidiar con las grandes cantidades de datos operacionales ahora disponibles por los sistemas de información de proceso. Es un área emergente, que ofrece la promesa de control y gestión mejorada de eficiencias operacionales, uso de energía, impactos ambientales, efectividad de capital, diseño de procesos y administración de operaciones.

1.3.2. Necesidad de la integración energética en las refinerías de petróleo

Para su adecuado funcionamiento y prestación de servicios, las refinerías de petróleo utilizan grandes cantidades de energía distribuidas de la siguiente manera: de combustible (directamente aplicado a los numerosos hornos y calderas que la integran), de energía eléctrica (utilizada esencialmente para accionamiento de motores) y de calor (como consumos grandes de vapor y agua utilizados en los intercambiadores de calor para transferir o sustraer energía del crudo).

El ahorro energético es el problema más importante en la industria de refinación y petroquímica, asociado también a otros, como: costos, regulaciones ambientales y relaciones sociales (Visbal y Proaño, 2014).

Sobre esto, Pérez (2008) plantea que las tendencias de la industria petrolera consideran utilizar al máximo equipos y procesos existentes para la solución de problemas operativos de inmediato, situación que permite el desarrollo y rentabilidad de muchos proyectos bajo estas condiciones.

1.3.3. Importancia de la integración energética

La sociedad actual basa su desarrollo en el consumo de recursos energéticos no renovables. A escala mundial, el análisis de la tendencia del consumo energético de las dos últimas décadas indica un incremento del orden de 45% para el período 2006-2030 (IEA, 2008). Es válido mencionar que siempre al pasar de una fuente energética a otra se ha registrado un incremento del consumo de energía *per cápita*, así como de su consumo global (Bachmann y Mensing, 2010).

Según CEPAL (2013), en la operación de plantas industriales los costos energéticos representan valores de por lo menos el 13% del costo total de producción, lo cual representa un gran incentivo para explotar los conceptos de uso eficiente de la energía. En el sector industrial existen muchas aplicaciones que demandan simultáneamente calor (en forma de agua caliente, vapor, agua fría, etc.) a diferentes temperaturas, que pueden atenderse satisfactoriamente con instalaciones de cogeneración.

Para Garrido (2010) y Domínguez (2014) la integración de procesos es un enfoque eficaz que permite a las industrias aumentar su rentabilidad, a través de reducciones en el consumo de energía, agua y materias primas, reducción en la emisión de gases de efecto invernadero y en la generación de residuos.

Acerca de esto, Braccia *et al.* (2013) consideran que la integración energética es una de las etapas más importantes en el diseño de cualquier proceso industrial. Si esta se realiza correctamente permitirá disminuir costos tanto en su instalación como en el funcionamiento normal de la misma.

Resultados de investigaciones anteriores (Puerta *et al.*, 2004) demuestran que la integración energética de procesos es viable, tanto técnica como económicamente, dado que pueden ser satisfechas las demandas de vapor y electricidad durante todo el año, siempre que se tomen en cuenta una serie de variables (variables de integración) que tienen alta influencia en las principales características termoenergéticas de los procesos integrados energéticamente (variables de decisión).

1.3.4. Métodos de integración energética

Para hacer frente a uno de los grandes desafíos que tiene la industria de procesos químicos en la actualidad: maximizar el ahorro de energía, se han desarrollado diversos métodos de integración energética de procesos (Garrido, 2010).

Según Gundersen (2000), los diferentes métodos de integración de procesos pueden clasificarse en:

- Reglas heurísticas: están enfocadas en la intuición y experiencia ingenieril.
- Sistemas basados en el conocimiento: formaliza las reglas heurísticas en automáticas directrices o metodologías para resolver un problema determinado mediante un cálculo rápido y aproximado.
- Métodos termodinámicos: se basan en la visión física del proceso o sistema.
- Métodos de optimización: utilizan modelos y algoritmos matemáticos de optimización que describen al proceso en cuestión, implementados en computadoras para facilitar la rapidez de los resultados. Pueden ser estocásticos o de programación matemática.

El enfoque de las reglas heurísticas está dado por la experiencia del ingeniero y su intuición, mientras que los sistemas basados en el conocimiento intentan formalizar las reglas heurísticas dentro de las pautas de la automatización.

Los métodos termodinámicos pueden ser clasificados en:

- Métodos basados en el análisis de la Primera Ley de la Termodinámica (tecnología *Pinch*, métodos basados en la programación matemática).
- Métodos basados en el análisis de la Segunda Ley de la Termodinámica (análisis exergético).
- Métodos basados en la combinación del análisis económico y la Segunda Ley de la Termodinámica (análisis exergoeconómico).

1.3.4.1. Método *Pinch*

Entre las metodologías de integración de procesos, el análisis de *Pinch* es sin duda el más utilizado (Linnhoff *et al.*, 1982). Su éxito se debe a la simplicidad de sus conceptos subyacentes y especialmente a los más espectaculares resultados que ha obtenido en numerosos proyectos en todo el mundo (Garrido, 2010).

Según Escobar (2011), el diseño de estructuras de redes de intercambiadores de calor mediante el método *Pinch* es uno de los más empleados y difundidos. En el mismo se realiza la integración energética de manera secuencial en base a conocimientos heurísticos, obteniendo el mínimo número de intercambiadores de calor, la mínima demanda de servicios auxiliares y el mínimo costo (Braccia *et al.*, 2013). Se plantea por Visbal y Proaño (2014) que la tecnología *Pinch* presenta una metodología para el análisis sistemático de los procesos químicos y los servicios auxiliares que se basa en la Primera y Segunda Ley de la Termodinámica. Con la primera se calculan los cambios de entalpía en las corrientes que pasan por los intercambiadores de calor, mientras el uso de la segunda determina la dirección del flujo de calor (el calor sólo puede influir en la dirección de caliente a frío). En la práctica una corriente caliente sólo puede ser enfriada a una temperatura definida por el acercamiento mínimo de temperaturas (mínima diferencia permitida, ΔT_{\min}) del intercambiador de calor. El nivel de temperatura en el cual ΔT_{\min} se observa en el proceso, es llamado “punto *pinch*”; el que define la fuerza motriz mínima permitida en un intercambiador de calor. Castillo (2007) plantea que en este punto se igualan los calores que van de la parte fría a la caliente.

El análisis *pinch* es usado para identificar costos de energía y costo capital de redes de intercambio de calor para un proceso. El mismo es un procedimiento riguroso para disminuir el consumo de servicios energéticos en un proceso y se basa en el análisis termodinámico de la recuperación de calor entre las corrientes calientes (oferta) y las corrientes frías (demanda) del proceso, de modo que se consiga el máximo aprovechamiento de calor con el mínimo número de intercambiadores de calor (Cuesta, 2009).

Su empleo está orientado al diseño de redes de intercambio de calor complejas en la industria, tal como plantean El-Halwagi (2006), Kemp (2007) y Smith *et al.* (2010). La tecnología *Pinch* se fortalece a través de su desarrollo y aplicación en distintas partes del mundo, donde produce enormes ahorros de energía y capital. La mayoría de los procesos industriales en los países desarrollados se diseñan mediante los conceptos de la tecnología *Pinch*, aplicada también de forma exitosa al mejoramiento de la eficiencia energética en plantas instaladas (Pérez, 2008).

1.3.4.2. Método de programación matemática

Según Montes de Oca y Domínguez (2008), una de las metodologías que se ha vuelto imprescindible en la actualidad para diseñar una red de intercambio de calor es la programación matemática. La misma permite desarrollar herramientas automáticas que sirven de base en la exploración de alternativas y la optimización en el diseño, con lo cual puede llevarse a cabo la integración energética de una red. Este método consiste en tres pasos fundamentales:

- Desarrollo de alternativas (selección de la solución óptima).
- Formulación del programa matemático que involucre a las variables continuas y discretas para la selección de los niveles de operabilidad y configuración respectivamente.
- Solución del modelo de optimización del cual se obtendrá la solución óptima.

NAMP (2003) plantea que la programación matemática utiliza modelos y algoritmos matemáticos de optimización que describen al proceso en cuestión, implementados en computadoras para facilitar la rapidez de los resultados. Los modelos empleados contienen una serie de elementos claves (variables, parámetros, restricciones y relaciones matemáticas) e involucran uno o más criterios de funcionamiento, representados por una función objetivo. Esta función puede ser la minimización (de costos, tiempo, riesgo, error, etc.) o la maximización (utilidades, ganancias, velocidad, eficiencia, etc.), en dependencia del criterio a considerar.

De igual forma, Laukkanen (2003) considera que es primordial prestar la debida atención a la modelación y formulación del problema; de lo contrario no se llegará a una solución rápida mediante la aplicación de software, o no se obtendrán los resultados esperados.

Según expone NAMP (2003), existen diferentes clases de problemas de optimización: programación lineal y no lineal (LP y NLP, respectivamente), programación lineal de enteros mezclados (MILP) y programación no lineal de enteros mezclados (MINLP). Cuando es posible, se utilizan los programas lineales (LP o MILP), ya que garantizan soluciones globales, mientras que los problemas MINLP también caracterizan a muchas aplicaciones en ingeniería. La optimización o programación matemática tiene aplicaciones en la síntesis de procesos (redes de intercambio de calor (HEN), redes de intercambio de masa (MEN), secuencias de destilación, sistemas basados en reactores,

sistemas de servicios, sistemas de procesos totales), el diseño, programación y planeación del proceso, la interacción de diseño y control, el diseño molecular de producto, la ubicación y asignación de las instalaciones, la planeación y programación de las instalaciones y la topología de redes de transporte.

1.3.4.3. Método exergético

La exergía es la cantidad de trabajo que puede ser extraído por un consumidor de energía externo durante una interacción reversible entre el sistema y sus alrededores hasta que se alcanza un completo equilibrio. La exergía depende de los estados relativos de un sistema y sus alrededores, y cuanto menor sea la pérdida de esta mejor será el proceso. Entre las irreversibilidades que pueden presentarse en un proceso se encuentran: fricción, libre expansión, mezcla de dos gases, resistencias eléctricas, deformaciones inelásticas de sólidos y reacciones químicas. Se demuestra que es casi imposible la eliminación de estas, por lo cual solamente podrán ser minimizadas en el proceso (Mateos, 2004).

En correspondencia con lo planteado anteriormente, Laukkanen (2003) considera que la pérdida exergética proporciona una medida cuantitativa, generalmente aplicable, del proceso o la ineficacia de un sistema.

Como se conoce, la exergía es la parte de la energía transformable en trabajo útil. Se plantea por Montes de Oca (2005) que la energía mecánica y la eléctrica son totalmente exergía, puesto que no existen limitaciones teóricas para su transformación total en trabajo útil. Sin embargo, la energía térmica sólo es transformable en trabajo útil con un rendimiento limitado, que depende fundamentalmente de las temperaturas del foco caliente y del ambiente, por lo que en la mayoría de los casos resulta más interesante conocer la exergía disponible que la energía. Considera también que el balance exergético surgió para unificar los diferentes flujos energéticos implicados en un proceso con el grado de irreversibilidad existente en el mismo. Por esto, el análisis exergético es una metodología para aplicar las consecuencias de las leyes de la termodinámica al análisis y diseño de sistemas relacionados de alguna manera con la energía y sus flujos. Su generalidad le permite tratar tanto procesos cíclicos como no cíclicos, procesos en máquinas térmicas y procesos de la ingeniería química; así como considerar en su

totalidad una instalación, y cada uno de los procesos que en ella tienen lugar por separado. Renedo y Fernández (2008) y Muñoz (2009) coinciden en afirmar que el análisis exergético resulta de interés principalmente en situaciones donde se realiza trabajo sobre o por el sistema.

La mayor desventaja del análisis exergético es que se necesitan los valores de la entropía para los diferentes flujos y obtenerlos puede hacerse muy difícil. Esto se hace realmente importante en la determinación de la exergía química, donde es muy difícil o incluso imposible obtener estos valores. Otra desventaja es que la ineficacia obtenida del análisis exergético no dice nada sobre cómo evitarla o si es en absoluto evitable (Laukkanen, 2003).

Aunque el análisis exergético minimiza las ineficacias de un sistema o proceso, no considera la economía de las alternativas evaluadas, por lo que existe la posibilidad de obtener soluciones que son termodinámicamente eficaces pero económicamente impracticables (Montes de Oca, 2005).

1.3.4.4. Método exergoeconómico

Los métodos de análisis que combinan las consideraciones termodinámicas y las económicas, para brindar una información no disponible a partir de los análisis convencionales de energía y evaluación económica se agrupan bajo el término de termoeconomía o exergoeconomía (Romero, 2005). La termoeconomía intenta superar esta desventaja del análisis exergético básico, basada en proporcionar un valor monetario a las ineficacias termodinámicas.

Este método proporciona a los diseñadores u operadores de plantas información no disponible a través del análisis de energía convencional y de las evaluaciones económicas, pero que es crucial para el diseño y operación de una planta. Así, la exergoeconomía puede definirse como la minimización de los costos ayudado por la exergía (Montes de Oca, 2005).

Un estudio realizado por Lugo (2014) reporta que en la literatura se registran diferentes metodologías para el cálculo exergoeconómico, pero todas tienen una característica en común: reconocen que la exergía es la variable de valor, y asignan costos o precios a las variables exergéticas. Las diferencias quedan en los datos que cada metodología

requiere, en el procedimiento para analizar y, eventualmente, en la optimización el sistema de energía. Pueden diferir también en la complejidad del sistema que puede manejarse, y en la cantidad y calidad de los resultados. Entre dichas metodologías se encuentran los diagramas de eficiencia producto/costo, el análisis de cálculos exergoeconómicos y la contabilidad exergoeconómica.

La exergoeconomía es usada para mejorar la efectividad de los costos en nuevos sistemas, el desempeño y la efectividad de los costos de sistemas existentes y para ayudar en la decisión con relación al mantenimiento de estos sistemas, y de esta manera asignar fondos de investigación y desarrollo (Tsatsaronis, 2007).

Por estas razones los métodos exergético y exergoeconómico tienen una amplia y directa aplicación en la industria, debido a que permiten evaluar e identificar las ineficiencias del proceso en cuestión, al realizar una evaluación directa de los costos o gastos causados por los diferentes puntos de irreversibilidad (exergía perdida) en el sistema. Se desarrollan posibles modelos de energía-utilización futuros relacionados con las soluciones potenciales a los problemas medioambientales actuales, tecnologías de energías renovables y sus relaciones con el desarrollo sustentable, y la utilización de los principios termodinámicos vía exergía, para evaluar sistemas de energía y tecnologías en beneficio medioambiental (Romero, 2005).

Una vez que se plantean los criterios de los distintos autores acerca del fundamento, el nivel de dificultad y la utilización de los principales métodos de integración energética, se puede considerar el de programación matemática como el más adecuado para dar cumplimiento a uno de los principales objetivos de la investigación: obtener la red óptima de intercambio de calor que reduzca el consumo energético de la unidad, el cual a pesar de sus desventajas es un método capaz de optimizar el resultado.

1.4. Optimización matemática por programación lineal

En el epígrafe bajo estudio se presentan los elementos fundamentales y las principales aplicaciones de la programación lineal, dada su importancia como método al permitir la obtención del resultado óptimo.

1.4.1. Definición y elementos fundamentales

La programación lineal constituye un algoritmo a través del cual se resuelven situaciones reales en las que se pretende identificar y resolver dificultades para aumentar la productividad respecto a los recursos (principalmente los limitados y costosos), lo que aumenta sus beneficios (Salazar, 2012).

El objetivo primordial de la programación lineal es optimizar (minimizar o maximizar) una función lineal, denominada función objetivo, de tal forma que las variables de dicha función estén sujetas a una serie de restricciones que se expresan mediante un sistema de inecuaciones lineales (Gundersen, 2000).

Para Salazar (2012) los resultados del proceso de optimización se convierten en un respaldo cuantitativo de las decisiones frente a las situaciones planteadas, en las cuales sería importante tener en cuenta diversos criterios administrativos tales como: los hechos, la experiencia, la intuición y la autoridad.

El primer paso para la solución de un problema mediante programación lineal consiste en la identificación de los elementos básicos de un modelo matemático, que son: la función objetivo, las variables de decisión y las restricciones. Luego se procede a la determinación de los mismos, para lo cual se plantean los siguientes pasos:

- Definir el criterio de efectividad
- Identificar y definir las variables de decisión
- Identificar y definir las restricciones
- Plantear la función objetivo

La función objetivo tiene una estrecha relación con la pregunta general que se desea responder. Si en un modelo resultasen distintas preguntas la función objetivo se relacionaría con la de nivel superior, es decir, la fundamental.

Las variables de decisión se identifican a partir de una serie de preguntas derivadas de la cuestión principal. Estas son, en teoría, factores controlables del sistema que se modela, y como tal, pueden tomar diversos valores posibles, de los cuales se precisa obtener su valor óptimo, que contribuya a conseguir el objetivo de la función general del problema.

Las restricciones de un problema de programación lineal son todas aquellas que limitan la libertad de los valores que pueden tomar las variables de decisión; es decir, todas las

limitantes tanto físicas como de contexto que condicionan los valores que en un momento dado podrían tomar estas.

Según plantean Felipe *et al.* (1983), el problema de programación lineal debe constar normalmente de un número infinito de soluciones posibles. El objetivo al resolver el problema consiste en determinar de entre todas las soluciones posibles, la solución óptima.

Según Vitutor (2014), cuando se analiza el problema gráficamente puede plantearse que cada desigualdad del sistema de restricciones determina un semiplano. El conjunto intersección de todos los semiplanos formado por las restricciones determina un recinto, acotado (poligonal) o no, que recibe el nombre de región de validez o zona de soluciones factibles. Mientras, el conjunto de los vértices del recinto se denomina “conjunto de soluciones factibles básicas”, y el vértice donde se presenta la solución óptima se denomina “solución máxima (o mínima, según el caso)”. El valor que toma la función objetivo en el vértice de solución óptima se nombra “valor del programa lineal”.

Sin embargo, Felipe *et al.* (1983) consideran que mediante el planteamiento del problema como una programación lineal y aplicando el algoritmo *Simplex*, es más rápido y sencillo encontrar la solución óptima. Esto se debe a que dicha teoría reduce drásticamente el número de posibles soluciones óptimas que deben ser revisadas.

1.4.2. Aplicaciones de la programación lineal

El verdadero valor de las técnicas de programación lineal consiste en poder aplicarlas a problemas reales (Felipe *et al.*, 1983).

Para González (2014), este constituye un importante campo de la optimización por varias razones. Muchos problemas prácticos de la investigación de operaciones pueden plantearse como problemas de programación lineal. Algunos casos especiales, tales como los problemas de flujo de redes y de mercancías se consideraron en el desarrollo de las matemáticas lo suficientemente importantes como para generar por sí mismos mucha investigación sobre algoritmos especializados en su solución. La programación lineal es muy usada en la microeconomía y la administración de empresas, ya sea para aumentar al máximo los ingresos o reducir al mínimo los costos de un sistema de producción. Algunos ejemplos son la mezcla de alimentos, la gestión de inventarios, la

gestión de las finanzas, la asignación de recursos humanos y recursos de máquinas, la planificación de campañas de publicidad, entre otros. Por su parte, Vitutor (2014) plantea que su utilización es muy frecuente tanto en aplicaciones de la economía como en la industria y la estrategia militar.

Por lo anteriormente expuesto, es posible plantear que la optimización matemática cuando se emplea la programación lineal es un método de suma importancia, debido a que mediante una serie de pasos o etapas, permite obtener el mejor resultado posible (óptimo). Además, como el modelo está conformado por funciones lineales, donde tanto la función objetivo como las restricciones son ecuaciones lineales (de igualdad y desigualdad, respectivamente), resulta más fácil desarrollar el método de programación y determinar la solución óptima.

1.5. Conclusiones parciales del capítulo

1. El proceso de refinación de crudo es sumamente complejo e involucra una serie de etapas interconectadas entre sí, donde cada una contribuye al consumo tanto de energía eléctrica como de utilidades, lo cual incide negativamente sobre la eficiencia del mismo.
2. La etapa de destilación atmosférica constituye el mayor consumidor de portadores energéticos en una refinería de crudo.
3. La integración energética resulta fundamental para minimizar los costos de operación y mejorar la eficiencia económica de una refinería de petróleo.
4. La programación lineal como método de programación matemática resulta factible en la integración energética de un proceso, al mostrar en sus resultados la red óptima de intercambio de calor.

Capítulo 2: Materiales y métodos

En el presente capítulo se realiza la descripción del proceso objeto de estudio y se explica la metodología a emplear en la investigación, con el propósito de reducir el consumo de energía en la sección de destilación atmosférica de una refinería de petróleo.

2.1. Descripción del proceso tecnológico

El caso de estudio lo constituye la sección de destilación atmosférica de una refinería de petróleo (**Anexos 5, 6 y 7**). Esta tiene como objetivo procesar el crudo de alimentación con el fin de obtener las fracciones que constituyen las materias primas de las secciones posteriores. El proceso se efectúa por medio de métodos fisicoquímicos, tales como: la desalación y deshidratación (químicos) y la rectificación e intercambio de calor (físicos).

Facilidades de entrada y primer banco de intercambiadores

A la sección se alimenta un flujo de 430 m³/h. El crudo proveniente de la estación de bombeo, a 303 K y una presión de 294 a 784 kPa, se succiona por la bomba de inyección de crudo. Posteriormente, el flujo se descarga hacia el primer banco de intercambiadores de calor, a 305 K y 2 370 kPa. Esta batería de intercambiadores cuenta con dos ramales en paralelo conformado cada uno por cuatro equipos en serie, donde ambos se unen en una línea para llevar el crudo precalentado, a 393 K y 1 078,7 kPa, al sistema de desalación eléctrica.

Desalación eléctrica

El sistema de desalación eléctrica cuenta con dos etapas de desalación y un sistema de lavado con agua, el cual tiene por objetivo extraer las sales contenidas en el crudo. Para ello el mismo se mezcla intensamente con el agua dulce en los mezcladores; la emulsión formada del agua en el crudo se destruye y se dispersa en un campo eléctrico. La destrucción más rápida y completa de las emulsiones se alcanza al calentar el crudo hasta 393 K y una presión de 1 127,8 kPa.

A la entrada de la primera etapa de desalación eléctrica se inyecta una disolución de desmulsificante al 2%, proveniente del bloque de reactivos químicos, con la finalidad de

contribuir a la destrucción de la emulsión formada y lograr la desalación del crudo en el proceso. Esta etapa cuenta con dos electrodeshidratadores que trabajan en paralelo, cuya alimentación es a través de inyectores donde se mezcla el crudo con la disolución salina proveniente del sistema de lavado. El crudo se introduce en los electrodeshidratadores por debajo, a través de los distribuidores que crean un flujo uniforme en el campo eléctrico de abajo hacia arriba. Ambas salidas de los electrodeshidratadores se unen en una línea que constituye la alimentación de la segunda etapa de desalación. En esta línea se inyecta también solución de desmulsificante al 2%. La operación de los electrodeshidratadores de la segunda etapa es similar a la primera.

Segundo banco de intercambiadores

Este banco cuenta con dos ramales en paralelo, conformado cada uno por cuatro equipos conectados en serie. A la salida de este, el crudo calentado, desalado y deshidratado a 498 K y 588,4 kPa se dirige a la torre desgasolinadora (T-101).

A dicha torre se le inyecta una disolución de hidróxido de sodio al 1% (masa/volumen) proveniente del bloque de reactivos químicos. La alimentación a la misma se distribuye en varias entradas que van desde el plato 6 hasta el 8.

Torre desgasolinadora (T-101)

La torre desgasolinadora (T-101) está conformada por 19 platos, y a cada fracción que se obtiene de la misma se le denomina Pie.

Por el tope de la torre sale la fracción Pie 105 °C a 386 K y 382,5 kPa hacia los enfriadores de aire, donde gran parte se condensa y de allí va al tambor de reflujo del tope con 328K. En la línea de salida del tope y en la de reflujo de la torre T-101 se inyecta una disolución al 2% de inhibidor de corrosión, procedente del bloque de reactivos químicos. Desde el tambor correspondiente se succiona el reflujo de la torre por una bomba, para ser inyectado en el tope de la misma a 323 K aproximadamente. El exceso de Pie 105 °C es descargado por otra bomba y se dirige hacia un enfriador por aire. El exceso de gas y de reflujo pasa luego a un enfriador, y la salida de este va al tambor a 323 K.

Desde el fondo de la torre T-101 sale crudo desgasolinado, con 532 K y 480,5 kPa, hacia una bomba cuya descarga se dirige al horno para reinyectarlo por dos corrientes en forma de chorro caliente a la torre por debajo del plato 1. En la salida del horno se controla la temperatura adecuada que debe tener el producto. Por otra parte, por el fondo de la torre es succionado el crudo desgasolinado por una bomba, y descargado hacia el horno de la torre de destilación atmosférica (T-102).

Torre de destilación atmosférica (T-102)

Proveniente del horno conectado a esta torre, el petróleo desgasolinado (fondo de la T-101) es alimentado por dos líneas a la torre de destilación atmosférica (T-102) en el plato 6, a 638 K y 1 569,1 kPa. La torre cuenta con un total de 57 platos. En la línea de salida del tope y en la de reflujo de la torre T-102 se inyecta inhibidor de corrosión al 2% procedente del bloque de reactivos químicos.

Por el tope de la torre sale la fracción Pie 120 °C hacia los enfriadores de aire a 378 K y 68,6 kPa. Esta fracción se enfría hasta los 343 K y va al tambor de reflujo del tope, desde donde se succiona el producto a través de la bomba de reflujo a la T-102, cuya descarga va al enfriador por aire y de allí pasa al intercambiador de calor. Posteriormente, sale de allí hacia el tope de la torre. El exceso de Pie 120 °C se descarga y va hacia un enfriador por aire, cuya salida se dirige al tambor correspondiente.

De la torre T-102 se extraen cuatro cortes laterales: fracción 120-180 °C, 180-230 °C, 230-270 °C y 270-350 °C.

La fracción 120-180 °C se extrae por los platos 45 y 47, y va a la parte superior de la primera sección de la torre despojadora T-103 (T-103/1) de 6 platos, a 407 K y 166,7 kPa. Para despojar las fracciones ligeras, es suministrado vapor de agua sobrecalentado, por lo que tanto la fracción ligera como los vapores de agua que salen del tope de la despojadora, entran a la torre T-102 por el plato 48 a 374 K. Mientras tanto, por el fondo la fracción (a 376 K) es bombeada hacia un enfriador por aire, y posteriormente pasa al intercambiador por agua hasta llegar al nudo de mezcla, en el cual se forman las fracciones resultantes de la sección 100.

La fracción 180-230 °C se extrae entre los platos 34 y 36 y va a la parte superior de la segunda sección de la torre despojadora (T-103/2) que consta de 6 platos, a 468 K y

166,7 kPa. La fracción ligera y los vapores de agua salen del tope de la despojadora y entran a la torre T-102 en el plato 37 a 438 K. Por el fondo, la fracción (a 433 K) es bombeada hacia el enfriador por aire, para finalmente llegar al nudo de mezcla.

La fracción 230-270 °C se extrae entre los platos 22 al 24, y va a la parte superior de la tercera sección de la torre despojadora (T-103/3) de 5 platos, a 525 K y 176,5 kPa. La fracción ligera y los vapores de agua salen del tope de la despojadora y entran a la torre T-102 por el plato 25 a 485 K. Por el fondo, la fracción (a 475 K) es bombeada hacia un intercambiador donde se enfría hasta 412 K, y luego hacia un enfriador por aire. Finalmente la fracción va a la salida, hasta el nudo de mezcla.

La fracción 270-350 °C se extrae entre los platos 12 al 14, y se succiona a 586 K y 176,5kPa. La descarga de dicha bomba se ramifica en dos líneas que van a los intercambiadores del segundo banco para calentar el crudo desalado.

De la torre T-102, se extraen tres reflujos circulantes, los cuales se aprovechan como agentes de calentamiento en el primer banco de intercambiadores y así precalentar el crudo antes de su desalación. El primer reflujo recirculante se extrae por el plato 43 y se succiona a 422 K y 88,3 kPa, donde la descarga de la bomba va a dos intercambiadores consecutivos y posteriormente a dos secciones de un enfriado, para luego retornarlo a la torre T-102 por el plato 45 con 343 K.

El segundo de estos se extrae por el plato 32 y se succiona por una bomba, con 473 K y 98,1 kPa. La descarga de la misma se dirige hacia una serie de intercambiadores, para luego retornarlo a la torre en el plato 35 a 353 K. El tercer reflujo recirculante se extrae por el plato 21 y se succiona (con 523 K y 107,9 kPa) por una bomba, cuya descarga va a un grupo de intercambiadores de calor hasta retornar a la torre T-102 por el plato 22 a 373 K.

Por el fondo de la torre sale el crudo reducido a 617 K y de 176,5 kPa, y se bombea hacia la entrada del segundo banco de intercambiadores. El crudo reducido se dirige al primer banco de intercambiadores para utilizarse como agente de calentamiento a contracorriente con el crudo que se precalienta en serie en los intercambiadores. Luego va hacia los enfriadores por aire, los cuales trabajan en operación normal en serie, pero en dependencia de la condición del crudo reducido tienen la facilidad de trabajar en paralelo.

Torre estabilizadora (T-104)

En el tambor de inyectos de la torre estabilizadora (T-104) se recolectan los excesos de gas y del reflujo de los tambores correspondientes. La temperatura de entrada es 323 K y la presión 382,5 kPa. Adicionalmente, también entra al enfriador el exceso del tambor de reflujo de la torre T-102, para luego pasar al enfriador de fracción 120 °C. La salida de este enfriador va al propio tambor de inyectos de la torre estabilizadora; esa mezcla se denomina fracción 70-120 °C inestable. La misma, a 323 K y 382,5 kPa, se succiona hacia una serie de intercambiadores y posteriormente entra a la T-104 por los platos 25, 27 y 31 a 452 K y 2 186,9 kPa.

Por el tope de la torre sale la fracción Pie 70 °C inestable a 383 K hacia los enfriadores de aire, donde alcanza 330 K, y de ahí pasa al enfriador por agua y posteriormente al tambor de reflujo del tope T-104. Desde el tambor se succiona el producto, cuya descarga va al tope de la torre a 324 K. Los gases de tope del tambor son enviados al cabezal de gas combustible.

Por el fondo de la torre, a 470 K, se succiona la fracción 70-120 °C estable que se descarga hacia el horno, y desde allí entra por los platos 25, 28, 31 de la torre T-104 (recirculación caliente). La otra salida de la fracción 70-120 °C estable por el fondo de la torre se bombea hacia un intercambiador, de donde sale a 407 K, y se dirige hacia las tres secciones de un enfriador (disminuye la temperatura hasta 328 K). Luego va a un intercambiador por agua, y de allí sale hacia el nudo mezcla (Heredia, 2008).

2.2. Metodología para la aplicación de la programación lineal

Para efectuar la integración energética de la sección caso de estudio se utiliza la programación lineal a partir de la metodología descrita por Biegler *et al.* (1997). El objetivo del método consiste en proponer una red de transferencia de calor óptima entre las diferentes corrientes del proceso, que permita aprovechar al máximo todas las posibilidades de calentamiento y enfriamiento entre las propias corrientes, lo cual reduce la necesidad de utilizar fuentes externas. Para proponer la red de intercambiadores integrada, la programación matemática se divide en las siguientes etapas de trabajo:

- Definición del problema (etapas preliminar, uno, dos y tres)
- Determinación del punto de *pinch* (etapas cuatro, cinco y seis)

- Diseño de la red de intercambiadores (etapas siete, ocho, nueve y diez)
- Optimización de la red diseñada (etapa once)

El primer paso que se debe dar al enfrentarse a un nuevo problema mediante el uso de técnicas de optimización, es obtener los datos necesarios para poder resolverlo. Estos suelen provenir de un diagrama de flujo del proceso en las etapas previas del diseño, o del diagrama de flujo de una instalación existente que se desee integrar energéticamente (Benítez *et al.*, 2007).

2.2.1. Desintegración energética del proceso (etapa preliminar)

Para identificar las corrientes que intervienen en el proceso y las utilidades que se requieren, es necesario hacer un análisis de todas las unidades de intercambio de calor presentes en el mismo.

La desintegración energética consiste en eliminar cada uno los intercambiadores de calor del diagrama de flujo del proceso, y en su lugar indicar el calentamiento o enfriamiento de las corrientes mediante su temperatura inicial y final. Este paso solamente se realiza en plantas que existan físicamente, donde estén presentes intercambiadores de calor que integren energéticamente el proceso. Durante la síntesis y diseño de plantas químicas no es necesaria esta etapa ya que todavía no existe ninguna integración previa de corrientes.

2.2.2. Identificación de las corrientes energéticas (etapa 1)

En integración energética se define como corriente aquella que, aunque conserva su masa y composición, cambia su contenido energético (temperatura o estado de agregación) desde la salida de una operación hasta la entrada de otra. De manera general, son aquellas que pasan por equipos de transferencia de calor. Las corrientes energéticas se clasifican en:

- Corrientes frías: la temperatura de salida es mayor que la de entrada o existe evaporación, por lo que deben ser calentadas (absorben calor).
- Corrientes calientes: la temperatura de salida es menor que la de entrada o existe condensación, por lo que deben ser enfriadas (ceden calor).

- Utilidades: fluidos adicionales que se utilizan como medio de enfriamiento (utilidades frías) o de calentamiento (utilidades calientes) cuando no es económico o práctico el uso de un intercambiador de calor entre las corrientes de un proceso (Montes de Oca, 2005).

2.2.3. Extracción de los datos de las corrientes (etapa 2)

En integración energética, el parámetro más importante de una corriente es su contenido energético (entalpía, calor específico, calor latente, etc.). Estos valores se pueden obtener de la literatura especializada. Otros datos imprescindibles para realizar la integración energética son el caudal y la temperatura de entrada y de salida de cada corriente. También pueden ser necesarias las composiciones de las corrientes para estimar los calores específicos de las mezclas. Todos los parámetros anteriores pueden ser estimados mediante los balances de masa y energía correspondientes. La extracción de estos se puede hacer más fácilmente mediante la simulación digital del proceso, para lo que se requiere un simulador que garantice una estimación termodinámica confiable. Para enfriar las corrientes calientes es necesario extraerles una cierta cantidad de calor igual al calor cedido por estas, para garantizar el intercambio de calor sin considerar pérdidas de energía. De igual manera, para calentar las corrientes frías se incorpora una determinada cantidad de calor que debe ser garantizada por una fuente que ceda calor. El flujo de calor necesario a suministrarle a las corrientes frías y/o a extraerles a las calientes se determina a partir de la Primera Ley de la Termodinámica (ecuación 2.1).

$$\Delta H = Q - W \quad (2.1)$$

donde:

ΔH : Variación de entalpía (kJ/kg)

Q: Flujo de calor transferido (kJ/kg)

W: Trabajo (kJ/kg)

Como en los equipos de transferencia de calor no se realiza trabajo, la expresión se reduce a la ecuación 2.2.

$$Q = m \cdot \Delta H \quad (2.2)$$

donde:

m: Flujo másico de la corriente (kg/s)

Q: Flujo de calor transferido (kW)

Dichos flujos de calor se pueden determinar de dos formas: por la ecuación 2.3 si es calor sensible (asociado a un cambio de temperatura) o por la ecuación 2.4 en caso de que exista calor latente (debido a un cambio de fase).

$$Q = m \cdot cp(Te - Ts) \quad (2.3)$$

$$Q = m \cdot \lambda \quad (2.4)$$

donde:

Q: Flujo de calor sensible y/o latente, respectivamente (kW)

cp: Calor específico de la corriente (kJ/kgK)

Te: Temperatura de entrada (K)

Ts: Temperatura de salida (K)

λ : Variación de entalpía de vaporización o condensación (kJ/kg)

El flujo de calor neto del sistema (ecuación 2.5) es la suma del calor de todas las corrientes.

$$Q_{neto} = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (2.5)$$

donde:

Q_{neto} : Flujo de calor neto del sistema (kW)

n: Número o cantidad de corrientes

i: Número de la corriente

Q_i : Flujo de calor de cada corriente (kW)

Si el valor obtenido es negativo ($Q_{neto} < 0$) significa que al sistema se le debe suministrar esa energía mediante utilidades calientes; mientras que si es positivo ($Q_{neto} > 0$) indica que ese calor debe ser extraído mediante utilidades frías (González, 2014).

2.2.4. Selección de la ΔT_{min} inicial (etapa 3)

La temperatura de aproximación mínima (ΔT_{min}) representa la menor diferencia de temperaturas que puede existir entre una corriente fría y una caliente a lo largo de un intercambiador de calor para que la transferencia sea efectiva. Esto se debe a que la Segunda Ley de la Termodinámica prohíbe cualquier cruce de temperatura entre las corrientes frías y calientes. En términos matemáticos, en cualquier punto del intercambiador se obtiene:

$$\Delta T_{\min} = T_c - T_f \tag{2.6}$$

donde:

Tc: Temperatura de la corriente caliente (K)

Tf: Temperatura de la corriente fría (K)

Mientras menor es la ΔT_{\min} que se seleccione, mayor será el área de transferencia necesaria en los intercambiadores (que provoca un incremento de los costos de instalación y mantenimiento), pero menores serán los requerimientos de utilidades (lo cual reduce los costos de operación). Por esta razón, la selección de la diferencia de temperatura mínima más adecuada constituye un problema de optimización.

La ΔT_{\min} inicial se fija, por lo común, en 10 K. Sin embargo, la experiencia práctica ha arrojado una serie de valores recomendados en cuanto a intervalos de temperatura para distintos sectores industriales. Tal es el caso de la refinación de petróleo (20-40 K), la petroquímica (10-20 K), la química (10-20 K) y los procesos a bajas temperaturas (3-5 K) (Gundersen, 2000). Para el proceso en estudio, la diferencia mínima de temperatura inicial seleccionada es 20 K por ser recomendada para la refinación de petróleo.

2.2.5. Construcción del diagrama de intervalos de temperaturas (etapa 4)

En el diagrama (Figura 2.1) de intervalos (A, B, etc.) de temperaturas se indican todos los niveles de temperatura del proceso (t_{ic} y t_{if}), y proporciona la información cualitativa y cuantitativa del intercambio entre las corrientes del sistema. Cada una de ellas se representa con una flecha vertical que parte desde la temperatura de entrada hasta la de salida. Las saetas de las corrientes calientes se dibujan de arriba hacia abajo (en rojo), y las frías de abajo hacia arriba (en azul). Además, se representa la capacidad calórica ($m_i c_{p_i}$) de cada corriente y la entalpía (H_j) correspondiente a cada intervalo.

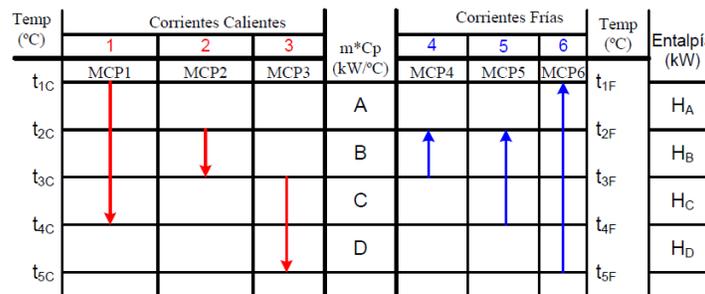


Figura 2.1- Diagrama de intervalos de temperatura (Romero, 2005)

En la Figura 2.1 se separa con una franja central, donde se colocan las corrientes calientes a la izquierda y las frías a la derecha. Cada línea de temperatura tiene una diferencia de $\Delta T_{\text{mín}}$ entre el lado caliente y el frío, de forma que si t_{1C} es la temperatura de entrada de la corriente 1, entonces t_{1F} es la diferencia entre t_{1C} y la $\Delta T_{\text{mín}}$ ($t_{1F} = t_{1C} - \Delta T_{\text{mín}}$).

Los intervalos de temperatura se identifican con una letra consecutiva que se escribe en la franja central que separa el lado caliente del frío. El diagrama se completa con el balance energético para cada intervalo de temperaturas. El calor de cada uno de estos intervalos se calcula como la diferencia de calor entre las corrientes calientes y frías en el mismo.

$$Q_i = [(T_{\text{cal.máx}} - T_{\text{cal.mín}}) \sum_{i=1}^{CC} (m_i \cdot cp_i)] - [(T_{\text{fría máx}} - T_{\text{fría mín}}) \sum_{i=1}^{CF} (m_i \cdot cp_i)] \quad (2.7)$$

donde:

Q_i : Flujo de calor transferido en el intervalo i (kW)

$T_{\text{cal.máx}}$: Temperatura máxima del intervalo i para el lado caliente (K)

$T_{\text{cal.mín}}$: Temperatura mínima del intervalo i para el lado caliente (K)

$T_{\text{fría máx}}$: Temperatura máxima del intervalo i para el lado frío (K)

$T_{\text{fría mín}}$: Temperatura mínima del intervalo i para el lado frío (K)

$m_i \cdot cp_i$: Razón de flujo de capacidad calórica (kW/K)

CC: Corriente caliente

CF: Corriente fría

El flujo de calor neto del sistema es igual a la suma de los flujos de calor de todos los intervalos, y este resultado tiene que coincidir con el valor del flujo de calor que previamente se calcula, para demostrar que el diagrama se confecciona correctamente.

$$Q_{\text{neto}} = \sum_{i=1}^n Q_{\text{intervalo } i} \quad (2.8)$$

donde:

$Q_{\text{intervalo } i}$: Flujo de calor de cada intervalo (kW)

i : Cantidad de intervalos

Estos valores permiten construir una tabla donde se indica el contenido energético de cada corriente de acuerdo a los intervalos, para facilitar la modelación matemática del diagrama de cascada (Kemp, 2007).

2.2.6. Construcción del diagrama de cascada (etapa 5)

El diagrama de cascada no es más que una representación gráfica de cómo el flujo de calor, a manera de cascada, atraviesa los intervalos de temperatura. En esta metodología, el diagrama de cascada tiene la ventaja principal de poder ser considerado como un problema de transporte que se formula como un modelo de programación lineal. En términos de modelos de transporte, las corrientes calientes son tratadas como fuentes y las frías como destinos, por lo que es conveniente que el calor sea transferido desde las fuentes hacia los destinos, a través de los intermediarios (depósito o almacén) que corresponden a los intervalos de temperaturas que garantizan un intercambio de calor factible. Cada flecha indica la cantidad de calor que puede intercambiar cada corriente por intervalo. Cuando no todo el calor puede ser ubicado en los destinos (corrientes frías) debido al intervalo de temperatura, el exceso o calor residual simple (R_k), se coloca en forma de cascada hacia el nivel de temperatura inferior (Figura 2.2).

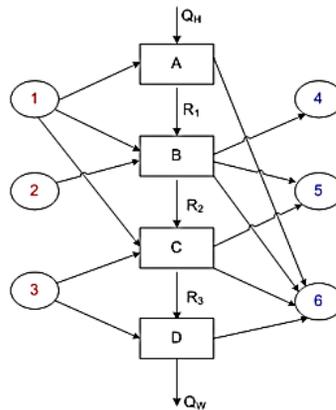


Figura 2.2.- Ejemplo de diagrama de cascada o modelo de transporte (Romero, 2005)

De esta manera, en cada nivel o intervalo de temperatura se realiza un balance sencillo de calor (corrientes de entrada igual a corrientes de salida). El modelo formulado generalmente tiene un grado de libertad, lo que implica un problema propio de optimización cuya función objetivo es la minimización de los flujos calóricos de utilidades (Q_w (frías) y Q_H (calientes)); de ahí que se considere como restricción la no negatividad de las variables, lo cual se soluciona a partir de un problema de programación lineal. Finalmente, se determina el calor neto del sistema.

$$Q_{neto} = \sum Q_{utilidades\ frías} - \sum Q_{utilidades\ calientes} \quad (2.9)$$

donde:

Q_{neto} : Flujo de calor neto del sistema (kW)

$Q_{utilidades\ frías}$: Flujo de calor que se necesita extraer al sistema mediante utilidades frías (kW)

$Q_{utilidades\ calientes}$: Flujo de calor que se necesita suministrar al sistema mediante utilidades calientes (kW)

2.2.7. Optimización de las restricciones generales y establecimiento de la función objetivo (etapa 6)

En este punto se da solución al problema de programación lineal que se presenta en el diagrama de transporte, y para ello se emplea el *software MATLAB*. El problema está compuesto por las ecuaciones del balance de energía en cada intervalo (que constituyen las restricciones), y por la función objetivo que responde a la necesidad de minimizar el consumo de utilidades en el proceso.

De esta forma se obtienen las cantidades óptimas que deben ser transferidas en cada intervalo de temperatura, y las cantidades mínimas de utilidades frías y calientes necesarias. Además, se aprecia el punto de *pinch* (residual cero), que determina entre qué intervalos se encuentra la temperatura de *pinch*.

2.2.8. Construcción del modelo de transporte ampliado (etapa 7)

Esta etapa de la metodología parte de que en cada intervalo (k) de temperatura existe intercambio de calor entre las corrientes frías y calientes. A diferencia del diagrama de cascada, donde el residual que se obtenía en cada nivel de temperatura era simple, en el modelo de transporte ampliado se asigna un residual (R_{ki}) para cada corriente caliente (i), y para cada utilidad caliente (m) (R_{km}) que se encuentra en o sobre el intervalo de temperatura (Figura 2.3).

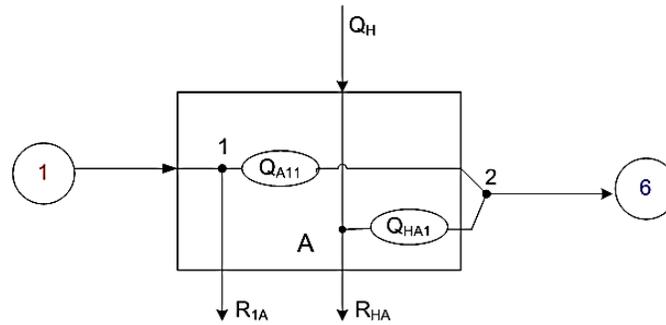


Figura 2.3- Ejemplo de modelo de transporte ampliado (Romero, 2005)

Dentro de este último se define la variable (Q_{ijA}) para denotar el intercambio de calor entre la corriente caliente (i) y la corriente fría (j). Por otra parte, en este caso se debe ejecutar un balance de calor dentro de cada intervalo de temperatura. De esta forma se especifican las restricciones en los puntos de intercambio, se obtiene un modelo más complejo que el formulado para el diagrama de cascada, y con la solución de dicho modelo matemático ampliado se obtienen las cantidades intercambiadas durante el proceso, tanto entre corrientes frías y calientes como las utilidades. A partir de ello se puede determinar el número de intercambiadores requeridos, con lo cual se procede a la distribución de los mismos en el proceso, y a la determinación de los costos energéticos y de adquisición de la red. Es necesario destacar que el contenido calórico de las utilidades tiene que coincidir con el obtenido en el modelo compactado o diagrama de cascada. Para comprobar el resultado de esta etapa se realiza una comparación entre el flujo de calor obtenido en la misma y el que se determina en la anterior; la ecuación 2.10 permite calcular el error relativo. Se plantea por Sargent (2009) que este valor debe ser inferior al 10%.

$$e = \frac{|Q_{cascada} - Q_{ampliado}|}{Q_{cascada}} \cdot 100 \quad (2.10)$$

donde:

e: Error relativo (%)

$Q_{cascada}$: Flujo de utilidad que se obtiene del diagrama de cascada (kW)

$Q_{ampliado}$: Flujo de utilidad que se obtiene del diagrama de transporte ampliado (kW)

2.2.9. Distribución de la cantidad de calor a intercambiar (etapa 8)

El modelo de programación lineal ampliado ofrece la información de las corrientes de intercambio, y a partir de ello se puede determinar el número de intercambiadores requeridos (que garanticen una transferencia eficiente para las condiciones mínimas de utilidades) y la distribución de las cantidades a intercambiar. En esta etapa existe un principio que nunca debe ser violado: una corriente nunca debe transferir calor a través de la temperatura de *pinch*. Es por ello que para proponer la red de intercambio de calor entre las corrientes, se deben analizar por separado las redes de intercambio sobre y bajo el *pinch*. El objetivo de esta etapa consiste en determinar, para cada intercambiador de calor, las corrientes involucradas y la cantidad de energía que intercambian entre sí. Para la confección de la red propuesta, las corrientes se colocan en rectángulos, las calientes encima y las frías debajo. Además, dentro de los rectángulos se debe escribir también la cantidad de energía que absorbe o libera cada corriente. Los intercambiadores de calor se representan con círculos ordenados de forma consecutiva, y se debe pasar toda la energía de las corrientes calientes a las frías, solamente mediante la utilización de la cantidad calculada de intercambiadores (Montes de Oca, 2005).

2.2.10. Diseño preliminar de la red de intercambio de calor (etapa 9)

A partir de la propuesta de intercambio de energía de la etapa anterior, quedan definidas las corrientes y la cantidad de calor que intercambian estas entre sí. Solamente falta definir el orden de los intercambiadores de calor en el diagrama de flujo. Para ello se colocan todas las corrientes como líneas horizontales, con flechas que van de derecha a izquierda (para las corrientes frías) y de izquierda a derecha (para las calientes). Sobre cada línea se representan las temperaturas de entrada, de salida y de *pinch* de cada corriente. Una vez representadas todas las corrientes, se van colocando los intercambiadores de calor entre estas, según la propuesta de la etapa 8. Sobre cada intercambiador se indica el calor que debe intercambiar y se calculan las temperaturas de entrada y de salida de cada corriente a cada uno de ellos (Pérez, 2013). Al ubicar los intercambiadores se debe comprobar que en ninguno de ellos existan cruces de temperatura ni se viole la diferencia mínima de temperatura propuesta, además de que no exista intercambio de calor a través del *pinch* (González, 2014).

2.2.11. Diseño final del diagrama de flujo integrado energéticamente (etapa 10)

Aunque se debe incluir un análisis económico y una optimización del costo total en función de la ΔT_{\min} , la etapa final de la integración energética la constituyen la reconstrucción del diagrama de flujo del proceso integrado y la realización del diseño de los intercambiadores de calor.

Dentro del diseño se incluye el cálculo del área de transferencia de calor para cada uno de los equipos (ecuación 2.11).

$$A = \frac{Q}{U_D \cdot LMTD \cdot F_T} \quad (2.11)$$

donde:

A: Área del intercambiador (m²)

Q: Flujo de calor total transferido (kW)

U_D: Coeficiente global de transferencia de calor para las condiciones de operación (kW/m²K)

LMTD: Diferencia media logarítmica de temperaturas (K)

F_T: Factor de corrección de temperaturas

Para el caso de flujo a contracorriente, la diferencia media logarítmica de temperaturas (LMTD) se determina a partir de la ecuación 2.12:

$$LMTD = \frac{(T_{SCC} - T_{eCF}) - (T_{eCC} - T_{SCF})}{\ln \left(\frac{T_{SCC} - T_{eCF}}{T_{eCC} - T_{SCF}} \right)} \quad (2.12)$$

donde:

T_{SCC}: temperatura de salida de la corriente caliente (K)

T_{eCF}: temperatura de entrada de la corriente fría (K)

T_{eCC}: temperatura de entrada de la corriente caliente (K)

T_{SCF}: temperatura de salida de la corriente fría (K)

El coeficiente global de transferencia de calor (U_D) en condiciones de operación para los equipos puede ser estimado mediante la tabla que se muestra en el **Anexo 8** a partir de las sustancias que intercambian calor en cada uno.

Por otra parte, el factor de corrección de temperaturas puede determinarse a partir de gráficos que presenta Kern (1999) (**Anexo 9**) o por la ecuación 2.13 (para intercambiadores 1-2):

$$F_T = \frac{\sqrt{R^2+1} \cdot \ln(1-P) / (1-R \cdot P)}{(R-1) \cdot \ln \frac{2-P(R+1-\sqrt{R^2+1})}{2-P(R+1+\sqrt{R^2+1})}} \quad (2.13)$$

Como $F_t = f(P, R)$:

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad (2.14)$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad (2.15)$$

donde:

P: Eficiencia del intercambiador para el lado frío

R: Razón de transferencia de calor

T₁: Temperatura de entrada del fluido caliente (K)

T₂: Temperatura de salida del fluido caliente (K)

t₁: Temperatura de entrada del fluido frío (K)

t₂: Temperatura de salida del fluido frío (K)

2.2.12. Análisis económico de la nueva red de intercambio de calor (etapa 11)

Los costos a considerar en el análisis económico son: el consumo de utilidades y la amortización del costo de adquisición de los equipos propuestos. Esto se debe a que el resto de los costos de producción no son modificados, puesto que al realizar la integración energética no se afectan las principales operaciones del proceso productivo.

Luego de obtener la distribución energética y la conformación de la red de intercambio de calor, es posible estimar la cantidad de energía que se entrega a cada equipo en particular que requiera de servicios auxiliares. Esto permite conocer el flujo de utilidad que se maneja en cada uno a partir de un balance de energía en dependencia del tipo de utilidad.

En el caso del enfriamiento con agua se emplea la ecuación 2.16:

$$m_{agua} = \frac{Q}{c_p \cdot \Delta T} \quad (2.16)$$

donde:

m_{agua}: Flujo de agua de enfriamiento para el intercambiador (kg/s)

Q: Flujo de calor absorbido por el agua en el intercambiador (kW)

cp: Calor específico del agua (kJ/kgK)

ΔT : Variación de la temperatura del agua (K)

El calentamiento en el horno emplea dos tipos de combustible: *fuel oil* o gas combustible de baja presión; en este caso se considera el primero de ellos solamente. El flujo de combustible necesario se determina mediante la ecuación 2.17:

$$\eta_H = \frac{Q}{VCI \cdot \eta_q \cdot m_{comb}} \quad (2.17)$$

donde:

η_H : Eficiencia del horno

Q: Calor cedido por el combustible (kW)

VCI: Valor calórico inferior del combustible (kJ/kg)

η_q : Eficiencia de los quemadores, propuesta por el fabricante

m_{comb} : Flujo de combustible (kg/s)

Según Pírez (2012), el valor calórico inferior del *fuel oil* es 40128 kJ/kg y la eficiencia del horno en cuestión es de 80%, mientras que González (2015) plantea que para los quemadores es de 90%.

En el caso de los enfriadores por aire, el costo a considerar es referido al consumo de energía eléctrica. Los mismos utilizan aire atmosférico, el cual se extrae del medio a través de ventiladores impulsados por electricidad. Por esta razón, solamente se debe conocer la potencia que consume cada uno de los equipos instalados, la cual tiene un valor de 45 kW para la unidad del caso de estudio (Pírez, 2012).

Con los flujos de utilidades se estima el costo total de energía por concepto de calentamiento y enfriamiento, donde se deben conocer los costos unitarios de cada utilidad, para lo cual se emplea la ecuación 2.18.

$$C_{total\ energía} = \sum_{U=1}^U m_U \cdot costou + Pot \cdot costoe \quad (2.18)$$

donde:

$C_{total\ energía}$: Costo total de energía (CUC/a)

m_U : Flujo de la utilidad U (m³/a)

$costou$: Costo unitario de la utilidad U (CUC/m³)

U: Número total de utilidades usadas

Pot: Potencia consumida por los equipos (ventiladores de los enfriadores por aire) (kWh/a)

Costo_E: Costo unitario de la electricidad (CUC/kWh)

El costo unitario de las utilidades se obtiene de la investigación realizada por Pírez (2012) (**Tabla 2.1**), mientras que el costo de adquisición para cada intercambiador de calor se puede determinar a través de las ecuaciones propuestas por Turton (2009).

Tabla 2.1 – Costo unitario de las utilidades

Utilidades	Costos unitarios
Fuel oil	211,60 CUC/m ³
Agua de enfriamiento	1,55 CUC/m ³
Electricidad	6,10 CUC/kWh

Fuente: Pírez (2012)

El costo de adquisición de la red de intercambio de calor depende de algunos factores esenciales: el número de intercambiadores que conforman la red, el área global de la misma, la distribución del área entre los equipos y los materiales de construcción de estos.

El costo de inversión de la red se determina mediante la ecuación 2.19.

$$Costo_{Red} = \sum_{i=1}^{N_{\text{mínimo}}} Costo_i \quad (2.19)$$

donde:

Costo_{Red}: Costo de adquisición de la red de intercambiadores de calor (CUC)

N_{mínimo}: Número mínimo de intercambiadores de calor

Costo_i: Costo de cada intercambiador i (CUC)

Según CEPCI (2016), el índice de costo requerido para la actualización de los costos de los equipos es:

$$IC_{2015} = 556,8$$

Cuando se calcula la inversión que representa la nueva red de intercambio, es posible estimar el costo de amortización de la misma (ecuación 2.20), en dependencia de su tiempo de vida útil.

$$Costo_{Amortización_{Red}} = \frac{I}{t} \quad (2.20)$$

donde:

Costo Amortización Red: Costo de amortización de la red (CUC/a)

I: Inversión de la red de intercambio de calor para el año 2015 (CUC)

t: Tiempo de vida útil (a)

La condición que debe cumplir la alternativa de integración energética para ser aceptada es que reporte beneficios desde el punto de vista productivo. Para ello es necesario que la propuesta reduzca los costos de producción y que cumpla con los intervalos admisibles de los indicadores económicos de la inversión; por lo cual se realiza un estudio de factibilidad económica donde estos se consideren.

El ahorro total por concepto de utilidades en CUC anuales, no es más que el beneficio o ganancia (G) que se obtiene al efectuar la modificación del proceso.

El retorno de la inversión (ecuación 2.21) es el porcentaje de recuperación anual de la misma a través del incremento de ganancia.

$$Retorno = \frac{G}{I} \cdot 100 \quad (2.21)$$

donde:

Retorno: porcentaje anual de retorno de la inversión (%/a)

Otro término relacionado es el plazo de recuperación de la inversión (ecuación 2.22), el cual se define como el tiempo necesario para que el incremento de ganancia compense o cubra la inversión realizada, y se determina mediante la relación inversa del retorno (Turton, 2009).

$$PRI = \frac{I}{G} \quad (2.22)$$

donde:

PRI: Plazo de recuperación de la inversión (a)

2.3. Conclusiones parciales del capítulo

1. Se describe el proceso tecnológico que se lleva a cabo en la sección de destilación atmosférica objeto de estudio.
2. Se establece la metodología que permite realizar la integración energética del proceso mediante programación lineal: definición del problema, determinación del punto de *pinch*, diseño de la red de intercambiadores y optimización de la red diseñada.
3. La optimización por el método de programación lineal se realiza a través del *software MATLAB*.
4. El costo de adquisición de los equipos se determina mediante el *software CapCost*.

Capítulo 3: Resultados y discusión

En el capítulo correspondiente al análisis de resultados se muestran los valores que se obtienen al aplicar la metodología de integración energética mediante la programación matemática, a la vez que se analizan y discuten los mismos.

3.1. Desintegración energética del proceso

Para la desintegración energética del proceso es necesario eliminar todos los intercambiadores de calor que aparecen en el diagrama de flujo. El caso de estudio presenta 48 de estos equipos: E-101, E-104, E-102, E-103, E-105 A, E-106 A, E-105 B, E-106 B, AC-100, A-111 A, A-106 A, A-111 B, A-107, E-100, F-101 (T-102), 3-A-101, E-109, E-107, E-108, E-114, A-110, E-113, A-104, A-105 y A-106. Algunos de ellos cuentan con más de una unidad, debido a que se encuentran dispuestos en serie, como es el caso del E-101 (4), E-102 (4), E 103 (3), E-104 (4), E-105 A (2), E-105 B (2), E-106 A (6) y E-106 B (6).

Todos los intercambiadores se analizan para obtener los datos térmicos e identificar las corrientes energéticas que intervienen en el proceso.

La desintegración energética de la sección se muestra en el **Anexo 10**, donde se representan las corrientes calientes y frías mediante el color rojo y verde, respectivamente. Se refleja el esquema general del proceso de destilación atmosférica en estudio, así como los diagramas del banco de intercambio de calor y el nudo de mezcla.

3.2. Identificación de las corrientes energéticas

Una vez que se realiza la desintegración energética, se toman las corrientes resultantes y se clasifican según sus temperaturas de entrada y salida, en corrientes calientes o frías. Las corrientes que se identifican, así como otros parámetros de interés se muestran en la **Tabla 3.1**. Las entradas y salidas de las corrientes energéticas que se presentan en esta tabla se nombran según la nomenclatura utilizada en la simulación del proceso (Heredia, 2008).

Tabla 3.1- Corrientes energéticas presentes en el proceso

Corriente	Entrada	Salida	Tipo de corriente	Equipo	Utilidad	Tipo de utilidad
1	Crudo 12	6	fría	E-101	-	-
2	6	6—3	fría	E-104	-	-
3	Crudo 22	6—2	fría	E-102	-	-
4	6—2	4--3--2	fría	E-103	-	-
5	2—3	5—4	fría	E-105 A	-	-
6	5—4	6--3—2	fría	E-106 A	-	-
7	2--2--2	5--2—2	fría	E-105 B	-	-
8	5--2--2	1	caliente	E-106 B	-	-
9	RC 10	RC 14	caliente	E-101	-	-
10	25	29	caliente	E-104	-	-
11	RC 20	RC 24	caliente	E-102	-	-
12	RC 30	RC 33	caliente	E-103	-	-
13	2	9	fría	E-105	-	-
14	FTA 1	18	caliente	E-106	-	-
15	8	11	caliente	E-105	-	-
16	FTA 2	24	caliente	E-106	-	-
17	29	Fuel a TK	caliente	AC-100	aire	fría
18	RC 14	RC 1 retorno	caliente	A-111-A	aire	fría
19	RC 33	RC 3 retorno	caliente	A-106-A	aire	fría
20	RC 24	RC 2 retorno	caliente	A-111-B	aire	fría
21	Diesel a A-107	Diesel a NM	caliente	A-107	aire	fría
22	Inyecto	1	caliente	E-100	agua	fría
23	Crudo topeado	Crudo a T-102	fría	F-101 (T-102)	<i>fuel oil</i>	caliente
24	a 3-A-101	a E-109	caliente	3-A-101	aire	fría
25	a E-109	4	caliente	E-109	agua	fría
26	a E-107	a E-108	fría	E-107	-	-
27	a E-108	inyecto a T-104	fría	E-108	-	-
28	Cort. 3	Corte 3 a A-106	caliente	E-108	-	-
29	Ref. a E-107	Estab. a A-110	caliente	E-107	-	-
30	a E-114	a sección 400	caliente	E-114	agua	fría
31	Estab. a A-110	Estab. a E-113	caliente	A-110	aire	fría
32	Estab. a E-113	Fr. 70-120	caliente	E-113	agua	fría
33	NVP	Fr. 120-180	caliente	A-104	aire	fría
34	Cort. 2	Fr. 180-230	caliente	A-105	aire	fría
35	Corte 3 a A-106	Fr. 230-270	Caliente	A-106	aire	fría

De las corrientes que se definen en la **Tabla 3.1**, desde la primera hasta la número 21 pertenecen al banco de intercambio de calor, de la 22 a la 30 se encuentran en la línea principal del proceso, y las restantes corresponden al nudo de mezcla.

3.3. Extracción de los datos térmicos de las corrientes

La extracción de los datos térmicos de las corrientes del proceso se realiza con el objetivo de conformar la información necesaria que posibilite determinar los calores involucrados (ecuación 2.3), para la posterior integración energética de la sección (**Tabla 3.2**).

Tabla 3.2. Datos térmicos de las corrientes energéticas del proceso

Corriente	Flujo (kg/s)	Cp (kJ/kgK)	Te (K)	Ts (K)	ΔT (K)	Q (kW)
1	52,88	1,93	303,4	337,1	-33,7	-3 432,24
2	52,88	2,13	337,1	401,1	-64,0	-7 211,99
3	52,88	1,95	303,4	347,1	-43,7	-4 499,24
4	52,88	2,13	347,1	389,1	-42,0	-4 725,09
5	52,88	2,24	383,3	407,1	-23,8	-2 819,14
6	52,88	2,47	407,1	498,1	-91,0	-11 888,24
7	52,88	2,24	383,3	407,1	-23,8	-2 819,14
8	52,88	2,47	407,1	325,0	82,1	23 789,55
9	21,19	2,36	415,4	347,0	68,4	3 414,05
10	59,51	2,31	458,8	406,3	52,5	7 207,70
11	22,73	2,58	491,6	415,2	76,4	4 476,88
12	15,15	2,60	527,6	407,9	119,7	4 710,45
13	91,58	2,15	311	429,2	-118,2	-23 246,16
14	29,76	2,66	608,9	458,8	150,1	11 864,29
15	7,80	2,66	565,1	429,2	135,9	2 824,98
16	29,76	2,66	608,9	458,8	150,1	11 864,29
17	59,51	2,15	406,3	373,1	33,2	4 240,91
18	21,19	2,14	347	332,1	14,9	676,14
19	15,15	2,26	407,9	373,2	34,7	1 189,41
20	22,73	2,27	415,2	353,2	62,0	3 193,38
21	15,61	2,19	429,2	333,2	96,0	3 284,84
22	105,8	1,87	310,8	303,1	7,7	1 523,82
23	104,3	3,12	538	618,1	-80,1	-26 075,00
24	7,18	4,18	334,8	328,1	6,7	201,10
25	7,18	2,12	328,1	327,1	1,0	15,22
26	7,18	2,40	324	373,1	-49,1	-845,09
27	7,18	2,65	373,1	403,1	-30,0	-571,29
28	5,35	2,65	499,9	459,6	40,3	569,96
29	5,37	2,86	452,5	397,2	55,3	850,66
30	1,81	2,43	330,2	313,1	17,1	75,15
31	5,37	2,19	397,2	328,1	69,1	811,83
32	5,37	2,25	328,1	313,1	15,0	180,98
33	7,87	2,30	395	328,1	66,9	1 213,48

34	10,29	2,29	449,3	328,1	121,2	2 850,98
35	5,35	2,40	459,6	333,1	126,5	1 620,34
Q neto (kW)						4 517,77

El calor neto (ecuación 2.5) que muestra el balance energético del caso de estudio se encuentra en el orden de los 4 500 kW, lo que refleja un valor positivo. Como dicho valor representa la cantidad de energía adicional que se debe suministrar o eliminar del sistema mediante utilidades para lograr un balance energético, el resultado indica que el sistema presenta un exceso de calor, el cual debe ser extraído a través de utilidades frías. Esto no quiere decir que no se necesiten utilidades calientes en un momento determinado, sino que el flujo de utilidades frías debe superar al de calientes precisamente en ese valor.

3.4. Selección de la ΔT_{\min} inicial

La ΔT_{\min} inicial se considera 20 K como se justifica en el epígrafe 2.2.4.

Según demuestra la experiencia práctica, este valor se recomienda en los procesos de refinación de petróleo.

3.5. Construcción del diagrama de intervalos de temperaturas

El **Anexo 11** refleja los intervalos de temperatura en los que intervienen las corrientes energéticas del proceso. Como se puede apreciar, el número de niveles (intervalos de temperatura) para el sistema asciende a 46, los cuales se identifican con letras sucesivas desde la A hasta la R*.

Cada corriente se representa con flechas verticales desde la temperatura de entrada hasta la de salida, el sentido de las calientes es de arriba hacia abajo (flecha roja), mientras las corrientes frías se muestran de forma contraria (flecha azul).

Al realizar la sumatoria de los calores de cada intervalo (ecuación 2.7) se obtiene el calor neto (ecuación 2.8) y se verifica que coincide con el resultado de la etapa relacionada a los datos térmicos de las corrientes, lo que demuestra la correcta elaboración del diagrama de intervalos de temperatura.

Se confecciona el **Anexo 12** para mostrar el contenido energético de cada corriente según el intervalo de temperatura donde se encuentre, el cual tiene por objetivo ayudar a la modelación matemática del diagrama de cascada.

3.6. Construcción del diagrama de cascada

La representación gráfica del intercambio de calor a través de los intervalos de temperatura facilita la confección del diagrama de cascada. Esto se debe a que permite apreciar claramente cuáles son las corrientes calientes (fuentes) que suministran energía a cada intervalo, y a qué corrientes frías (sumideros) le transfieren una parte de su contenido energético.

El diagrama de cascada que se obtiene (**Anexo 13**) presenta un elevado nivel de complejidad en cuanto a su observación y análisis, como consecuencia directa de la gran cantidad de intervalos de temperatura que existen. El hecho de que en la mayor parte de estos intercambia energía un gran número de corrientes, antes de continuar hacia los diferentes niveles como calores residuales.

De este diagrama se deriva una serie de restricciones, las cuales se muestran en la **Tabla 3.3**.

Tabla 3.3. Restricciones del diagrama de cascada

Ecuaciones	Número	Ecuaciones	Número
$Q_H - R_1 = 9505,49$	(3.1)	$R_{23} - R_{24} = -238,54$	(3.24)
$R_1 - R_2 = 7334,11$	(3.2)	$R_{24} - R_{25} = -78,04$	(3.25)
$R_2 - R_3 = 1041,27$	(3.3)	$R_{25} - R_{26} = -101,86$	(3.26)
$R_3 - R_4 = -5437,72$	(3.4)	$R_{26} - R_{27} = -1103,29$	(3.27)
$R_4 - R_5 = -2073,13$	(3.5)	$R_{27} - R_{28} = -2,12$	(3.28)
$R_5 - R_6 = -1594,04$	(3.6)	$R_{28} - R_{29} = 639,44$	(3.29)
$R_6 - R_7 = -844,34$	(3.7)	$R_{29} - R_{30} = 970,29$	(3.30)
$R_7 - R_8 = -5130,41$	(3.8)	$R_{30} - R_{31} = 336,13$	(3.31)
$R_8 - R_9 = -127,19$	(3.9)	$R_{31} - R_{32} = 853,71$	(3.32)
$R_9 - R_{10} = -870,19$	(3.10)	$R_{32} - R_{33} = 426,69$	(3.33)
$R_{10} - R_{11} = -491,45$	(3.11)	$R_{33} - R_{34} = 1150,16$	(3.34)
$R_{11} - R_{12} = -17,45$	(3.12)	$R_{34} - R_{35} = 152,01$	(3.35)
$R_{12} - R_{13} = 391,33$	(3.13)	$R_{35} - R_{36} = 12,92$	(3.36)
$R_{13} - R_{14} = 12,89$	(3.14)	$R_{36} - R_{37} = 142,03$	(3.37)
$R_{14} - R_{15} = 449,60$	(3.15)	$R_{37} - R_{38} = 206,15$	(3.38)
$R_{15} - R_{16} = 262,88$	(3.16)	$R_{38} - R_{39} = -7,41$	(3.39)

$R_{16} - R_{17} = 1391,54$	(3.17)	$R_{39} - R_{40} = -28,68$	(3.40)
$R_{17} - R_{18} = 38,84$	(3.18)	$R_{40} - R_{41} = 42,49$	(3.41)
$R_{18} - R_{19} = 1227,98$	(3.19)	$R_{41} - R_{42} = 213,50$	(3.42)
$R_{19} - R_{20} = 376,57$	(3.20)	$R_{42} - R_{43} = -1515,14$	(3.43)
$R_{20} - R_{21} = 255,11$	(3.21)	$R_{43} - R_{44} = -300,47$	(3.44)
$R_{21} - R_{22} = 150,60$	(3.22)	$R_{44} - R_{45} = -2529,75$	(3.45)
$R_{22} - R_{23} = 593,39$	(3.23)	$R_{45} - Q_W = -10202,99$	(3.46)

El modelo resultante del diagrama de cascada se conforma por 47 parámetros totales, ninguno de ellos conocido, y cuenta con 46 ecuaciones. Por esta razón se puede plantear que posee un grado de libertad, lo cual indica la existencia de un problema de optimización.

3.7. Optimización de las restricciones generales y establecimiento de la función objetivo

Dado que el problema de optimización que se presenta persigue lograr la minimización de los flujos calóricos de utilidades frías y calientes, se define como función objetivo la siguiente expresión:

$$FO: \min (Q_H + Q_W) \tag{3.47}$$

La solución al modelo de transporte se determina a través del *software MATLAB*, cuyos resultados se ofrecen en la **Tabla 3.4**.

Tabla 3.4. Resultados del diagrama de cascada o modelo de transporte

Variables	Resultados	Variables	Resultados	Variables	Resultados
QH	17 880,87	R16	15 469,92	R32	10 160,17
R1	8 375,38	R17	14 078,38	R33	9 733,48
R2	1 041,27	R18	14 039,54	R34	8 583,32
R3	0	R19	12 811,56	R35	8 431,31
R4	5 437,72	R20	12 434,99	R36	8 418,39
R5	7 510,85	R21	12 179,88	R37	8 276,36
R6	9 104,89	R22	12 029,28	R38	8 070,21
R7	9 949,23	R23	11 435,89	R39	8 077,62
R8	15 079,64	R24	11 674,43	R40	8 106,3
R9	15 206,83	R25	11 752,47	R41	8 063,81
R10	16 077,46	R26	11 854,33	R42	7 850,31
R11	16 568,91	R27	12 957,62	R43	9 365,45
R12	16 586,62	R28	12 959,74	R44	9 665,92
R13	16 195,29	R29	12 320,3	R45	12 195,67
R14	16 182,4	R30	11 350,01	QW	22 398,66
R15	15 732,8	R31	11 013,88		

Según los resultados del modelo de transporte (**Tabla 3.4**), los flujos calóricos mínimos de utilidades que requiere el proceso son:

- Requerimiento mínimo de utilidad caliente (Q_H): 22 398,66 kW
- Requerimiento mínimo de utilidad fría (Q_W): 17 880,87 kW

Como se puede apreciar, las necesidades de enfriamiento representan casi el 80% de las de calentamiento, lo que demuestra una vez más que el sistema presenta un exceso de energía, el cual debe extraerse por medio de utilidades frías. Sin embargo, se evidencia que también se necesita suministrar calor en algunas etapas del proceso.

El valor del calor neto resultante es 4 517,79 kW cuando se determina la diferencia entre las utilidades frías y calientes (ecuación 2.9), a partir de la optimización del modelo correspondiente al diagrama de cascada. Este resultado verifica el que se alcanza en la obtención de los datos térmicos de las corrientes y en el diagrama de intervalos de temperatura.

En el diagrama de cascada solamente se administra calor al sistema por encima del *pinch* y se extrae del sistema por debajo del mismo.

En la **Tabla 3.4** se observa que el flujo de calor residual R3 es nulo, el cual se corresponde con la salida del intervalo C. Esto indica que no se transfiere energía entre los intervalos de temperatura C y D, lo cual significa que el punto de *pinch* se localiza precisamente en la frontera entre ambos. Por esta razón se puede plantear que la temperatura del *pinch* es de 558 K por el lado caliente y de 538 K por el frío.

3.8. Construcción del modelo de transporte ampliado

La representación esquemática del modelo de transporte ampliado se confecciona con la herramienta *Excel* de *Microsoft Office*, y para una mejor comprensión a causa de sus dimensiones se encuentra como un archivo adjunto al presente documento. Las restricciones derivadas del mismo se muestran en el **Anexo 14**.

El modelo consta de 826 ecuaciones, 2 711 parámetros totales y tres conocidos (Q_{AH23} , R_{12E} y R_{22Q^*}), lo que da como resultado 1 882 grados de libertad para el sistema. En la solución del problema de optimización se emplea también como función objetivo la expresión 3.47. Los resultados que se obtienen mediante el *software MATLAB* aparecen en el **Anexo 15**.

Se corrobora la determinación del punto de *pinch* con los resultados que se derivan de la optimización matemática según el método de programación lineal. Es posible apreciar que los valores correspondientes a cada residual en la salida del intervalo de temperatura C son iguales a cero, lo cual verifica el resultado que se desea obtener al no intercambiar energía a través del *pinch*.

Los flujos mínimos que demandan las utilidades frías y calientes son aproximadamente iguales a los del modelo de cascada, y por supuesto, lo mismo sucede con el flujo de calor neto. En la **Tabla 3.5** se muestra el porcentaje de error o desviación relativa (ecuación 2.10) que presentan los resultados de la optimización del diagrama de cascada con respecto a la del modelo de transporte ampliado. Se observa que la variación es despreciable en todos los casos, al ser las diferencias porcentuales relativas inferiores al 1%.

Tabla 3.5 – Porcentaje de error relativo para los resultados obtenidos

	Cascada	Ampliado	Error relativo (%)
QH (kW)	17 880,87	17 881	0,00
QW (kW)	22 398,66	22 365	0,15
Qneto (kW)	4 517,79	4 484	0,75

3.9. Distribución de la cantidad de calor a intercambiar

Dado que una corriente nunca debe transferir calor a través del *pinch*, para proponer la red de intercambio de calor entre las mismas se hace necesario confeccionar por separado la distribución de intercambio sobre y bajo el *pinch*.

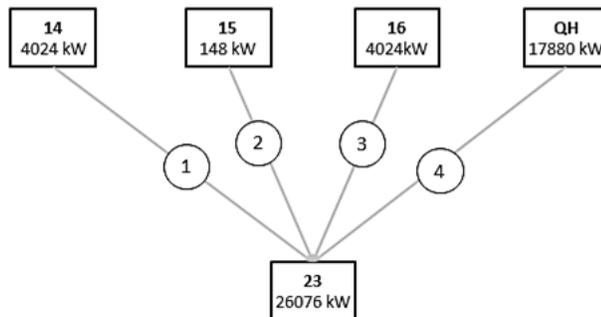
En la **Tabla 3.6** se muestran las cantidades energéticas a intercambiar entre las corrientes calientes (columnas) y frías (filas) sobre el punto de *pinch*, teniendo en cuenta las utilidades calientes.

Tabla 3.6 – Cantidad de calor a intercambiar sobre el *pinch*

	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18	19	20	21	22	24	25	28	29	30	31	32	33	34	35	QH	Total
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
23	-	-	-	-	-	4 024	148	4 024	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17 880	26 076
26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
Total	0	0	0	0	0	4 024	148	4 024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17 880	kW

En la Figura 3.2 se muestra la distribución de las cantidades energéticas sobre el *pinch*.

Figura 3.2 - Distribución de las cantidades energéticas sobre el *pinch*



En la Figura 3.2 se muestra que la energía aportada por las corrientes calientes no es suficiente para satisfacer la demanda de la fría (23), por lo que esta falta debe suplirse con utilidad caliente. Como se puede observar, se necesitan cuatro intercambiadores sobre el punto de *pinch*.

En la **Tabla 3.7** muestran los flujos de calor a intercambiar entre las corrientes calientes (columnas) y frías (filas) por debajo del *pinch*, incluyendo las utilidades frías.

Tabla 3.7 – Cantidad de calor a intercambiar bajo el *pinch*

	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18	19	20	21	22	24	25	28	29	30	31	32	33	34	35	Total
1	578	224	162	144	150	154	137	154	200	116	128	208	242	-	33	3	55	75	9	116	14	134	211	139	3 386
2	1 279	581	553	415	406	469	287	469	747	-	144	547	478	-	-	-	60	95	-	62	-	45	366	184	7 187
3	856	329	207	181	188	197	166	197	278	117	154	298	336	-	34	3	61	86	9	135	14	13	275	168	4 302
4	953	441	231	204	205	227	163	227	664	-	117	424	322	-	-	-	42	65	-	43	-	23	235	123	4 709
5	44	78	485	337	322	373	207	373	34	-	19	80	137	-	-	-	37	60	-	-	-	-	152	91	2 829
6	-	-	1 359	340	464	3 719	427	3 719	-	-	-	-	11	-	-	-	30	24	-	-	-	-	47	50	10 190
7	44	78	485	337	322	373	207	373	34	-	19	80	137	-	-	-	37	60	-	-	-	-	152	91	2 829
13	5 424	1 098	3 171	1 349	1 214	1 919	691	1 919	1 731	116	282	1 004	998	-	17	-	122	196	-	171	-	176	810	401	22 809
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
26	64	58	52	49	43	48	45	48	58	3	41	57	56	-	-	-	19	27	-	34	-	27	52	42	823
27	54	57	73	69	69	66	61	66	51	-	29	57	68	-	-	-	26	36	-	8	-	3	65	48	906
QW	14 489	465	430	332	337	303	292	303	442	326	255	439	504	1 524	90	9	73	123	56	241	153	294	486	285	22 251
Total	23 785	3 409	7 208	3 757	3 720	7 848	2 683	7 848	4 239	678	1 188	3 194	3 289	1 524	174	15	562	847	74	810	181	715	2851	1622	kW

Para entender con mayor facilidad el diagrama sobre la distribución de las cantidades energéticas bajo el *pinch*, este se adjunta al trabajo en un archivo de *Excel*. Por la complejidad de este esquema, no es posible colocar encima de las líneas de unión entre las corrientes los números de los intercambiadores. Por esto se debe conocer que la cantidad de equipos resultante de la confección del mismo es igual a 206 intercambiadores de calor. Este nuevo valor, sumado a la cantidad que se requiere sobre el *pinch*, hace un total de 210 de estos equipos

Por otra parte, se puede afirmar que la energía aportada por las corrientes calientes es capaz de satisfacer la demanda de las frías. En este caso sucede que se mantiene un exceso de calor residual, el que es necesario extraer mediante utilidades frías, razón por la cual todas las corrientes deberán intercambiar energía en enfriadores con utilidades de este tipo.

3.10. Diseño preliminar de la red de intercambio de calor

Cuando se obtienen las cantidades energéticas a intercambiar, se procede a establecer la distribución de los intercambiadores de calor. Para ello los mismos se ubican entre las corrientes frías y calientes, mientras que en los extremos del esquema se colocan los calentadores y enfriadores. El diagrama donde aparece la red de intercambio de calor propuesta se encuentra incluido en un archivo de *Excel* adjunto a la investigación. El

calentador en este caso representa al horno, el cual opera con *fuel oil*. Por su parte, todos los enfriadores emplean agua de enfriamiento a 303 K y 101,3 kPa, excepto el número 14 que al presentar un mayor consumo de utilidad se considera como un enfriador por aire, y utiliza aire atmosférico (también a 303 K y 101,3 kPa). Se comprueba que no existe intercambio de calor a través del *pinch*.

Inicialmente, la red que se propone tiene 210 intercambiadores de calor (incluye un calentador y 24 enfriadores), pero dado que una parte significativa de estos equipos tenía como función intercambiar pocos grados de temperatura (entre 0,3 y 2 K), se determina eliminarlos y reducir a 67 el número de intercambiadores de calor a emplear. Esta decisión implica una redistribución de los flujos de calor transferidos, con el objetivo de obtener el mayor acercamiento posible a las temperaturas reales de entrada y salida de las corrientes en el proceso.

En el **Anexo 16** se definen los principales parámetros de diseño y operación de los equipos que conforman la red integrada de intercambiadores de calor. Se considera que la temperatura de salida del agua es de 318 K y la del aire es 22 K menor que la temperatura de entrada de la corriente caliente con la que intercambia energía (López, 2013).

Se puede apreciar que en ninguno de los equipos existe cruce de temperatura. Sin embargo, en algunos casos las temperaturas de los cabezales son demasiado cercanas ($\Delta T < 10$), para lo cual se propone colocar intercambiadores de placas. Tal es el caso, de los intercambiadores número: 1, 2, 21, 30, 52, 75, 137, 144, 169 y 180.

3.11. Diseño final del diagrama de flujo integrado energéticamente

Para determinar el área de transferencia de calor (ecuación 2.11) se debe tener en cuenta algunos elementos, tales como el calor transferido (se determina con anterioridad), la diferencia media logarítmica de temperatura, el coeficiente global de transferencia de calor y el factor de corrección de temperaturas. La LMTD se calcula mediante la expresión 2.11 a partir de la diferencia de temperaturas entre los cabezales caliente y frío. El coeficiente global de transferencia de calor se obtiene según la tabla que refiere Edwards (2001) para sustancias que intercambian energía en cada equipo (**Anexo 8**), y el factor de corrección de la temperatura (**Anexo 9**) se selecciona por los gráficos de Kern (1999),

donde se tiene en consideración los parámetros P y R como se indica en el capítulo anterior (ecuaciones 2.13 y 2.14). Con los valores que se obtienen para dichos parámetros se puede establecer el área de transferencia de calor de cada equipo a proponer.

Cuando se calculan las áreas de los equipos, puede ser determinado el tipo de intercambiadores que representan. Según Incropera (2011) si dicha superficie de transferencia de calor es inferior o igual a 10 m² se considera que el intercambiador es de doble tubo, mientras que si excede los 1 500 m² se clasifica como un intercambiador de placas. En ambos casos se debe rectificar la ecuación para el cálculo del área, puesto que no se requiere la presencia del factor de corrección F_T. Mientras tanto, los equipos con un área de transferencia de calor comprendida en el rango de 10 a 1 500 m², constituyen intercambiadores de tubos y coraza, donde el número de pasos por cada lado depende del propio factor de corrección de la temperatura.

En este caso, los intercambiadores 70, 155, 166, 172 y 208 son de tubo en tubo, y el resto de ellos es de tubos y coraza. De estos últimos se puede plantear que los equipos 3, 6, 8, 56 y 76 son de dos pasos por la coraza y cuatro por los tubos (2-4), y los restantes son de 1-2 (**Anexo 17**). El intercambiador número 14, como se menciona anteriormente, se considera como un enfriador por aire, debido al elevado flujo de agua de enfriamiento que presenta si emplea esta utilidad. Se utiliza el software *Aspen-Hysys* para comprobar que se puede emplear un enfriador por aire en el caso del intercambiador de calor número 14; en la Figura 3.3 se observa dicha comprobación.

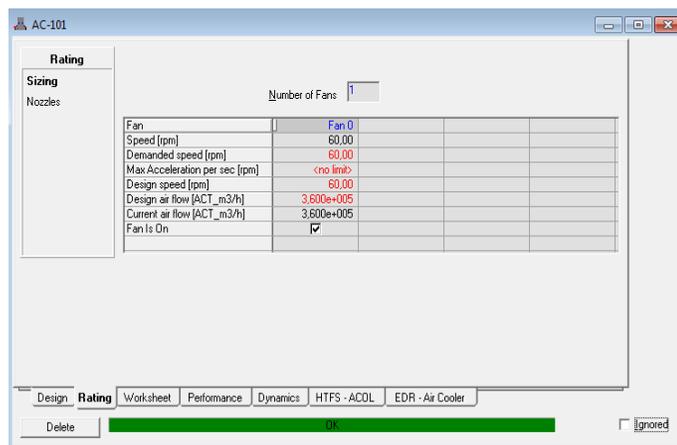


Figura 3.3. Comprobación del enfriador por aire

Además, se debe destacar el hecho de que el cuarto equipo constituye un horno, en el cual se emplea como agente de calentamiento la corriente formada por los gases generados por la combustión de *fuel oil*, y la transferencia de calor ocurre en la sección de convección del propio equipo.

Con respecto a los materiales de construcción, las placas serán de acero inoxidable AISI 304 (intercambiadores de placas), las corazas de acero al carbono y los tubos de acero inoxidable AISI 304 (intercambiadores de tubos y coraza), los tubos interiores de acero inoxidable AISI 304 y los exteriores de acero al carbono (intercambiadores de tubo en tubo). Mientras que los enfriadores por aire (que en este caso es uno solamente) también se construirán de acero inoxidable AISI 304 (González, 2014).

A partir de la expresión 2.10 se puede obtener el área de transferencia de calor de los equipos originales del proceso (antes de realizar la integración), del mismo modo que se determina la del proceso integrado, y los resultados se observan en la **Tabla 3.8**.

Tabla 3.8 – Área de transferencia de calor de los equipos originales

Equipos	No. de unidades	A (m ²)
E-107	1	51
E-108	1	28
E-101	4	262
E-104	4	518
E-102	4	160
E-103	3	227
E-105 A	2	141
E-105 B	2	141
E-106 A	6	696
E-106 B	6	696
E-100	1	1781
E-109	1	4
E-114	1	27
E-113	1	72
AC-100	1	464
A 111 A	1	121
A 106 A	1	130
A 111 B	1	422
A 107	1	577
3 A 101	1	39
A-110	1	157
A-104	1	235
A-105	1	551
A-106	1	285
F 101 (T-102)	1	268
Total		8 054

La **Tabla 3.9** permite efectuar una comparación entre el área total de transferencia de calor que existe originalmente y la que se obtiene luego de la integración energética.

Tabla 3.9 – Área total de transferencia de calor antes y después de la integración

Proceso	Cantidad de equipos	Área total (m ²)
Original	48	8 054
Integrado	67	15 106
Diferencia	19	7 052

Como se puede observar ocurre un incremento del área de transferencia de calor necesaria en 7 052 m², a la vez que el número de intercambiadores de calor aumenta en 19 unidades.

3.12. Análisis económico de la nueva red de intercambio de calor

En el análisis económico se determina el consumo de utilidades y la amortización del costo de adquisición de la nueva red de intercambio de calor, debido a que al no afectar las principales operaciones del proceso productivo el resto de los costos de producción no varían.

Se refleja en la **Tabla 3.10** el consumo por concepto de utilidades (agua de enfriamiento (ecuación 2.16) y *fuel oil* (ecuación 2.17)), así como por consumo de potencia en los enfriadores por aire. Dicho consumo se determina para el proceso actual y el proceso integrado, el cual permite obtener el porcentaje de ahorro para cada uno de estos equipos.

Tabla 3.10 – Consumo por concepto de utilidades

Utilidades	<i>Fuel oil</i>		Agua		Electricidad	
	Consumo (m ³ /h)	Costo (CUC/a)	Consumo (m ³ /h)	Costo (CUC/a)	Consumo de potencia (kWh/d)	Costo (CUC/a)
Original	3,35	5 625 739	319,91	3 927 174	10 800	21 740 400
Integrado	2,30	3 857 649	0,12	1 525	1 080	2 174 040
Ahorro	1,05	1 768 089	319,78	3 925 650	9 720	19 566 360
Reducción (%)	31,43		99,96		90	
Reducción total (%)	81					

El costo total de utilidades de la nueva red que se propone se determina mediante la ecuación 2.18, y el mismo arroja un valor de 6 033 215 CUC/a, lo que representa un ahorro considerable con respecto al costo original (31 293 314 CUC/a).

Para el cálculo de los costos anuales de operación por concepto de consumo de utilidades, se considera que la sección opera 24 horas durante 330 días al año.

Como se puede apreciar, la integración energética del proceso reporta un ahorro total de utilidades del 81% con respecto al proceso original, lo que se traduce en una reducción del costo total de 25 260 100 CUC al año, solamente por concepto de utilidades.

De forma individual, se puede observar que el consumo de *fuel oil* en el horno se reduce en un 31,43%, lo cual se traduce en una disminución del costo de casi dos millones de CUC anuales. Además, este resultado se debe a que las condiciones del horno, y por tanto, de la reacción química que en este se produce, son las mismas que al inicio de la integración.

Con respecto al agua de enfriamiento, se aprecia que la misma se reduce casi en un 100%, lo que representa un ahorro de 3 925 650 CUC/a, aproximadamente lo mismo que originalmente se consumía en la adquisición de este recurso (3 927 174,90 CUC/a). Al comprobar en el **Anexo 16** los enfriadores que emplean agua como agente de enfriamiento, se puede constatar que los flujos de utilidad requeridos para su operación (0,12 m³/h, en total), en dependencia de las temperaturas a alcanzar, son notablemente inferiores que los valores reales de los enfriadores existentes en la planta (319,91 m³/h, en total). Por lo tanto, el ahorro que se obtiene como resultado es lógico.

En el caso de la electricidad, el valor del ahorro que se calcula es del 90%, puesto que al inicio existen 10 enfriadores por aire y luego de la integración se determina que solamente es necesario uno. En términos monetarios este resultado representa un ahorro superior a 19 millones y medio de CUC al año, por lo cual, este es el costo que más incide en el ahorro de utilidades del proceso como consecuencia de la aplicación de la integración energética.

Los costos de cada equipo de la nueva red de intercambio de calor se muestran en el **Anexo 18**, para ello se utiliza el *software CapCost*, donde se tiene en consideración el tipo de intercambiador de calor, el material de construcción y el área de transferencia de calor para cada equipo.

Para la obtención de la nueva red de intercambio de calor se presentan dos alternativas. Una de ellas consiste en adquirir los 67 equipos que componen la red y desechar los que se encuentran instalados en la planta; mientras que la otra propone la reutilización de algunos de los intercambiadores originales. Para ello se verifica que el área de transferencia de calor de los mismos posee un margen de sobrediseño del 20%, con respecto a los intercambiadores que se proponen.

En el caso de la segunda alternativa, a continuación se muestra una relación de los intercambiadores que se pretende sustituir por otros ya existentes (**Tabla 3.11**).

Tabla 3.11 – Intercambiadores a reutilizar en la nueva red

IC propuesto	IC original	Área necesaria	Área disponible
7	E-107	50	51
190	E-108	26	28
32	E-101	252	262
11	E-104	509	518
97	E-103	218	227
122	E-105 A	141	141
43	E-105 B	141	141
192	E-114	24	27
199E	E-113	72	72
4C	F 101 (T-102)	268	268

Como se observa en la **Tabla 3.11**, es posible reutilizar diez de los equipos originales en la planta, dado que sus superficies de transferencia de calor son similares.

El costo de adquisición de la nueva red de intercambio de calor se determina por medio de la ecuación 2.19, y con este valor es posible estimar el costo de amortización de la inversión que representa la misma (ecuación 2.20). Según plantea González (2014), se considera un tiempo de vida útil igual a 10 años.

La ganancia que se obtiene al efectuar la integración energética del proceso consiste en el ahorro total por concepto de utilidades en CUC anuales.

El porcentaje de retorno anual de la inversión se calcula por la ecuación 2.21, mientras que el plazo de recuperación de la misma se obtiene a través de la expresión 2.22.

En las **Tablas 3.12 y 3.13** se presentan los valores obtenidos para la primera y la segunda alternativas, respectivamente.

Tabla 3.12 – Indicadores económicos para la alternativa número 1

Inversión (Costo de la red) (CUC)	17 636 865
Tiempo de vida útil (a)	10
Costo (amortización de la red) (CUC/a)	1 763 687
Ganancia (CUC/a)	25 260 100
Retorno (%/a)	143
PRI (a)	0,70

Tabla 3.13 – Indicadores económicos para la alternativa número 2

Inversión (Costo de la red) (CUC)	15 816 337
Tiempo de vida útil (a)	10
Costo (amortización de la red) (CUC/a)	1 581 634
Ganancia (CUC/a)	25 260 100
Retorno (%/a)	160
PRI (a)	0,63

Al efectuar una comparación entre ambas alternativas, se puede apreciar que resultan muy similares. La alternativa número 2 reporta un ahorro de 1 820 528 CUC con respecto a la alternativa número 1, por lo cual el costo de amortización también disminuye (en 182 053 CUC/a). Como el ahorro por concepto del consumo de utilidades es el mismo en ambos casos, la propuesta de mayor costo de inversión (1) presenta un ritmo de retorno menos acelerado que la de menor costo (2), lo cual se debe a la relación de proporcionalidad inversa que se establece entre el porcentaje anual de retorno y el valor de la inversión a efectuar (ecuación 2.21). Esto provoca que el período de tiempo en que la misma se recupera sea mayor en el primer caso que en el segundo. Además, con la aprobación de la segunda variante se aprovecha un horno y nueve intercambiadores de calor de los que ya se encuentran instalados en la planta, los cuales ya están amortizados y se encuentran dentro de su tiempo de vida útil. Por todo esto es posible afirmar que, al ser la más apropiada, se selecciona la alternativa número 2.

Con respecto a esta variante, se puede analizar si los indicadores económicos se encuentran dentro de los rangos permisibles. Se establece que el ritmo de retorno de la inversión debe ser superior al 17% en una industria química (Turton, 2009), lo cual se

logra en este caso al indicar que retorna a través de la ganancia el 160% de la misma al año. Este resultado permite recuperar la inversión en aproximadamente seis meses, y al tener los nuevos equipos un tiempo de vida útil igual a 10 años se considera un excelente resultado, pues según el criterio de Ulrich (1985) se establece que un tercio del tiempo de vida útil resulta adecuado para recuperar la inversión.

3.13. Conclusiones parciales del capítulo

1. A partir de la desintegración energética del proceso se identificaron 35 corrientes energéticas: 24 calientes y 11 frías.
2. El calor neto es de 4 517 kW, que al tener un valor positivo indica que al sistema se le debe extraer ese calor mediante utilidades frías.
3. La cantidad mínima necesaria de calentamiento es de 17 880 kW y la de enfriamiento de 22 398 kW.
4. El punto de *pinch* es 558 K por el lado caliente y 538 por el frío.
5. Se propuso una red óptima con 67 intercambiadores de calor, con un área total de transferencia de calor de 15106 m².
6. La red integrada permite reducir el consumo de portadores energéticos anuales: 99% para el agua de enfriamiento y 31% para el *fuel oil*, mientras que la energía eléctrica se ahorra en un 90%.
7. La inversión de la red de intercambio de calor integrada es de 15 millones de CUC y se recupera en seis meses con un ritmo de retorno de 160% anualmente.

Conclusiones

1. Se reduce el consumo de energía en la sección de destilación atmosférica objeto de estudio, al integrar las corrientes del proceso mediante programación matemática en un 81% con respecto al proceso original.
2. La nueva red de intercambio de calor que se propone consta de un calentador (horno), 24 enfriadores (uno por aire y el resto por agua) y 42 intercambiadores de calor entre las corrientes del proceso.
3. El análisis económico refleja que es factible la inversión de 15 816 337 CUC para la nueva red de intercambio de calor, con un retorno anual de 160% y un plazo de recuperación de la misma de aproximadamente seis meses.
4. Se garantiza un beneficio anual de 25 260 100 CUC al instalar la nueva red de intercambio de calor, lo cual corrobora la evaluación técnica y económica de la red propuesta.

Recomendaciones

1. Realizar el análisis de riesgos que genera la integración del proceso a través de la instalación de la red de intercambio de calor propuesta.

Bibliografía

1. Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland (ANCAP). (2013). Refinación de petróleo y economía del proceso. Uruguay.
2. Alcorta, D. R. (2011). Descripción del funcionamiento de la nueva torre de destilación atmosférica instalada en la refinería “Nico López” haciendo uso del simulador profesional HYSYS. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico. Facultad de Ingeniería Química, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE). La Habana, Cuba.
3. American Fuel and Petrochemical Manufacturers (AFPM) (2015). The Refining Process. Washington, DC.
4. Australian Institute of Petroleum (AIP) (2015). Refining of petroleum. Canberra, Australia.
5. Bachmann, D. y Mensing, F. (2010). Crude distillation unit design. Engineering design seminar.
6. Barberi, E. (2012). El Pozo Ilustrado I. Ediciones PDVSA. Caracas, Venezuela.
7. Barker, C. (2007). Petroleum technology. Volume 1. John Wiley & Sons. University of Tulsa. Oklahoma, USA.
8. Benítez, A.; Martínez, Y. y Domínguez, F. J. (2007). Tecnología *Pinch*: Una Introducción a la Integración Energética. Monografías. Universidad de Matanzas. 27 p. ISBN 978-959-16-0632-7.
9. Berger, B. D. y Anderson, K. E. (1978) Modern Petroleum, A Basic Primer of the Industry. Oil & Gas Journal Books.
10. Biegler L. T.; Grossmann, I. E. y Westerberg, A. W. (1997) Systematic Methods of Chemical Process Design. Prentice Hall. New Jersey, USA. pp. 1-408.
11. Boyce, M. P.; Edwards, V. H. y Cowley, T. W. (2008). Transport and storage of fluids. Perry's Chemical Engineers. 8va Ed. New York: McGraw-Hill. Section 6.
12. Braccia, L.; Nieto, L.; Luppi, P. y Basualdo, M. S. (2013). Esquemas de integración energética flexible para plantas químicas y diseño de la estructura de control reconfigurable. Universidad Tecnológica Nacional Regional Rosario. Santa Fe, Argentina.

13. Cabrera, L.; García, O., González; R., Rangel, J. y Rincón, D. (2012). Elaboración teórica para la destilación de crudo pesado mediante la destilación atmosférica y de vacío. Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.
14. Castillo, E. F. (2007). Power Integration of the Palm Oil Extraction Process. CEIAM. Universidad Industrial de Santander (UIS). *PALMAS*. Vol. 28, No. Especial, Tomo 2, p. 93-104. Bucaramanga, Colombia.
15. Castillo, R. (2014). Análisis de la gestión de la energía en la planta de destilación atmosférica de la refinería “Camilo Cienfuegos”. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico. Facultad de Ingeniería, Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez”. Cienfuegos, Cuba.
16. Cepero, L. (2013). Recuperación de hidrocarburos en la emulsión de la sosa agotada aplicando desemulsionantes en la planta de endulzamiento de Jet A-1. Trabajo final en opción al Título Académico de Especialista en Tecnologías de Refinación de Petróleo. Facultad de Ingenierías, Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”. Matanzas, Cuba.
17. Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI). (2016). Economic Indicators. [Consultado: 20 de mayo de 2016]. Disponible en:
<http://www.chemengonline.com/pci>
18. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) (2013). Anuario Estadístico de América Latina y el Caribe.
19. Cuesta, L. F. (2009). Integración energética de la columna de destilación atmosférica al banco de precalentamiento de crudo de la refinería “Nico López”. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico. Facultad de Ingeniería Química, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE). La Habana, Cuba.
20. Díaz, M. A. (2011). Introducción a la refinación de petróleo. Universidad de Los Andes. Publicaciones. Venezuela.
21. Domínguez, T. (2014). Análisis de riesgo a la red de intercambio de calor propuesta en la planta de desmineralización de aceite de una refinería de petróleo. Tesis presentada en opción al título de Ingeniera Química. Facultad de Ingenierías, Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”. Matanzas, Cuba.

22. Edwards, J. E. (2001). Process modelling and design of shell and tube heat exchangers. UK CHEMCAD Seminar. P & I Design Ltd. UK.
23. El-Halwagi, M. M. (1997). Pollution Prevention through Process Integration: Systematic Design Tools. Academic Press.
24. El-Halwagi, M. M. (2006). Process Integration. Academic Press. ISBN: 978-0-12-370532-7.
25. Escobar, M. (2011). Síntese Simultânea de Trocadores de Calor com considerações operacionais: Flexibilidade e Controlabilidade. Ph.D. Thesis. Department of Chemical Engineering, Federal University of Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil.
26. Felipe, Pilar *et al.* (1983). Programación Matemática I. Universidad de La Habana. Ciudad de La Habana.
27. Garrido, M. F. (2010). Simulación estacionaria de plantas de FCCU (*Fluid Cracking Catalitic Unit*) e integración energética. ENAP Refinerías Aconcagua. Facultad de Ingeniería, Universidad de Magallanes. Chile.
28. Gary, J. H.; Handwerk, G. E. y Kaiser, M. J. (2007). Petroleum Refining Technology and Economics, 5th Ed. CRC Press.
29. Gerardo, H. (2010). Procesos de destilación atmosférica de crudos y al vacío. [en línea]; [Consultado: 24 de enero del 2016]. Disponible en: <http://www.scribd.com/doc/41740415/PROCESOS-DE-DESTILACION-ATMOSFERICA-DE-CRUDOS-Y-AL-VACIO#scribd>
30. González, A. (2014). Integración energética mediante programación lineal en la Unidad de Desmineralización de Aceite de una refinería de petróleo. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico. Facultad de Ingenierías, Universidad de Matanzas. Matanzas, Cuba.
31. González, Y. (2015). Análisis de la planta de destilación atmosférica con solo dos hornos para el calentamiento de la materia prima de la torre fraccionadora. Trabajo final en opción al título académico de especialista en tecnologías de refinación de petróleo. Facultad de Ingenierías, Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”. Matanzas, Cuba.

32. Grupo Alfonso Gallardo (2007). Proyecto para la instalación de una Refinería de Petróleo en Extremadura (Refinería Balboa). España.
33. Guerra, O. (2013). Introducción al procesamiento de hidrocarburos. Universidad de Oriente. Venezuela.
34. Guerra, O. (2015). Procesamiento de hidrocarburos. Fundamentos teóricos de fraccionamiento. Curso de destilación.
35. Guinea, J. (2006). Los retos actuales de la refinación y la logística. Repsol YPF. Argentina.
36. Gundersen, T. (2000). A process integration primer. SINTEF Energy Research. Dept. of Thermal Energy and Hydro Power. Trondheim, Noruega.
37. Heredia, Y. O. (2008). Evaluación y rediseño en la red de intercambio de la unidad de destilación de la Refinería "Camilo Cienfuegos". Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico. Facultad de Ingeniería Química, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE). La Habana, Cuba.
38. Hernández, R. B. (2008). Refinación del petróleo. [en línea]; [Consultado: 20 de enero del 2016]. Disponible en: <http://www.pdvsa.com/trabajos36/refinacion-petroleo>
39. Incropera, F. et al. (2011). Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 7th Ed. McGraw Hill. New York, USA.
40. Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) (2014). Refinación. Secretaría de Energía (SENER). San Bartolo Atepehuacan, México D.F.
41. International Council on Clean Transportation (ICCT) (2011). Introducción a la refinación del petróleo y producción de gasolina y *diesel* con contenido ultra bajo de azufre. Bethesda, Maryland.
42. International Energy Agency (IEA) (1993). Process Integration. [en línea]; [Consultado: 19 de enero del 2016]. Disponible en: http://www.polymtl.ca/namp/docweb/ModulesWeb/M8_Part1_Tier1_Spanish.pdf
43. International Energy Agency (IEA) (2008). World Energy Outlook. [en línea]; [Consultado: 19 de enero del 2016]. Disponible en: <http://www.iea.org/>

44. Kemp, I. C. (2007). Pinch Analysis and Process Integration: A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy. 2nd Ed. Elsevier: Oxford, UK. 391 p. ISBN 978-0-75068-260-2.
45. Kern, D. Q. (1999). Procesos de transferencia de calor. Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V. (CECSA). 1era Ed. México, D.F. ISBN 968-26-1040-0.
46. Kraus, R. S. (2013). Industrias Químicas. Petróleo y gas natural. Proceso de refinación del petróleo. Enciclopedia de salud y seguridad. Ministerio del Trabajo y Asuntos Sociales. Madrid, España.
47. Kunt, H. (2010). Principales procesos de refinación. Refinación y destilación de petróleo. Universidad Central de Venezuela. Publicaciones.
48. Laukkanen, T. (2003). A Methodology for Cost-Effective Thermal Integration of Production Plant Sections and the Utility System. Degree of Licentiate of Science in Technology. Department of Mechanical Engineering, Helsinki University of Technology. Finland.
49. Linnhoff, B.; Townsend, D. W.; Boland, D.; Hewitt, G. F.; Thomas B. E. A.; Guy, A. R. y Marsland, R. H. (1982). A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy. 1st Ed. Institution of Chemical Engineers (IChemE). Rugby, U.K.
50. Lluch, J. (2008). Tecnología y margen de refinación. Ediciones Díaz de Santos. España.
51. López, Y. (2013). Propuesta y evaluación técnico económica de un proceso de sacarificación de cáscara de arroz para la producción de etanol. Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas Especialidad Ingeniería Química. Facultad de Ingenierías, Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”. Matanzas, Cuba.
52. Lugo, R. A. (2014). Optimización multiobjetivo de variables operacionales y de diseño en calderas recuperadoras de calor. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico. Facultad de Ingenierías, Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”. Matanzas, Cuba.
53. Martínez, O. (2007). Destilación atmosférica y al vacío. CONAQUIM. Margarita, Venezuela.

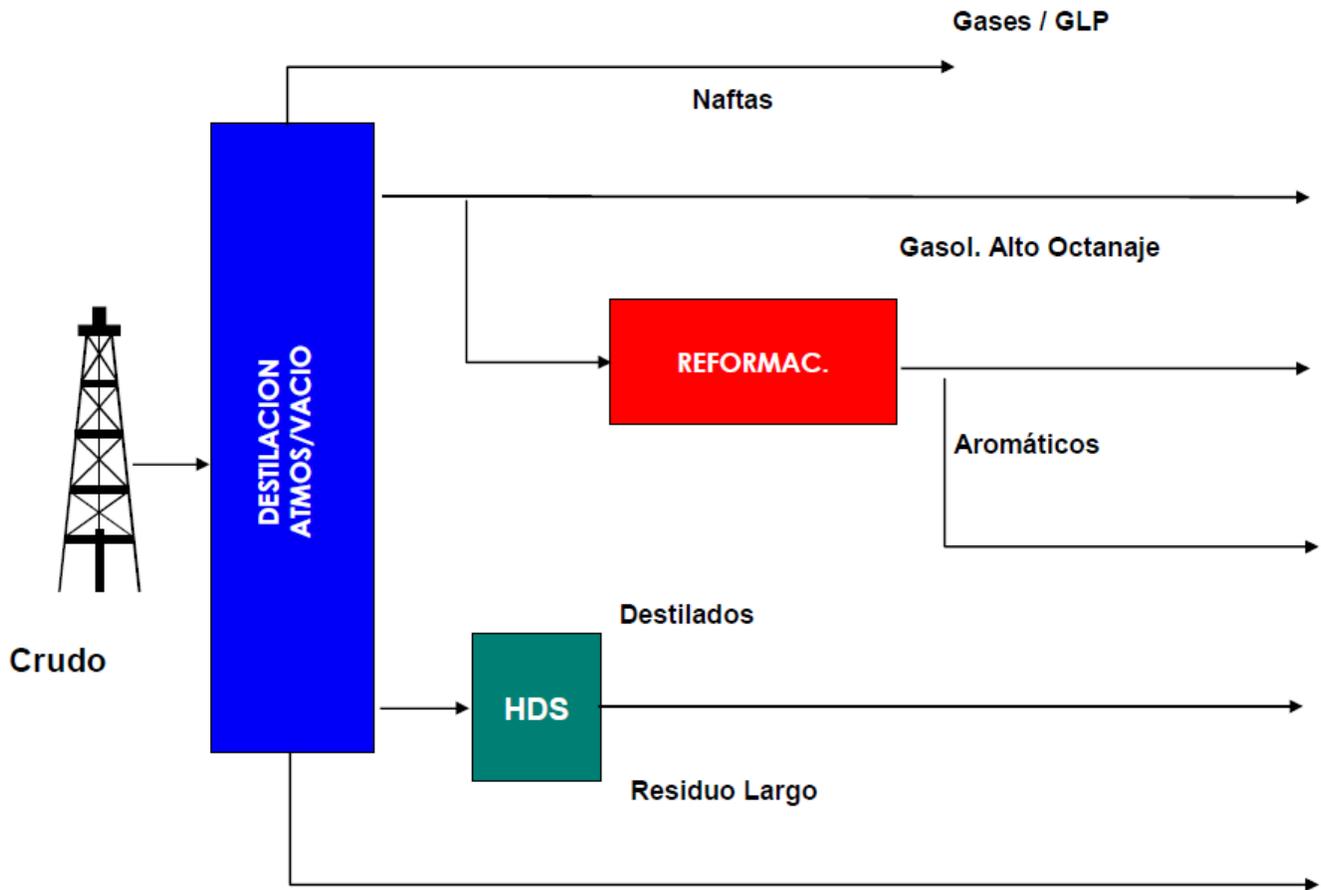
54. Mateos, E. (2004). Análisis Exergético de una planta de hidrodealquilación de tolueno y una planta simplificada de síntesis de amoníaco mediante el método de distribución de cargas exergéticas. Licenciatura en Ingeniería Química con área en Ingeniería de Procesos. Departamento de Ingeniería Química y Alimentos, Universidad de las Américas. Puebla. México.
55. Montes de Oca, L y Domínguez, F. J. (2008). Ahorro y Eficiencia Energética. Integración energética de procesos mediante Programación Matemática. [en línea]; [Consultado: 22 de enero del 2016]. Disponible en: <http://Scholar.Google.com/>
56. Montes de Oca, L. (2005). Comparación de las metodologías de integración energética en el caso de estudio de hidrodealquilación de tolueno. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico. Facultad de Ingenierías, Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”. Matanzas, Cuba.
57. Morlote, M. (2012). Evaluación de la torre rectificadora de destilación atmosférica con la dieta de crudo actual. Trabajo final en opción al Título Académico de Especialista en Tecnologías de refinación de petróleo. Facultad de Ingenierías, Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”. Matanzas, Cuba.
58. Muñoz, M. J. (2009). Evaluación y rediseño de la red de precalentamiento de crudo de la Refinería Níco López por medio del Análisis *Pinch*. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico. Facultad de Ingeniería Química, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE). La Habana.
59. North American Mobility Program in Higher Education (NAMP) (2003). Introduction to Process Integration. PIECE. USA.
60. Occupational Safety and Health Administration (OSHA) (1996). OSHA Instruction TED 1.15 CH-1. US Department of Labor. Washington, DC.
61. Parkash, S. (2003). Refining Processes Handbook. 1st Ed. Gulf Professional Publishing. ISBN-13: 978-0750677219.
62. PDVSA (2007). Destilación fraccionada. Manual del participante. CIED. Puerto La Cruz, Venezuela.
63. PDVSA (2011). La Refinería. Ministerio del Poder Popular para la Energía y Petróleo. Venezuela.

64. Pemex (2013). Principales insumos de una refinería. [en línea]; [Consultado: 23 de enero del 2016]. Disponible en:
<http://www.industriapetroleramexicana.com/tag/isomerizacion/>
65. Pérez, A. D. (2013). Propuesta de integración energética en la destilería de la corporación Cuba Ron de Cárdenas. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico. Facultad de Ingenierías, Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”. Matanzas, Cuba.
66. Pérez, G. A. (2008). Implementación de algoritmos de Análisis *Pinch* para la integración energética en industrias de procesos. Tesis presentada en opción al título de Máster en Análisis y Control de Procesos. Facultad de Ingeniería Química, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE). La Habana, Cuba.
67. Pérez, A. R. (2012). Propuesta de un plan de ahorro energético en el horno F-101 de la planta de procesos de la Refinería “Camilo Cienfuegos”. Trabajo final en opción al título académico de especialista en tecnologías de refinación de petróleo. Facultad de Ingenierías, Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”. Matanzas, Cuba.
68. Polledo, A. (2011). Diseño preliminar de una columna de destilación multicomponente. Tesis presentada en opción al título de Ingeniera Química. Facultad de Ingenierías, Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”. Matanzas, Cuba.
69. Pontoni, A. (2004). El Futuro del Petróleo y Fósiles Energéticos. [en línea]; [Consultado: 21 de enero del 2016]. Disponible en:
<http://www.econlink.com.ar/energetico>
70. Puerta, J. F.; Castellanos, J. A., González, F. (2004). Método de Análisis para realizar estudios de integración energética entre procesos de fabricación de Azúcar Crudo, Pulpa y Papel de Bagazo. Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez”. Cienfuegos, Cuba.
71. Renedo C. J. y Fernández D. P. (2008). Tecnología *Pinch*. Curso de Tecnología *Pinch*. E.T.S.I. Industriales. Santander, España.

72. Repsol (2012) Los secretos mejor guardados de la destilación atmosférica. [en línea]; [Consultado: 21 de enero del 2016]. Disponible en: <http://blogs.repsol.com/innovacion/los-secretos-mejor-guardados-de-la-destilacion-atmosferica/>
73. Romero, K. (2011). Clasificación de las refinerías. Petroleoamérica. [en línea]; [Consultado: 21 de enero del 2016]. Disponible en: <http://www.petroleoamerica.com>
74. Romero, P. (2005). Comparación de las metodologías de integración energética en el caso de estudio para la producción de anhídrido acético. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico. Facultad de Ingenierías, Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”. Matanzas, Cuba.
75. Salazar, B. (2012). Investigación de operaciones. Programación Lineal. E-Resources, Training and Technology.
76. Sargent, R. G. (2009). Verification and validation of simulation models. En: Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference. Syracuse, E.E.U.U.
77. Seader, D. y Henley, J. (1998). Separation Process Principles. John Wiley & Sons, Inc. New York.
78. Smith, R.; Jobson, M. y Chen, L. 2010. Recent development in the retrofit of heat exchanger networks. Applied Thermal Engineering. Vol. 30, pp. 2281-2289. John Wiley & Sons, Inc. New York.
79. Tsatsaronis, G. (2007). Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics. Energy, Vol. April, No. 4, p. 249-53.
80. Turton, R. (2009). Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes. Prentice Hall. New York, USA.
81. Ulrich, G. D. (1985). Diseño y Economía de los Procesos de Ingeniería Química.
82. Visbal, E. J. y Proaño, J. F. (2014). Análisis de integración energética por el método *Pinch* de la unidad de destilación primaria de la refinería de Talara, Perú. Especialización en ingeniería de proceso de refinación de petróleo y petroquímicos básicos. Facultad de Ingenierías, Arquitectura, Artes y Diseño; Universidad de San Buenaventura. Cartagena, Colombia.

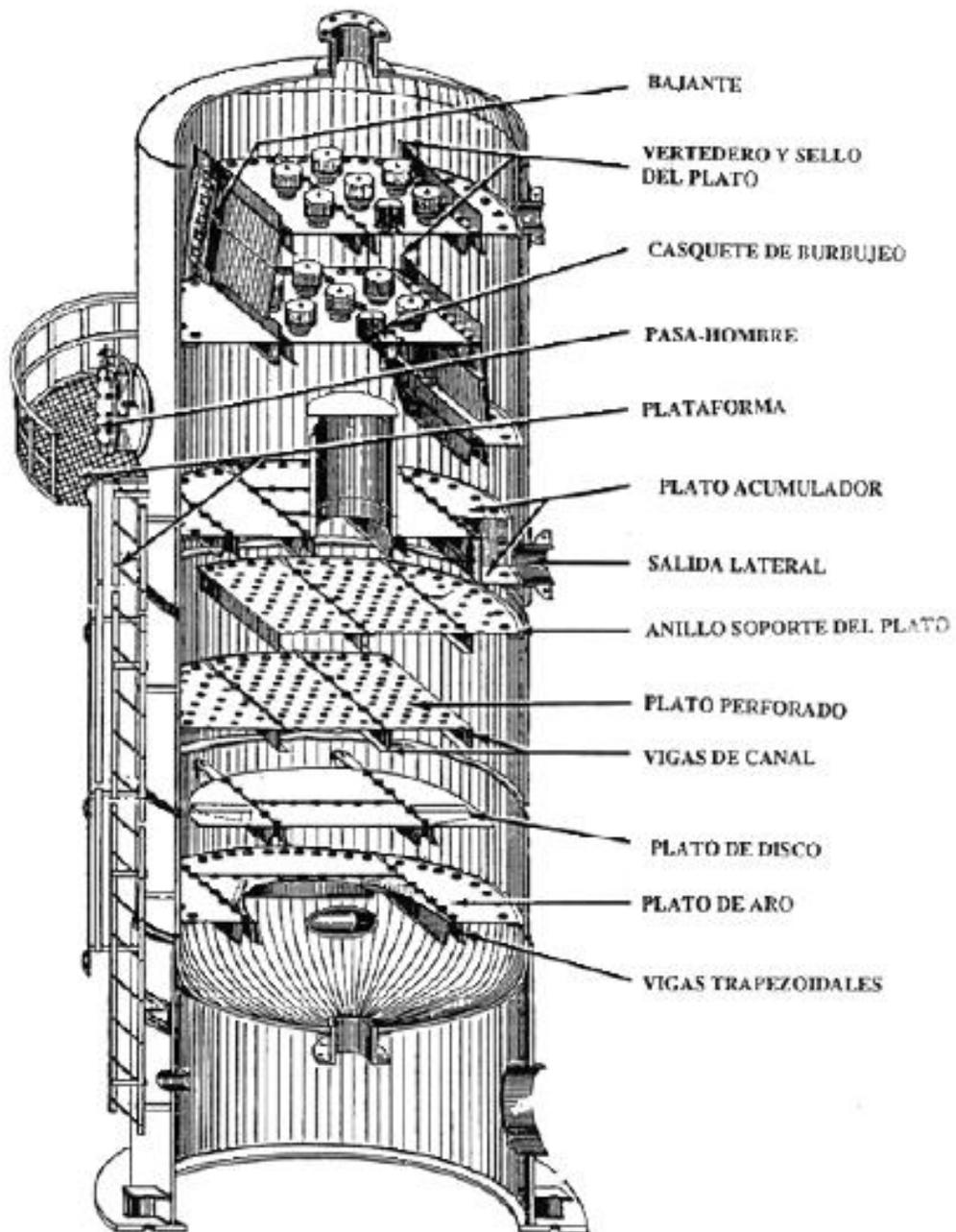
83. Vitutor (2014). Álgebra. Programación lineal. [en línea]; [Consultado: 19 de enero del 2016]. Disponible en:
http://www.vitutor.com/algebra/pl/programacion_lineal.html

Anexo 2 – Esquema de refinación del tipo *hydroskimming*



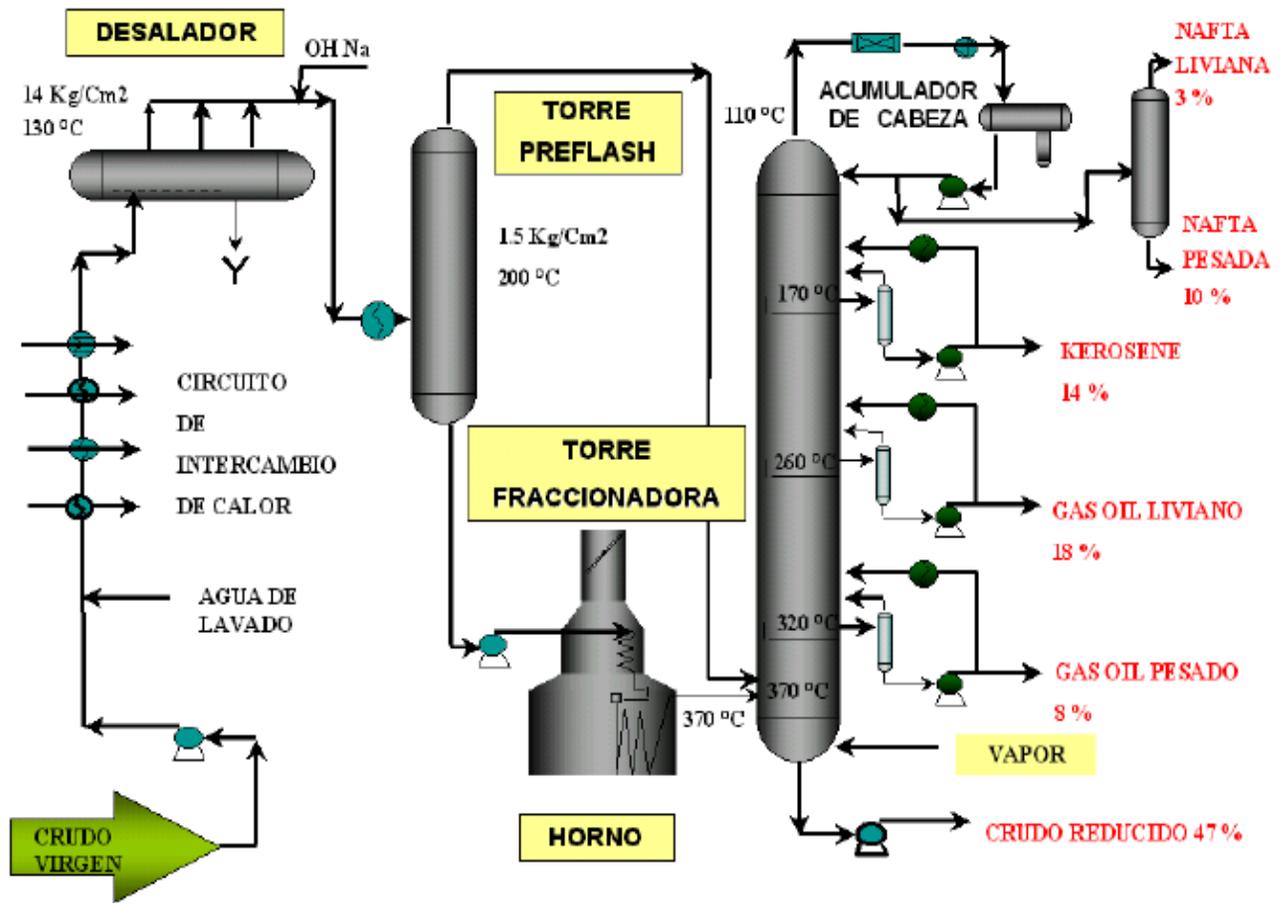
Fuente: Guerra (2013).

Anexo 3 – Columna de destilación y sus componentes internos



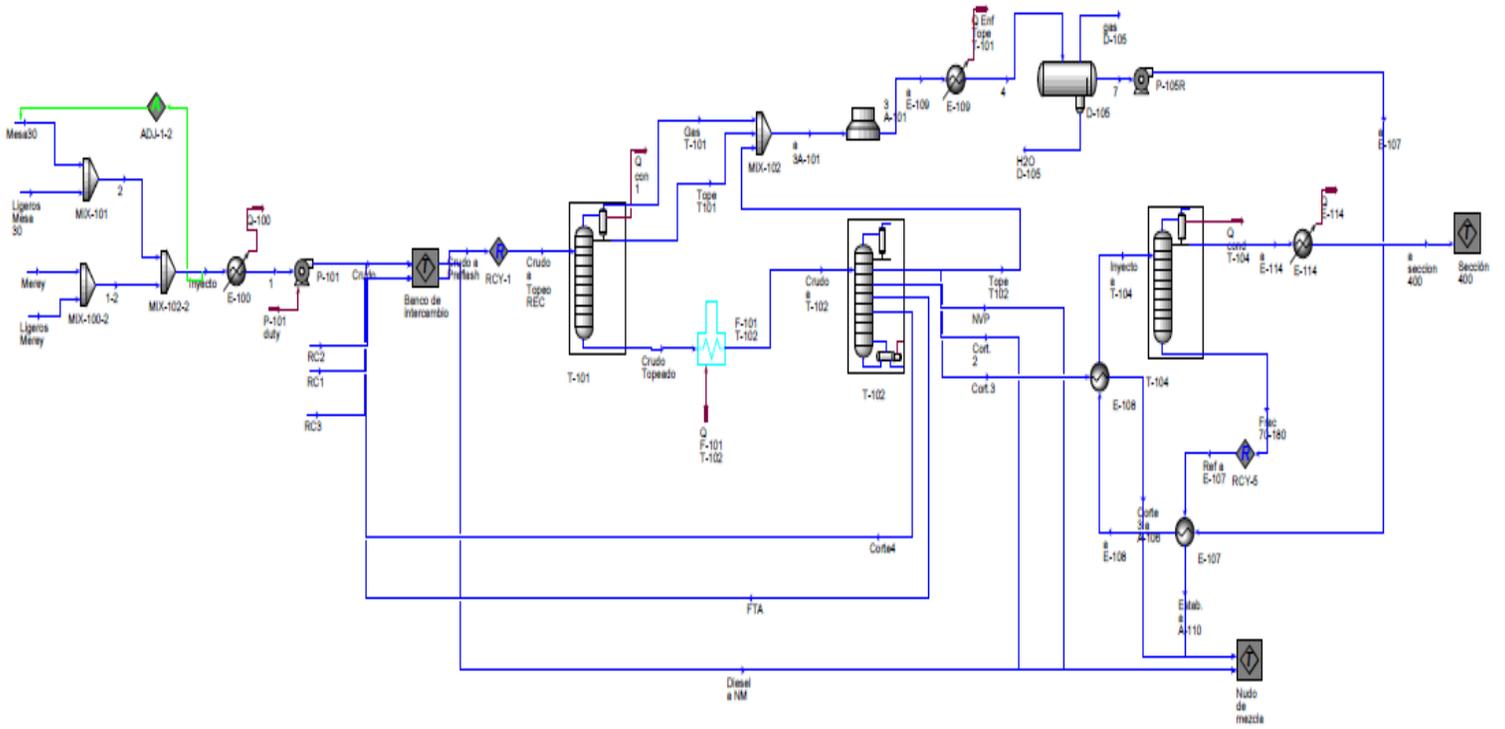
Fuente: Cabrera et al. (2012).

Anexo 4 – Unidad de destilación atmosférica



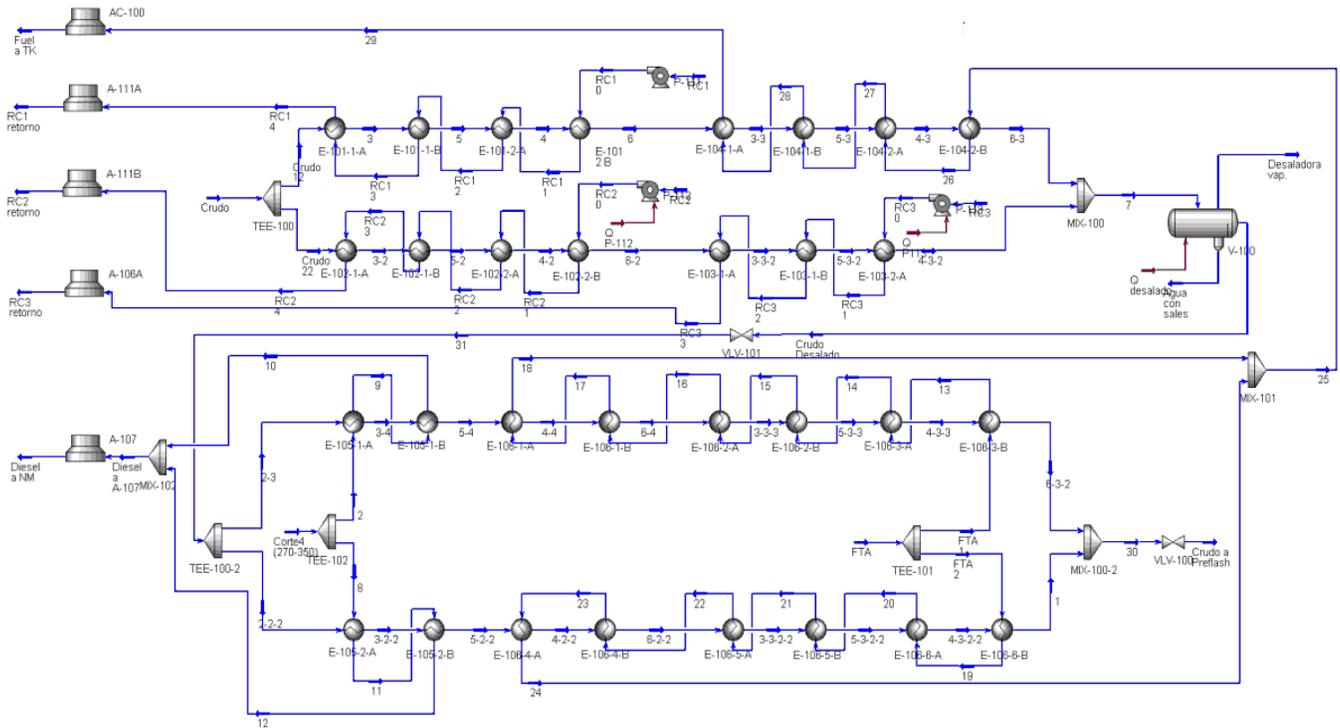
Fuente: Cabrera et al. (2012)

Anexo 5 – Esquema general de la sección de destilación atmosférica bajo estudio



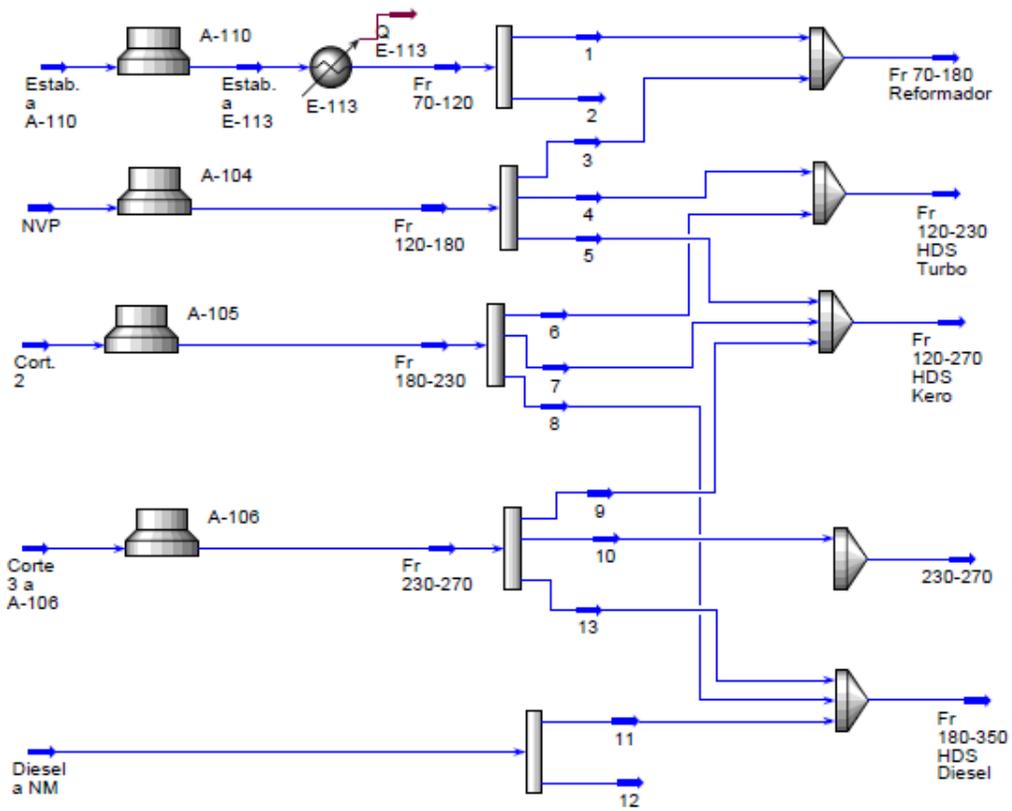
Fuente: Heredia (2008).

Anexo 6 – Diagrama del banco de intercambio de la sección de destilación atmosférica bajo estudio



Fuente: Heredia (2008).

Anexo 7 – Representación del nudo de mezcla en la sección de destilación atmosférica bajo estudio



Fuente: Heredia (2008).

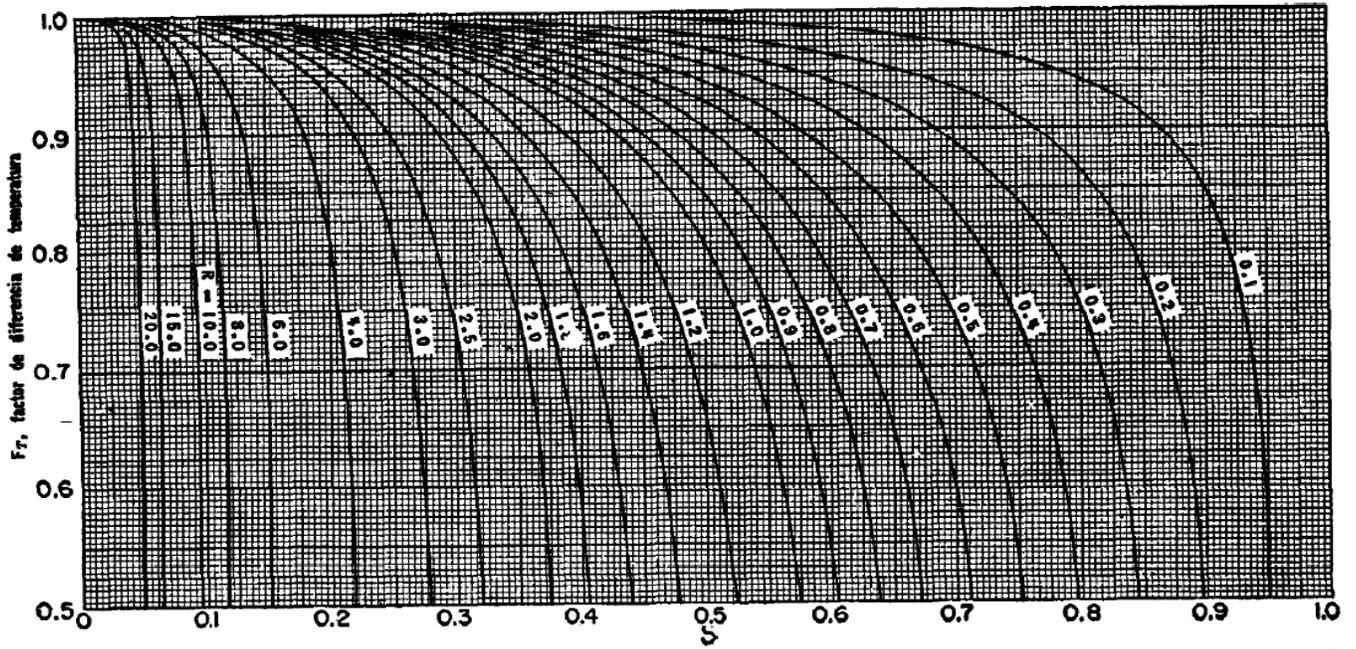
Anexo 8 – Coeficientes de transferencia de calor

TYPICAL OVERALL HEAT TRANSFER COEFFICIENTS (fouling~0.003 ft ² hdegF/Btu)				Units U Btu/ h ft ² degF ▼	
Fouling	Inside (Btu/ft ² hdegF) 2000 ▼	Outside (Btu/ft ² hdegF) 2000 ▼	Typical OHTC		
Application	Hot fluid	Cold fluid	Minimum	Maximum	
Heat exchangers	Water	Water	141	264	
	Aqueous solutions	Aqueous solutions(1)	250	500	
	Organic solvents	Organic solvents	18	53	
	Light oils	Light oils	18	70	
	Medium organics	Medium organics (1)	20	60	
	Heavy organics	Light organics(1)	30	60	
	Heavy organics	Heavy organics(1)	10	40	
	Light organics	Heavy organics(1)	10	40	
	Gases	Gases	2	9	
Coolers	Water	Water (1)	250	500	
	Methanol	Water (1)	250	500	
	Organic solvents	Water	44	132	
	Aqueous solutions	Water(1)	250	500	
	Light oils	Water	62	158	
	Medium organics	Water(1)	50	125	
	Heavy oils	Water	11	53	
	Gases	Water	4	53	
	Organic solvents	Brine	26	88	
	Water	Brine	106	211	
	Gases	Brine	3	44	
Heaters	Steam	Water	264	704	
	Steam	Aqueous solutions <2.0 cp (1)	200	700	
	Steam	Aqueous solutions >2.0 cp (1)	100	500	
	Steam	Organic solvents	88	176	
	Steam	Light organics/oils	53	158	
	Steam	Medium organics (1)	50	100	
	Steam	Heavy organics/oils	11	79	
	Steam	Gases	5	53	
	Dowtherm	Heavy oils	9	53	
	Dowtherm	Gases	4	35	
	Flue gases	Steam	5	18	
	Flue	Hydrocarbon vapors	5	18	
Condensers	Aqueous vapors	Water	176	264	
	Organic vapors	Water	123	176	
	Organics with non-condensibles	Water	88	123	
	Vacuum condensers	Water	35	88	
Vaporisers	Steam	Aqueous solutions	176	264	
	Steam	Light organics	158	211	
	Steam	Heavy organics	106	158	

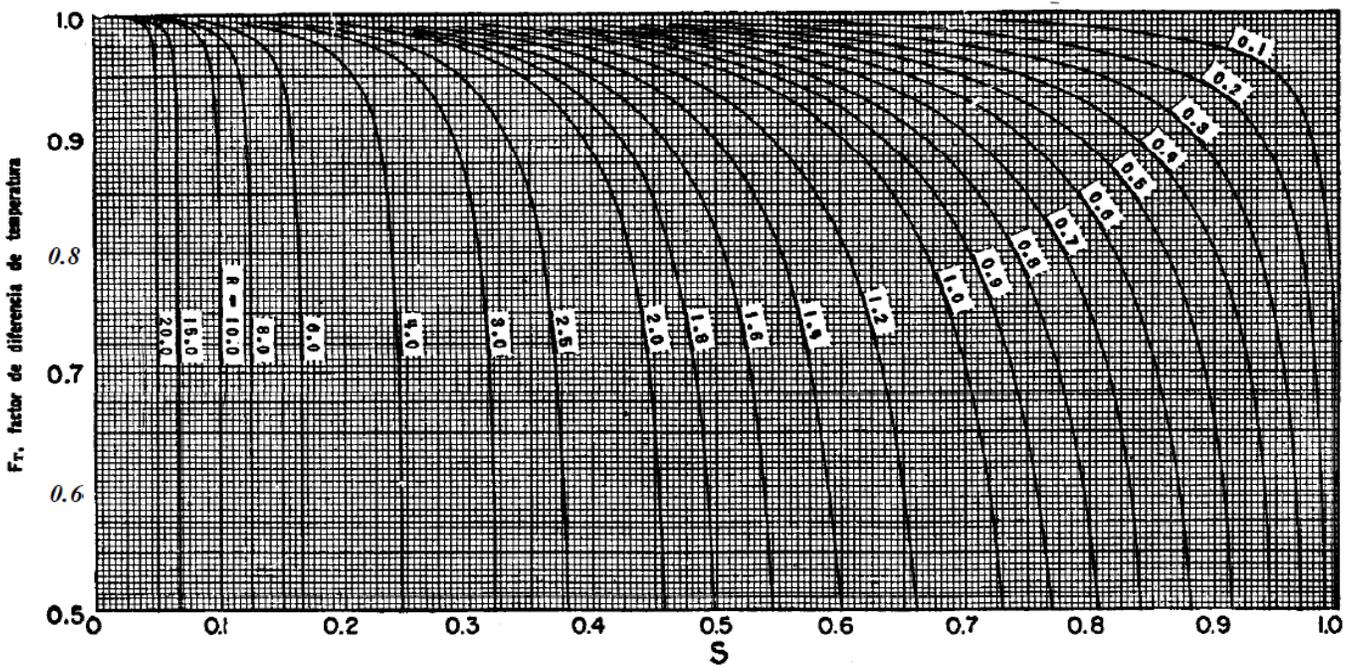
Fuente: Edwards (2001).

Anexo 9 - Factor de corrección F_T para LMTD

Intercambiadores 1-2

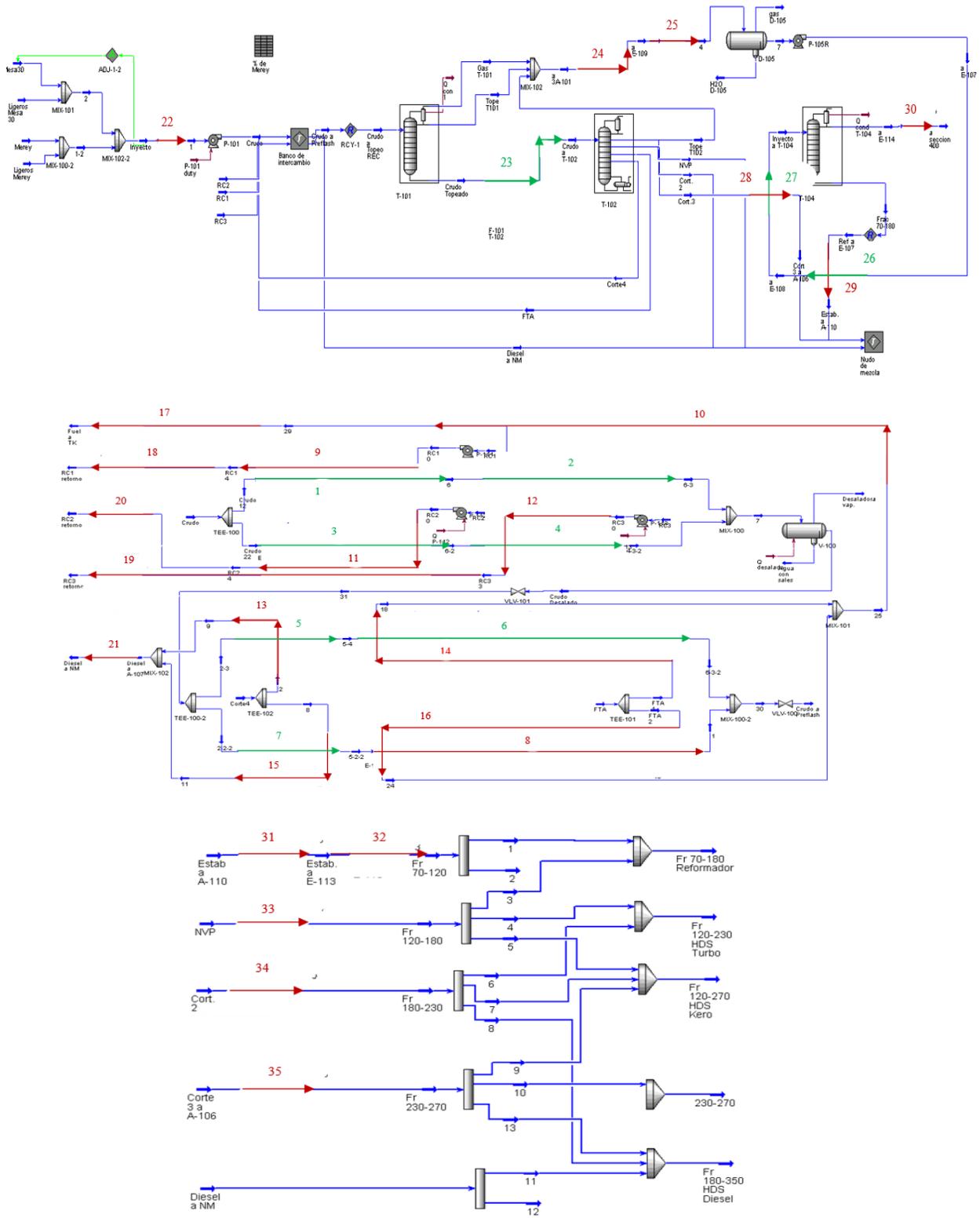


Intercambiadores 2-4

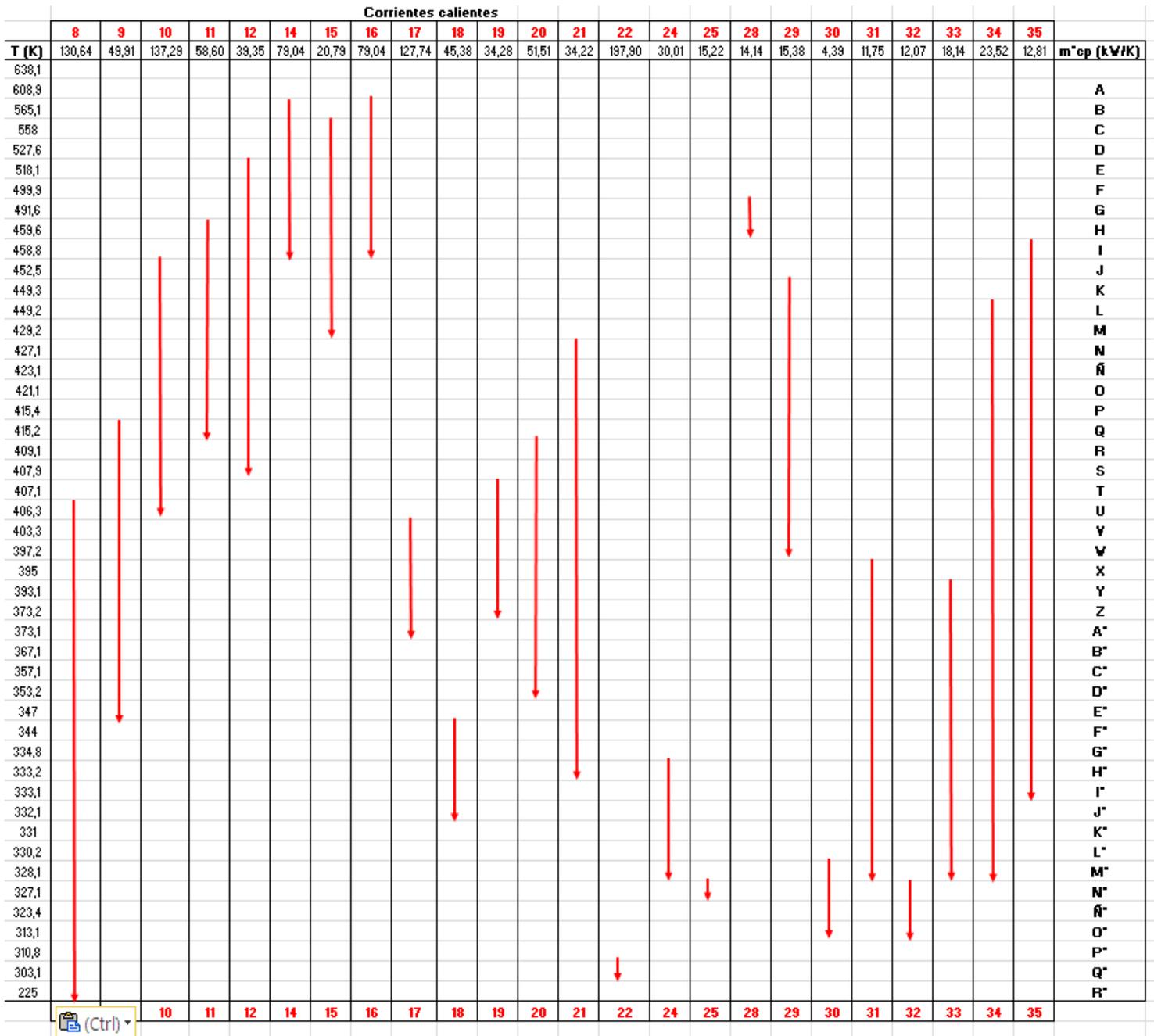


Fuente: Kern (1999).

Anexo 10 – Desintegración energética de la sección bajo estudio



Anexo 11 – Diagrama de intervalos de temperatura



Anexo 12 – Contenido energético de las corrientes en cada intervalo de temperatura

Intervalo	C (kW/K)	101,85	112,69	102,96	112,50	118,45	130,64	118,45	130,64	49,91	137,29	58,60	39,35	196,67
	ΔT intervalo (K)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
A	29,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B	43,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C	7,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D	30,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E	9,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	373,85	0
F	18,2	0	0	0	0	0	2377,65	0	0	0	0	0	716,21	0
G	8,3	0	0	0	0	0	1084,31	0	0	0	0	0	326,62	0
H	32	0	0	0	0	0	4180,48	0	0	0	0	1875,13	1259,27	0
I	0,8	0	0	0	0	0	104,51	0	0	0	0	46,88	31,48	0
J	6,3	0	0	0	0	0	823,03	0	0	0	864,92	369,17	247,92	0
K	3,2	0	0	0	0	0	418,05	0	0	0	439,33	187,51	125,93	0
L	0,1	0	0	0	0	0	13,06	0	0	0	13,73	5,86	3,94	0
M	20	0	0	0	0	0	2612,80	0	0	0	2745,79	1171,96	787,04	3933,36
N	2,1	0	0	0	0	0	274,34	0	0	0	288,31	123,06	82,64	413,00
Ñ	4	0	0	0	0	473,80	0	473,80	0	0	549,16	234,39	157,41	786,67
O	2	0	0	0	0	236,90	0	236,90	0	0	274,58	117,20	78,70	393,34
P	5,7	0	642,32	0	0	675,17	0	675,17	0	0	782,55	334,01	224,31	1121,01
Q	0,2	0	22,54	0	0	23,69	0	23,69	0	9,98	27,46	11,72	7,87	39,33
R	6,1	0	687,39	0	0	722,55	0	722,55	0	304,47	837,47	0	240,05	1199,68
S	1,2	0	135,22	0	135,00	142,14	0	142,14	0	59,90	164,75	0	47,22	236,00
T	0,8	0	90,15	0	90,00	94,76	0	94,76	0	39,93	109,83	0	0	157,33
U	0,8	0	90,15	0	90,00	94,76	0	94,76	104,51	39,93	109,83	0	0	157,33
V	3	0	338,06	0	337,51	355,35	0	355,35	391,92	149,74	0	0	0	590,00
W	6,1	0	687,39	0	686,26	0	0	0	796,90	304,47	0	0	0	1199,68
X	2,2	0	247,91	0	247,50	0	0	0	287,41	109,81	0	0	0	432,67
Y	1,9	0	214,11	0	213,75	0	0	0	248,22	94,83	0	0	0	373,67
Z	19,9	0	2242,48	0	2238,79	0	0	0	2599,74	993,27	0	0	0	3913,69
A*	0,1	0	11,27	0	11,25	0	0	0	13,06	4,99	0	0	0	19,67
B*	6	0	676,12	0	675,01	0	0	0	783,84	299,48	0	0	0	1180,01
C*	10	0	1126,87	1029,57	0	0	0	0	1306,40	499,13	0	0	0	1966,68
D*	3,9	397,20	0	401,53	0	0	0	0	509,50	194,66	0	0	0	767,01
E*	6,2	631,45	0	638,34	0	0	0	0	809,97	309,46	0	0	0	1219,34
F*	3	305,54	0	308,87	0	0	0	0	391,92	0	0	0	0	590,00
G*	9,2	936,99	0	947,21	0	0	0	0	1201,89	0	0	0	0	1809,35
H*	1,6	162,96	0	164,73	0	0	0	0	209,02	0	0	0	0	314,67
I*	0,1	10,18	0	10,30	0	0	0	0	13,06	0	0	0	0	19,67
J*	1	101,85	0	102,96	0	0	0	0	130,64	0	0	0	0	196,67
K*	1,1	112,03	0	113,25	0	0	0	0	143,70	0	0	0	0	216,33
L*	0,8	81,48	0	82,37	0	0	0	0	104,51	0	0	0	0	0
M*	2,1	213,88	0	216,21	0	0	0	0	274,34	0	0	0	0	0
N*	1	101,85	0	102,96	0	0	0	0	130,64	0	0	0	0	0
Ñ*	3,7	376,83	0	380,94	0	0	0	0	483,37	0	0	0	0	0
O*	10,3	0	0	0	0	0	0	0	1345,59	0	0	0	0	0
P*	2,3	0	0	0	0	0	0	0	300,47	0	0	0	0	0
Q*	7,7	0	0	0	0	0	0	0	1005,93	0	0	0	0	0
R*	78,1	0	0	0	0	0	0	0	10202,99	0	0	0	0	0
Q corriente (kW)		3432,24	7211,99	4499,24	4725,09	2819,14	11888,24	2819,14	23789,55	3414,05	7207,70	4476,88	4710,45	23246,16

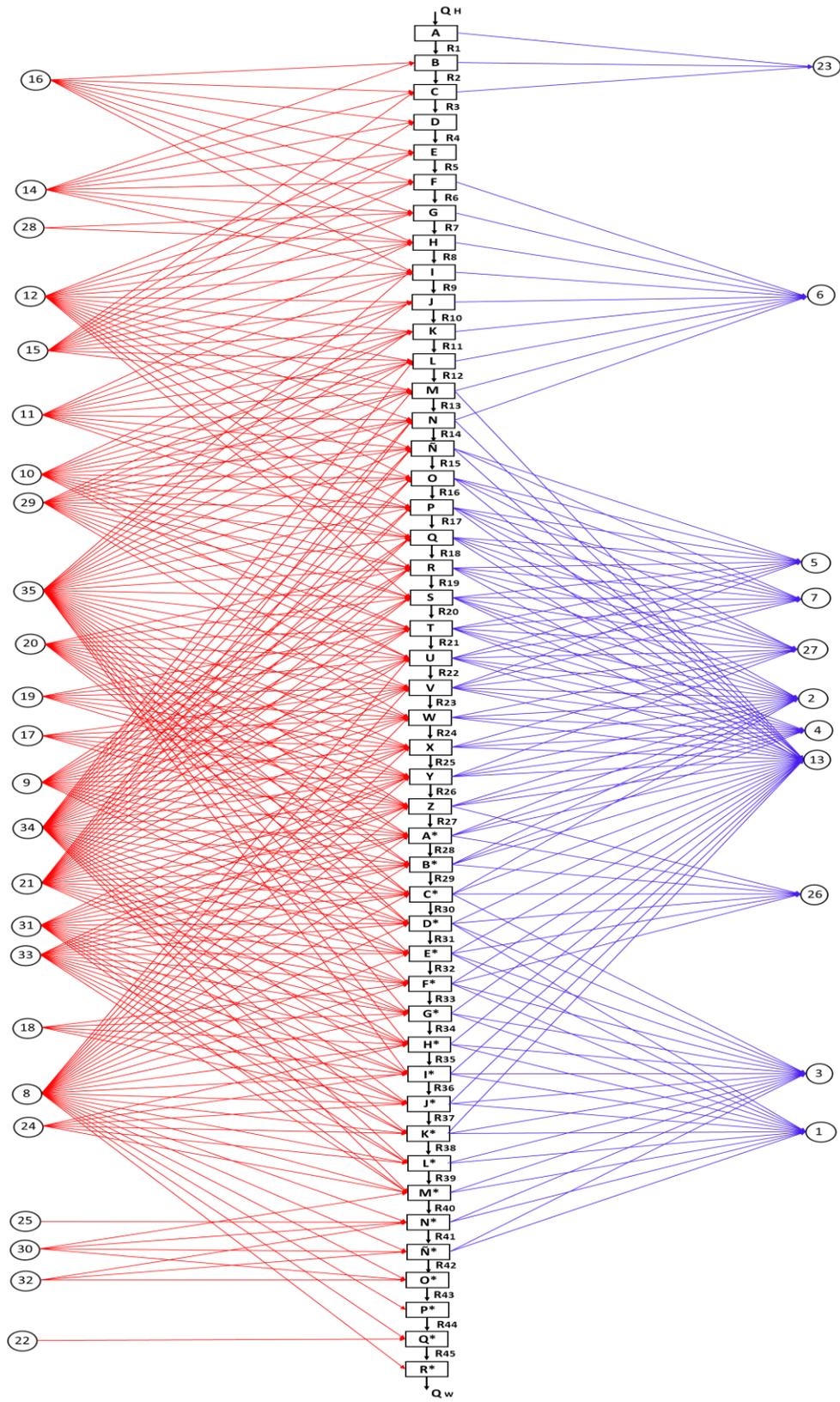
Anexo 12 – Contenido energético de las corrientes en cada intervalo de temperatura (continuación)

	C (kW/K)	79,04	20,79	79,04	127,74	45,38	34,28	51,51	34,22	197,90	325,53	30,01	15,22	17,21
Intervalo	ΔT intervalo [K]	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
A	29,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9505,49	0	0	0
B	43,8	3462,06	0	3462,06	0	0	0	0	0	0	14258,24	0	0	0
C	7,1	561,20	147,59	561,20	0	0	0	0	0	0	2311,27	0	0	0
D	30,4	2402,89	631,93	2402,89	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E	9,5	750,90	197,48	750,90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F	18,2	1438,57	378,33	1438,57	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
G	8,3	656,05	172,53	656,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H	32	2529,36	665,19	2529,36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	0,8	63,23	16,63	63,23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
J	6,3	0	130,96	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K	3,2	0	66,52	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L	0,1	0	2,08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M	20	0	415,74	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N	2,1	0	0	0	0	0	0	0	71,86	0	0	0	0	0
Ñ	4	0	0	0	0	0	0	0	136,87	0	0	0	0	0
O	2	0	0	0	0	0	0	0	68,43	0	0	0	0	0
P	5,7	0	0	0	0	0	0	0	195,04	0	0	0	0	0
Q	0,2	0	0	0	0	0	0	0	6,84	0	0	0	0	0
R	6,1	0	0	0	0	0	0	314,19	208,72	0	0	0	0	0
S	1,2	0	0	0	0	0	0	61,81	41,06	0	0	0	0	0
T	0,8	0	0	0	0	0	27,42	41,20	27,37	0	0	0	0	0
U	0,8	0	0	0	0	0	27,42	41,20	27,37	0	0	0	0	0
V	3	0	0	0	383,21	0	102,83	154,52	102,65	0	0	0	0	0
W	6,1	0	0	0	779,20	0	209,09	314,19	208,72	0	0	0	0	0
X	2,2	0	0	0	281,02	0	75,41	113,31	75,28	0	0	0	0	0
Y	1,9	0	0	0	242,70	0	65,13	97,86	65,01	0	0	0	0	0
Z	19,9	0	0	0	2541,99	0	682,11	1024,97	680,92	0	0	0	0	342,51
A*	0,1	0	0	0	12,77	0	0	5,15	3,42	0	0	0	0	1,72
B*	6	0	0	0	0	0	0	309,04	205,30	0	0	0	0	103,27
C*	10	0	0	0	0	0	0	515,06	342,17	0	0	0	0	172,12
D*	3,9	0	0	0	0	0	0	200,87	133,45	0	0	0	0	67,13
E*	6,2	0	0	0	0	0	0	0	212,15	0	0	0	0	106,71
F*	3	0	0	0	0	136,14	0	0	102,65	0	0	0	0	51,63
G*	9,2	0	0	0	0	417,48	0	0	314,80	0	0	0	0	0
H*	1,6	0	0	0	0	72,61	0	0	54,75	0	0	48,02	0	0
I*	0,1	0	0	0	0	4,54	0	0	0	0	0	3,00	0	0
J*	1	0	0	0	0	45,38	0	0	0	0	0	30,01	0	0
K*	1,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33,02	0	0
L*	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24,01	0	0
M*	2,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	63,03	0	0
N*	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15,22	0
Ñ*	3,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O*	10,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P*	2,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Q*	7,7	0	0	0	0	0	0	0	0	1523,82	0	0	0	0
R*	78,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Q corriente (kW)	11864,29	2824,98	11864,29	4240,91	676,14	1189,41	3193,38	3284,84	1523,82	26075,00	201,10	15,22	845,09

Anexo 12 – Contenido energético de las corrientes en cada intervalo de temperatura (continuación)

	C (kW/K)	19,04	14,14	15,38	4,39	11,75	12,07	18,14	23,52	12,81	
Intervalo	ΔT intervalo (K)	27	28	29	30	31	32	33	34	35	Qintervalo(kW)
A	29,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-9505,49
B	43,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-7334,11
C	7,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1041,27
D	30,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5437,72
E	9,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2073,13
F	18,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1594,04
G	8,3	0	117,39	0	0	0	0	0	0	0	844,34
H	32	0	452,57	0	0	0	0	0	0	0	5130,41
I	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	10,25	127,19
J	6,3	0	0	0	0	0	0	0	0	80,70	870,63
K	3,2	0	0	49,22	0	0	0	0	0	40,99	491,45
L	0,1	0	0	1,54	0	0	0	0	2,35	1,28	17,71
M	20	0	0	307,65	0	0	0	0	470,46	256,18	-391,33
N	2,1	0	0	32,30	0	0	0	0	49,40	26,90	-12,89
Ñ	4	0	0	61,53	0	0	0	0	94,09	51,24	-449,60
O	2	38,09	0	30,77	0	0	0	0	47,05	25,62	-262,88
P	5,7	108,55	0	87,68	0	0	0	0	134,08	73,01	-1391,54
Q	0,2	3,81	0	3,08	0	0	0	0	4,70	2,56	-38,84
R	6,1	116,16	0	93,83	0	0	0	0	143,49	78,13	-1227,98
S	1,2	22,85	0	18,46	0	0	0	0	28,23	15,37	-376,57
T	0,8	15,23	0	12,31	0	0	0	0	18,82	10,25	-255,11
U	0,8	15,23	0	12,31	0	0	0	0	18,82	10,25	-150,60
V	3	57,13	0	46,15	0	0	0	0	70,57	38,43	-593,39
W	6,1	116,16	0	93,83	0	0	0	0	143,49	78,13	238,54
X	2,2	41,89	0	0	0	25,85	0	0	51,75	28,18	78,04
Y	1,9	36,18	0	0	0	22,32	0	34,46	44,69	24,34	101,86
Z	19,9	0	0	0	0	233,80	0	360,96	468,11	254,90	1103,29
A*	0,1	0	0	0	0	1,17	0	1,81	2,35	1,28	2,12
B*	6	0	0	0	0	70,49	0	108,83	141,14	76,85	-639,44
C*	10	0	0	0	0	117,49	0	181,39	235,23	128,09	-970,29
D*	3,9	0	0	0	0	45,82	0	70,74	91,74	49,96	-336,13
E*	6,2	0	0	0	0	72,84	0	112,46	145,84	79,42	-853,71
F*	3	0	0	0	0	35,25	0	54,42	70,57	38,43	-426,69
G*	9,2	0	0	0	0	108,09	0	166,88	216,41	117,84	-1150,16
H*	1,6	0	0	0	0	18,80	0	29,02	37,64	20,49	-152,01
I*	0,1	0	0	0	0	1,17	0	1,81	2,35	1,28	-12,92
J*	1	0	0	0	0	11,75	0	18,14	23,52	0	-142,03
K*	1,1	0	0	0	0	12,92	0	19,95	25,88	0	-206,15
L*	0,8	0	0	0	0	9,40	0	14,51	18,82	0	7,41
M*	2,1	0	0	0	9,23	24,67	0	38,09	49,40	0	28,68
N*	1	0	0	0	4,39	0	12,07	0	0	0	-42,49
Ñ*	3,7	0	0	0	16,26	0	44,64	0	0	0	-213,50
O*	10,3	0	0	0	45,27	0	124,27	0	0	0	1515,14
P*	2,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	300,47
Q*	7,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2529,75
R*	78,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10202,99
	Q corriente (kW)	571,29	569,96	850,66	75,15	811,83	180,98	1213,48	2850,98	1620,34	4517,77

Anexo 13 – Diagrama de cascada



Anexo 14 – Restricciones del modelo de transporte ampliado

Intervalo A

$$Q_H - Q_{AH23} - R_{HA} = 0 \quad (1)$$

$$Q_{AH23} = 9505,49 \quad (2)$$

Intervalo B

$$R_{HA} - Q_{BH23} - R_{HB} = 0 \quad (3)$$

$$Q_{B1623} + R_{16B} = 3462,06 \quad (4)$$

$$Q_{B1423} + R_{14B} = 3462,06 \quad (5)$$

$$Q_{BH23} + Q_{B1623} + Q_{B1423} = 14258,24 \quad (6)$$

Intervalo C

$$R_{HB} - Q_{CH23} - R_{HC} = 0 \quad (7)$$

$$R_{16B} - Q_{C1623} - R_{16C} = -561,20 \quad (8)$$

$$R_{14B} - Q_{C1423} - R_{14C} = -561,20 \quad (9)$$

$$R_{15C} + Q_{C1523} = 147,59 \quad (10)$$

$$Q_{CH23} + Q_{C1623} + Q_{C1423} + Q_{C1523} = 2311,27 \quad (11)$$

Intervalo D

$$R_{16C} - R_{16D} = -2402,89 \quad (12)$$

$$R_{14C} - R_{14D} = -2402,89 \quad (13)$$

$$R_{15C} - R_{15D} = -631,93 \quad (14)$$

$$R_{HC} - R_{HD} = 0 \quad (15)$$

Intervalo E

$$R_{16E} - R_{16D} = 750,90 \quad (16)$$

$$R_{14E} - R_{14D} = 750,90 \quad (17)$$

$$R_{12E} = 373,85 \quad (18)$$

$$R_{15E} - R_{15D} = 197,48 \quad (19)$$

$$R_{HD} - R_{HE} = 0 \quad (20)$$

Intervalo F

$$R_{HE} - Q_{FH6} - R_{HF} = 0 \quad (21)$$

$$R_{12E} - Q_{F126} - R_{12F} = -716,21 \quad (22)$$

$$R_{16E} - Q_{F166} - R_{16F} = -1438,57 \quad (23)$$

$$R_{14E} - Q_{F146} - R_{14F} = -1438,57 \quad (24)$$

$$R_{15E} - Q_{F156} - R_{15F} = -378,33 \quad (25)$$

$$Q_{FH6} + Q_{F166} + Q_{F146} + Q_{F126} + Q_{F156} = 2377,65 \quad (26)$$

Intervalo G

$$R_{16G} + Q_{G166} - R_{16F} = 656,05 \quad (27)$$

$$R_{14G} + Q_{G146} - R_{14F} = 656,05 \quad (28)$$

$$R_{28G} + Q_{G286} = 117,39 \quad (29)$$

$$R_{12G} + Q_{G126} - R_{12F} = 326,62 \quad (30)$$

$$R_{15G} + Q_{G156} - R_{15F} = 172,53 \quad (31)$$

$$R_{HF} - Q_{GH6} - R_{HG} = 0 \quad (32)$$

$$Q_{G166} + Q_{G146} + Q_{G286} + Q_{G126} + Q_{G156} + Q_{GH6} = 1084,31 \quad (33)$$

Intervalo H

$$R_{16G} - Q_{H166} - R_{16H} = -2529,36 \quad (34)$$

$$R_{14G} - Q_{H146} - R_{14H} = -2529,36 \quad (35)$$

$$R_{28G} - Q_{H286} - R_{28H} = -452,57 \quad (36)$$

$$R_{12G} - Q_{H126} - R_{12H} = -1259,27 \quad (37)$$

$$R_{15G} - Q_{H156} - R_{15H} = -665,19 \quad (38)$$

$$Q_{H116} + R_{11H} = 1875,13 \quad (39)$$

$$R_{HG} - Q_{HH6} - R_{HH} = 0 \quad (40)$$

$$Q_{H166} + Q_{H146} + Q_{H286} + Q_{H126} + Q_{H156} + Q_{H116} + Q_{HH6} = 4180,48 \quad (41)$$

Intervalo I

$$R_{16H} - Q_{I166} - R_{16I} = -63,23 \quad (42)$$

$$R_{14H} - Q_{I146} - R_{14I} = -63,23 \quad (43)$$

$$R_{12H} - Q_{I126} - R_{12I} = -31,48 \quad (44)$$

$$R_{15H} - Q_{I156} - R_{15I} = -16,63 \quad (45)$$

$$R_{11H} - Q_{I116} - R_{11I} = -46,88 \quad (46)$$

$$R_{35I} + Q_{I356} = 10,25 \quad (47)$$

$$R_{28H} - Q_{I286} - R_{28I} = 0 \quad (48)$$

$$R_{HH} - Q_{IH6} - R_{HI} = 0 \quad (49)$$

$$Q_{H166} + Q_{H146} + Q_{H126} + Q_{H156} + Q_{H116} + Q_{H356} + Q_{H286} + Q_{HH6} = 104,51 \quad (50)$$

Intervalo J

$$R_{HI} - Q_{JH6} - R_{HJ} = 0 \quad (51)$$

$$R_{11I} - Q_{J116} - R_{11J} = -369,17 \quad (52)$$

$$R_{28I} - Q_{J286} - R_{28J} = 0 \quad (53)$$

$$R_{12I} - Q_{J126} - R_{12J} = -247,92 \quad (54)$$

$$R_{16I} - Q_{J166} - R_{16J} = 0 \quad (55)$$

$$R_{14I} - Q_{J146} - R_{14J} = 0 \quad (56)$$

$$R_{35I} - Q_{J356} - R_{35J} = -80,70 \quad (57)$$

$$R_{15I} - Q_{J156} - R_{15J} = -130,96 \quad (58)$$

$$R_{10J} + Q_{J106} = 864,92 \quad (59)$$

$$Q_{JH6} + Q_{J286} + Q_{J126} + Q_{J146} + Q_{J156} + Q_{J166} + Q_{J116} + Q_{J106} + Q_{J356} = 823,03 \quad (60)$$

Intervalo K

$$R_{11J} - R_{11K} - Q_{K116} = -187,51 \quad (61)$$

$$R_{10J} - R_{10K} - Q_{K106} = -439,33 \quad (62)$$

$$R_{28J} - R_{28K} - Q_{K286} = 0 \quad (63)$$

$$R_{12J} - R_{12K} - Q_{K126} = -125,93 \quad (64)$$

$$R_{16J} - R_{16K} - Q_{K166} = 0 \quad (65)$$

$$R_{35J} - R_{35K} - Q_{K356} = -40,99 \quad (66)$$

$$R_{15J} - R_{15K} - Q_{K156} = -66,52 \quad (67)$$

$$R_{29K} + Q_{K296} = 49,22 \quad (68)$$

$$R_{14J} - R_{14K} - Q_{K146} = 0 \quad (69)$$

$$R_{HJ} - R_{HK} - Q_{KH6} = 0 \quad (70)$$

$$Q_{K286} + Q_{K126} + Q_{K166} + Q_{K146} + Q_{KH6} + Q_{K156} + Q_{K116} + Q_{K106} + Q_{K296} + Q_{K356} = 418,05 \quad (71)$$

Intervalo L

$$R_{10K} - Q_{L106} - R_{10L} = -13,73 \quad (72)$$

$$R_{11K} - Q_{L116} - R_{11L} = -5,86 \quad (73)$$

$$R_{29K} - Q_{L296} - R_{29L} = -1,54 \quad (74)$$

$$R_{28K} - Q_{L286} - R_{28L} = 0 \quad (75)$$

$$R_{12K} - Q_{L126} - R_{12L} = -3,94 \quad (76)$$

$$R_{16K} - Q_{L166} - R_{16L} = 0 \quad (77)$$

$$R_{35K} - Q_{L356} - R_{35L} = -1,28 \quad (78)$$

$$R_{15K} - Q_{L156} - R_{15L} = -2,08 \quad (79)$$

$$R_{14K} - Q_{L146} - R_{14L} = 0 \quad (80)$$

$$R_{HK} - Q_{LH6} - R_{HL} = 0 \quad (81)$$

$$Q_{L346} + R_{34L} = 2,35 \quad (82)$$

$$Q_{LH6} + Q_{L286} + Q_{L106} + Q_{L166} + Q_{L116} + Q_{L146} + Q_{L126} + Q_{L156} + Q_{L296} + Q_{L346} + Q_{L356} = 13,06 \quad (83)$$

Intervalo M

$$R_{10L} - R_{10M} - Q_{M106} - Q_{M1013} = -2745,79 \quad (84)$$

$$R_{11L} - R_{11M} - Q_{M116} - Q_{M1113} = -1171,96 \quad (85)$$

$$R_{12L} - R_{12M} - Q_{M126} - Q_{M1213} = -787,04 \quad (86)$$

$$R_{15L} - R_{15M} - Q_{M156} - Q_{M1513} = -415,74 \quad (87)$$

$$R_{29L} - R_{29M} - Q_{M296} - Q_{M2913} = -307,65 \quad (88)$$

$$R_{34L} - R_{34M} - Q_{M346} - Q_{M3413} = -470,46 \quad (89)$$

$$R_{35L} - R_{35M} - Q_{M356} - Q_{M3513} = -256,18 \quad (90)$$

$$R_{28L} - R_{28M} - Q_{M286} - Q_{M2813} = 0 \quad (91)$$

$$R_{16L} - R_{16M} - Q_{M166} - Q_{M1613} = 0 \quad (92)$$

$$R_{14L} - R_{14M} - Q_{M146} - Q_{M1413} = 0 \quad (93)$$

$$R_{HL} - R_{HM} - Q_{MH6} - Q_{MH13} = 0 \quad (94)$$

$$Q_{M106} + Q_{M116} + Q_{M286} + Q_{M166} + Q_{M146} + Q_{M126} + Q_{M156} + Q_{M296} + Q_{M356} + Q_{M346} + Q_{MH6} = 2612,80 \quad (95)$$

$$Q_{M1013} + Q_{M1113} + Q_{M2813} + Q_{M1613} + Q_{M1413} + Q_{M1213} + Q_{M1513} + Q_{M2913} + Q_{M356} + Q_{M3413} + Q_{MH13} = 3933,36 \quad (96)$$

Intervalo N

$$R_{10M} - R_{10N} - Q_{N106} - Q_{N1013} = -288,31 \quad (97)$$

$$R_{11M} - R_{11N} - Q_{N116} - Q_{N1113} = -123,06 \quad (98)$$

$$R_{29M} - R_{29N} - Q_{N296} - Q_{N2913} = -32,30 \quad (99)$$

$$R_{28M} - R_{28N} - Q_{N286} - Q_{N2813} = 0 \quad (100)$$

$$R_{12M} - R_{12N} - Q_{N126} - Q_{N1213} = -82,64 \quad (101)$$

$$R_{35M} - R_{35N} - Q_{N356} - Q_{N3513} = -26,90 \quad (102)$$

$$R_{15M} - R_{15N} - Q_{N156} - Q_{N1513} = 0 \quad (103)$$

$$R_{16M} - R_{16N} - Q_{N166} - Q_{N1613} = 0 \quad (104)$$

$$R_{14M} - R_{14N} - Q_{N146} - Q_{N1413} = 0 \quad (105)$$

$$R_{34M} - R_{34N} - Q_{N346} - Q_{N3413} = -49,40 \quad (106)$$

$$R_{HM} - R_{HN} - Q_{NH6} - Q_{NH13} = 0 \quad (107)$$

$$R_{21N} + Q_{N216} + Q_{N2113} = 71,86 \quad (108)$$

$$Q_{N106} + Q_{N286} + Q_{N146} + Q_{N166} + Q_{N116} + Q_{N126} + Q_{N156} + Q_{N296} + Q_{N346} + Q_{N356} + Q_{N216} + Q_{NH6} = 274,34 \quad (109)$$

$$Q_{N1013} + Q_{N2813} + Q_{N1413} + Q_{N1613} + Q_{N1113} + Q_{N1213} + Q_{N1513} + Q_{N2913} + Q_{N3413} + Q_{N3513} + Q_{N216} + Q_{NH13} = 413,00 \quad (110)$$

Intervalo N

$$R_{10N} - R_{10\tilde{N}} - Q_{\tilde{N}105} - Q_{\tilde{N}107} - Q_{\tilde{N}1013} = -549,16 \quad (111)$$

$$R_{11N} - R_{11\tilde{N}} - Q_{\tilde{N}115} - Q_{\tilde{N}117} - Q_{\tilde{N}1113} = -234,39 \quad (112)$$

$$R_{12N} - R_{12\tilde{N}} - Q_{\tilde{N}125} - Q_{\tilde{N}127} - Q_{\tilde{N}1213} = -157,41 \quad (113)$$

$$R_{21N} - R_{21\tilde{N}} - Q_{\tilde{N}215} - Q_{\tilde{N}217} - Q_{\tilde{N}2113} = -136,87 \quad (114)$$

$$R_{29N} - R_{29\tilde{N}} - Q_{\tilde{N}295} - Q_{\tilde{N}297} - Q_{\tilde{N}2913} = -61,53 \quad (115)$$

$$R_{34N} - R_{34\tilde{N}} - Q_{\tilde{N}345} - Q_{\tilde{N}347} - Q_{\tilde{N}3413} = -94,09 \quad (116)$$

$$R_{35N} - R_{35\tilde{N}} - Q_{\tilde{N}355} - Q_{\tilde{N}357} - Q_{\tilde{N}3513} = -51,24 \quad (117)$$

$$R_{28N} - R_{28\tilde{N}} - Q_{\tilde{N}285} - Q_{\tilde{N}287} - Q_{\tilde{N}2813} = 0 \quad (118)$$

$$R_{16N} - R_{16\tilde{N}} - Q_{\tilde{N}165} - Q_{\tilde{N}167} - Q_{\tilde{N}1613} = 0 \quad (119)$$

$$R_{15N} - R_{15\bar{N}} - Q_{\bar{N}155} - Q_{\bar{N}157} - Q_{\bar{N}1513} = 0 \quad (120)$$

$$R_{14N} - R_{14\bar{N}} - Q_{\bar{N}145} - Q_{\bar{N}147} - Q_{\bar{N}1413} = 0 \quad (121)$$

$$R_{HN} - R_{H\bar{N}} - Q_{\bar{N}H5} - Q_{\bar{N}H7} - Q_{\bar{N}H13} = 0 \quad (122)$$

$$Q_{\bar{N}105} + Q_{\bar{N}115} + Q_{\bar{N}285} + Q_{\bar{N}145} + Q_{\bar{N}165} + Q_{\bar{N}125} + Q_{\bar{N}155} + Q_{\bar{N}215} + Q_{\bar{N}295} + Q_{\bar{N}345} + Q_{\bar{N}355} + Q_{\bar{N}H5} = 473,80 \quad (123)$$

$$Q_{\bar{N}107} + Q_{\bar{N}117} + Q_{\bar{N}287} + Q_{\bar{N}147} + Q_{\bar{N}167} + Q_{\bar{N}127} + Q_{\bar{N}157} + Q_{\bar{N}217} + Q_{\bar{N}297} + Q_{\bar{N}347} + Q_{\bar{N}357} + Q_{\bar{N}H7} = 473,80 \quad (124)$$

$$Q_{\bar{N}1013} + Q_{\bar{N}1113} + Q_{\bar{N}2813} + Q_{\bar{N}1413} + Q_{\bar{N}1613} + Q_{\bar{N}1213} + Q_{\bar{N}1513} + Q_{\bar{N}2113} + Q_{\bar{N}2913} + Q_{\bar{N}3413} + Q_{\bar{N}3513} + Q_{\bar{N}H13} = 786,67 \quad (125)$$

Intervalo O

$$R_{10\bar{N}} - R_{100} - Q_{0105} - Q_{0107} - Q_{01013} - Q_{01027} = -274,58 \quad (126)$$

$$R_{11\bar{N}} - R_{110} - Q_{0115} - Q_{0117} - Q_{01113} - Q_{01127} = -117,20 \quad (127)$$

$$R_{12\bar{N}} - R_{120} - Q_{0125} - Q_{0127} - Q_{01213} - Q_{01227} = -78,70 \quad (128)$$

$$R_{21\bar{N}} - R_{210} - Q_{0215} - Q_{0217} - Q_{02113} - Q_{02127} = -68,43 \quad (129)$$

$$R_{29\bar{N}} - R_{290} - Q_{0295} - Q_{0297} - Q_{02913} - Q_{02927} = -30,77 \quad (130)$$

$$R_{34\bar{N}} - R_{340} - Q_{0345} - Q_{0347} - Q_{03413} - Q_{03427} = -47,05 \quad (131)$$

$$R_{35\bar{N}} - R_{350} - Q_{0355} - Q_{0357} - Q_{03513} - Q_{03527} = -25,62 \quad (132)$$

$$R_{28\bar{N}} - R_{280} - Q_{0285} - Q_{0287} - Q_{02813} - Q_{02827} = 0 \quad (133)$$

$$R_{16\bar{N}} - R_{160} - Q_{0165} - Q_{0167} - Q_{01613} - Q_{01627} = 0 \quad (134)$$

$$R_{15\bar{N}} - R_{150} - Q_{0155} - Q_{0157} - Q_{01513} - Q_{01527} = 0 \quad (135)$$

$$R_{14\bar{N}} - R_{140} - Q_{0145} - Q_{0147} - Q_{01413} - Q_{01427} = 0 \quad (136)$$

$$R_H - R_{HO} - Q_{OH5-5} - Q_{OH7} - Q_{OH13} - Q_{OH27} = 0 \quad (137)$$

$$Q_{0105} + Q_{0115} + Q_{0125} + Q_{0215} + Q_{0295} + Q_{0345} + Q_{0355} + Q_{0285} + Q_{0165} + Q_{0155} + Q_{0145} + Q_{OH5} = 236,90 \quad (138)$$

$$Q_{0107} + Q_{0117} + Q_{0127} + Q_{0217} + Q_{0297} + Q_{0347} + Q_{0357} + Q_{0287} + Q_{0167} + Q_{0157} + Q_{0147} + Q_{OH7} = 236,90 \quad (139)$$

$$Q_{01013} + Q_{01113} + Q_{01213} + Q_{02113} + Q_{02913} + Q_{03413} + Q_{03513} + Q_{02813} + Q_{01613} + Q_{01513} + Q_{01413} + Q_{OH13} = 393,34 \quad (140)$$

$$Q_{01027} + Q_{01127} + Q_{01227} + Q_{02127} + Q_{02927} + Q_{03427} + Q_{03527} + Q_{02827} + Q_{01627} + Q_{01527} + Q_{01427} + Q_{OH27} = 38,09 \quad (141)$$

Intervalo P

$$R_{100} - R_{10P} - Q_{P102} - Q_{P105} - Q_{P107} - Q_{P1013} - Q_{P1027} = -782,55 \quad (142)$$

$$R_{110} - R_{11P} - Q_{P112} - Q_{P115} - Q_{P117} - Q_{P1113} - Q_{P1127} = -334,01 \quad (143)$$

$$R_{210} - R_{21P} - Q_{P212} - Q_{P215} - Q_{P217} - Q_{P2113} - Q_{P2127} = -195,04 \quad (144)$$

$$R_{120} - R_{12P} - Q_{P122} - Q_{P125} - Q_{P127} - Q_{P1213} - Q_{P1227} = -224,31 \quad (145)$$

$$R_{290} - R_{29P} - Q_{P292} - Q_{P295} - Q_{P297} - Q_{P2913} - Q_{P2927} = -87,68 \quad (146)$$

$$R_{340} - R_{34P} - Q_{P342} - Q_{P345} - Q_{P347} - Q_{P3413} - Q_{P3427} = -134,08 \quad (147)$$

$$R_{350} - R_{35P} - Q_{P352} - Q_{P355} - Q_{P357} - Q_{P3513} - Q_{P3527} = -73,01 \quad (148)$$

$$R_{280} - R_{28P} - Q_{P282} - Q_{P285} - Q_{P287} - Q_{P2813} - Q_{P2827} = 0 \quad (149)$$

$$R_{160} - R_{16P} - Q_{P162} - Q_{P165} - Q_{P167} - Q_{P1613} - Q_{P1627} = 0 \quad (150)$$

$$R_{150} - R_{15P} - Q_{P152} - Q_{P155} - Q_{P157} - Q_{P1513} - Q_{P1527} = 0 \quad (151)$$

$$R_{140} - R_{14P} - Q_{P142} - Q_{P145} - Q_{P147} - Q_{P1413} - Q_{P1427} = 0 \quad (152)$$

$$R_{HO} - R_{HP} - Q_{PH2} - Q_{PH5} - Q_{PH7} - Q_{PH13} - Q_{PH27} = 0 \quad (153)$$

$$Q_{P102} + Q_{P112} + Q_{P212} + Q_{P122} + Q_{P292} + Q_{P342} + Q_{P352} + Q_{P282} + Q_{P162} + Q_{P152} + Q_{P142} + Q_{PH2} = 642,32 \quad (154)$$

$$Q_{P105} + Q_{P115} + Q_{P215} + Q_{P125} + Q_{P295} + Q_{P345} + Q_{P355} + Q_{P285} + Q_{P165} + Q_{P155} + Q_{P145} + Q_{PH5} = 675,17 \quad (155)$$

$$Q_{P107} + Q_{P117} + Q_{P217} + Q_{P127} + Q_{P297} + Q_{P347} + Q_{P357} + Q_{P287} + Q_{P167} + Q_{P157} + Q_{P147} + Q_{PH7} = 675,17 \quad (156)$$

$$Q_{P1013} + Q_{P1113} + Q_{P2113} + Q_{P1213} + Q_{P2913} + Q_{P3413} + Q_{P3513} + Q_{P2813} + Q_{P1613} + Q_{P1513} + Q_{P1413} + Q_{PH13} = 1121,01 \quad (157)$$

$$Q_{P1027} + Q_{P1127} + Q_{P2127} + Q_{P1227} + Q_{P2927} + Q_{P3427} + Q_{P3527} + Q_{P2827} + Q_{P1627} + Q_{P1527} + Q_{P1427} + Q_{PH27} = 108,55 \quad (158)$$

Intervalo Q

$$R_{10P} - R_{10Q} - Q_{Q102} - Q_{Q105} - Q_{Q107} - Q_{Q1013} - Q_{Q1027} = -27,46 \quad (159)$$

$$R_{11P} - R_{11Q} - Q_{Q112} - Q_{Q115} - Q_{Q117} - Q_{Q1113} - Q_{Q1127} = -11,72 \quad (160)$$

$$R_{21P} - R_{21Q} - Q_{Q212} - Q_{Q215} - Q_{Q217} - Q_{Q2113} - Q_{Q2127} = -6,84 \quad (161)$$

$$R_{29P} - R_{29Q} - Q_{Q292} - Q_{Q295} - Q_{Q297} - Q_{Q2913} - Q_{Q2927} = -3,08 \quad (162)$$

$$R_{12P} - R_{12Q} - Q_{Q122} - Q_{Q125} - Q_{Q127} - Q_{Q1213} - Q_{Q1227} = -7,87 \quad (163)$$

$$R_{35P} - R_{35Q} - Q_{Q352} - Q_{Q355} - Q_{Q357} - Q_{Q3513} - Q_{Q3527} = -2,56 \quad (164)$$

$$R_{34P} - R_{34Q} - Q_{Q342} - Q_{Q345} - Q_{Q347} - Q_{Q3413} - Q_{Q3427} = -4,70 \quad (165)$$

$$R_{9Q} + Q_{Q92} + Q_{Q95} + Q_{Q97} + Q_{Q913} + Q_{Q927} = 9,98 \quad (166)$$

$$R_{28P} - R_{28Q} - Q_{Q282} - Q_{Q285} - Q_{Q287} - Q_{Q2813} - Q_{Q2827} = 0 \quad (167)$$

$$R_{16P} - R_{16Q} - Q_{Q162} - Q_{Q165} - Q_{Q167} - Q_{Q1613} - Q_{Q1627} = 0 \quad (168)$$

$$R_{15P} - R_{15Q} - Q_{Q152} - Q_{Q155} - Q_{Q157} - Q_{Q1513} - Q_{Q1527} = 0 \quad (169)$$

$$R_{14P} - R_{14Q} - Q_{Q142} - Q_{Q145} - Q_{Q147} - Q_{Q1413} - Q_{Q1427} = 0 \quad (170)$$

$$R_{HP} - R_{HQ} - Q_{QH2} - Q_{QH5} - Q_{QH7} - Q_{QH13} - Q_{QH27} = 0 \quad (171)$$

$$Q_{Q102} + Q_{Q112} + Q_{Q212} + Q_{Q292} + Q_{Q122} + Q_{Q352} + Q_{Q342} + Q_{Q92} + Q_{Q282} + Q_{Q162} + Q_{Q152} + Q_{Q142} + Q_{QH2} = 22,54 \quad (172)$$

$$Q_{Q105} + Q_{Q115} + Q_{Q215} + Q_{Q295} + Q_{Q125} + Q_{Q355} + Q_{Q345} + Q_{Q95} + Q_{Q285} + Q_{Q165} + Q_{Q155} + Q_{Q145} + Q_{QH5} = 23,69 \quad (173)$$

$$Q_{Q107} + Q_{Q117} + Q_{Q217} + Q_{Q297} + Q_{Q127} + Q_{Q357} + Q_{Q347} + Q_{Q97} + Q_{Q287} + Q_{Q167} + Q_{Q157} + Q_{Q147} + Q_{QH7} = 23,69 \quad (174)$$

$$Q_{Q1013} + Q_{Q1113} + Q_{Q2113} + Q_{Q2913} + Q_{Q1213} + Q_{Q3513} + Q_{Q3413} + Q_{Q913} + Q_{Q2813} + Q_{Q1613} + Q_{Q1513} + Q_{Q1413} + Q_{QH13} = 39,33 \quad (175)$$

$$Q_{Q1027} + Q_{Q1127} + Q_{Q2127} + Q_{Q2927} + Q_{Q1227} + Q_{Q3527} + Q_{Q3427} + Q_{Q927} + Q_{Q2827} + Q_{Q1627} + Q_{Q1527} + Q_{Q1427} + Q_{QH27} = 3,87 \quad (176)$$

Intervalo R

$$R_{9Q} - R_{9R} - Q_{R92} - Q_{R95} - Q_{R97} - Q_{R913} - Q_{R927} = -304,47 \quad (177)$$

$$R_{10Q} - R_{10R} - Q_{R102} - Q_{R105} - Q_{R107} - Q_{R1013} - Q_{R1027} = -837,47 \quad (178)$$

$$R_{12Q} - R_{12R} - Q_{R122} - Q_{R125} - Q_{R127} - Q_{R1213} - Q_{R1227} = -240,05 \quad (179)$$

$$R_{21Q} - R_{21R} - Q_{R212} - Q_{R215} - Q_{R217} - Q_{R2113} - Q_{R2127} = -208,72 \quad (180)$$

$$R_{29Q} - R_{29R} - Q_{R292} - Q_{R295} - Q_{R297} - Q_{R2913} - Q_{R2927} = -93,83 \quad (181)$$

$$R_{34Q} - R_{34R} - Q_{R342} - Q_{R345} - Q_{R347} - Q_{R3413} - Q_{R3427} = -143,49 \quad (182)$$

$$R_{35Q} - R_{35R} - Q_{R352} - Q_{R355} - Q_{R357} - Q_{R3513} - Q_{R3527} = -78,13 \quad (183)$$

$$R_{11Q} - R_{11R} - Q_{R112} - Q_{R115} - Q_{R117} - Q_{R1113} - Q_{R1127} = 0 \quad (184)$$

$$R_{28Q} - R_{28R} - Q_{R282} - Q_{R285} - Q_{R287} - Q_{R2813} - Q_{R2827} = 0 \quad (185)$$

$$R_{20R} + Q_{R202} + Q_{R205} + Q_{R207} + Q_{R2013} + Q_{R2027} = 314,19 \quad (186)$$

$$R_{16Q} - R_{16R} - Q_{R162} - Q_{R165} - Q_{R167} - Q_{R1613} - Q_{R1627} = 0 \quad (187)$$

$$R_{15Q} - R_{15R} - Q_{R152} - Q_{R155} - Q_{R157} - Q_{R1513} - Q_{R1527} = 0 \quad (188)$$

$$R_{14Q} - R_{14R} - Q_{R142} - Q_{R145} - Q_{R147} - Q_{R1413} - Q_{R1427} = 0 \quad (189)$$

$$R_{HQ} - R_{HR} - Q_{RH2} - Q_{RH5} - Q_{RH7} - Q_{RH13} - Q_{RH27} = 0 \quad (190)$$

$$Q_{R92} + Q_{R102} + Q_{R122} + Q_{R212} + Q_{R292} + Q_{R342} + Q_{R352} + Q_{R112} + Q_{R282} + Q_{R202} + Q_{R162} + Q_{R152} + Q_{R142} + Q_{RH2} = 687,39 \quad (191)$$

$$Q_{R95} + Q_{R105} + Q_{R125} + Q_{R215} + Q_{R295} + Q_{R345} + Q_{R355} + Q_{R115} + Q_{R285} + Q_{R205} + Q_{R165} + Q_{R155} + Q_{R145} + Q_{RH5} = 722,55 \quad (192)$$

$$Q_{R97} + Q_{R107} + Q_{R127} + Q_{R217} + Q_{R297} + Q_{R347} + Q_{R357} + Q_{R117} + Q_{R287} + Q_{R207} + Q_{R167} + Q_{R157} + Q_{R147} + Q_{RH7} = 722,55 \quad (193)$$

$$Q_{R913} + Q_{R1013} + Q_{R1213} + Q_{R2113} + Q_{R2913} + Q_{R3413} + Q_{R3513} + Q_{R1113} + Q_{R2813} + Q_{R2013} + Q_{R1613} + Q_{R1513} + Q_{R1413} + Q_{RH13} = 1199,68 \quad (194)$$

$$Q_{R927} + Q_{R1027} + Q_{R1227} + Q_{R2127} + Q_{R2927} + Q_{R3427} + Q_{R3527} + Q_{R1127} + Q_{R2827} + Q_{R2027} + Q_{R1627} + Q_{R1527} + Q_{R1427} + Q_{RH27} = 116,16 \quad (195)$$

Intervalo S

$$R_{9R} - R_{9S} - Q_{S92} - Q_{S94} - Q_{S95} - Q_{S97} - Q_{S913} - Q_{S927} = -54,90 \quad (196)$$

$$R_{10R} - R_{10S} - Q_{S102} - Q_{S104} - Q_{S105} - Q_{S107} - Q_{S1013} - Q_{S1027} = -164,75 \quad (197)$$

$$R_{12R} - R_{12S} - Q_{S122} - Q_{S124} - Q_{S125} - Q_{S127} - Q_{S1213} - Q_{S1227} = -47,22 \quad (198)$$

$$R_{20R} - R_{20S} - Q_{S202} - Q_{S204} - Q_{S205} - Q_{S207} - Q_{S2013} - Q_{S2027} = -61,81 \quad (199)$$

$$R_{21R} - R_{21S} - Q_{S212} - Q_{S214} - Q_{S215} - Q_{S217} - Q_{S2113} - Q_{S2127} = -41,06 \quad (200)$$

$$R_{29R} - R_{29S} - Q_{S292} - Q_{S294} - Q_{S295} - Q_{S297} - Q_{S2913} - Q_{S2927} = -18,46 \quad (201)$$

$$R_{35R} - R_{35S} - Q_{S352} - Q_{S354} - Q_{S355} - Q_{S357} - Q_{S3513} - Q_{S3527} = -15,37 \quad (202)$$

$$R_{34R} - R_{34S} - Q_{S342} - Q_{S344} - Q_{S345} - Q_{S347} - Q_{S3413} - Q_{S3427} = -28,23 \quad (203)$$

$$R_{28R} - R_{28S} - Q_{S282} - Q_{S284} - Q_{S285} - Q_{S287} - Q_{S2813} - Q_{S2827} = 0 \quad (204)$$

$$R_{11R} - R_{11S} - Q_{S112} - Q_{S114} - Q_{S115} - Q_{S117} - Q_{S1113} - Q_{S1127} = 0 \quad (205)$$

$$R_{16R} - R_{16S} - Q_{S162} - Q_{S164} - Q_{S165} - Q_{S167} - Q_{S1613} - Q_{S1627} = 0 \quad (206)$$

$$R_{15R} - R_{15S} - Q_{S152} - Q_{S154} - Q_{S155} - Q_{S157} - Q_{S1513} - Q_{S1527} = 0 \quad (207)$$

$$R_{14R} - R_{14S} - Q_{S142} - Q_{S144} - Q_{S145} - Q_{S147} - Q_{S1413} - Q_{S1427} = 0 \quad (208)$$

$$R_{HR} - R_{HS} - Q_{SH2} - Q_{SH4} - Q_{SH5} - Q_{SH7} - Q_{SH13} - Q_{SH27} = 0 \quad (209)$$

$$Q_{S92} + Q_{S102} + Q_{S122} + Q_{S202} + Q_{S212} + Q_{S292} + Q_{S352} + Q_{S342} + Q_{S282} + Q_{S112} + Q_{S162} + Q_{S152} + Q_{S142} + Q_{SH2} = 135,22 \quad (210)$$

$$Q_{S94} + Q_{S104} + Q_{S124} + Q_{S204} + Q_{S214} + Q_{S294} + Q_{S354} + Q_{S344} + Q_{S284} + Q_{S114} + Q_{S164} + Q_{S154} + Q_{S144} + Q_{SH4} = 135,00 \quad (211)$$

$$Q_{S95} + Q_{S105} + Q_{S125} + Q_{S205} + Q_{S215} + Q_{S295} + Q_{S355} + Q_{S345} + Q_{S285} + Q_{S115} + Q_{S165} + Q_{S155} + Q_{S145} + Q_{SH5} = 142,14 \quad (212)$$

$$Q_{S97} + Q_{S107} + Q_{S127} + Q_{S207} + Q_{S217} + Q_{S297} + Q_{S357} + Q_{S347} + Q_{S287} + Q_{S117} + Q_{S167} + Q_{S157} + Q_{S147} + Q_{SH7} = 142,14 \quad (213)$$

$$Q_{S913} + Q_{S1013} + Q_{S1213} + Q_{S2013} + Q_{S2113} + Q_{S2913} + Q_{S3513} + Q_{S3413} + Q_{S2813} + Q_{S1113} + Q_{S1613} + Q_{S1513} + Q_{S1413} + Q_{SH13} = 236,00 \quad (214)$$

$$Q_{S927} + Q_{S1027} + Q_{S1227} + Q_{S2027} + Q_{S2127} + Q_{S2927} + Q_{S3527} + Q_{S3427} + Q_{S2827} + Q_{S1127} + Q_{S1627} + Q_{S1527} + Q_{S1427} + Q_{SH27} = 22,85 \quad (215)$$

Intervalo T

$$R_{9S} - R_{9T} - Q_{T92} - Q_{T94} - Q_{T95} - Q_{T97} - Q_{T913} - Q_{T927} = -39,93 \quad (216)$$

$$R_{10S} - R_{10T} - Q_{T102} - Q_{T104} - Q_{T105} - Q_{T107} - Q_{T1013} - Q_{T1027} = -109,83 \quad (217)$$

$$R_{20S} - R_{20T} - Q_{T202} - Q_{T204} - Q_{T205} - Q_{T207} - Q_{T2013} - Q_{T2027} = -41,20 \quad (218)$$

$$R_{21S} - R_{21T} - Q_{T212} - Q_{T214} - Q_{T215} - Q_{T217} - Q_{T2113} - Q_{T2127} = -27,37 \quad (219)$$

$$R_{29S} - R_{29T} - Q_{T292} - Q_{T294} - Q_{T295} - Q_{T297} - Q_{T2913} - Q_{T2927} = -12,31 \quad (220)$$

$$R_{34S} - R_{34T} - Q_{T342} - Q_{T344} - Q_{T345} - Q_{T347} - Q_{T3413} - Q_{T3427} = -18,82 \quad (221)$$

$$R_{35S} - R_{35T} - Q_{T352} - Q_{T354} - Q_{T355} - Q_{T357} - Q_{T3513} - Q_{T3527} = -10,25 \quad (222)$$

$$R_{19T} + Q_{T192} + Q_{T194} + Q_{T195} + Q_{T197} + Q_{T1913} + Q_{T1927} = 27,42 \quad (223)$$

$$R_{11S} - R_{11T} - Q_{T112} - Q_{T114} - Q_{T115} - Q_{T117} - Q_{T1113} - Q_{T1127} = 0 \quad (224)$$

$$R_{28S} - R_{28T} - Q_{T282} - Q_{T284} - Q_{T285} - Q_{T287} - Q_{T2813} - Q_{T2827} = 0 \quad (225)$$

$$R_{12S} - R_{12T} - Q_{T122} - Q_{T124} - Q_{T125} - Q_{T127} - Q_{T1213} - Q_{T1227} = 0 \quad (226)$$

$$R_{16S} - R_{16T} - Q_{T162} - Q_{T164} - Q_{T165} - Q_{T167} - Q_{T1613} - Q_{T1627} = 0 \quad (227)$$

$$R_{15S} - R_{15T} - Q_{T152} - Q_{T154} - Q_{T155} - Q_{T157} - Q_{T1513} - Q_{T1527} = 0 \quad (228)$$

$$R_{14S} - R_{14T} - Q_{T142} - Q_{T144} - Q_{T145} - Q_{T147} - Q_{T1413} - Q_{T1427} = 0 \quad (229)$$

$$R_{HS} - R_{HT} - Q_{TH2} - Q_{TH4} - Q_{TH5} - Q_{TH7} - Q_{TH13} - Q_{TH27} = 0 \quad (230)$$

$$Q_{T92} + Q_{T102} + Q_{T202} + Q_{T212} + Q_{T292} + Q_{T342} + Q_{T352} + Q_{T192} + Q_{T112} + Q_{T282} + Q_{T122} + Q_{T162} + Q_{T152} + Q_{T142} + Q_{TH2} = 90,15 \quad (231)$$

$$Q_{T94} + Q_{T104} + Q_{T204} + Q_{T214} + Q_{T294} + Q_{T344} + Q_{T354} + Q_{T194} + Q_{T114} + Q_{T284} + Q_{T124} + Q_{T164} + Q_{T154} + Q_{T144} + Q_{TH4} = 90,00 \quad (232)$$

$$Q_{T95} + Q_{T105} + Q_{T205} + Q_{T215} + Q_{T295} + Q_{T345} + Q_{T355} + Q_{T195} + Q_{T115} + Q_{T285} + Q_{T125} + Q_{T165} + Q_{T155} + Q_{T145} + Q_{TH5} = 94,76 \quad (233)$$

$$Q_{T97} + Q_{T107} + Q_{T207} + Q_{T217} + Q_{T297} + Q_{T347} + Q_{T357} + Q_{T197} + Q_{T117} + Q_{T287} + Q_{T127} + Q_{T167} + Q_{T157} + Q_{T147} + Q_{TH7} = 94,76 \quad (234)$$

$$Q_{T913} + Q_{T1013} + Q_{T2013} + Q_{T2113} + Q_{T2913} + Q_{T343} + Q_{T3513} + Q_{T1913} + Q_{T1113} + Q_{T2813} + Q_{T1213} + Q_{T1613} + Q_{T1513} + Q_{T1413} + Q_{TH13} = 157,33 \quad (235)$$

$$Q_{T927} + Q_{T1027} + Q_{T2027} + Q_{T2127} + Q_{T2927} + Q_{T3427} + Q_{T3527} + Q_{T1927} + Q_{T1127} + Q_{T2827} + Q_{T1227} + Q_{T1627} + Q_{T1527} + Q_{T1427} + Q_{TH27} = 15,23 \quad (236)$$

Intervalo U

$$R_{19T} - R_{19U} - Q_{U192} - Q_{U194} - Q_{U195} - Q_{U197} - Q_{U1913} - Q_{U1927} = -27,42 \quad (237)$$

$$R_{20T} - R_{20U} - Q_{U202} - Q_{U204} - Q_{U205} - Q_{U207} - Q_{U2013} - Q_{U2027} = -41,20 \quad (238)$$

$$R_{9T} - R_{9U} - Q_{U92} - Q_{U94} - Q_{U95} - Q_{U97} - Q_{U913} - Q_{U927} = -39,93 \quad (239)$$

$$R_{10T} - R_{10U} - Q_{U102} - Q_{U104} - Q_{U105} - Q_{U107} - Q_{U1013} - Q_{U1027} = -109,83 \quad (240)$$

$$R_{11T} - R_{11U} - Q_{U112} - Q_{U114} - Q_{U115} - Q_{U117} - Q_{U1113} - Q_{U1127} = 0 \quad (241)$$

$$R_{21T} - R_{21U} - Q_{U212} - Q_{U214} - Q_{U215} - Q_{U217} - Q_{U2113} - Q_{U2127} = -27,37 \quad (242)$$

$$R_{29T} - R_{29U} - Q_{U292} - Q_{U294} - Q_{U295} - Q_{U297} - Q_{U2913} - Q_{U2927} = -12,31 \quad (243)$$

$$R_{28T} - R_{28U} - Q_{U282} - Q_{U284} - Q_{U285} - Q_{U287} - Q_{U2813} - Q_{U2827} = 0 \quad (244)$$

$$R_{12T} - R_{12U} - Q_{U122} - Q_{U124} - Q_{U125} - Q_{U127} - Q_{U1213} - Q_{U1227} = 0 \quad (245)$$

$$R_{35T} - R_{35U} - Q_{U352} - Q_{U354} - Q_{U355} - Q_{U357} - Q_{U3513} - Q_{U3527} = -10,25 \quad (246)$$

$$R_{16T} - R_{16U} - Q_{U162} - Q_{U164} - Q_{U165} - Q_{U167} - Q_{U1613} - Q_{U1627} = 0 \quad (247)$$

$$\begin{aligned}
 R_{15T} - R_{15U} - Q_{U152} - Q_{U154} - Q_{U155} - Q_{U157} - Q_{U1513} - Q_{U1527} &= 0 & (248) \\
 R_{14T} - R_{14U} - Q_{U142} - Q_{U144} - Q_{U145} - Q_{U147} - Q_{U1413} - Q_{U1427} &= 0 & (249) \\
 R_{34T} - R_{34U} - Q_{U342} - Q_{U344} - Q_{U345} - Q_{U347} - Q_{U3413} - Q_{U3427} &= -18,82 & (250) \\
 R_{HT} - R_{HU} - Q_{UH2} - Q_{UH4} - Q_{UH5} - Q_{UH7} - Q_{UH13} - Q_{UH27} &= 0 & (251) \\
 R_{8U} + Q_{U82} + Q_{U84} + Q_{U85} + Q_{U87} + Q_{U813} + Q_{U827} &= 104,51 & (252) \\
 Q_{U192} + Q_{U202} + Q_{U92} + Q_{U102} + Q_{U112} + Q_{U212} + Q_{U292} + Q_{U282} + Q_{U122} + Q_{U352} + Q_{U162} + Q_{U152} + Q_{U142} + Q_{U342} + Q_{UH2} + Q_{U82} &= 90,15 & (253) \\
 Q_{U194} + Q_{U204} + Q_{U94} + Q_{U104} + Q_{U114} + Q_{U214} + Q_{U294} + Q_{U284} + Q_{U124} + Q_{U354} + Q_{U164} + Q_{U154} + Q_{U144} + Q_{U344} + Q_{UH4} + Q_{U84} &= 90,00 & (254) \\
 Q_{U195} + Q_{U205} + Q_{U95} + Q_{U105} + Q_{U115} + Q_{U215} + Q_{U295} + Q_{U285} + Q_{U125} + Q_{U355} + Q_{U165} + Q_{U155} + Q_{U145} + Q_{U345} + Q_{UH5} + Q_{U85} &= 94,76 & (255) \\
 Q_{U197} + Q_{U207} + Q_{U97} + Q_{U107} + Q_{U117} + Q_{U217} + Q_{U297} + Q_{U287} + Q_{U127} + Q_{U357} + Q_{U167} + Q_{U157} + Q_{U147} + Q_{U347} + Q_{UH7} + Q_{U87} &= 94,76 & (256) \\
 Q_{U1913} + Q_{U2013} + Q_{U913} + Q_{U1013} + Q_{U1113} + Q_{U2113} + Q_{U2913} + Q_{U2813} + Q_{U1213} + Q_{U3513} + Q_{U1613} + Q_{U1513} + Q_{U1413} + Q_{U3413} + Q_{UH13} + Q_{U813} &= 157,33 & (257) \\
 Q_{U1927} + Q_{U2027} + Q_{U927} + Q_{U1027} + Q_{U1127} + Q_{U2127} + Q_{U2927} + Q_{U2827} + Q_{U1227} + Q_{U3527} + Q_{U1627} + Q_{U1527} + Q_{U1427} + Q_{U3427} + Q_{UH27} + Q_{U827} &= 15,23 & (258)
 \end{aligned}$$

Intervalo V

$$\begin{aligned}
 R_{19U} - R_{19V} - Q_{V192} - Q_{V194} - Q_{V195} - Q_{V197} - Q_{V1913} - Q_{V1927} &= -102,83 & (259) \\
 R_{20U} - R_{20V} - Q_{V202} - Q_{V204} - Q_{V205} - Q_{V207} - Q_{V2013} - Q_{V2027} &= -154,52 & (260) \\
 R_{9U} - R_{9V} - Q_{V92} - Q_{V94} - Q_{V95} - Q_{V97} - Q_{V913} - Q_{V927} &= -149,74 & (261) \\
 R_{10U} - R_{10V} - Q_{V102} - Q_{V104} - Q_{V105} - Q_{V107} - Q_{V1013} - Q_{V1027} &= 0 & (262) \\
 R_{11U} - R_{11V} - Q_{V112} - Q_{V114} - Q_{V115} - Q_{V117} - Q_{V1113} - Q_{V1127} &= 0 & (263) \\
 R_{21U} - R_{21V} - Q_{V212} - Q_{V214} - Q_{V215} - Q_{V217} - Q_{V2113} - Q_{V2127} &= -102,65 & (264) \\
 R_{29U} - R_{29V} - Q_{V292} - Q_{V294} - Q_{V295} - Q_{V297} - Q_{V2913} - Q_{V2927} &= -46,15 & (265) \\
 R_{28U} - R_{28V} - Q_{V282} - Q_{V284} - Q_{V285} - Q_{V287} - Q_{V2813} - Q_{V2827} &= 0 & (266) \\
 R_{12U} - R_{12V} - Q_{V122} - Q_{V124} - Q_{V125} - Q_{V127} - Q_{V1213} - Q_{V1227} &= 0 & (267) \\
 R_{35U} - R_{35V} - Q_{V352} - Q_{V354} - Q_{V355} - Q_{V357} - Q_{V3513} - Q_{V3527} &= -38,43 & (268) \\
 R_{16U} - R_{16V} - Q_{V162} - Q_{V164} - Q_{V165} - Q_{V167} - Q_{V1613} - Q_{V1627} &= 0 & (269) \\
 R_{17V} + Q_{V172} + Q_{V174} + Q_{V175} + Q_{V177} + Q_{V1713} + Q_{V1727} &= 383,21 & (270) \\
 R_{15U} - R_{15V} - Q_{V152} - Q_{V154} - Q_{V155} - Q_{V157} - Q_{V1513} - Q_{V1527} &= 0 & (271) \\
 R_{14U} - R_{14V} - Q_{V142} - Q_{V144} - Q_{V145} - Q_{V147} - Q_{V1413} - Q_{V1427} &= 0 & (272) \\
 R_{34U} - R_{34V} - Q_{V342} - Q_{V344} - Q_{V345} - Q_{V347} - Q_{V3413} - Q_{V3427} &= -70,57 & (273) \\
 R_{8U} - R_{8V} - Q_{V82} - Q_{V84} - Q_{V85} - Q_{V87} - Q_{V813} - Q_{V827} &= -391,92 & (274) \\
 R_{HU} - R_{HV} - Q_{VH2} - Q_{VH4} - Q_{VH5} - Q_{VH7} - Q_{VH13} - Q_{VH27} &= 0 & (275) \\
 Q_{V202} + Q_{V102} + Q_{V282} + Q_{V152} + Q_{V82} + Q_{V192} + Q_{V92} + Q_{V112} + Q_{V172} + Q_{V212} + Q_{V292} + Q_{V122} + Q_{V142} + Q_{V352} + Q_{V342} + Q_{V162} + Q_{VH2} &= 338,06 & (276) \\
 Q_{V204} + Q_{V104} + Q_{V284} + Q_{V154} + Q_{V82} + Q_{V194} + Q_{V94} + Q_{V114} + Q_{V174} + Q_{V214} + Q_{V294} + Q_{V124} + Q_{V144} + Q_{V354} + Q_{V344} + Q_{V164} + Q_{VH4} &= 337,51 & (277) \\
 Q_{V205} + Q_{V105} + Q_{V285} + Q_{V155} + Q_{V85} + Q_{V195} + Q_{V95} + Q_{V115} + Q_{V175} + Q_{V215} + Q_{V295} + Q_{V125} + Q_{V145} + Q_{V355} + Q_{V345} + Q_{V165} + Q_{VH5} &= 355,35 & (278) \\
 Q_{V207} + Q_{V107} + Q_{V287} + Q_{V157} + Q_{V87} + Q_{V197} + Q_{V97} + Q_{V117} + Q_{V177} + Q_{V217} + Q_{V297} + Q_{V127} + Q_{V147} + Q_{V357} + Q_{V347} + Q_{V167} + Q_{VH7} &= 355,35 & (279) \\
 Q_{V2013} + Q_{V1013} + Q_{V2813} + Q_{V1513} + Q_{V813} + Q_{V1913} + Q_{V913} + Q_{V1113} + Q_{V1713} + Q_{V2113} + Q_{V2913} + Q_{V1213} + Q_{V1413} + Q_{V3513} + Q_{V3413} + Q_{V1613} + Q_{VH13} &= 590,00 & (280)
 \end{aligned}$$

$$Q_{V2027} + Q_{V1027} + Q_{V2827} + Q_{V1527} + Q_{V827} + Q_{V1927} + Q_{V927} + Q_{V1127} + Q_{V1727} + Q_{V2127} + Q_{V2927} + Q_{V1227} + Q_{V1427} + Q_{V3527} + Q_{V3427} + Q_{V1627} + Q_{VH27} = 57,13 \quad (281)$$

Intervalo W

$$\begin{aligned}
 R_{8W} - R_{8X} - Q_{W82} - Q_{W84} - Q_{W813} - Q_{W827} &= -796,90 & (282) \\
 R_{9W} - R_{9X} - Q_{W92} - Q_{W94} - Q_{W913} - Q_{W927} &= -304,47 & (283) \\
 R_{17W} - R_{17X} - Q_{W172} - Q_{W174} - Q_{W1713} - Q_{W1727} &= -779,20 & (284) \\
 R_{19W} - R_{19X} - Q_{W192} - Q_{W194} - Q_{W1913} - Q_{W1927} &= -209,09 & (285) \\
 R_{20W} - R_{20X} - Q_{W202} - Q_{W204} - Q_{W2013} - Q_{W2027} &= -314,19 & (286) \\
 R_{21W} - R_{21X} - Q_{W212} - Q_{W214} - Q_{W2113} - Q_{W2127} &= -208,72 & (287) \\
 R_{29W} - R_{29X} - Q_{W292} - Q_{W294} - Q_{W2913} - Q_{W2927} &= -93,83 & (288) \\
 R_{34W} - R_{34X} - Q_{W342} - Q_{W344} - Q_{W3413} - Q_{W3427} &= -143,49 & (289) \\
 R_{35W} - R_{35X} - Q_{W352} - Q_{W354} - Q_{W3513} - Q_{W3527} &= -78,13 & (290) \\
 R_{10W} - R_{10X} - Q_{W102} - Q_{W104} - Q_{W1013} - Q_{W1027} &= 0 & (291) \\
 R_{11W} - R_{11X} - Q_{W112} - Q_{W114} - Q_{W1113} - Q_{W1127} &= 0 & (292) \\
 R_{28W} - R_{28X} - Q_{W282} - Q_{W284} - Q_{W2813} - Q_{W2827} &= 0 & (293) \\
 R_{12W} - R_{12X} - Q_{W122} - Q_{W124} - Q_{W1213} - Q_{W1227} &= 0 & (294) \\
 R_{16W} - R_{16X} - Q_{W162} - Q_{W164} - Q_{W1613} - Q_{W1627} &= 0 & (295) \\
 R_{15W} - R_{15X} - Q_{W152} - Q_{W154} - Q_{W1513} - Q_{W1527} &= 0 & (296) \\
 R_{14W} - R_{14X} - Q_{W142} - Q_{W144} - Q_{W1413} - Q_{W1427} &= 0 & (297) \\
 R_{HW} - R_{HX} - Q_{WH2} - Q_{WH4} - Q_{WH13} - Q_{WH27} &= 0 & (298) \\
 Q_{W82} + Q_{W92} + Q_{W172} + Q_{W192} + Q_{W202} + Q_{W212} + Q_{W292} + Q_{W342} + Q_{W352} + Q_{W102} + Q_{W112} + Q_{W282} + Q_{W122} + Q_{W162} + Q_{W152} + Q_{W142} + Q_{WH2} &= 687,39 & (299) \\
 Q_{W84} + Q_{W94} + Q_{W174} + Q_{W194} + Q_{W204} + Q_{W214} + Q_{W294} + Q_{W344} + Q_{W354} + Q_{W104} + Q_{W114} + Q_{W284} + Q_{W124} + Q_{W164} + Q_{W154} + Q_{W144} + Q_{WH4} &= 686,26 & (300) \\
 Q_{W813} + Q_{W913} + Q_{W1713} + Q_{W1913} + Q_{W2013} + Q_{W2113} + Q_{W2913} + Q_{W3413} + Q_{W3513} + Q_{W1013} + Q_{W1113} + Q_{W2813} + Q_{W1213} + Q_{W1613} + & & \\
 Q_{W1513} + Q_{W1413} + Q_{WH13} &= 1199,68 & (301) \\
 Q_{W827} + Q_{W927} + Q_{W1727} + Q_{W1927} + Q_{W2027} + Q_{W2127} + Q_{W2927} + Q_{W3427} + Q_{W3527} + Q_{W1027} + Q_{W1127} + Q_{W2827} + Q_{W1227} + Q_{W1627} + & & \\
 Q_{W1527} + Q_{W1427} + Q_{WH27} &= 116,16 & (302)
 \end{aligned}$$

Intervalo X

$$\begin{aligned}
 R_{19X} - R_{19Y} - Q_{X192} - Q_{X194} - Q_{X1913} - Q_{X1927} &= -75,41 & (303) \\
 R_{9X} - R_{9Y} - Q_{X92} - Q_{X94} - Q_{X913} - Q_{X927} &= -109,81 & (304) \\
 R_{20X} - R_{20Y} - Q_{X202} - Q_{X204} - Q_{X2013} - Q_{X2027} &= -113,31 & (305) \\
 R_{21X} - R_{21Y} - Q_{X212} - Q_{X214} - Q_{X2113} - Q_{X2127} &= -75,28 & (306) \\
 R_{35X} - R_{35Y} - Q_{X352} - Q_{X354} - Q_{X3513} - Q_{X3527} &= -28,18 & (307) \\
 R_{34X} - R_{34Y} - Q_{X342} - Q_{X344} - Q_{X3413} - Q_{X3427} &= -51,75 & (308) \\
 R_{8X} - R_{8Y} - Q_{X82} - Q_{X84} - Q_{X813} - Q_{X827} &= -287,41 & (309) \\
 R_{17X} - R_{17Y} - Q_{X172} - Q_{X174} - Q_{X1713} - Q_{X1727} &= -281,02 & (310)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_{10W} - R_{10X} - Q_{X102} - Q_{X104} - Q_{X1013} - Q_{X1027} &= 0 & (311) \\
 R_{11W} - R_{11X} - Q_{X112} - Q_{X114} - Q_{X1113} - Q_{X1127} &= 0 & (312) \\
 R_{29W} - R_{29X} - Q_{X292} - Q_{X294} - Q_{X2913} - Q_{X2927} &= 0 & (313) \\
 R_{28W} - R_{28X} - Q_{X282} - Q_{X284} - Q_{X2813} - Q_{X2827} &= 0 & (314) \\
 R_{12W} - R_{12X} - Q_{X122} - Q_{X124} - Q_{X1213} - Q_{X1227} &= 0 & (315) \\
 R_{16W} - R_{16X} - Q_{X162} - Q_{X164} - Q_{X1613} - Q_{X1627} &= 0 & (316) \\
 R_{15W} - R_{15X} - Q_{X152} - Q_{X154} - Q_{X1513} - Q_{X1527} &= 0 & (317) \\
 R_{14W} - R_{14X} - Q_{X142} - Q_{X144} - Q_{X1413} - Q_{X1427} &= 0 & (318) \\
 R_{HW} - R_{HX} - Q_{XH2} - Q_{XH4} - Q_{XH13} - Q_{XH27} &= 0 & (319) \\
 R_{31X} + Q_{X312} + Q_{X314} + Q_{X3113} + Q_{X3127} &= 25,85 & (320) \\
 Q_{X192} + Q_{X92} + Q_{X202} + Q_{X212} + Q_{X352} + Q_{X342} + Q_{X82} + Q_{X172} + Q_{X102} + Q_{W112} + Q_{X292} + Q_{X282} + Q_{X122} + Q_{X162} + Q_{X152} + Q_{X142} + Q_{X312} + Q_{XH2} &= 247,91 & (321) \\
 Q_{X194} + Q_{X94} + Q_{X204} + Q_{X214} + Q_{X354} + Q_{X344} + Q_{X84} + Q_{X174} + Q_{X104} + Q_{W114} + Q_{X294} + Q_{X284} + Q_{X124} + Q_{X164} + Q_{X154} + Q_{X144} + Q_{X314} + Q_{XH4} &= 247,50 & (322) \\
 Q_{X1913} + Q_{X913} + Q_{X2013} + Q_{X2113} + Q_{X3513} + Q_{X3413} + Q_{X813} + Q_{X1713} + Q_{X1013} + Q_{W1113} + Q_{X2913} + Q_{X2813} + Q_{X1213} + Q_{X1613} + Q_{X1513} + Q_{X1413} + Q_{X3113} + Q_{XH13} &= 432,67 & (323) \\
 Q_{X1927} + Q_{X927} + Q_{X2027} + Q_{X2127} + Q_{X3527} + Q_{X3427} + Q_{X827} + Q_{X1727} + Q_{X1027} + Q_{W1127} + Q_{X2927} + Q_{X2827} + Q_{X1227} + Q_{X1627} + Q_{X1527} + Q_{X1427} + Q_{X3127} + Q_{XH27} &= 41,89 & (324)
 \end{aligned}$$

Intervalo Y

$$\begin{aligned}
 R_{19X} - R_{19Y} - Q_{Y192} - Q_{Y194} - Q_{Y1913} - Q_{Y1927} &= -65,13 & (325) \\
 R_{20X} - R_{20Y} - Q_{Y202} - Q_{Y204} - Q_{Y2013} - Q_{Y2027} &= -97,86 & (326) \\
 R_{9X} - R_{9Y} - Q_{Y92} - Q_{Y94} - Q_{Y913} - Q_{Y927} &= -94,83 & (327) \\
 R_{10X} - R_{10Y} - Q_{Y102} - Q_{Y104} - Q_{Y1013} - Q_{Y1027} &= 0 & (328) \\
 R_{11X} - R_{11Y} - Q_{Y112} - Q_{Y114} - Q_{Y1113} - Q_{Y1127} &= 0 & (329) \\
 R_{21X} - R_{21Y} - Q_{Y212} - Q_{Y214} - Q_{Y2113} - Q_{Y2127} &= -65,01 & (330) \\
 R_{29X} - R_{29Y} - Q_{Y292} - Q_{Y294} - Q_{Y2913} - Q_{Y2927} &= 0 & (331) \\
 R_{17X} - R_{17Y} - Q_{Y172} - Q_{Y174} - Q_{Y1713} - Q_{Y1727} &= -242,70 & (332) \\
 R_{28X} - R_{28Y} - Q_{Y282} - Q_{Y284} - Q_{Y2813} - Q_{Y2827} &= 0 & (333) \\
 R_{12X} - R_{12Y} - Q_{Y122} - Q_{Y124} - Q_{Y1213} - Q_{Y1227} &= 0 & (334) \\
 R_{35X} - R_{35Y} - Q_{Y352} - Q_{Y354} - Q_{Y3513} - Q_{Y3527} &= -24,34 & (335) \\
 R_{16X} - R_{16Y} - Q_{Y162} - Q_{Y164} - Q_{Y1613} - Q_{Y1627} &= 0 & (336) \\
 R_{15X} - R_{15Y} - Q_{Y152} - Q_{Y154} - Q_{Y1513} - Q_{Y1527} &= 0 & (337) \\
 R_{14X} - R_{14Y} - Q_{Y142} - Q_{Y144} - Q_{Y1413} - Q_{Y1427} &= 0 & (338) \\
 R_{34X} - R_{34Y} - Q_{Y342} - Q_{Y344} - Q_{Y3413} - Q_{Y3427} &= -44,69 & (339) \\
 R_{8X} - R_{8Y} - Q_{Y82} - Q_{Y84} - Q_{Y813} - Q_{Y827} &= -248,22 & (340) \\
 R_{31X} - R_{31Y} - Q_{Y312} - Q_{Y314} - Q_{Y3113} - Q_{Y3127} &= -22,32 & (341) \\
 R_{HX} - R_{HY} - Q_{YH2} - Q_{YH4} - Q_{YH13} - Q_{YH27} &= 0 & (342) \\
 R_{33Y} + Q_{Y332} + Q_{Y334} + Q_{Y3313} + Q_{Y3327} &= 34,46 & (343) \\
 Q_{Y192} + Q_{Y202} + Q_{Y92} + Q_{Y102} + Q_{Y112} + Q_{Y212} + Q_{Y292} + Q_{Y172} + Q_{Y282} + Q_{Y122} + Q_{Y352} + Q_{Y162} + Q_{Y152} + Q_{Y142} + Q_{Y342} + Q_{Y82} + Q_{Y312} + Q_{Y332} + Q_{YH2} &= 214,11 & (344) \\
 Q_{Y194} + Q_{Y204} + Q_{Y94} + Q_{Y104} + Q_{Y114} + Q_{Y214} + Q_{Y294} + Q_{Y174} + Q_{Y284} + Q_{Y124} + Q_{Y354} + Q_{Y164} + Q_{Y154} + Q_{Y144} + Q_{Y344} + Q_{Y84} + Q_{Y314} + Q_{Y334} + Q_{YH4} &= 213,75 & (345) \\
 Q_{Y1913} + Q_{Y2013} + Q_{Y913} + Q_{Y1013} + Q_{Y1113} + Q_{Y2113} + Q_{Y2913} + Q_{Y1713} + Q_{Y2813} + Q_{Y1213} + Q_{Y3513} + Q_{Y1613} + Q_{Y1513} + Q_{Y1413} + Q_{Y3413} + Q_{Y813} + Q_{Y3113} + Q_{Y3313} + Q_{YH13} &= 36,18 & (346) \\
 Q_{Y1927} + Q_{Y2027} + Q_{Y927} + Q_{Y1027} + Q_{Y1127} + Q_{Y2127} + Q_{Y2927} + Q_{Y1727} + Q_{Y2827} + Q_{Y1227} + Q_{Y3527} + Q_{Y1627} + Q_{Y1527} + Q_{Y1427} + Q_{Y3427} + Q_{Y827} + Q_{Y3127} + Q_{Y3327} + Q_{YH27} &= 373,67 & (347)
 \end{aligned}$$

Intervalo Z

$$\begin{aligned}
 R_{19Y} - R_{19Z} - Q_{Z192} - Q_{Z194} - Q_{Z1913} - Q_{Z1926} &= -682,11 & (348) \\
 R_{20Y} - R_{20Z} - Q_{Z202} - Q_{Z204} - Q_{Z2013} - Q_{Z2026} &= -1024,97 & (349) \\
 R_{9Y} - R_{9Z} - Q_{Z92} - Q_{Z94} - Q_{Z913} - Q_{Z926} &= -993,27 & (350) \\
 R_{10Y} - R_{10Z} - Q_{Z102} - Q_{Z104} - Q_{Z1013} - Q_{Z1026} &= 0 & (351) \\
 R_{11Y} - R_{11Z} - Q_{Z112} - Q_{Z114} - Q_{Z1113} - Q_{Z1126} &= 0 & (352) \\
 R_{21Y} - R_{21Z} - Q_{Z212} - Q_{Z214} - Q_{Z2113} - Q_{Z2126} &= -680,92 & (353) \\
 R_{29Y} - R_{29Z} - Q_{Z292} - Q_{Z294} - Q_{Z2913} - Q_{Z2926} &= 0 & (354) \\
 R_{17Y} - R_{17Z} - Q_{Z172} - Q_{Z174} - Q_{Z1713} - Q_{Z1726} &= -2541,99 & (355) \\
 R_{28Y} - R_{28Z} - Q_{Z282} - Q_{Z284} - Q_{Z2813} - Q_{Z2826} &= 0 & (356) \\
 R_{12Y} - R_{12Z} - Q_{Z122} - Q_{Z124} - Q_{Z1213} - Q_{Z1226} &= 0 & (357) \\
 R_{35Y} - R_{35Z} - Q_{Z352} - Q_{Z354} - Q_{Z3513} - Q_{Z3526} &= -254,90 & (358) \\
 R_{16Y} - R_{16Z} - Q_{Z162} - Q_{Z164} - Q_{Z1613} - Q_{Z1626} &= 0 & (359) \\
 R_{15Y} - R_{15Z} - Q_{Z152} - Q_{Z154} - Q_{Z1513} - Q_{Z1526} &= 0 & (360) \\
 R_{14Y} - R_{14Z} - Q_{Z142} - Q_{Z144} - Q_{Z1413} - Q_{Z1426} &= 0 & (361) \\
 R_{34Y} - R_{34Z} - Q_{Z342} - Q_{Z344} - Q_{Z3413} - Q_{Z3426} &= -468,11 & (362) \\
 R_{8Y} - R_{8Z} - Q_{Z82} - Q_{Z84} - Q_{Z813} - Q_{Z826} &= -2599,74 & (363) \\
 R_{31Y} - R_{31Z} - Q_{Z312} - Q_{Z314} - Q_{Z3113} - Q_{Z3126} &= -233,80 & (364) \\
 R_{33Y} - R_{33Z} - Q_{Z332} - Q_{Z334} - Q_{Z3313} - Q_{Z3326} &= 0 & (365) \\
 R_{HY} - R_{HZ} - Q_{ZH2} - Q_{ZH4} - Q_{ZH13} - Q_{ZH26} &= -360,96 & (366) \\
 Q_{Z192} + Q_{Z202} + Q_{Z92} + Q_{Z212} + Q_{Z292} + Q_{Z172} + Q_{Z282} + Q_{Z122} + Q_{Z352} + Q_{Z102} + Q_{Z112} + Q_{Z162} + Q_{Z152} + Q_{Z142} + Q_{Z342} + Q_{Z82} + Q_{Z312} + Q_{Z332} + Q_{ZH2} &= 2242,48 & (367) \\
 Q_{Z194} + Q_{Z204} + Q_{Z94} + Q_{Z214} + Q_{Z294} + Q_{Z174} + Q_{Z284} + Q_{Z124} + Q_{Z354} + Q_{Z104} + Q_{Z114} + Q_{Z164} + Q_{Z154} + Q_{Z144} + Q_{Z344} + Q_{Z84} + Q_{Z314} + Q_{Z334} + Q_{ZH4} &= 2238,79 & (368) \\
 Q_{Z1913} + Q_{Z2013} + Q_{Z913} + Q_{Z2113} + Q_{Z2913} + Q_{Z1713} + Q_{Z2813} + Q_{Z1213} + Q_{Z3513} + Q_{Z1013} + Q_{Z1113} + Q_{Z1613} + Q_{Z1513} + Q_{Z1413} + Q_{Z3413} + Q_{Z813} + Q_{Z3113} + Q_{Z3313} + Q_{ZH13} &= 3913,69 & (369)
 \end{aligned}$$

$$Q_{Z1926} + Q_{Z2026} + Q_{Z926} + Q_{Z2126} + Q_{Z2926} + Q_{Z1726} + Q_{Z2826} + Q_{Z1226} + Q_{Z3526} + Q_{Z1026} + Q_{Z1126} + Q_{Z1626} + Q_{Z1526} + Q_{Z1426} + Q_{Z3426} + Q_{Z826} + Q_{Z3126} + Q_{Z3326} + Q_{ZH26} = 342,51 \quad (370)$$

Intervalo A*

$$R_{9Z} - R_{9A^*} - Q_{A^*92} - Q_{A^*94} - Q_{A^*913} - Q_{A^*926} = -4,99 \quad (371)$$

$$R_{8Z} - R_{8A^*} - Q_{A^*82} - Q_{A^*84} - Q_{A^*813} - Q_{A^*826} = -13,06 \quad (372)$$

$$R_{17Z} - R_{17A^*} - Q_{A^*172} - Q_{A^*174} - Q_{A^*1713} - Q_{A^*1726} = -12,77 \quad (373)$$

$$R_{20Z} - R_{20A^*} - Q_{A^*202} - Q_{A^*204} - Q_{A^*2013} - Q_{A^*2026} = -5,15 \quad (374)$$

$$R_{21Z} - R_{21A^*} - Q_{A^*212} - Q_{A^*214} - Q_{A^*2113} - Q_{A^*2126} = -3,42 \quad (375)$$

$$R_{31Z} - R_{31A^*} - Q_{A^*312} - Q_{A^*314} - Q_{A^*3113} - Q_{A^*3126} = -1,17 \quad (376)$$

$$R_{33Z} - R_{33A^*} - Q_{A^*332} - Q_{A^*334} - Q_{A^*3313} - Q_{A^*3326} = -1,81 \quad (377)$$

$$R_{34Z} - R_{34A^*} - Q_{A^*342} - Q_{A^*344} - Q_{A^*3413} - Q_{A^*3426} = -2,35 \quad (378)$$

$$R_{35Z} - R_{35A^*} - Q_{A^*352} - Q_{A^*354} - Q_{A^*3513} - Q_{A^*3526} = -1,28 \quad (379)$$

$$R_{19Z} - R_{19A^*} - Q_{A^*192} - Q_{A^*194} - Q_{A^*1913} - Q_{A^*1926} = 0 \quad (380)$$

$$R_{10Z} - R_{10A^*} - Q_{A^*102} - Q_{A^*104} - Q_{A^*1013} - Q_{A^*1026} = 0 \quad (381)$$

$$R_{11Z} - R_{11A^*} - Q_{A^*112} - Q_{A^*114} - Q_{A^*1113} - Q_{A^*1126} = 0 \quad (382)$$

$$R_{29Z} - R_{29A^*} - Q_{A^*292} - Q_{A^*294} - Q_{A^*2913} - Q_{A^*2926} = 0 \quad (383)$$

$$R_{28Z} - R_{28A^*} - Q_{A^*282} - Q_{A^*284} - Q_{A^*2813} - Q_{A^*2826} = 0 \quad (384)$$

$$R_{12Z} - R_{12A^*} - Q_{A^*122} - Q_{A^*124} - Q_{A^*1213} - Q_{A^*1226} = 0 \quad (385)$$

$$R_{16Z} - R_{16A^*} - Q_{A^*162} - Q_{A^*164} - Q_{A^*1613} - Q_{A^*1626} = 0 \quad (386)$$

$$R_{15Z} - R_{15A^*} - Q_{A^*152} - Q_{A^*154} - Q_{A^*1513} - Q_{A^*1526} = 0 \quad (387)$$

$$R_{14Z} - R_{14A^*} - Q_{A^*142} - Q_{A^*144} - Q_{A^*1413} - Q_{A^*1426} = 0 \quad (388)$$

$$R_{HZ} - R_{HA^*} - Q_{A^*H2} - Q_{A^*H4} - Q_{A^*H13} - Q_{A^*H26} = 0 \quad (389)$$

$$Q_{A^*92} + Q_{A^*82} + Q_{A^*172} + Q_{A^*202} + Q_{A^*212} + Q_{A^*312} + Q_{A^*332} + Q_{A^*342} + Q_{A^*352} + Q_{A^*192} + Q_{A^*102} + Q_{A^*112} + Q_{A^*292} + Q_{A^*282} + Q_{A^*122} + Q_{A^*162} + Q_{A^*152} + Q_{A^*142} + Q_{A^*H2} = 11,27 \quad (390)$$

$$Q_{A^*94} + Q_{A^*84} + Q_{A^*174} + Q_{A^*204} + Q_{A^*214} + Q_{A^*314} + Q_{A^*334} + Q_{A^*344} + Q_{A^*354} + Q_{A^*194} + Q_{A^*104} + Q_{A^*114} + Q_{A^*294} + Q_{A^*284} + Q_{A^*124} + Q_{A^*164} + Q_{A^*154} + Q_{A^*144} + Q_{A^*H4} = 11,25 \quad (391)$$

$$Q_{A^*913} + Q_{A^*813} + Q_{A^*1713} + Q_{A^*2013} + Q_{A^*2113} + Q_{A^*3113} + Q_{A^*3313} + Q_{A^*3413} + Q_{A^*3513} + Q_{A^*1913} + Q_{A^*1013} + Q_{A^*1113} + Q_{A^*2913} + Q_{A^*2813} + Q_{A^*1213} + Q_{A^*1613} + Q_{A^*1513} + Q_{A^*1413} + Q_{A^*H13} = 19,67 \quad (392)$$

$$Q_{A^*926} + Q_{A^*826} + Q_{A^*1726} + Q_{A^*2026} + Q_{A^*2126} + Q_{A^*3126} + Q_{A^*3326} + Q_{A^*3426} + Q_{A^*3526} + Q_{A^*1926} + Q_{A^*1026} + Q_{A^*1126} + Q_{A^*2926} + Q_{A^*2826} + Q_{A^*1226} + Q_{A^*1626} + Q_{A^*1526} + Q_{A^*1426} + Q_{A^*H26} = 1,72 \quad (393)$$

Intervalo B*

$$R_{31A^*} - R_{31B^*} - Q_{B^*31-2} - Q_{B^*31-4} - Q_{B^*31-13} - Q_{B^*31-26} = -70,49 \quad (394)$$

$$R_{19A^*} - R_{19B^*} - Q_{B^*19-2} - Q_{B^*19-4} - Q_{B^*19-13} - Q_{B^*19-26} = 0 \quad (395)$$

$$R_{20A^*} - R_{20B^*} - Q_{B^*20-2} - Q_{B^*20-4} - Q_{B^*20-13} - Q_{B^*20-26} = -309,04 \quad (396)$$

$$R_{9A^*} - R_{9B^*} - Q_{B^*9-2} - Q_{B^*9-4} - Q_{B^*9-13} - Q_{B^*9-26} = -299,48 \quad (397)$$

$$R_{10A^*} - R_{10B^*} - Q_{B^*10-2} - Q_{B^*10-4} - Q_{B^*10-13} - Q_{B^*10-26} = 0 \quad (398)$$

$$R_{11A^*} - R_{11B^*} - Q_{B^*11-2} - Q_{B^*11-4} - Q_{B^*11-13} - Q_{B^*11-26} = 0 \quad (399)$$

$$R_{21A^*} - R_{21B^*} - Q_{B^*21-2} - Q_{B^*21-4} - Q_{B^*21-13} - Q_{B^*21-26} = -205,30 \quad (400)$$

$$R_{29A^*} - R_{29B^*} - Q_{B^*29-2} - Q_{B^*29-4} - Q_{B^*29-13} - Q_{B^*29-26} = 0 \quad (401)$$

$$R_{28A^*} - R_{28B^*} - Q_{B^*28-2} - Q_{B^*28-4} - Q_{B^*28-13} - Q_{B^*28-26} = 0 \quad (402)$$

$$R_{12A^*} - R_{12B^*} - Q_{B^*12-2} - Q_{B^*12-4} - Q_{B^*12-13} - Q_{B^*12-26} = 0 \quad (403)$$

$$R_{35A^*} - R_{35B^*} - Q_{B^*35-2} - Q_{B^*35-4} - Q_{B^*35-13} - Q_{B^*35-26} = -76,85 \quad (404)$$

$$R_{16A^*} - R_{16B^*} - Q_{B^*16-2} - Q_{B^*16-4} - Q_{B^*16-13} - Q_{B^*16-26} = 0 \quad (405)$$

$$R_{15A^*} - R_{15B^*} - Q_{B^*15-2} - Q_{B^*15-4} - Q_{B^*15-13} - Q_{B^*15-26} = 0 \quad (406)$$

$$R_{14A^*} - R_{14B^*} - Q_{B^*14-2} - Q_{B^*14-4} - Q_{B^*14-13} - Q_{B^*14-26} = 0 \quad (407)$$

$$R_{34A^*} - R_{34B^*} - Q_{B^*34-2} - Q_{B^*34-4} - Q_{B^*34-13} - Q_{B^*34-26} = -141,14 \quad (408)$$

$$R_{8A^*} - R_{8B^*} - Q_{B^*16-2} - Q_{B^*16-4} - Q_{B^*16-13} - Q_{B^*8-26} = -783,84 \quad (409)$$

$$R_{17A^*} - R_{17B^*} - Q_{B^*17-2} - Q_{B^*17-4} - Q_{B^*17-13} - Q_{B^*17-26} = 0 \quad (410)$$

$$R_{33A^*} - R_{33B^*} - Q_{B^*33-2} - Q_{B^*33-4} - Q_{B^*33-13} - Q_{B^*33-26} = -108,83 \quad (411)$$

$$R_{HA^*} - R_{HB^*} - Q_{B^*H} - Q_{B^*H4} - Q_{B^*H13} - Q_{B^*H26} = 0 \quad (412)$$

$$Q_{B^*31-2} + Q_{B^*19-2} + Q_{B^*20-2} + Q_{B^*9-2} + Q_{B^*10-2} + Q_{B^*11-2} + Q_{B^*21-2} + Q_{B^*29-2} + Q_{B^*28-2} + Q_{B^*12-2} + Q_{B^*35-2} + Q_{B^*16-2} + Q_{B^*15-2} + Q_{B^*14-2} + Q_{B^*34-2} + Q_{B^*8-2} + Q_{B^*17-2} + Q_{B^*33-2} + Q_{B^*H2} = 676,12 \quad (413)$$

$$Q_{B^*31-4} + Q_{B^*19-4} + Q_{B^*20-4} + Q_{B^*9-4} + Q_{B^*10-4} + Q_{B^*11-4} + Q_{B^*21-4} + Q_{B^*29-4} + Q_{B^*28-4} + Q_{B^*12-4} + Q_{B^*35-4} + Q_{B^*16-4} + Q_{B^*15-4} + Q_{B^*14-4} + Q_{B^*34-4} + Q_{B^*8-4} + Q_{B^*17-4} + Q_{B^*33-4} + Q_{B^*H4} = 675,01 \quad (414)$$

$$Q_{B^*31-13} + Q_{B^*19-13} + Q_{B^*20-13} + Q_{B^*9-13} + Q_{B^*10-13} + Q_{B^*11-13} + Q_{B^*21-13} + Q_{B^*29-13} + Q_{B^*28-13} + Q_{B^*12-13} + Q_{B^*35-13} + Q_{B^*16-13} + Q_{B^*15-13} + Q_{B^*14-13} + Q_{B^*34-13} + Q_{B^*8-13} + Q_{B^*17-13} + Q_{B^*33-13} + Q_{B^*H13} = 1180,01 \quad (415)$$

$$Q_{B^*31-26} + Q_{B^*19-26} + Q_{B^*20-26} + Q_{B^*9-26} + Q_{B^*10-26} + Q_{B^*11-26} + Q_{B^*21-26} + Q_{B^*29-26} + Q_{B^*28-26} + Q_{B^*12-26} + Q_{B^*35-26} + Q_{B^*16-26} + Q_{B^*15-26} + Q_{B^*14-26} + Q_{B^*34-26} + Q_{B^*8-26} + Q_{B^*17-26} + Q_{B^*33-26} + Q_{B^*H26} = 103,27 \quad (416)$$

Intervalo C*

$$R_{8B^*} - R_{8C^*} - Q_{C^*8-2} - Q_{C^*8-3} - Q_{C^*8-13} - Q_{C^*8-26} = -1306,40 \quad (417)$$

$$R_{9B^*} - R_{9C^*} - Q_{C^*9-2} - Q_{C^*9-3} - Q_{C^*9-13} - Q_{C^*9-26} = -499,13 \quad (418)$$

$$R_{20B^*} - R_{20C^*} - Q_{C^*20-2} - Q_{C^*20-3} - Q_{C^*20-13} - Q_{C^*20-26} = -515,06 \quad (419)$$

$$R_{21B^*} - R_{21C^*} - Q_{C^*21-2} - Q_{C^*21-3} - Q_{C^*21-13} - Q_{C^*21-26} = -342,17 \quad (420)$$

$$R_{31B^*} - R_{31C^*} - Q_{C^*31-2} - Q_{C^*31-3} - Q_{C^*31-13} - Q_{C^*31-26} = -117,49 \quad (421)$$

$$R_{33B^*} - R_{33C^*} - Q_{C^*33-2} - Q_{C^*33-3} - Q_{C^*33-13} - Q_{C^*33-26} = -181,39 \quad (422)$$

$$R_{34B^*} - R_{34C^*} - Q_{C^*34-2} - Q_{C^*34-3} - Q_{C^*34-13} - Q_{C^*34-26} = -235,23 \quad (423)$$

$$R_{35B^*} - R_{35C^*} - Q_{C^*35-2} - Q_{C^*35-3} - Q_{C^*35-13} - Q_{C^*35-26} = -128,09 \quad (424)$$

$$R_{19B^*} - R_{19C^*} - Q_{C^*19-2} - Q_{C^*19-3} - Q_{C^*19-13} - Q_{C^*19-26} = 0 \quad (425)$$

$$R_{10B^*} - R_{10C^*} - Q_{C^*10-2} - Q_{C^*10-3} - Q_{C^*10-13} - Q_{C^*10-26} = 0 \quad (426)$$

$$\begin{aligned}
 R_{11B^*} - R_{11C^*} - Q_{C^*11-2} - Q_{C^*11-3} - Q_{C^*11-13} - Q_{C^*11-26} &= 0 & (427) \\
 R_{29B^*} - R_{29C^*} - Q_{C^*29-2} - Q_{C^*29-3} - Q_{C^*29-13} - Q_{C^*29-26} &= 0 & (428) \\
 R_{28B^*} - R_{28C^*} - Q_{C^*28-2} - Q_{C^*28-3} - Q_{C^*28-13} - Q_{C^*28-26} &= 0 & (429) \\
 R_{12B^*} - R_{12C^*} - Q_{C^*12-2} - Q_{C^*12-3} - Q_{C^*12-13} - Q_{C^*12-26} &= 0 & (430) \\
 R_{16B^*} - R_{16C^*} - Q_{C^*16-2} - Q_{C^*16-3} - Q_{C^*16-13} - Q_{C^*16-26} &= 0 & (431) \\
 R_{15B^*} - R_{15C^*} - Q_{C^*15-2} - Q_{C^*15-3} - Q_{C^*15-13} - Q_{C^*15-26} &= 0 & (432) \\
 R_{14B^*} - R_{14C^*} - Q_{C^*14-2} - Q_{C^*14-3} - Q_{C^*14-13} - Q_{C^*14-26} &= 0 & (433) \\
 R_{17B^*} - R_{17C^*} - Q_{C^*17-2} - Q_{C^*17-3} - Q_{C^*17-13} - Q_{C^*17-26} &= 0 & (434) \\
 R_{HB^*} - R_{HC^*} - Q_{C^*H2} - Q_{C^*H3} - Q_{C^*H13} - Q_{C^*H26} &= 0 & (435) \\
 Q_{C^*82} + Q_{C^*92} + Q_{C^*202} + Q_{C^*212} + Q_{C^*312} + Q_{C^*332} + Q_{C^*342} + Q_{C^*352} + Q_{C^*192} + Q_{C^*102} + Q_{C^*112} + Q_{C^*292} + Q_{C^*282} + Q_{C^*122} + \\
 Q_{C^*162} + Q_{C^*152} + Q_{C^*142} + Q_{C^*172} + Q_{C^*H2} &= 1126,87 & (436) \\
 Q_{C^*83} + Q_{C^*93} + Q_{C^*203} + Q_{C^*213} + Q_{C^*313} + Q_{C^*333} + Q_{C^*343} + Q_{C^*353} + Q_{C^*193} + Q_{C^*103} + Q_{C^*113} + Q_{C^*293} + Q_{C^*283} + Q_{C^*123} + \\
 Q_{C^*163} + Q_{C^*153} + Q_{C^*143} + Q_{C^*173} + Q_{C^*H3} &= 1029,57 & (437) \\
 Q_{C^*813} + Q_{C^*913} + Q_{C^*2013} + Q_{C^*2113} + Q_{C^*3113} + Q_{C^*3313} + Q_{C^*3413} + Q_{C^*3513} + Q_{C^*1913} + Q_{C^*1013} + Q_{C^*1113} + Q_{C^*2913} + Q_{C^*2813} + \\
 Q_{C^*1213} + Q_{C^*1613} + Q_{C^*1513} + Q_{C^*1413} + Q_{C^*1713} + Q_{C^*H13} &= 1966,68 & (438) \\
 Q_{C^*826} + Q_{C^*926} + Q_{C^*2026} + Q_{C^*2126} + Q_{C^*3126} + Q_{C^*3326} + Q_{C^*3426} + Q_{C^*3526} + Q_{C^*1926} + Q_{C^*1026} + Q_{C^*1126} + Q_{C^*2926} + Q_{C^*2826} + \\
 Q_{C^*1226} + Q_{C^*1626} + Q_{C^*1526} + Q_{C^*1426} + Q_{C^*1726} + Q_{C^*H26} &= 172,12 & (439)
 \end{aligned}$$

Intervalo D

$$\begin{aligned}
 R_{8C^*} - R_{8D^*} - Q_{D^*81} - Q_{D^*83} - Q_{D^*813} - Q_{D^*826} &= -509,50 & (440) \\
 R_{9C^*} - R_{9D^*} - Q_{D^*91} - Q_{D^*93} - Q_{D^*913} - Q_{D^*926} &= -194,66 & (441) \\
 R_{20C^*} - R_{20D^*} - Q_{D^*201} - Q_{D^*203} - Q_{D^*2013} - Q_{D^*2026} &= -200,87 & (442) \\
 R_{21C^*} - R_{21D^*} - Q_{D^*211} - Q_{D^*213} - Q_{D^*2113} - Q_{D^*2126} &= -133,45 & (443) \\
 R_{31C^*} - R_{31D^*} - Q_{D^*311} - Q_{D^*313} - Q_{D^*3113} - Q_{D^*3126} &= -45,82 & (444) \\
 R_{33C^*} - R_{33D^*} - Q_{D^*331} - Q_{D^*333} - Q_{D^*3313} - Q_{D^*3326} &= -70,74 & (445) \\
 R_{34C^*} - R_{34D^*} - Q_{D^*341} - Q_{D^*343} - Q_{D^*3413} - Q_{D^*3426} &= -91,74 & (446) \\
 R_{35C^*} - R_{35D^*} - Q_{D^*351} - Q_{D^*353} - Q_{D^*3513} - Q_{D^*3526} &= -49,96 & (447) \\
 R_{19C^*} - R_{19D^*} - Q_{D^*191} - Q_{D^*193} - Q_{D^*1913} - Q_{D^*1926} &= 0 & (448) \\
 R_{10C^*} - R_{10D^*} - Q_{D^*101} - Q_{D^*103} - Q_{D^*1013} - Q_{D^*1026} &= 0 & (449) \\
 R_{11C^*} - R_{11D^*} - Q_{D^*111} - Q_{D^*113} - Q_{D^*1113} - Q_{D^*1126} &= 0 & (450) \\
 R_{29C^*} - R_{29D^*} - Q_{D^*291} - Q_{D^*293} - Q_{D^*2913} - Q_{D^*2926} &= 0 & (451) \\
 R_{28C^*} - R_{28D^*} - Q_{D^*281} - Q_{D^*283} - Q_{D^*2813} - Q_{D^*2826} &= 0 & (452) \\
 R_{12C^*} - R_{12D^*} - Q_{D^*121} - Q_{D^*123} - Q_{D^*1213} - Q_{D^*1226} &= 0 & (453) \\
 R_{16C^*} - R_{16D^*} - Q_{D^*161} - Q_{D^*163} - Q_{D^*1613} - Q_{D^*1626} &= 0 & (454) \\
 R_{15C^*} - R_{15D^*} - Q_{D^*151} - Q_{D^*153} - Q_{D^*1513} - Q_{D^*1526} &= 0 & (455) \\
 R_{14C^*} - R_{14D^*} - Q_{D^*141} - Q_{D^*143} - Q_{D^*1413} - Q_{D^*1426} &= 0 & (456) \\
 R_{17C^*} - R_{17D^*} - Q_{D^*171} - Q_{D^*173} - Q_{D^*1713} - Q_{D^*1726} &= 0 & (457) \\
 R_{HC^*} - R_{HD^*} - Q_{D^*H1} - Q_{D^*H3} - Q_{D^*H13} - Q_{D^*H26} &= 0 & (458) \\
 Q_{D^*81} + Q_{D^*91} + Q_{D^*201} + Q_{D^*211} + Q_{D^*311} + Q_{D^*331} + Q_{D^*341} + Q_{D^*351} + Q_{D^*191} + Q_{D^*101} + Q_{D^*111} + Q_{D^*291} + Q_{D^*281} + Q_{D^*121} + \\
 Q_{D^*161} + Q_{D^*151} + Q_{D^*141} + Q_{D^*171} + Q_{D^*H1} &= 397,20 & (459) \\
 Q_{D^*83} + Q_{D^*93} + Q_{D^*203} + Q_{D^*213} + Q_{D^*313} + Q_{D^*333} + Q_{D^*343} + Q_{D^*353} + Q_{D^*193} + Q_{D^*103} + Q_{D^*113} + Q_{D^*293} + Q_{D^*283} + Q_{D^*123} + \\
 Q_{D^*163} + Q_{D^*153} + Q_{D^*143} + Q_{D^*173} + Q_{D^*H3} &= 401,53 & (460) \\
 Q_{D^*813} + Q_{D^*913} + Q_{D^*2013} + Q_{D^*2113} + Q_{D^*3113} + Q_{D^*3313} + Q_{D^*3413} + Q_{D^*3513} + Q_{D^*1913} + Q_{D^*1013} + Q_{D^*1113} + Q_{D^*2913} + Q_{D^*2813} + \\
 Q_{D^*1213} + Q_{D^*1613} + Q_{D^*1513} + Q_{D^*1413} + Q_{D^*1713} + Q_{D^*H13} &= 767,01 & (461) \\
 Q_{D^*826} + Q_{D^*926} + Q_{D^*2026} + Q_{D^*2126} + Q_{D^*3126} + Q_{D^*3326} + Q_{D^*3426} + Q_{D^*3526} + Q_{D^*1926} + Q_{D^*1026} + Q_{D^*1126} + Q_{D^*2926} + Q_{D^*2826} + \\
 Q_{D^*1226} + Q_{D^*1626} + Q_{D^*1526} + Q_{D^*1426} + Q_{D^*1726} + Q_{D^*H26} &= 67,13 & (462)
 \end{aligned}$$

Intervalo E*

$$\begin{aligned}
 R_{31D^*} - R_{31E^*} - Q_{E^*311} - Q_{E^*313} - Q_{E^*3113} - Q_{E^*3126} &= -72,84 & (463) \\
 R_{19D^*} - R_{19E^*} - Q_{E^*191} - Q_{E^*193} - Q_{E^*1913} - Q_{E^*1926} &= 0 & (464) \\
 R_{20D^*} - R_{20E^*} - Q_{E^*201} - Q_{E^*203} - Q_{E^*2013} - Q_{E^*2026} &= 0 & (465) \\
 R_{9D^*} - R_{9E^*} - Q_{E^*91} - Q_{E^*93} - Q_{E^*913} - Q_{E^*926} &= -309,46 & (466) \\
 R_{10D^*} - R_{10E^*} - Q_{E^*101} - Q_{E^*103} - Q_{E^*1013} - Q_{E^*1026} &= 0 & (467) \\
 R_{11D^*} - R_{11E^*} - Q_{E^*111} - Q_{E^*113} - Q_{E^*1113} - Q_{E^*1126} &= 0 & (468) \\
 R_{21D^*} - R_{21E^*} - Q_{E^*211} - Q_{E^*213} - Q_{E^*2113} - Q_{E^*2126} &= -212,15 & (469) \\
 R_{29D^*} - R_{29E^*} - Q_{E^*291} - Q_{E^*293} - Q_{E^*2913} - Q_{E^*2926} &= 0 & (470) \\
 R_{28D^*} - R_{28E^*} - Q_{E^*281} - Q_{E^*283} - Q_{E^*2813} - Q_{E^*2826} &= 0 & (471) \\
 R_{12D^*} - R_{12E^*} - Q_{E^*121} - Q_{E^*123} - Q_{E^*1213} - Q_{E^*1226} &= 0 & (472) \\
 R_{35D^*} - R_{35E^*} - Q_{E^*351} - Q_{E^*353} - Q_{E^*3513} - Q_{E^*3526} &= -79,42 & (473) \\
 R_{16D^*} - R_{16E^*} - Q_{E^*161} - Q_{E^*163} - Q_{E^*1613} - Q_{E^*1626} &= 0 & (474) \\
 R_{15D^*} - R_{15E^*} - Q_{E^*151} - Q_{E^*153} - Q_{E^*1513} - Q_{E^*1526} &= 0 & (475) \\
 R_{14D^*} - R_{14E^*} - Q_{E^*141} - Q_{E^*143} - Q_{E^*1413} - Q_{E^*1426} &= 0 & (476) \\
 R_{34D^*} - R_{34E^*} - Q_{E^*341} - Q_{E^*343} - Q_{E^*3413} - Q_{E^*3426} &= -145,84 & (477) \\
 R_{8D^*} - R_{8E^*} - Q_{E^*81} - Q_{E^*83} - Q_{E^*813} - Q_{E^*826} &= -809,97 & (478) \\
 R_{17D^*} - R_{17E^*} - Q_{E^*171} - Q_{E^*173} - Q_{E^*1713} - Q_{E^*1726} &= 0 & (479) \\
 R_{33D^*} - R_{33E^*} - Q_{E^*331} - Q_{E^*333} - Q_{E^*3313} - Q_{E^*3326} &= -112,46 & (480) \\
 R_{HD^*} - R_{HE^*} - Q_{E^*H1} - Q_{E^*H3} - Q_{E^*H13} - Q_{E^*H26} &= 0 & (481) \\
 Q_{E^*311} + Q_{E^*191} + Q_{E^*201} + Q_{E^*91} + Q_{E^*101} + Q_{E^*111} + Q_{E^*211} + Q_{E^*291} + Q_{E^*281} + Q_{E^*121} + Q_{E^*351} + Q_{E^*161} + Q_{E^*151} + Q_{E^*141} + \\
 Q_{E^*341} + Q_{E^*81} + Q_{E^*171} + Q_{E^*331} + Q_{E^*H1} &= 631,45 & (482)
 \end{aligned}$$

$$Q_{E^*313} + Q_{E^*193} + Q_{E^*203} + Q_{E^*93} + Q_{E^*103} + Q_{E^*113} + Q_{E^*213} + Q_{E^*293} + Q_{E^*283} + Q_{E^*123} + Q_{E^*353} + Q_{E^*163} + Q_{E^*153} + Q_{E^*143} + Q_{E^*343} + Q_{E^*83} + Q_{E^*173} + Q_{E^*333} + Q_{E^*H3} = 638,34 \quad (483)$$

$$Q_{E^*3113} + Q_{E^*1913} + Q_{E^*2013} + Q_{E^*913} + Q_{E^*1013} + Q_{E^*1113} + Q_{E^*2113} + Q_{E^*2913} + Q_{E^*2813} + Q_{E^*1213} + Q_{E^*3513} + Q_{E^*1613} + Q_{E^*1513} + Q_{E^*1413} + Q_{E^*3413} + Q_{E^*813} + Q_{E^*1713} + Q_{E^*3313} + Q_{E^*H13} = 1219,34 \quad (484)$$

$$Q_{E^*3126} + Q_{E^*1926} + Q_{E^*2026} + Q_{E^*926} + Q_{E^*1026} + Q_{E^*1126} + Q_{E^*2126} + Q_{E^*2926} + Q_{E^*2826} + Q_{E^*1226} + Q_{E^*3526} + Q_{E^*1626} + Q_{E^*1526} + Q_{E^*1426} + Q_{E^*3426} + Q_{E^*826} + Q_{E^*1726} + Q_{E^*3326} + Q_{E^*H26} = 106,71 \quad (485)$$

Intervalo F*

$$R_{8E^*} - R_{8F^*} - Q_{F^*81} - Q_{F^*83} - Q_{F^*813} - Q_{F^*826} = -391,92 \quad (486)$$

$$R_{21E^*} - R_{21F^*} - Q_{F^*211} - Q_{F^*213} - Q_{F^*2113} - Q_{F^*2126} = -102,65 \quad (487)$$

$$R_{31E^*} - R_{31F^*} - Q_{F^*311} - Q_{F^*313} - Q_{F^*3113} - Q_{F^*3126} = -35,25 \quad (488)$$

$$R_{33E^*} - R_{33F^*} - Q_{F^*331} - Q_{F^*333} - Q_{F^*3313} - Q_{F^*3326} = -54,42 \quad (489)$$

$$R_{34E^*} - R_{34F^*} - Q_{F^*341} - Q_{F^*343} - Q_{F^*3413} - Q_{F^*3426} = -70,57 \quad (490)$$

$$R_{35E^*} - R_{35F^*} - Q_{F^*351} - Q_{F^*353} - Q_{F^*3513} - Q_{F^*3526} = -38,43 \quad (491)$$

$$R_{19E^*} - R_{19F^*} - Q_{F^*191} - Q_{F^*193} - Q_{F^*1913} - Q_{F^*1926} = 0 \quad (492)$$

$$R_{20E^*} - R_{20F^*} - Q_{F^*201} - Q_{F^*203} - Q_{F^*2013} - Q_{F^*2026} = 0 \quad (493)$$

$$R_{9E^*} - R_{9F^*} - Q_{F^*91} - Q_{F^*93} - Q_{F^*913} - Q_{F^*926} = 0 \quad (494)$$

$$R_{10E^*} - R_{10F^*} - Q_{F^*101} - Q_{F^*103} - Q_{F^*1013} - Q_{F^*1026} = 0 \quad (495)$$

$$R_{11E^*} - R_{11F^*} - Q_{F^*111} - Q_{F^*113} - Q_{F^*1113} - Q_{F^*1126} = 0 \quad (496)$$

$$R_{29E^*} - R_{29F^*} - Q_{F^*291} - Q_{F^*293} - Q_{F^*2913} - Q_{F^*2926} = 0 \quad (497)$$

$$R_{28E^*} - R_{28F^*} - Q_{F^*281} - Q_{F^*283} - Q_{F^*2813} - Q_{F^*2826} = 0 \quad (498)$$

$$R_{12E^*} - R_{12F^*} - Q_{F^*121} - Q_{F^*123} - Q_{F^*1213} - Q_{F^*1226} = 0 \quad (499)$$

$$R_{16E^*} - R_{16F^*} - Q_{F^*161} - Q_{F^*163} - Q_{F^*1613} - Q_{F^*1626} = 0 \quad (500)$$

$$R_{15E^*} - R_{15F^*} - Q_{F^*151} - Q_{F^*153} - Q_{F^*1513} - Q_{F^*1526} = 0 \quad (501)$$

$$R_{14E^*} - R_{14F^*} - Q_{F^*141} - Q_{F^*143} - Q_{F^*1413} - Q_{F^*1426} = 0 \quad (502)$$

$$R_{17E^*} - R_{17F^*} - Q_{F^*171} - Q_{F^*173} - Q_{F^*1713} - Q_{F^*1726} = 0 \quad (503)$$

$$R_{HE^*} - R_{HF^*} - Q_{F^*H1} - Q_{F^*H3} - Q_{F^*H13} - Q_{F^*H26} = 0 \quad (504)$$

$$R_{18F^*} + Q_{F^*181} + Q_{F^*183} + Q_{F^*1813} + Q_{F^*1826} = 136,14 \quad (505)$$

$$Q_{F^*81} + Q_{F^*211} + Q_{F^*311} + Q_{F^*331} + Q_{F^*341} + Q_{F^*351} + Q_{F^*191} + Q_{F^*201} + Q_{F^*181} + Q_{F^*91} + Q_{F^*101} + Q_{F^*111} + Q_{F^*291} + Q_{F^*281} + Q_{F^*121} + Q_{F^*161} + Q_{F^*151} + Q_{F^*141} + Q_{F^*171} + Q_{F^*H1} = 305,54 \quad (506)$$

$$Q_{F^*83} + Q_{F^*213} + Q_{F^*313} + Q_{F^*333} + Q_{F^*343} + Q_{F^*353} + Q_{F^*193} + Q_{F^*203} + Q_{F^*183} + Q_{F^*93} + Q_{F^*103} + Q_{F^*113} + Q_{F^*293} + Q_{F^*283} + Q_{F^*123} + Q_{F^*163} + Q_{F^*153} + Q_{F^*143} + Q_{F^*173} + Q_{F^*H3} = 308,87 \quad (507)$$

$$Q_{F^*813} + Q_{F^*2113} + Q_{F^*3113} + Q_{F^*3313} + Q_{F^*3413} + Q_{F^*3513} + Q_{F^*1913} + Q_{F^*2013} + Q_{F^*1813} + Q_{F^*913} + Q_{F^*1013} + Q_{F^*1113} + Q_{F^*2913} + Q_{F^*2813} + Q_{F^*1213} + Q_{F^*1613} + Q_{F^*1513} + Q_{F^*1413} + Q_{F^*1713} + Q_{F^*H13} = 590,00 \quad (508)$$

$$Q_{F^*826} + Q_{F^*2126} + Q_{F^*3126} + Q_{F^*3326} + Q_{F^*3426} + Q_{F^*3526} + Q_{F^*1926} + Q_{F^*2026} + Q_{F^*1826} + Q_{F^*926} + Q_{F^*1026} + Q_{F^*1126} + Q_{F^*2926} + Q_{F^*2826} + Q_{F^*1226} + Q_{F^*1626} + Q_{F^*1526} + Q_{F^*1426} + Q_{F^*1726} + Q_{F^*H26} = 51,63 \quad (509)$$

Intervalo G*

$$R_{18G^*} - R_{18F^*} - Q_{G^*181} - Q_{G^*183} - Q_{G^*1813} = -417,48 \quad (510)$$

$$R_{31G^*} - R_{31F^*} - Q_{G^*311} - Q_{G^*313} - Q_{G^*3113} = -108,09 \quad (511)$$

$$R_{19G^*} - R_{19F^*} - Q_{G^*191} - Q_{G^*193} - Q_{G^*1913} = 0 \quad (512)$$

$$R_{20G^*} - R_{20F^*} - Q_{G^*201} - Q_{G^*203} - Q_{G^*2013} = 0 \quad (513)$$

$$R_{9G^*} - R_{9F^*} - Q_{G^*91} - Q_{G^*93} - Q_{G^*913} = 0 \quad (514)$$

$$R_{10G^*} - R_{10F^*} - Q_{G^*101} - Q_{G^*103} - Q_{G^*1013} = 0 \quad (515)$$

$$R_{11G^*} - R_{11F^*} - Q_{G^*111} - Q_{G^*113} - Q_{G^*1113} = 0 \quad (516)$$

$$R_{21G^*} - R_{21F^*} - Q_{G^*211} - Q_{G^*213} - Q_{G^*2113} = -314,80 \quad (517)$$

$$R_{29G^*} - R_{29F^*} - Q_{G^*291} - Q_{G^*293} - Q_{G^*2913} = 0 \quad (518)$$

$$R_{28G^*} - R_{28F^*} - Q_{G^*281} - Q_{G^*283} - Q_{G^*2813} = 0 \quad (519)$$

$$R_{12G^*} - R_{12F^*} - Q_{G^*121} - Q_{G^*123} - Q_{G^*1213} = 0 \quad (520)$$

$$R_{35G^*} - R_{35F^*} - Q_{G^*351} - Q_{G^*353} - Q_{G^*3513} = -117,84 \quad (521)$$

$$R_{16G^*} - R_{16F^*} - Q_{G^*161} - Q_{G^*163} - Q_{G^*1613} = 0 \quad (522)$$

$$R_{15G^*} - R_{15F^*} - Q_{G^*151} - Q_{G^*153} - Q_{G^*1513} = 0 \quad (523)$$

$$R_{14G^*} - R_{14F^*} - Q_{G^*141} - Q_{G^*143} - Q_{G^*1413} = 0 \quad (524)$$

$$R_{34G^*} - R_{34F^*} - Q_{G^*341} - Q_{G^*343} - Q_{G^*3413} = -216,41 \quad (525)$$

$$R_{8G^*} - R_{8F^*} - Q_{G^*81} - Q_{G^*83} - Q_{G^*813} = -1201,89 \quad (526)$$

$$R_{17G^*} - R_{17F^*} - Q_{G^*171} - Q_{G^*173} - Q_{G^*1713} = 0 \quad (527)$$

$$R_{33G^*} - R_{33F^*} - Q_{G^*331} - Q_{G^*333} - Q_{G^*3313} = -166,88 \quad (528)$$

$$R_{HG^*} - R_{HF^*} - Q_{G^*H1} - Q_{G^*H3} - Q_{G^*H13} = 0 \quad (529)$$

$$Q_{G^*181} + Q_{G^*311} + Q_{G^*191} + Q_{G^*201} + Q_{G^*91} + Q_{G^*101} + Q_{G^*111} + Q_{G^*211} + Q_{G^*291} + Q_{G^*281} + Q_{G^*121} + Q_{G^*351} + Q_{G^*161} + Q_{G^*151} + Q_{G^*141} + Q_{G^*171} + Q_{G^*H1} = 936,99 \quad (530)$$

$$Q_{G^*183} + Q_{G^*313} + Q_{G^*193} + Q_{G^*203} + Q_{G^*93} + Q_{G^*103} + Q_{G^*113} + Q_{G^*213} + Q_{G^*293} + Q_{G^*283} + Q_{G^*123} + Q_{G^*353} + Q_{G^*163} + Q_{G^*153} + Q_{G^*143} + Q_{G^*173} + Q_{G^*83} + Q_{G^*173} + Q_{G^*333} + Q_{G^*H3} = 947,21 \quad (531)$$

$$Q_{G^*1813} + Q_{G^*3113} + Q_{G^*1913} + Q_{G^*2013} + Q_{G^*913} + Q_{G^*1013} + Q_{G^*1113} + Q_{G^*2113} + Q_{G^*2913} + Q_{G^*2813} + Q_{G^*1213} + Q_{G^*3513} + Q_{G^*1613} + Q_{G^*1513} + Q_{G^*1413} + Q_{G^*1713} + Q_{G^*813} + Q_{G^*1713} + Q_{G^*3313} + Q_{G^*H13} = 1809,35 \quad (532)$$

Intervalo H*

$$R_{18H^*} - R_{18G^*} - Q_{H^*181} - Q_{H^*183} - Q_{H^*1813} = -72,61 \quad (533)$$

$$R_{31H^*} - R_{31G^*} - Q_{H^*311} - Q_{H^*313} - Q_{H^*3113} = -18,80 \quad (534)$$

$$R_{19H^*} - R_{19G^*} - Q_{H^*191} - Q_{H^*193} - Q_{H^*1913} = 0 \quad (535)$$

$$R_{20H^*} - R_{20G^*} - Q_{H^*201} - Q_{H^*203} - Q_{H^*2013} = 0 \quad (536)$$

$$R_{9H^*} - R_{9G^*} - Q_{G^*91} - Q_{G^*93} - Q_{G^*913} = 0 \quad (537)$$

$$R_{24H^*} + Q_{H^*241} + Q_{H^*243} + Q_{H^*2413} = 48,02 \quad (538)$$

$$R_{10G^*} - R_{10H^*} - Q_{H^*101} - Q_{H^*103} - Q_{H^*1013} = 0 \quad (539)$$

$$R_{11G^*} - R_{11H^*} - Q_{H^*111} - Q_{H^*113} - Q_{H^*1113} = 0 \quad (540)$$

$$R_{21G^*} - R_{21H^*} - Q_{H^*211} - Q_{H^*213} - Q_{H^*2113} = -54,75 \quad (541)$$

$$R_{29G^*} - R_{29H^*} - Q_{H^*291} - Q_{H^*293} - Q_{H^*2913} = 0 \quad (542)$$

$$R_{28G^*} - R_{28H^*} - Q_{H^*281} - Q_{H^*283} - Q_{H^*2813} = 0 \quad (543)$$

$$R_{12G^*} - R_{12H^*} - Q_{H^*121} - Q_{H^*123} - Q_{H^*1213} = 0 \quad (544)$$

$$R_{35G^*} - R_{35H^*} - Q_{H^*351} - Q_{H^*353} - Q_{H^*3513} = -20,49 \quad (545)$$

$$R_{16G^*} - R_{16H^*} - Q_{H^*161} - Q_{H^*163} - Q_{H^*1613} = 0 \quad (546)$$

$$R_{15G^*} - R_{15H^*} - Q_{H^*151} - Q_{H^*153} - Q_{H^*1513} = 0 \quad (547)$$

$$R_{14G^*} - R_{14H^*} - Q_{H^*141} - Q_{H^*143} - Q_{H^*1413} = 0 \quad (548)$$

$$R_{34G^*} - R_{34H^*} - Q_{H^*341} - Q_{H^*343} - Q_{H^*3413} = -37,64 \quad (549)$$

$$R_{8G^*} - R_{8H^*} - Q_{H^*81} - Q_{H^*83} - Q_{H^*813} = -209,02 \quad (550)$$

$$R_{17G^*} - R_{17H^*} - Q_{H^*171} - Q_{H^*173} - Q_{H^*1713} = 0 \quad (551)$$

$$R_{33G^*} - R_{33H^*} - Q_{H^*331} - Q_{H^*333} - Q_{H^*3313} = -29,02 \quad (552)$$

$$R_{HG^*} - R_{HH^*} - Q_{H^*H1} - Q_{H^*H3} - Q_{H^*H13} = 0 \quad (553)$$

$$Q_{H^*181} + Q_{H^*311} + Q_{H^*191} + Q_{H^*201} + Q_{H^*91} + Q_{H^*241} + Q_{H^*101} + Q_{H^*111} + Q_{H^*211} + Q_{H^*291} + Q_{H^*281} + Q_{H^*121} + Q_{H^*351} + Q_{H^*161} + Q_{H^*151} + Q_{H^*141} + Q_{H^*81} + Q_{H^*171} + Q_{H^*331} + Q_{H^*H1} = 162,96 \quad (554)$$

$$Q_{H^*183} + Q_{H^*313} + Q_{H^*193} + Q_{H^*203} + Q_{H^*93} + Q_{H^*243} + Q_{H^*103} + Q_{H^*113} + Q_{H^*213} + Q_{H^*293} + Q_{H^*283} + Q_{H^*123} + Q_{H^*353} + Q_{H^*163} + Q_{H^*153} + Q_{H^*143} + Q_{H^*83} + Q_{H^*173} + Q_{H^*333} + Q_{H^*H3} = 164,73 \quad (555)$$

$$Q_{H^*1813} + Q_{H^*3113} + Q_{H^*1913} + Q_{H^*2013} + Q_{H^*913} + Q_{H^*2413} + Q_{H^*1013} + Q_{H^*1113} + Q_{H^*2113} + Q_{H^*2913} + Q_{H^*2813} + Q_{H^*1213} + Q_{H^*3513} + Q_{H^*1613} + Q_{H^*1513} + Q_{H^*1413} + Q_{H^*813} + Q_{H^*1713} + Q_{H^*3313} + Q_{H^*H13} = 314,67 \quad (556)$$

Intervalo I*

$$R_{18H^*} - R_{18I^*} - Q_{I^*181} - Q_{I^*183} - Q_{I^*1813} = -4,54 \quad (557)$$

$$R_{31H^*} - R_{31I^*} - Q_{I^*311} - Q_{I^*313} - Q_{I^*3113} = -1,17 \quad (558)$$

$$R_{19H^*} - R_{19I^*} - Q_{I^*191} - Q_{I^*193} - Q_{I^*1913} = 0 \quad (559)$$

$$R_{20H^*} - R_{20I^*} - Q_{I^*201} - Q_{I^*203} - Q_{I^*2013} = 0 \quad (560)$$

$$R_{9H^*} - R_{9I^*} - Q_{I^*91} - Q_{I^*93} - Q_{I^*913} = 0 \quad (561)$$

$$R_{24H^*} - R_{24I^*} - Q_{I^*241} - Q_{I^*243} - Q_{I^*2413} = -3,00 \quad (562)$$

$$R_{10H^*} - R_{10I^*} - Q_{I^*101} - Q_{I^*103} - Q_{I^*1013} = 0 \quad (563)$$

$$R_{11H^*} - R_{11I^*} - Q_{I^*111} - Q_{I^*113} - Q_{I^*1113} = 0 \quad (564)$$

$$R_{21H^*} - R_{21I^*} - Q_{I^*211} - Q_{I^*213} - Q_{I^*2113} = 0 \quad (565)$$

$$R_{29H^*} - R_{29I^*} - Q_{I^*291} - Q_{I^*293} - Q_{I^*2913} = 0 \quad (566)$$

$$R_{28H^*} - R_{28I^*} - Q_{I^*281} - Q_{I^*283} - Q_{I^*2813} = 0 \quad (567)$$

$$R_{12H^*} - R_{12I^*} - Q_{I^*121} - Q_{I^*123} - Q_{I^*1213} = 0 \quad (568)$$

$$R_{35H^*} - R_{35I^*} - Q_{I^*351} - Q_{I^*353} - Q_{I^*3513} = -1,28 \quad (569)$$

$$R_{16H^*} - R_{16I^*} - Q_{I^*161} - Q_{I^*163} - Q_{I^*1613} = 0 \quad (570)$$

$$R_{15H^*} - R_{15I^*} - Q_{I^*151} - Q_{I^*153} - Q_{I^*1513} = 0 \quad (571)$$

$$R_{14H^*} - R_{14I^*} - Q_{I^*141} - Q_{I^*143} - Q_{I^*1413} = 0 \quad (572)$$

$$R_{34H^*} - R_{34I^*} - Q_{I^*341} - Q_{I^*343} - Q_{I^*3413} = -2,35 \quad (573)$$

$$R_{8H^*} - R_{8I^*} - Q_{I^*81} - Q_{I^*83} - Q_{I^*813} = -13,06 \quad (574)$$

$$R_{17H^*} - R_{17I^*} - Q_{I^*171} - Q_{I^*173} - Q_{I^*1713} = 0 \quad (575)$$

$$R_{33H^*} - R_{33I^*} - Q_{I^*331} - Q_{I^*333} - Q_{I^*3313} = -1,81 \quad (576)$$

$$R_{HH^*} - R_{HI^*} - Q_{I^*H1} - Q_{I^*H3} - Q_{I^*H13} = 0 \quad (577)$$

$$Q_{I^*181} + Q_{I^*311} + Q_{I^*191} + Q_{I^*201} + Q_{I^*91} + Q_{I^*241} + Q_{I^*101} + Q_{I^*111} + Q_{I^*211} + Q_{I^*291} + Q_{I^*281} + Q_{I^*121} + Q_{I^*351} + Q_{I^*161} + Q_{I^*151} + Q_{I^*141} + Q_{I^*81} + Q_{I^*171} + Q_{I^*331} + Q_{I^*H1} = 10,18 \quad (578)$$

$$Q_{I^*183} + Q_{I^*313} + Q_{I^*193} + Q_{I^*203} + Q_{I^*93} + Q_{I^*243} + Q_{I^*103} + Q_{I^*113} + Q_{I^*213} + Q_{I^*293} + Q_{I^*283} + Q_{I^*123} + Q_{I^*353} + Q_{I^*163} + Q_{I^*153} + Q_{I^*143} + Q_{I^*83} + Q_{I^*173} + Q_{I^*333} + Q_{I^*H3} = 10,30 \quad (579)$$

$$Q_{I^*1813} + Q_{I^*3113} + Q_{I^*1913} + Q_{I^*2013} + Q_{I^*913} + Q_{I^*2413} + Q_{I^*1013} + Q_{I^*1113} + Q_{I^*2113} + Q_{I^*2913} + Q_{I^*2813} + Q_{I^*1213} + Q_{I^*3513} + Q_{I^*1613} + Q_{I^*1513} + Q_{I^*1413} + Q_{I^*813} + Q_{I^*1713} + Q_{I^*3313} + Q_{I^*H13} = 19,67 \quad (580)$$

Intervalo J*

$$R_{18I^*} - R_{18J^*} - Q_{J^*181} - Q_{J^*183} - Q_{J^*1813} = -45,38 \quad (581)$$

$$R_{31I^*} - R_{31J^*} - Q_{J^*311} - Q_{J^*313} - Q_{J^*3113} = -11,75 \quad (582)$$

$$R_{19I^*} - R_{19J^*} - Q_{J^*191} - Q_{J^*193} - Q_{J^*1913} = 0 \quad (583)$$

$$R_{20I^*} - R_{20J^*} - Q_{J^*201} - Q_{J^*203} - Q_{J^*2013} = 0 \quad (584)$$

$$R_{9I^*} - R_{9J^*} - Q_{J^*91} - Q_{J^*93} - Q_{J^*913} = 0 \quad (585)$$

$$R_{24I^*} - R_{24J^*} - Q_{J^*241} - Q_{J^*243} - Q_{J^*2413} = -30,01 \quad (586)$$

$$R_{10I^*} - R_{10J^*} - Q_{J^*101} - Q_{J^*103} - Q_{J^*1013} = 0 \quad (587)$$

$$R_{11I^*} - R_{11J^*} - Q_{J^*111} - Q_{J^*113} - Q_{J^*1113} = 0 \quad (588)$$

$$R_{21I^*} - R_{21J^*} - Q_{J^*211} - Q_{J^*213} - Q_{J^*2113} = 0 \quad (589)$$

$$R_{29I^*} - R_{29J^*} - Q_{J^*291} - Q_{J^*293} - Q_{J^*2913} = 0 \quad (590)$$

$$R_{28I^*} - R_{28J^*} - Q_{J^*281} - Q_{J^*283} - Q_{J^*2813} = 0 \quad (591)$$

$$R_{12I^*} - R_{12J^*} - Q_{J^*121} - Q_{J^*123} - Q_{J^*1213} = 0 \quad (592)$$

$$R_{35I^*} - R_{35J^*} - Q_{J^*351} - Q_{J^*353} - Q_{J^*3513} = 0 \quad (593)$$

$$R_{16I^*} - R_{16J^*} - Q_{J^*161} - Q_{J^*163} - Q_{J^*1613} = 0 \quad (594)$$

$$R_{15I^*} - R_{15J^*} - Q_{J^*151} - Q_{J^*153} - Q_{J^*1513} = 0 \quad (595)$$

$$R_{14I^*} - R_{14J^*} - Q_{J^*141} - Q_{J^*143} - Q_{J^*1413} = 0 \quad (596)$$

$$R_{34I^*} - R_{34J^*} - Q_{J^*341} - Q_{J^*343} - Q_{J^*3413} = -23,52 \quad (597)$$

$$R_{8I^*} - R_{8J^*} - Q_{J^*81} - Q_{J^*83} - Q_{J^*813} = -130,64 \quad (598)$$

$$R_{17I^*} - R_{17J^*} - Q_{J^*171} - Q_{J^*173} - Q_{J^*1713} = 0 \quad (599)$$

$$R_{33I^*} - R_{33J^*} - Q_{J^*331} - Q_{J^*333} - Q_{J^*3313} = -18,14 \quad (600)$$

$$R_{HI^*} - R_{HJ^*} - Q_{J^*H1} - Q_{J^*H3} - Q_{J^*H13} = 0 \quad (601)$$

$$Q_{J^*181} + Q_{J^*311} + Q_{J^*191} + Q_{J^*201} + Q_{J^*91} + Q_{J^*241} + Q_{J^*101} + Q_{J^*111} + Q_{J^*211} + Q_{J^*291} + Q_{J^*281} + Q_{J^*121} + Q_{J^*351} + Q_{J^*161} + Q_{J^*151} + Q_{J^*141} + Q_{J^*341} + Q_{J^*81} + Q_{J^*171} + Q_{J^*331} + Q_{J^*H1} = 101,85 \quad (602)$$

$$Q_{J^*183} + Q_{J^*313} + Q_{J^*193} + Q_{J^*203} + Q_{J^*93} + Q_{J^*243} + Q_{J^*103} + Q_{J^*113} + Q_{J^*213} + Q_{J^*293} + Q_{J^*283} + Q_{J^*123} + Q_{J^*353} + Q_{J^*163} + Q_{J^*153} + Q_{J^*143} + Q_{J^*343} + Q_{J^*83} + Q_{J^*173} + Q_{J^*333} + Q_{J^*H3} = 102,96 \quad (603)$$

$$Q_{J^*1813} + Q_{J^*3113} + Q_{J^*1913} + Q_{J^*2013} + Q_{J^*913} + Q_{J^*2413} + Q_{J^*1013} + Q_{J^*1113} + Q_{J^*2113} + Q_{J^*2913} + Q_{J^*2813} + Q_{J^*1213} + Q_{J^*3513} + Q_{J^*1613} + Q_{J^*1513} + Q_{J^*1413} + Q_{J^*3413} + Q_{J^*813} + Q_{J^*1713} + Q_{J^*3313} + Q_{J^*H13} = 196,67 \quad (604)$$

Intervalo K*

$$R_{31J^*} - R_{31K^*} - Q_{K^*311} - Q_{K^*313} - Q_{K^*3113} = -12,92 \quad (605)$$

$$R_{8J^*} - R_{8K^*} - Q_{K^*81} - Q_{K^*83} - Q_{K^*813} = -141,70 \quad (606)$$

$$R_{24J^*} - R_{24K^*} - Q_{K^*241} - Q_{K^*243} - Q_{K^*2413} = -33,02 \quad (607)$$

$$R_{33J^*} - R_{33K^*} - Q_{K^*331} - Q_{K^*333} - Q_{K^*3313} = -19,95 \quad (608)$$

$$R_{34J^*} - R_{34K^*} - Q_{K^*341} - Q_{K^*343} - Q_{K^*3413} = -25,8 \quad (609)$$

$$R_{19J^*} - R_{19K^*} - Q_{K^*191} - Q_{K^*193} - Q_{K^*1913} = 0 \quad (610)$$

$$R_{20J^*} - R_{20K^*} - Q_{K^*201} - Q_{K^*203} - Q_{K^*2013} = 0 \quad (611)$$

$$R_{9J^*} - R_{9K^*} - Q_{K^*91} - Q_{K^*93} - Q_{K^*913} = 0 \quad (612)$$

$$R_{10J^*} - R_{10K^*} - Q_{K^*101} - Q_{K^*103} - Q_{K^*1013} = 0 \quad (613)$$

$$R_{11J^*} - R_{11K^*} - Q_{K^*111} - Q_{K^*113} - Q_{K^*1113} = 0 \quad (614)$$

$$R_{21J^*} - R_{21K^*} - Q_{K^*211} - Q_{K^*213} - Q_{K^*2113} = 0 \quad (615)$$

$$R_{29J^*} - R_{29K^*} - Q_{K^*291} - Q_{K^*293} - Q_{K^*2913} = 0 \quad (616)$$

$$R_{28J^*} - R_{28K^*} - Q_{K^*281} - Q_{K^*283} - Q_{K^*2813} = 0 \quad (617)$$

$$R_{12J^*} - R_{12K^*} - Q_{K^*121} - Q_{K^*123} - Q_{K^*1213} = 0 \quad (618)$$

$$R_{35J^*} - R_{35K^*} - Q_{K^*351} - Q_{K^*353} - Q_{K^*3513} = 0 \quad (619)$$

$$R_{16J^*} - R_{16K^*} - Q_{K^*161} - Q_{K^*163} - Q_{K^*1613} = 0 \quad (620)$$

$$R_{15J^*} - R_{15K^*} - Q_{K^*151} - Q_{K^*153} - Q_{K^*1513} = 0 \quad (621)$$

$$R_{14J^*} - R_{14K^*} - Q_{K^*141} - Q_{K^*143} - Q_{K^*1413} = 0 \quad (622)$$

$$R_{18J^*} - R_{18K^*} - Q_{K^*181} - Q_{K^*183} - Q_{K^*1813} = 0 \quad (623)$$

$$R_{17J^*} - R_{17K^*} - Q_{K^*171} - Q_{K^*173} - Q_{K^*1713} = 0 \quad (624)$$

$$R_{HJ^*} - R_{HK^*} - Q_{J^*K1} - Q_{J^*K3} - Q_{J^*K13} = 0 \quad (625)$$

$$Q_{K^*181} + Q_{K^*311} + Q_{K^*191} + Q_{K^*201} + Q_{K^*91} + Q_{K^*241} + Q_{K^*101} + Q_{K^*111} + Q_{K^*211} + Q_{K^*291} + Q_{K^*281} + Q_{K^*121} + Q_{K^*351} + Q_{K^*161} + Q_{K^*151} + Q_{K^*141} + Q_{K^*341} + Q_{K^*81} + Q_{K^*171} + Q_{K^*331} + Q_{K^*H1} = 112,03 \quad (626)$$

$$Q_{K^*183} + Q_{K^*313} + Q_{K^*193} + Q_{K^*203} + Q_{K^*93} + Q_{K^*243} + Q_{K^*103} + Q_{K^*113} + Q_{K^*213} + Q_{K^*293} + Q_{K^*283} + Q_{K^*123} + Q_{K^*353} + Q_{K^*163} + Q_{K^*153} + Q_{K^*143} + Q_{K^*343} + Q_{K^*83} + Q_{K^*173} + Q_{K^*333} + Q_{K^*H3} = 113,25 \quad (627)$$

$$Q_{K^*1813} + Q_{K^*3113} + Q_{K^*1913} + Q_{K^*2013} + Q_{K^*913} + Q_{K^*2413} + Q_{K^*1013} + Q_{K^*1113} + Q_{K^*2113} + Q_{K^*2913} + Q_{K^*2813} + Q_{K^*1213} + Q_{K^*3513} + Q_{K^*1613} + Q_{K^*1513} + Q_{K^*1413} + Q_{K^*3413} + Q_{K^*813} + Q_{K^*1713} + Q_{K^*3313} + Q_{K^*H13} = 216,33 \quad (628)$$

Intervalo L*

$$R_{31K^*} - R_{31L^*} - Q_{L^*311} - Q_{L^*313} = -9,40 \quad (629)$$

$$R_{8K^*} - R_{8L^*} - Q_{L^*81} - Q_{L^*83} = -104,51 \quad (630)$$

$$R_{24K^*} - R_{24L^*} - Q_{L^*241} - Q_{L^*243} = -24,01 \quad (631)$$

$$R_{33K^*} - R_{33L^*} - Q_{L^*331} - Q_{L^*333} = -14,51 \quad (632)$$

$$R_{34K^*} - R_{34L^*} - Q_{L^*341} - Q_{L^*343} = -18,82 \quad (633)$$

$$R_{19K^*} - R_{19L^*} - Q_{L^*191} - Q_{L^*193} = 0 \quad (634)$$

$$R_{20K^*} - R_{20L^*} - Q_{L^*201} - Q_{L^*203} = 0 \quad (635)$$

$$R_{9K^*} - R_{9L^*} - Q_{L^*91} - Q_{L^*93} = 0 \quad (636)$$

$$R_{10K^*} - R_{10L^*} - Q_{L^*101} - Q_{L^*103} = 0 \quad (637)$$

$$R_{11K^*} - R_{11L^*} - Q_{L^*111} - Q_{L^*113} = 0 \quad (638)$$

$$R_{21K^*} - R_{21L^*} - Q_{L^*211} - Q_{L^*213} = 0 \quad (639)$$

$$R_{29K^*} - R_{29L^*} - Q_{L^*291} - Q_{L^*293} = 0 \quad (640)$$

$$R_{28K^*} - R_{28L^*} - Q_{L^*281} - Q_{L^*283} = 0 \quad (641)$$

$$R_{12K^*} - R_{12L^*} - Q_{L^*121} - Q_{L^*123} = 0 \quad (642)$$

$$R_{35K^*} - R_{35L^*} - Q_{L^*351} - Q_{L^*353} = 0 \quad (643)$$

$$R_{16K^*} - R_{16L^*} - Q_{L^*161} - Q_{L^*163} = 0 \quad (644)$$

$$R_{15K^*} - R_{15L^*} - Q_{L^*151} - Q_{L^*153} = 0 \quad (645)$$

$$R_{14K^*} - R_{14L^*} - Q_{L^*141} - Q_{L^*143} = 0 \quad (646)$$

$$R_{17K^*} - R_{17L^*} - Q_{L^*171} - Q_{L^*173} = 0 \quad (647)$$

$$R_{18K^*} - R_{18L^*} - Q_{L^*181} - Q_{L^*183} = 0 \quad (648)$$

$$R_{HK^*} - R_{HL^*} - Q_{L^*H1} - Q_{L^*H3} = 0 \quad (649)$$

$$Q_{L^*311} + Q_{L^*81} + Q_{L^*241} + Q_{L^*331} + Q_{L^*341} + Q_{L^*191} + Q_{L^*201} + Q_{L^*91} + Q_{L^*101} + Q_{L^*111} + Q_{L^*211} + Q_{L^*181} + Q_{L^*291} + Q_{L^*281} + Q_{L^*121} + Q_{L^*351} + Q_{L^*161} + Q_{L^*151} + Q_{L^*141} + Q_{L^*171} + Q_{L^*H1} = 81,48 \quad (650)$$

$$Q_{L^*313} + Q_{L^*83} + Q_{L^*243} + Q_{L^*333} + Q_{L^*343} + Q_{L^*193} + Q_{L^*203} + Q_{L^*93} + Q_{L^*103} + Q_{L^*113} + Q_{L^*213} + Q_{L^*183} + Q_{L^*293} + Q_{L^*283} + Q_{L^*123} + Q_{L^*353} + Q_{L^*163} + Q_{L^*153} + Q_{L^*143} + Q_{L^*173} + Q_{L^*H3} = 82,37 \quad (651)$$

Intervalo M*

$$R_{18L^*} - R_{18M^*} - Q_{M^*181} - Q_{M^*183} = 0 \quad (652)$$

$$\begin{aligned}
 R_{31L^*} - R_{31M^*} - Q_{M^*311} - Q_{M^*313} &= -24,67 & (653) \\
 R_{19L^*} - R_{19M^*} - Q_{M^*191} - Q_{M^*193} &= 0 & (654) \\
 R_{20L^*} - R_{20M^*} - Q_{M^*201} - Q_{M^*203} &= 0 & (655) \\
 R_{9L^*} - R_{9M^*} - Q_{M^*91} - Q_{M^*93} &= 0 & (656) \\
 R_{24L^*} - R_{24M^*} - Q_{M^*241} - Q_{M^*243} &= -36,03 & (657) \\
 R_{30M^*} + Q_{M^*301} + Q_{M^*303} &= 9,23 & (658) \\
 R_{10L^*} - R_{10M^*} - Q_{M^*101} - Q_{M^*103} &= 0 & (659) \\
 R_{11L^*} - R_{11M^*} - Q_{M^*111} - Q_{M^*113} &= 0 & (660) \\
 R_{21L^*} - R_{21M^*} - Q_{M^*211} - Q_{M^*213} &= 0 & (661) \\
 R_{29L^*} - R_{29M^*} - Q_{M^*291} - Q_{M^*293} &= 0 & (662) \\
 R_{28L^*} - R_{28M^*} - Q_{M^*281} - Q_{M^*283} &= 0 & (663) \\
 R_{12L^*} - R_{12M^*} - Q_{M^*121} - Q_{M^*123} &= 0 & (664) \\
 R_{35L^*} - R_{35M^*} - Q_{M^*351} - Q_{M^*353} &= 0 & (665) \\
 R_{16L^*} - R_{16M^*} - Q_{M^*161} - Q_{L^*163} &= 0 & (666) \\
 R_{15L^*} - R_{15M^*} - Q_{M^*151} - Q_{M^*153} &= 0 & (667) \\
 R_{14L^*} - R_{14M^*} - Q_{M^*141} - Q_{M^*143} &= 0 & (668) \\
 R_{34L^*} - R_{34M^*} - Q_{M^*341} - Q_{M^*343} &= -49,40 & (669) \\
 R_{8L^*} - R_{8M^*} - Q_{M^*81} - Q_{M^*83} &= -274,34 & (670) \\
 R_{17L^*} - R_{17M^*} - Q_{M^*171} - Q_{M^*173} &= 0 & (671) \\
 R_{33L^*} - R_{33M^*} - Q_{M^*331} - Q_{M^*333} &= -38,09 & (672) \\
 R_{HL^*} - R_{HM^*} - Q_{M^*H1} - Q_{M^*H3} &= 0 & (673) \\
 Q_{M^*181} + Q_{M^*311} + Q_{M^*191} + Q_{M^*201} + Q_{M^*91} + Q_{M^*241} + Q_{M^*301} + Q_{M^*101} + Q_{M^*111} + Q_{M^*211} + Q_{M^*291} + Q_{M^*281} + Q_{M^*121} + \\
 Q_{M^*351} + Q_{M^*161} + Q_{M^*151} + Q_{M^*141} + Q_{M^*341} + Q_{M^*81} + Q_{M^*171} + Q_{M^*331} + Q_{M^*H1} &= 213,88 & (674) \\
 Q_{M^*183} + Q_{M^*313} + Q_{M^*193} + Q_{M^*203} + Q_{M^*93} + Q_{M^*243} + Q_{M^*303} + Q_{M^*103} + Q_{M^*113} + Q_{M^*213} + Q_{M^*293} + Q_{M^*283} + Q_{M^*123} + \\
 Q_{M^*353} + Q_{M^*163} + Q_{M^*153} + Q_{M^*143} + Q_{M^*343} + Q_{M^*83} + Q_{M^*173} + Q_{M^*333} + Q_{M^*H3} &= 216,21 & (675)
 \end{aligned}$$

Intervalo N*

$$\begin{aligned}
 R_{8M^*} - R_{8N^*} - Q_{N^*81} - Q_{N^*83} &= -130,64 & (676) \\
 R_{30M^*} - R_{30N^*} - Q_{N^*301} - Q_{N^*303} &= -4,39 & (677) \\
 R_{25N^*} + Q_{N^*251} + Q_{N^*253} &= 15,22 & (678) \\
 R_{32N^*} + Q_{N^*321} + Q_{N^*323} &= 12,07 & (679) \\
 R_{31M^*} - R_{31N^*} - Q_{N^*311} - Q_{N^*313} &= 0 & (680) \\
 R_{19M^*} - R_{19N^*} - Q_{N^*191} - Q_{N^*193} &= 0 & (681) \\
 R_{20M^*} - R_{20N^*} - Q_{N^*201} - Q_{N^*203} &= 0 & (682) \\
 R_{9M^*} - R_{9N^*} - Q_{N^*91} - Q_{N^*93} &= 0 & (683) \\
 R_{10M^*} - R_{10N^*} - Q_{N^*101} - Q_{N^*103} &= 0 & (684) \\
 R_{11M^*} - R_{11N^*} - Q_{N^*111} - Q_{N^*113} &= 0 & (685) \\
 R_{21M^*} - R_{21N^*} - Q_{N^*211} - Q_{N^*213} &= 0 & (686) \\
 R_{29M^*} - R_{29N^*} - Q_{N^*291} - Q_{N^*293} &= 0 & (687) \\
 R_{28M^*} - R_{28N^*} - Q_{N^*281} - Q_{N^*283} &= 0 & (688) \\
 R_{12M^*} - R_{12N^*} - Q_{N^*121} - Q_{N^*123} &= 0 & (689) \\
 R_{35M^*} - R_{35N^*} - Q_{N^*351} - Q_{N^*353} &= 0 & (690) \\
 R_{16M^*} - R_{16N^*} - Q_{N^*161} - Q_{N^*163} &= 0 & (691) \\
 R_{15M^*} - R_{15N^*} - Q_{N^*151} - Q_{N^*153} &= 0 & (692) \\
 R_{14M^*} - R_{14N^*} - Q_{N^*141} - Q_{N^*143} &= 0 & (693) \\
 R_{34M^*} - R_{34N^*} - Q_{N^*341} - Q_{N^*343} &= 0 & (694) \\
 R_{17M^*} - R_{17N^*} - Q_{N^*171} - Q_{N^*173} &= 0 & (695) \\
 R_{33M^*} - R_{33N^*} - Q_{N^*331} - Q_{N^*333} &= 0 & (696) \\
 R_{24M^*} - R_{24N^*} - Q_{N^*241} - Q_{N^*243} &= 0 & (697) \\
 R_{18M^*} - R_{18N^*} - Q_{N^*181} - Q_{N^*183} &= 0 & (698) \\
 R_{HM^*} - R_{HN^*} - Q_{N^*H1} - Q_{N^*H3} &= 0 & (699) \\
 Q_{N^*81} + Q_{N^*301} + Q_{N^*251} + Q_{N^*321} + Q_{N^*311} + Q_{N^*191} + Q_{N^*201} + Q_{N^*91} + Q_{N^*101} + Q_{N^*111} + Q_{N^*211} + Q_{N^*181} + Q_{N^*291} + Q_{N^*281} + \\
 Q_{N^*121} + Q_{N^*351} + Q_{N^*161} + Q_{N^*151} + Q_{N^*141} + Q_{N^*341} + Q_{N^*171} + Q_{N^*331} + Q_{N^*241} + Q_{N^*H1} &= 101,85 & (700) \\
 Q_{N^*83} + Q_{N^*303} + Q_{N^*253} + Q_{N^*323} + Q_{N^*313} + Q_{N^*193} + Q_{N^*203} + Q_{N^*93} + Q_{N^*103} + Q_{N^*113} + Q_{N^*213} + Q_{N^*183} + Q_{N^*293} + Q_{N^*283} + \\
 Q_{N^*123} + Q_{N^*353} + Q_{N^*163} + Q_{N^*153} + Q_{N^*143} + Q_{N^*343} + Q_{N^*173} + Q_{N^*333} + Q_{N^*243} + Q_{N^*H3} &= 102,96 & (701)
 \end{aligned}$$

Intervalo N̄*

$$\begin{aligned}
 R_{8N^*} - R_{8\bar{N}^*} - Q_{\bar{N}^*81} - Q_{\bar{N}^*83} &= -483,37 & (702) \\
 R_{30N^*} - R_{30\bar{N}^*} - Q_{\bar{N}^*301} - Q_{\bar{N}^*303} &= -16,26 & (703) \\
 R_{32N^*} - R_{32\bar{N}^*} - Q_{\bar{N}^*321} - Q_{\bar{N}^*323} &= -44,64 & (704) \\
 R_{31N^*} - R_{31\bar{N}^*} - Q_{\bar{N}^*311} - Q_{\bar{N}^*313} &= 0 & (705) \\
 R_{19N^*} - R_{19\bar{N}^*} - Q_{\bar{N}^*191} - Q_{\bar{N}^*193} &= 0 & (706) \\
 R_{25N^*} - R_{25\bar{N}^*} - Q_{\bar{N}^*251} - Q_{\bar{N}^*253} &= 0 & (707) \\
 R_{20N^*} - R_{20\bar{N}^*} - Q_{\bar{N}^*201} - Q_{\bar{N}^*203} &= 0 & (708) \\
 R_{9N^*} - R_{9\bar{N}^*} - Q_{\bar{N}^*91} - Q_{\bar{N}^*93} &= 0 & (709) \\
 R_{10N^*} - R_{10\bar{N}^*} - Q_{\bar{N}^*101} - Q_{\bar{N}^*103} &= 0 & (710) \\
 R_{11N^*} - R_{11\bar{N}^*} - Q_{\bar{N}^*111} - Q_{\bar{N}^*113} &= 0 & (711) \\
 R_{21N^*} - R_{21\bar{N}^*} - Q_{\bar{N}^*211} - Q_{\bar{N}^*213} &= 0 & (712) \\
 R_{29N^*} - R_{29\bar{N}^*} - Q_{\bar{N}^*291} - Q_{\bar{N}^*293} &= 0 & (713) \\
 R_{28N^*} - R_{28\bar{N}^*} - Q_{\bar{N}^*281} - Q_{\bar{N}^*283} &= 0 & (714) \\
 R_{12N^*} - R_{12\bar{N}^*} - Q_{\bar{N}^*121} - Q_{\bar{N}^*123} &= 0 & (715)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_{35N^*} - R_{35\tilde{N}^*} - Q_{\tilde{N}^*351} - Q_{N^*353} &= 0 & (716) \\
 R_{16N^*} - R_{16\tilde{N}^*} - Q_{\tilde{N}^*161} - Q_{N^*163} &= 0 & (717) \\
 R_{15N^*} - R_{15\tilde{N}^*} - Q_{\tilde{N}^*151} - Q_{N^*153} &= 0 & (718) \\
 R_{14N^*} - R_{14\tilde{N}^*} - Q_{\tilde{N}^*141} - Q_{N^*143} &= 0 & (719) \\
 R_{34N^*} - R_{34\tilde{N}^*} - Q_{\tilde{N}^*341} - Q_{N^*343} &= 0 & (720) \\
 R_{17N^*} - R_{17\tilde{N}^*} - Q_{\tilde{N}^*171} - Q_{N^*173} &= 0 & (721) \\
 R_{33N^*} - R_{33\tilde{N}^*} - Q_{\tilde{N}^*331} - Q_{N^*333} &= 0 & (722) \\
 R_{24N^*} - R_{24\tilde{N}^*} - Q_{\tilde{N}^*241} - Q_{N^*243} &= 0 & (723) \\
 R_{18N^*} - R_{18\tilde{N}^*} - Q_{\tilde{N}^*181} - Q_{N^*183} &= 0 & (724) \\
 R_{HN^*} - R_{H\tilde{N}^*} - Q_{\tilde{N}^*H1} - Q_{N^*H3} &= 0 & (725) \\
 Q_{N^*81} + Q_{N^*301} + Q_{N^*321} + Q_{N^*311} + Q_{N^*191} + Q_{N^*251} + Q_{N^*201} + Q_{N^*91} + Q_{N^*101} + Q_{N^*111} + Q_{N^*211} + Q_{N^*291} + Q_{N^*181} + Q_{N^*281} + \\
 Q_{N^*121} + Q_{N^*351} + Q_{N^*161} + Q_{N^*151} + Q_{N^*141} + Q_{N^*341} + Q_{N^*171} + Q_{N^*331} + Q_{N^*241} + Q_{N^*H1} &= 376,83 & (726) \\
 Q_{N^*83} + Q_{N^*303} + Q_{N^*323} + Q_{N^*313} + Q_{N^*193} + Q_{N^*253} + Q_{N^*203} + Q_{N^*93} + Q_{N^*103} + Q_{N^*113} + Q_{N^*213} + Q_{N^*293} + Q_{N^*183} + Q_{N^*283} + \\
 Q_{N^*123} + Q_{N^*353} + Q_{N^*163} + Q_{N^*153} + Q_{N^*143} + Q_{N^*343} + Q_{N^*173} + Q_{N^*333} + Q_{N^*243} + Q_{N^*H3} &= 380,94 & (727)
 \end{aligned}$$

Intervalo O*

$$\begin{aligned}
 R_{8\tilde{N}^*} - R_{80^*} &= -1345,59 & (728) \\
 R_{30\tilde{N}^*} - R_{300^*} &= -45,27 & (729) \\
 R_{32\tilde{N}^*} - R_{320^*} &= -124,27 & (730) \\
 R_{31\tilde{N}^*} - R_{310^*} &= 0 & (731) \\
 R_{19\tilde{N}^*} - R_{190^*} &= 0 & (732) \\
 R_{25\tilde{N}^*} - R_{250^*} &= 0 & (733) \\
 R_{20\tilde{N}^*} - R_{200^*} &= 0 & (734) \\
 R_{9\tilde{N}^*} - R_{90^*} &= 0 & (735) \\
 R_{10\tilde{N}^*} - R_{100^*} &= 0 & (736) \\
 R_{11\tilde{N}^*} - R_{110^*} &= 0 & (737) \\
 R_{21\tilde{N}^*} - R_{210^*} &= 0 & (738) \\
 R_{17\tilde{N}^*} - R_{170^*} &= 0 & (739) \\
 R_{29\tilde{N}^*} - R_{290^*} &= 0 & (740) \\
 R_{28\tilde{N}^*} - R_{280^*} &= 0 & (741) \\
 R_{12\tilde{N}^*} - R_{120^*} &= 0 & (742) \\
 R_{35\tilde{N}^*} - R_{350^*} &= 0 & (743) \\
 R_{16\tilde{N}^*} - R_{160^*} &= 0 & (744) \\
 R_{15\tilde{N}^*} - R_{150^*} &= 0 & (745) \\
 R_{14\tilde{N}^*} - R_{140^*} &= 0 & (746) \\
 R_{34\tilde{N}^*} - R_{340^*} &= 0 & (747) \\
 R_{33\tilde{N}^*} - R_{330^*} &= 0 & (748) \\
 R_{24\tilde{N}^*} - R_{240^*} &= 0 & (749) \\
 R_{18\tilde{N}^*} - R_{180^*} &= 0 & (750) \\
 R_{H\tilde{N}^*} - R_{HO^*} &= 0 & (751)
 \end{aligned}$$

Intervalo P*

$$\begin{aligned}
 R_{80^*} - R_{8P^*} &= -300,47 & (752) \\
 R_{310^*} - R_{31P^*} &= 0 & (753) \\
 R_{190^*} - R_{19P^*} &= 0 & (754) \\
 R_{250^*} - R_{25P^*} &= 0 & (755) \\
 R_{200^*} - R_{20P^*} &= 0 & (756) \\
 R_{90^*} - R_{9P^*} &= 0 & (757) \\
 R_{100^*} - R_{10P^*} &= 0 & (758) \\
 R_{110^*} - R_{11P^*} &= 0 & (759) \\
 R_{210^*} - R_{21P^*} &= 0 & (760) \\
 R_{320^*} - R_{32P^*} &= 0 & (761) \\
 R_{290^*} - R_{29P^*} &= 0 & (762) \\
 R_{280^*} - R_{28P^*} &= 0 & (763) \\
 R_{120^*} - R_{12P^*} &= 0 & (764) \\
 R_{350^*} - R_{35P^*} &= 0 & (765) \\
 R_{160^*} - R_{16P^*} &= 0 & (766) \\
 R_{150^*} - R_{15P^*} &= 0 & (767) \\
 R_{140^*} - R_{14P^*} &= 0 & (768) \\
 R_{340^*} - R_{34P^*} &= 0 & (769) \\
 R_{300^*} - R_{30P^*} &= 0 & (770) \\
 R_{170^*} - R_{17P^*} &= 0 & (771) \\
 R_{330^*} - R_{33P^*} &= 0 & (772) \\
 R_{240^*} - R_{24P^*} &= 0 & (773) \\
 R_{180^*} - R_{18P^*} &= 0 & (774) \\
 R_{HO^*} - R_{HP^*} &= 0 & (775)
 \end{aligned}$$

Intervalo Q*

$$\begin{aligned}
 R_{8P^*} - R_{8Q^*} &= -1005,93 & (776) \\
 R_{22Q^*} &= 1523,82 & (777) \\
 R_{31P^*} - R_{31Q^*} &= 0 & (778) \\
 R_{19P^*} - R_{19Q^*} &= 0 & (779)
 \end{aligned}$$

$R_{25P^*} - R_{25Q^*} = 0$	(780)
$R_{20P^*} - R_{20Q^*} = 0$	(781)
$R_{9P^*} - R_{9Q^*} = 0$	(782)
$R_{10P^*} - R_{10Q^*} = 0$	(783)
$R_{11P^*} - R_{11Q^*} = 0$	(784)
$R_{21P^*} - R_{21Q^*} = 0$	(785)
$R_{32P^*} - R_{32Q^*} = 0$	(786)
$R_{29P^*} - R_{29Q^*} = 0$	(787)
$R_{28P^*} - R_{28Q^*} = 0$	(788)
$R_{12P^*} - R_{12Q^*} = 0$	(789)
$R_{35P^*} - R_{35Q^*} = 0$	(790)
$R_{16P^*} - R_{16Q^*} = 0$	(791)
$R_{15P^*} - R_{15Q^*} = 0$	(792)
$R_{14P^*} - R_{14Q^*} = 0$	(793)
$R_{34P^*} - R_{34Q^*} = 0$	(794)
$R_{30P^*} - R_{30Q^*} = 0$	(795)
$R_{17P^*} - R_{17Q^*} = 0$	(796)
$R_{33P^*} - R_{33Q^*} = 0$	(797)
$R_{24P^*} - R_{24Q^*} = 0$	(798)
$R_{18P^*} - R_{18Q^*} = 0$	(799)
$R_{HP^*} - R_{HQ^*} = 0$	(800)
Intervalo R*	
$R_{8Q^*} - R_{8R^*} = -10202,99$	(801)
$R_{22Q^*} - R_{22R^*} = 0$	(802)
$R_{31Q^*} - R_{31R^*} = 0$	(803)
$R_{18Q^*} - R_{18R^*} = 0$	(804)
$R_{19Q^*} - R_{19R^*} = 0$	(805)
$R_{25Q^*} - R_{25R^*} = 0$	(806)
$R_{20Q^*} - R_{20R^*} = 0$	(807)
$R_{9Q^*} - R_{9R^*} = 0$	(808)
$R_{10Q^*} - R_{10R^*} = 0$	(809)
$R_{11Q^*} - R_{11R^*} = 0$	(810)
$R_{21Q^*} - R_{21R^*} = 0$	(811)
$R_{32Q^*} - R_{32R^*} = 0$	(812)
$R_{29Q^*} - R_{29R^*} = 0$	(813)
$R_{28Q^*} - R_{28R^*} = 0$	(814)
$R_{12Q^*} - R_{12R^*} = 0$	(815)
$R_{35Q^*} - R_{35R^*} = 0$	(816)
$R_{16Q^*} - R_{16R^*} = 0$	(817)
$R_{15Q^*} - R_{15R^*} = 0$	(818)
$R_{14Q^*} - R_{14R^*} = 0$	(819)
$R_{34Q^*} - R_{34R^*} = 0$	(820)
$R_{17Q^*} - R_{17R^*} = 0$	(821)
$R_{33Q^*} - R_{33R^*} = 0$	(822)
$R_{24Q^*} - R_{24R^*} = 0$	(823)
$R_{30Q^*} - R_{30R^*} = 0$	(824)
$R_{HQ^*} - R_{HR^*} = 0$	(825)
$Q_W - R_{8R^*} - R_{22R^*} - R_{31R^*} - R_{18R^*} - R_{19R^*} - R_{25R^*} - R_{20R^*} - R_{9R^*} - R_{10R^*} - R_{11R^*} - R_{21R^*} - R_{32R^*} - R_{29R^*} - R_{28R^*} - R_{12R^*} - R_{35R^*} - R_{16R^*} - R_{15R^*} - R_{14R^*} - R_{34R^*} - R_{17R^*} - R_{33R^*} - R_{24R^*} - R_{30R^*} - R_{HR^*} = 0$	(826)

Anexo 15 – Resultados de la optimización del modelo de transporte ampliado

QH	17881	QG126	275	QJ166	152	R35L	109	QN106	42	R12Ñ	2098
QAH23	9505	R15G	1290	R16J	4693	QL156	2	QN1013	70	QÑ125	64
RHA	8375	QG156	68	QJ146	152	R15L	1970	R11N	2302	QÑ127	64
QBH23	7529	QGH6	0	R14J	4693	QL146	1	QN116	37	QÑ1213	106
RHB	846	RHG	0	QJ356	10	R14L	4626	QN1113	59	R21Ñ	132
QB1623	3365	QH166	1584	R35J	78	QLH6	0	R29N	349	QÑ215	17
R16B	97	R16H	4802	QJ156	65	RHL	0	QN296	8	QÑ217	17
QB1423	3365	QH146	1584	R15J	1947	QL346	1	QN2913	8	QÑ2113	19
R14B	97	R14H	4802	R10J	720	R34L	2	R28N	523	R29Ñ	385
QCH23	846	QH286	5	QJ106	145	R10M	1172	QN286	5	QÑ295	9
RHC	0	R28H	560	R11K	1702	QM106	1093	QN2813	5	QÑ297	9
QC1623	659	QH126	401	QK116	72	QM1013	1574	R12N	2174	QÑ2913	9
R16C	0	R12H	1690	R10K	1080	R11M	2275	QN126	36	R34Ñ	441
QC1423	659	QH156	74	QK106	78	QM116	229	QN1213	56	QÑ345	24

R14C	0	R15H	1881	R28K	546	QM1113	375	R35N	338	QÑ347	24
R15C	0	QH116	531	QK286	5	R12M	2184	QN356	12	QÑ3413	28
QC1523	148	R11H	1344	R12K	1866	QM126	196	QN3513	13	R35Ñ	347
R16D	2403	QHH6	0	QK126	69	QM1213	275	R15N	2138	QÑ355	14
R14D	2403	RHH	0	R16K	4627	R15M	2205	QN156	28	QÑ357	14
R15D	632	QI166	20	QK166	66	QM156	106	QN1513	39	QÑ3513	15
RHD	0	R16I	4845	R35K	109	QM1513	74	R16N	3268	R28Ñ	507
R16E	3154	QI146	20	QK356	10	R29M	333	QN166	39	QÑ285	5
R14E	3154	R14I	4845	R15K	1969	QM296	9	QN1613	64	QÑ287	5
R12E	374	QI126	20	QK156	45	QM2913	9	R14N	3268	QÑ2813	5
R15E	829	R12I	1701	R29K	43	R34M	415	QN146	39	R16Ñ	2996
RHE	0	QI156	17	QK296	6	QM346	28	QN1413	64	QÑ165	73
QFH6	0	R15I	1881	R14K	4627	QM3413	29	R34N	424	QÑ167	73
RHF	0	QI116	20	QK146	66	R35M	336	QN346	18	QÑ1613	126
QF126	309	R11I	1371	RHK	0	QM356	14	QN3413	22	R15Ñ	2000
R12F	781	R35I	7	QKH6	0	QM3513	15	RHN	0	QÑ155	42
QF166	1023	QI356	3	QL106	1	R28M	534	QNH6	0	QÑ157	42
R16F	3569	QI286	4	R10L	1093	QM286	5	QNH13	0	QÑ1513	55
QF146	1023	R28I	556	QL116	2	QM2813	5	R21N	48	R14Ñ	2996
R14F	3569	QIH6	0	R11L	1706	R16M	3371	QN216	11	QÑ145	73
QF156	22	RHI	0	QL296	1	QM166	466	QN2113	12	QÑ147	73
R15F	1186	QJH6	0	R29L	44	QM1613	788	R10Ñ	1547	QÑ1413	126
R16G	3857	RHJ	0	QL286	1	R14M	3371	QÑ105	85	RHÑ	0
QG166	368	QJ116	153	R28L	544	QM146	466	QÑ107	85	QÑH5	0
R14G	3857	R11J	1587	QL126	2	QM1413	788	QÑ1013	180	QÑH7	0
QG146	368	QJ286	5	R12L	1868	RHM	0	R11Ñ	2284	QÑH13	0
R28G	112	R28J	551	QL166	1	QMH6	0	QÑ115	67	R10O	1680
QG286	5	QJ126	141	R16L	4626	QMH13	0	QÑ117	67	QO105	35
R12G	832	R12J	1809	QL356	1	R10N	1348	QÑ1113	119	QO107	35
QO1013	68	QO155	23	QP2927	6	R10Q	1661	QQ92	1	QR105	149
QO1027	4	QO157	23	R34P	430	QQ102	2	QQ95	1	QR107	149
R11O	2285	QO1513	35	QP342	29	QQ105	2	QQ97	1	QR1013	373
QO115	30	QO1527	4	QP345	30	QQ107	2	QQ913	2	QR1027	12
QO117	30	R14O	2871	QP347	30	QQ1013	4	QQ927	0	R12R	1746
QO1113	53	QO145	32	QP3413	32	QQ1027	0	R28Q	458	QR122	79
QO1127	4	QO147	32	QP3427	10	R11Q	2188	QQ282	2	QR125	84
R12O	2063	QO1413	59	R35P	339	QQ112	2	QQ285	2	QR127	84
QO125	29	QO1427	3	QP352	15	QQ115	2	QQ287	2	QR1213	127
QO127	29	RHO	0	QP355	15	QQ117	2	QQ2813	2	QR1227	11
QO1213	51	QOH5	0	QP357	15	QQ1113	4	QQ2827	0	R21R	301
QO1227	4	QOH7	0	QP3513	15	QQ1127	0	R16Q	2365	QR212	31
R21O	149	QOH13	0	QP3527	7	R21Q	229	QQ162	2	QR215	31
QO215	15	QOH27	0	R28P	466	QQ212	2	QQ165	2	QR217	31

QO217	15	R10P	1644	QP282	5	QQ215	2	QQ167	2	QR2113	35
QO2113	18	QP102	139	QP285	5	QQ217	2	QQ1613	3	QR2127	9
QO2127	4	QP105	151	QP287	5	QQ2113	4	QQ1627	0	R29R	480
R29O	389	QP107	151	QP2813	5	QQ2127	0	R15Q	1694	QR292	9
QO295	8	QP1013	365	QP2827	4	R29Q	428	QQ152	2	QR295	9
QO297	8	QP1027	13	R16P	2374	QQ292	2	QQ155	2	QR297	9
QO2913	9	R11P	2187	QP162	101	QQ295	2	QQ157	2	QR2913	9
QO2927	3	QP112	89	QP165	106	QQ297	2	QQ1513	4	QR2927	5
R34O	426	QP115	94	QP167	106	QQ2913	3	QQ1527	0	R34R	424
QO345	18	QP117	94	QP1613	172	QQ2927	0	R14Q	2365	QR342	32
QO347	18	QP1113	142	QP1627	12	R12Q	1891	QQ142	2	QR345	33
QO3413	23	QP1127	12	R15P	1704	QQ122	2	QQ145	2	QR347	33
QO3427	4	R21P	233	QP152	47	QQ125	2	QQ147	2	QR3413	37
R35O	334	QP212	25	QP155	48	QQ127	2	QQ1413	3	QR3427	9
QO355	11	QP215	25	QP157	48	QQ1213	4	QQ1427	0	R35R	340
QO357	11	QP217	25	QP1513	56	QQ1227	0	RHQ	0	QR352	15
QO3513	13	QP2113	27	QP1527	11	R35Q	332	QQH2	0	QR355	16
QO3527	3	QP2127	9	R14P	2374	QQ352	2	QQH5	0	QR357	16
R28O	490	R12P	1894	QP142	101	QQ355	2	QQH7	0	QR3513	17
QO285	5	QP122	83	QP145	106	QQ357	2	QQH13	0	QR3527	7
QO287	5	QP125	87	QP147	106	QQ3513	3	QQH27	0	R11R	1781
QO2813	5	QP127	87	QP1413	172	QQ3527	0	R9R	184	QR112	83
QO2827	2	QP1213	125	QP1427	12	R34Q	424	QR92	28	QR115	88
R16O	2871	QP1227	12	RHP	0	QQ342	2	QR95	28	QR117	88
QO165	32	R29P	434	QPH2	0	QQ345	2	QR97	28	QR1113	138
QO167	32	QP292	9	QPH5	0	QQ347	2	QR913	31	QR1127	11
QO1613	59	QP295	9	QPH7	0	QQ3413	4	QR927	9	R28R	434
QO1627	3	QP297	9	QPH13	0	QQ3427	0	R10R	1679	QR282	5
R15O	1914	QP2913	9	QPH27	0	R9Q	4	QR102	137	QR285	5
QR287	5	QS105	15	QS347	11	QSH13	0	QT3427	1	R15T	1383
QQ2813	5	QS107	15	QS3413	16	QSH27	0	R35T	289	QT152	7
QR2827	4	QS1013	29	QS3427	2	R9T	175	QT352	6	QT154	7
R20R	183	QS1027	2	R28S	412	QT92	7	QT354	6	QT155	8
QR202	29	R12S	1715	QS282	4	QT94	7	QT535	6	QT157	8
QR205	30	QS122	13	QS284	4	QT95	7	QT357	6	QT1513	12
QR207	30	QS124	13	QS285	4	QT97	7	QT3513	9	QT1527	1
QR2013	33	QS125	14	QS287	4	QT913	12	QT3527	1	R14T	1758
QR2027	9	QS127	14	QS2813	5	QT927	1	R19T	11	QT142	7
R16R	1883	QS1213	24	QS2827	1	R10T	1813	QT192	3	QT144	7
QR162	97	QS1227	2	R11S	1703	QT102	8	QT194	3	QT145	8
QR165	103	R20S	182	QS112	13	QT104	8	QT195	3	QT147	8
QR167	103	QS202	11	QS114	13	QT105	9	QT197	3	QT1413	15
QR1613	169	QS204	11	QS115	14	QT107	9	QT1913	4	QT1427	1

QR1627	11	QS205	11	QS117	14	QT1013	16	QT1927	1	RHT	0
R15R	1491	QS207	11	QS1113	24	QT1027	1	R11T	1654	QTH2	0
QR152	45	QS2013	17	QS1127	2	R20T	180	QT112	8	QTH4	0
QR155	46	QS2027	2	R16S	1803	QT202	7	QT114	8	QTH5	0
QR157	46	R21S	282	QS162	13	QT204	7	QT115	8	QTH7	0
QR1513	56	QS212	10	QS164	13	QT205	8	QT117	8	QTH13	0
QR1527	9	QS214	10	QS165	14	QT207	8	QT1113	15	QTH27	0
R14R	1883	QS215	11	QS167	14	QT2013	12	QT1127	1	R19U	16
QR142	97	QS217	11	QS1613	26	QT2027	1	R28T	394	QU192	4
QR145	103	QS2113	17	QS1627	1	R21T	268	QT282	3	QU194	4
QR147	103	QS2127	2	R15S	1426	QT212	7	QT284	3	QU195	4
QR1413	169	R29S	466	QS152	11	QT214	7	QT285	3	QU197	4
QR1427	11	QS292	6	QS154	11	QT215	7	QT287	3	QU1913	5
RHR	0	QS294	6	QS155	11	QT217	7	QT2813	4	QU1927	1
QRH2	0	QS295	6	QS157	11	QT2113	12	QT2827	1	R20U	182
QRH5	0	QS297	6	QS1513	19	QT2127	1	R12T	1666	QU202	7
QRH7	0	QS2913	7	QS1527	2	R29T	453	QT122	8	QU204	7
QRH13	0	QS2927	2	R14S	1803	QT292	5	QT124	8	QU205	7
QRH27	0	R35S	312	QS142	13	QT294	5	QT125	8	QU207	7
R9S	177	QS352	8	QS144	13	QT295	5	QT127	8	QU2013	12
QS92	10	QS354	8	QS145	14	QT297	5	QT1213	15	QU2027	1
QS94	10	QS355	8	QS147	14	QT2913	6	QT1227	1	R9U	176
QS95	11	QS357	8	QS1413	26	QT2927	1	R16T	1758	QU92	7
QS97	11	QS3513	11	QS1427	1	R34T	370	QT162	7	QU94	7
QS913	17	QS3527	2	RHS	0	QT342	7	QT164	7	QU95	7
QS927	2	R34S	392	QSH2	0	QT344	7	QT165	8	QU97	7
R10S	1755	QS342	10	QSH4	0	QT345	7	QT167	8	QU913	11
QS102	14	QS344	10	QSH5	0	QT347	7	QT1613	15	QU927	1
QS104	14	QS345	11	QSH7	0	QT3413	12	QT1627	1	R10U	1878
QU102	7	QU354	5	QU85	7	QV217	22	QV1713	68	QW92	50
QU104	7	QU355	6	QU87	7	QV2113	33	QV1727	4	QW94	50
QU105	8	QU357	6	QU813	12	QV2127	4	R15V	1232	QW913	77
QU107	8	QU3513	8	QU827	1	R29V	444	QV152	19	QW927	8
QU1013	14	QU3527	1	R19V	55	QV292	8	QV154	19	R17W	523
QU1027	1	R16U	1719	QV192	11	QV294	8	QV155	20	QW172	98
R11U	1611	QU162	6	QV194	11	QV295	8	QV157	20	QW174	98
QU112	7	QU164	6	QV195	12	QV297	8	QV1513	29	QW1713	232
QU114	7	QU165	7	QV197	12	QV2913	9	QV1527	4	QW1727	9
QU115	8	QU167	7	QV1913	14	QV2927	3	R14V	1563	R19W	196
QU117	8	QU1613	13	QV1927	3	R28V	349	QV142	26	QW192	20
QU1113	13	QU1627	1	R20V	198	QV282	5	QV144	26	QW194	20
QU1127	1	R15U	1344	QV202	23	QV284	5	QV145	28	QW1913	23
R21U	257	QU152	7	QV204	23	QV285	5	QV147	28	QW1927	6

QU212	6	QU154	7	QV205	24	QV287	5	QV1413	46	R20W	322
QU214	6	QU155	7	QV207	24	QV2813	5	QV1427	3	QW202	51
QU215	7	QU157	7	QV2013	40	QV2827	2	R34V	308	QW204	51
QU217	7	QU1513	11	QV2027	4	R12V	1479	QV342	20	QW2013	79
QU2113	11	QU1527	1	R9V	190	QV122	24	QV344	20	QW2027	8
QU2127	1	R14U	1719	QV92	23	QV124	24	QV345	20	R21W	300
R29U	441	QU142	6	QV94	23	QV125	26	QV347	20	QW212	41
QU292	4	QU144	6	QV95	24	QV127	26	QV3413	30	QW214	41
QU294	4	QU145	7	QV97	24	QV1213	40	QV3427	4	QW2113	57
QU295	4	QU147	7	QV913	38	QV1227	4	R8V	226	QW2127	8
QU297	4	QU1413	13	QV927	4	R35V	236	QV82	34	R29W	505
QU2913	6	QU1427	1	R10V	1703	QV352	13	QV84	34	QW292	9
QU2927	1	R34U	351	QV102	29	QV354	13	QV85	37	QW294	9
R28U	376	QU342	6	QV104	29	QV355	13	QV87	37	QW2913	10
QT282	3	QU344	6	QV105	31	QV357	13	QV813	83	QW2927	5
QT284	3	QU345	7	QV107	31	QV3513	16	QV827	4	R34W	333
QT285	3	QU347	7	QV1013	52	QV3527	3	RHV	0	QW342	34
QT287	3	QU3413	11	QV1027	4	R16V	1563	QVH2	0	QW344	34
QT2813	4	QU3427	1	R11V	1467	QV162	26	QVH4	0	QW3413	44
QT2827	1	RHU	0	QV112	24	QV164	26	QVH5	0	QW3427	7
R12U	1623	QUH2	0	QV114	24	QV165	28	QVH7	0	R35W	252
QU122	7	QUH4	0	QV115	26	QV167	28	QVH13	0	QW352	18
QU124	7	QUH5	0	QV117	26	QV1613	46	QVH27	0	QW354	18
QU125	8	QUH7	0	QV1113	41	QV1627	3	R8W	465	QW3513	20
QU127	8	QUH13	0	QV1127	4	R17V	182	QW82	110	QW3527	6
QU1213	13	QUH27	0	R21V	237	QV172	31	QW84	109	R10W	1539
QU1227	1	R8U	62	QV212	21	QV174	31	QW813	330	QW102	51
R35U	269	QU82	7	QV214	21	QV175	34	QW827	9	QW104	51
QU352	5	QU84	7	QV215	22	QV177	34	R9W	310	QW1013	54
QW1027	8	QX94	18	R29X	481	QY1913	2	QY122	14	QYH27	0
R11W	1328	QX913	33	QX292	7	QY1927	16	QY124	14	R33Y	24
QW112	40	QX927	3	QX294	7	R20Y	401	QY1213	2	QY332	3
QW114	40	R20X	364	QX2913	8	QY202	15	QY1227	23	QY334	3
QW1113	51	QX202	18	QX2927	2	QY204	15	R35Y	227	QY3313	1
QW1127	8	QX204	18	R28X	313	QY2013	2	QY352	10	QY3327	3
R28W	329	QX2013	33	QX282	5	QY2027	29	QY354	10	R19Z	820
QW282	5	QX2027	3	QX284	5	R9Y	382	QY3513	2	QZ192	33
QW284	5	R21X	309	QX2813	5	QY92	15	QY3527	15	QZ194	33
QW2813	6	QX212	17	QX2827	2	QY94	15	R16Y	1280	QZ1913	34
QW2827	4	QX214	17	R12X	1278	QY913	2	QY162	14	QZ1926	15
R12W	1340	QX2113	30	QX122	16	QY927	29	QY164	14	R20Z	654
QW122	40	QX2127	3	QX124	16	R10Y	1410	QY1613	2	QZ202	232
QW124	40	R35X	240	QX1213	27	QY102	15	QY1627	24	QZ204	232

QW1213	50	QX352	11	QX1227	3	QY104	15	R15Y	1034	QZ2013	281
QW1227	8	QX354	11	R16X	1333	QY1013	2	QY152	12	QZ2026	26
R16W	1398	QX3513	16	QX162	17	QY1027	26	QY154	12	R9Z	554
QW162	46	QX3527	3	QX164	17	R11Y	1214	QY1513	2	QZ92	247
QW164	46	R34X	325	QX1613	29	QY112	14	QY1527	19	QZ94	247
QW1613	66	QX342	16	QX1627	2	QY114	14	R14Y	1280	QZ913	300
QW1627	8	QX344	15	R15X	1078	QY1113	2	QY142	14	QZ926	26
R15W	1130	QX3413	26	QX152	14	QY1127	23	QY144	14	R10Z	1232
QW512	29	QX3427	3	QX154	14	R21Y	316	QY1413	2	QZ102	52
QW154	29	R8X	655	QX1513	21	QY212	15	QY1427	24	QZ104	52
QW1513	37	QX82	22	QX1527	3	QY214	15	R34Y	317	QZ1013	52
QW1527	7	QX84	22	R14X	1333	QY2113	2	QY342	14	QZ1026	23
R14W	1398	QX813	50	QX142	17	QY2127	27	QY344	14	R11Z	1041
QW142	46	QX827	2	QX144	17	R29Y	458	QY3413	2	QZ112	50
QW144	46	R17X	714	QX1413	29	QY292	6	QY3427	24	QZ114	50
QW1413	66	QX172	21	QX1427	2	QY294	6	R8Y	828	QZ1113	54
QW1427	8	QX174	21	RHX	0	QY2913	2	QY82	18	QZ1126	20
RHW	0	QX1713	45	QXH2	0	QY2927	8	QY84	17	R21Z	519
QWH2	0	QX1727	3	QXH4	0	R17Y	886	QY813	2	QZ212	148
QWH4	0	R10X	1468	QXH13	0	QY172	17	QY827	38	QZ214	148
QWH13	0	QX102	18	QXH27	0	QY174	17	R31Y	15	QZ2113	157
QWH27	0	QX104	18	R31X	12	QY1713	2	QY312	5	QZ2126	25
R19X	229	QX1013	32	QX312	4	QY1727	35	QY314	5	R29Z	422
QX192	12	QX1027	2	QX314	4	R28Y	297	QY3113	2	QZ292	10
QX194	12	R11X	1266	QX1313	4	QY282	4	QY3127	6	QZ294	10
QX1913	17	QX112	16	QX3127	2	QY284	4	RHY	0	QZ2913	8
QX1927	2	QX114	16	R19Y	255	QY2813	2	QYH2	0	QZ2926	8
R9X	349	QX1113	27	QY192	10	QY2827	5	QYH4	0	R17Z	1578
QX92	18	QX1127	3	QY194	10	R12Y	1225	QYH13	0	QZ172	441
QZ174	440	R31Z	186	QA*3113	1	QA*122	1	QB*926	6	QB*154	25
QZ1713	941	QZ312	17	QA*3126	0	QA*124	1	R10B*	1105	QB*1513	31
QZ1726	28	QZ314	17	R33A*	9	QA*1213	1	QB*102	36	QB*1526	6
R28Z	276	QZ3113	17	QA*332	1	QA*1226	0	QB*104	36	R14B*	930
QZ282	6	QZ3126	11	QA*334	1	R16A*	1047	QB*1013	46	QB*142	33
QZ284	6	R33Z	10	QA*3313	1	QA*162	0	QB*1026	6	QB*144	33
QZ2813	5	QZ332	4	QA*3326	0	QA*164	0	R11B*	932	QB*1413	45
QZ2826	5	QZ334	4	R34A*	511	QA*1613	1	QB*112	31	QB*1426	6
R12Z	1049	QZ3313	4	QA*342	1	QA*1626	0	QB*114	31	R34B*	492
QZ122	51	QZ3326	3	QA*344	1	R15A*	901	QB*1113	38	QB*342	44
QZ124	51	RHZ	303	QA*3413	1	QA*152	1	QB*1126	6	QB*344	44
QZ1213	55	QZH2	14	QA*3426	0	QA*154	1	R21B*	511	QB*3413	65
QZ1226	20	QZH4	14	R35A*	384	QA*1513	1	QB*212	57	QB*3426	6
R35Z	385	QZH13	25	QA*352	1	QA*1526	0	QB*214	56	R8B*	627

QZ352	28	QZH26	4	QA*354	1	R14A*	1047	QB*2113	94	QB*82	109
QZ354	28	R9A*	557	QA*3513	1	QA*142	0	QB*2126	6	QB*84	109
QZ3513	25	QA*92	1	QA*3526	0	QA*144	0	R29B*	387	QB*813	353
QZ3526	15	QA*94	1	R19A*	818	QA*1413	1	QB*292	9	QB*826	7
R16Z	1049	QA*913	1	QA*192	1	QA*1426	0	QB*294	9	R17B*	1376
QZ162	65	QA*926	0	QA*194	1	RHA*	300	QB*2913	10	QB*172	57
QZ164	65	R8A*	421	QA*1913	1	QA*H2	1	QB*2926	4	QB*174	56
QZ1613	79	QA*82	1	QA*1926	0	QA*H4	1	R28B*	254	QB*1713	93
QZ1626	21	QA*84	1	R10A*	1230	QA*H13	1	QB*282	6	QB*1726	6
R15Z	904	QA*813	1	QA*102	1	QA*H26	0	QB*284	6	R33B*	68
QZ152	38	QA*826	0	QA*104	1	R31B*	201	QB*2813	6	QB*332	15
QZ154	38	R17A*	1589	QA*1013	1	QB*312	16	QB*2826	3	QB*334	15
QZ1513	37	QA*172	1	QA*1026	0	QB*314	16	R12B*	941	QB*3313	16
QZ1526	17	QA*174	1	R11A*	1038	QB*3113	18	QB*122	31	QB*3326	5
R14Z	1049	QA*1713	1	QA*112	1	QB*3126	5	QB*124	31	RHB*	276
QZ142	65	QA*1726	0	QA*114	1	R19B*	740	QB*1213	39	QB*H2	7
QZ144	65	R20A*	657	QA*1113	1	QB*192	23	QB*1226	6	QB*H4	7
QZ1413	79	QA*202	1	QA*1126	0	QB*194	23	R35B*	381	QB*H13	9
QZ1426	21	QA*204	1	R29A*	420	QB*1913	27	QB*352	23	QB*H26	2
R34Z	511	QA*2013	1	QA*292	1	QB*1926	5	QB*354	23	R8C*	364
QZ342	84	QA*2026	0	QA*294	1	R20B*	740	QB*3513	28	QC*82	322
QZ344	84	R21A*	520	QA*2913	1	QB*202	59	QB*3526	5	QC*83	265
QZ3413	83	QA*212	1	QA*2926	0	QB*204	59	R16B*	930	QC*813	970
QZ3426	22	QA*214	1	R28A*	274	QB*2013	102	QB*162	33	QC*826	12
R8Z	410	QA*2113	1	QA*282	1	QB*2026	6	QB*164	33	R9C*	725
QZ82	656	QA*2126	0	QA*284	1	R9B*	609	QB*1613	45	QC*92	111
QZ84	654	R31A*	185	QA*2813	1	QB*92	63	QB*1626	6	QC*93	102
QZ813	1676	QA*312	1	QA*2826	0	QB*94	63	R15B*	815	QC*913	158
QZ826	31	QA*314	1	R12A*	1047	QB*913	115	QB*152	25	QC*926	12
R20C*	935	QC*1113	43	QD*81	49	QD*1926	4	QD*173	28	R29E*	287
QC*202	94	QC*1126	10	QD*83	50	R10D*	868	QD*1713	52	QE*291	10
QC*203	88	R29C*	350	QD*813	196	QD*101	23	QD*1726	4	QE*293	10
QC*2013	126	QC*292	10	QD*826	4	QD*103	23	RHD*	228	QE*2913	10
QC*2026	11	QC*293	10	R9D*	790	QD*1013	34	QD*H1	4	QE*2926	4
R21C*	517	QC*2913	10	QD*91	31	QD*1026	4	QD*H3	4	R28E*	191
QC*212	97	QC*2926	6	QD*93	31	R11D*	732	QD*H13	7	QE*281	6
QC*213	90	R28C*	232	QD*913	63	QD*111	20	QD*H26	2	QE*283	6
QC*2113	137	QC*282	6	QD*926	4	QD*113	21	R31E*	266	QE*2813	6
QC*2126	11	QC*283	6	R20D*	1018	QD*1113	30	QE*311	17	QE*2826	3
R31C*	254	QC*2813	6	QD*201	29	QD*1126	4	QE*313	17	R12E*	646
QC*312	19	QC*2826	4	QD*203	29	R29D*	321	QE*3113	20	QE*121	27
QC*313	19	R12C*	814	QD*2013	56	QD*291	8	QE*3126	5	QE*123	27
QC*3113	20	QC*122	37	QD*2026	4	QD*293	8	R19E*	518	QE*1213	33

QC*3126	7	QC*123	36	R21D*	523	QD*2913	10	QE*191	21	QE*1226	6
R33C*	175	QC*1213	43	QD*211	31	QD*2926	3	QE*193	21	R35E*	396
QC*332	22	QC*1226	10	QD*213	31	R28D*	213	QE*1913	25	QE*351	23
QC*333	21	R16C*	795	QD*2113	62	QD*281	5	QE*1926	6	QE*353	24
QC*3313	23	QC*162	42	QD*2126	4	QD*283	5	R20E*	858	QE*3513	28
QC*3326	8	QC*163	41	R31D*	252	QD*2813	6	QE*201	45	QE*3526	6
R34C*	502	QC*1613	43	QD*311	13	QD*2826	2	QE*203	45	R16E*	617
QC*342	67	QC*1626	10	QD*313	13	R12D*	739	QE*2013	64	QE*161	28
QC*343	64	R15C*	714	QD*3113	17	QD*121	20	QE*2026	7	QE*163	29
QC*3413	84	QC*152	30	QD*3126	3	QD*123	21	R9E*	916	QE*1613	38
QC*3426	11	QC*153	29	R33D*	192	QD*1213	30	QE*91	50	QE*1626	6
R35C*	412	QC*1513	33	QD*331	15	QD*1226	4	QE*93	51	R15E*	571
QC*352	29	QC*1526	9	QD*333	15	R16D*	717	QE*913	76	QE*151	23
QC*353	28	R14C*	795	QD*3313	20	QD*161	21	QE*926	7	QE*153	23
QC*3513	31	QC*142	42	QD*3326	3	QD*163	21	R10E*	762	QE*1513	28
QC*3526	9	QC*143	41	R34D*	488	QD*1613	32	QE*101	30	QE*1526	6
R19C*	649	QC*1413	43	QD*341	27	QD*1626	3	QE*103	31	R14E*	617
QC*192	27	QC*1426	10	QD*343	27	R15D*	650	QE*1013	39	QE*141	28
QC*193	26	R17C*	1109	QD*3413	48	QD*151	18	QE*1026	6	QE*143	29
QC*1913	29	QC*172	81	QD*3426	4	QD*153	18	R11E*	639	QE*1413	38
QC*1926	8	QC*173	76	R35D*	398	QD*1513	25	QE*111	27	QE*1426	6
R10C*	952	QC*1713	99	QD*351	18	QD*1526	4	QE*113	27	R34E*	482
QC*102	44	QC*1726	11	QD*353	18	R14D*	717	QE*1113	33	QE*341	43
QC*103	43	RHC*	245	QD*3513	25	QD*141	21	QE*1126	6	QE*343	43
QC*1013	56	QC*H2	9	QD*3526	4	QD*143	21	R21E*	541	QE*3413	59
QC*1026	10	QC*H3	8	R19D*	590	QD*1413	32	QE*211	53	QE*3426	6
R11C*	807	QC*H13	11	QD*191	16	QD*1426	3	QE*213	54	R8E*	562
QC*112	37	QC*H26	3	QD*193	16	R17D*	997	QE*2113	81	QE*81	131
QC*113	36	R8D*	575	QD*1913	22	QD*171	28	QE*2126	7	QE*83	134
QE*813	551	QF*351	14	QF*1226	3	R20G*	607	QG*1513	30	QH*93	10
QE*826	7	QF*353	14	R16F*	557	QG*201	52	R14G*	452	QH*913	20
R17E*	847	QF*3513	23	QF*161	16	QG*203	53	QG*141	33	R24H*	36
QE*171	42	QF*3526	3	QF*163	16	QG*2013	64	QG*143	33	QH*241	4
QE*173	43	R19F*	469	QF*1613	26	R9G*	637	QG*1413	40	QH*243	4
QE*1713	59	QF*191	13	QF*1626	2	QG*91	59	R34G*	502	QH*2413	5
QE*1726	6	QF*193	13	R15F*	519	QG*93	59	QG*341	57	R10H*	552
R33E*	233	QF*1913	20	QF*151	14	QG*913	74	QG*343	57	QH*101	9
QE*331	21	QF*1926	3	QF*153	14	R10G*	585	QG*3413	71	QH*103	9
QE*333	21	R20F*	777	QF*1513	22	QG*101	34	R8G*	373	QH*1013	16
QE*3313	24	QF*201	20	QF*1526	3	QG*103	34	QG*81	290	R11H*	451
QE*3326	5	QF*203	20	R14F*	557	QG*1013	44	QG*83	298	QH*111	8
RHE*	205	QF*2013	39	QF*141	16	R11G*	484	QG*813	1027	QH*113	8
QE*H1	6	QF*2026	3	QF*143	16	QG*111	30	R17G*	609	QH*1113	15

QE*H3	6	R9F*	829	QF*1413	26	QG*113	30	QG*171	50	R21H*	640
QE*H13	8	QF*91	21	QF*1426	2	QG*1113	36	QG*173	50	QH*211	10
QE*3126	2	QF*93	21	R17F*	768	R21G*	626	QG*1713	59	QH*213	10
R8F*	786	QF*913	43	QF*171	19	QG*211	72	R33G*	320	QH*2113	21
QF*81	29	QF*926	3	QF*173	20	QG*213	73	QG*331	27	R29H*	208
QF*83	29	R10F*	698	QF*1713	37	QG*2113	95	QG*33	27	QH*291	5
QF*813	107	QF*101	17	QF*1726	3	R29G*	227	QG*3313	31	QH*293	6
QF*826	3	QF*103	17	RHF*	191	QG*291	11	RHG*	168	QH*2913	8
R21F*	551	QF*1013	28	QF*H1	4	QG*293	11	QG*H1	7	R28H*	139
QF*211	21	QF*1026	3	QF*H3	4	QG*2913	11	QG*H3	7	QH*281	4
QF*213	22	R11F*	580	QF*H13	6	R28G*	153	QG*H13	9	QH*283	4
QF*2113	47	QF*111	16	QF*H26	2	QG*281	7	R18H*	392	QH*2813	5
QF*2126	3	QF*113	16	R18F*	80	QG*283	7	QH*181	9	R12H*	457
R31F*	258	QF*1113	25	QF*181	15	QG*2813	7	QH*183	9	QH*121	8
QF*311	12	QF*1126	3	QF*183	15	R12G*	490	QH*1813	17	QH*123	8
QF*313	12	R29F*	260	QF*1813	24	QG*121	30	R31H*	292	QH*1213	15
QF*3113	17	QF*291	8	QF*1826	3	QG*123	31	QH*311	7	R35H*	400
QF*3126	3	QF*293	8	R18G*	353	QG*1213	36	QH*313	7	QH*351	8
R33F*	238	QF*2913	10	QG*181	45	R35G*	410	QH*3113	12	QH*353	8
QF*331	13	QF*2926	2	QG*183	45	QG*351	28	R19H*	367	QH*3513	14
QF*333	13	R28F*	173	QG*1813	54	QG*353	28	QH*191	8	R16H*	420
QF*3313	21	QF*281	5	R31G*	300	QG*3513	32	QH*193	8	QH*161	8
QF*3326	3	QF*283	5	QG*311	21	R16G*	452	QH*1913	13	QH*163	8
R34F*	471	QF*2813	6	QG*313	21	QG*161	33	R20H*	570	QH*1613	15
QF*341	20	QF*2826	2	QG*3113	23	QG*163	33	QH*201	9	R15H*	407
QF*343	20	R12F*	587	R19G*	395	QG*1613	40	QH*203	9	QH*151	8
QF*3413	39	QF*121	16	QG*191	24	R15G*	437	QH*2013	19	QH*153	8
QF*3426	3	QF*123	16	QG*193	24	QG*151	26	R9H*	598	QH*1513	14
R35F*	381	QF*1213	25	QG*1913	26	QG*153	26	QH*91	9	R14H*	420
QH*141	8	R24I*	37	QI*1413	1	QJ*243	4	QJ*341	6	R20K*	521
QH*143	8	QI*241	0	R34I*	502	QJ*2413	5	QJ*343	6	QK*201	6
QH*1413	15	QI*243	0	QI*341	1	R10J*	529	QJ*3413	11	QK*203	6
R34H*	501	QI*2413	1	QI*343	1	QJ*101	5	R8J*	641	QK*2013	12
QH*341	9	R10I*	550	QI*3413	1	QJ*103	5	QJ*81	6	R9K*	549
QH*343	9	QI*101	0	R8I*	537	QJ*1013	10	QJ*83	6	QK*91	6
QH*3413	19	QI*103	0	QI*81	1	R11J*	429	QJ*813	15	QK*93	6
R8H*	526	QI*1013	1	QI*83	1	QJ*111	5	R17J*	548	QK*913	13
QH*81	11	R11I*	450	QI*813	1	QJ*113	5	QJ*171	5	R10K*	507
QH*83	11	QI*111	0	R17I*	570	QJ*1113	10	QJ*173	5	QK*101	6
QH*813	33	QI*113	0	QI*171	0	R21J*	615	QJ*1713	11	QK*103	6
R17H*	572	QI*1113	1	QI*173	0	QJ*211	6	R33J*	318	QK*1013	11
QH*171	9	R21I*	638	QI*1713	1	QJ*213	6	QJ*331	5	R11K*	407
QH*173	9	QI*211	1	R33I*	319	QJ*2113	12	QJ*333	5	QK*111	6

QH*1713	19	QI*213	1	QI*331	1	R29J*	191	QJ*3313	9	QK*113	6
R33H*	319	QI*2113	1	QI*333	1	QJ*291	4	RHJ*	148	QK*1113	11
QH*331	8	R29I*	206	QI*3313	1	QJ*293	4	QJ*H1	2	R21K*	590
QH*333	8	QI*291	0	RHI*	156	QJ*2913	6	QJ*H3	2	QK*211	6
QH*3313	14	QI*293	0	QI*H1	0	R28J*	126	QJ*H13	3	QK*213	6
RHH*	158	QI*2913	1	QI*H3	0	QJ*281	3	R31K*	277	QK*2113	13
QH*H1	3	R28I*	137	QI*H13	1	QJ*283	3	QK*311	5	R29K*	176
QH*H3	3	QI*281	0	R18J*	420	QJ*2813	5	QK*313	5	QK*291	4
QH*H13	4	QI*283	0	QJ*181	5	R12J*	435	QK*3113	10	QK*293	4
R18I*	395	QI*2813	1	QJ*183	5	QJ*121	5	R8K*	752	QK*2913	7
QI*181	1	R12I*	455	QJ*1813	10	QJ*123	5	QK*81	7	R28K*	114
QI*183	1	QI*121	0	R31J*	285	QJ*1213	10	QK*83	7	QK*281	4
QI*1813	1	QI*123	0	QJ*311	5	R35J*	380	QK*813	17	QK*283	4
R31I*	291	QI*1213	1	QJ*313	5	QJ*351	5	R24K*	74	QK*2813	5
QI*311	1	R35I*	400	QJ*3113	9	QJ*353	5	QK*241	4	R12K*	413
QI*313	1	QI*351	1	R19J*	346	QJ*3513	10	QK*243	4	QK*121	6
QI*3113	1	QI*353	1	QJ*191	5	R16J*	399	QK*2413	6	QK*123	6
R19I*	365	QI*3513	1	QJ*193	5	QJ*161	5	R33K*	316	QK*1213	11
QI*191	1	R16I*	418	QJ*1913	9	QJ*163	5	QK*331	6	R35K*	358
QI*193	1	QI*161	0	R20J*	546	QJ*1613	10	QK*333	6	QK*351	6
QI*1913	1	QI*163	0	QJ*201	5	R15J*	385	QK*3313	11	QK*353	6
R20I*	568	QI*1613	1	QJ*203	6	QJ*151	5	R34K*	504	QK*3513	10
QI*201	1	R15I*	405	QJ*2013	11	QJ*153	5	QK*341	6	R16K*	377
QI*203	1	QI*151	1	R9J*	574	QJ*1513	9	QK*343	6	QK*161	5
QI*2013	1	QI*153	1	QJ*91	6	R14J*	399	QK*3413	13	QK*163	6
R9I*	596	QI*1513	1	QJ*93	6	QJ*141	5	R19K*	325	QK*1613	11
QI*91	0	R14I*	418	QJ*913	11	QJ*143	5	QK*191	5	R15K*	364
QI*93	1	QI*141	0	R24J*	55	QJ*1413	10	QK*193	5	QK*151	6
QI*913	1	QI*143	0	QJ*241	3	R34J*	503	QK*1913	10	QK*153	6
QK*1513	10	QL*103	4	R19M*	297	QM*141	11	QN*103	5	RHN*	122
R14K*	377	R11L*	399	QM*191	10	QM*143	11	R11N*	367	QN*H1	3
QK*141	5	QL*111	4	QM*193	10	R34M*	539	QN*111	5	QN*H3	3
QK*143	6	QL*113	4	R20M*	489	QM*341	12	QN*113	5	R8Ñ*	1634
QK*1413	11	R21L*	581	QM*201	12	QM*343	12	R21N*	547	QÑ*81	30
R18K*	399	QL*211	4	QM*203	12	R8M*	1091	QN*211	5	QÑ*83	31
QK*181	5	QL*213	4	R9M*	516	QM*81	15	QN*213	5	R30Ñ*	11
QK*183	5	R29L*	169	QM*91	12	QM*83	15	R29N*	146	QÑ*301	5
QK*1813	10	QL*291	3	QM*93	12	R17M*	492	QN*291	4	QÑ*303	5
R17K*	524	QL*293	3	R24M*	115	QM*171	12	QN*293	4	R32Ñ*	29
QK*171	6	R28L*	108	QM*241	6	QM*173	12	R28N*	90	QÑ*321	11
QK*173	6	QL*281	3	QM*243	6	R33M*	339	QN*281	4	QÑ*323	11
QK*1713	12	QL*283	3	R30M*	6	QM*331	11	QN*283	4	R31Ñ*	241
RHK*	140	R12L*	404	QM*301	2	QM*333	11	R12N*	373	QÑ*311	16

QK*H1	3	QL*121	4	QM*303	2	RHM*	127	QN*121	5	QÑ*313	16
QK*H3	3	QL*123	4	R10M*	477	QM*H1	4	QN*123	5	R19Ñ*	255
QK*H13	3	R35L*	350	QM*101	11	QM*H3	4	R35N*	320	QÑ*191	16
R31L*	279	QL*351	4	QM*103	11	R8N*	1211	QN*351	5	QÑ*193	16
QL*311	4	QL*353	4	R11M*	377	QN*81	5	QN*353	5	R25Ñ*	9
QL*313	4	R16L*	369	QM*111	11	QN*83	5	R16N*	339	QÑ*251	2
R8L*	848	QL*161	4	QM*113	11	R30N*	6	QN*161	5	QÑ*253	2
QL*81	4	QL*163	4	R21M*	557	QN*301	2	QN*163	5	R20Ñ*	439
QL*83	4	R15L*	356	QM*211	12	QN*303	2	R15N*	326	QÑ*201	20
R24L*	92	QL*151	4	QM*213	12	R25N*	13	QN*151	5	QÑ*203	20
QL*241	3	QL*153	4	R29M*	154	QN*81	1	QN*153	5	R9Ñ*	465
QL*243	3	R14L*	369	QM*291	7	QN*83	1	R14N*	339	QÑ*91	21
R33L*	322	QL*141	4	QM*293	7	R32N*	7	QN*141	5	QÑ*93	21
QL*331	4	QL*143	4	R28M*	97	QN*321	3	QN*143	5	R10Ñ*	430
QL*333	4	R17L*	516	QM*281	6	QN*323	3	R34N*	529	QÑ*101	18
R34L*	514	QL*171	4	QM*283	6	R31N*	274	QN*341	5	QÑ*103	19
QL*341	4	QL*173	4	R12M*	383	QN*311	5	QN*343	5	R11Ñ*	332
QL*343	4	R18L*	391	QM*121	11	QN*313	5	R17N*	483	QÑ*111	18
R19L*	317	QL*181	4	QM*123	11	R19N*	288	QN*171	5	QÑ*113	18
QL*191	4	QL*183	4	R35M*	330	QN*191	5	QN*173	5	R21Ñ*	504
QL*193	4	RHL*	135	QM*351	10	QN*193	5	R33N*	330	QÑ*211	21
R20L*	513	QL*H1	2	QM*353	10	R20N*	479	QN*331	5	QÑ*213	22
QL*201	4	QL*H3	2	R16M*	348	QN*201	5	QN*333	5	R29Ñ*	123
QL*203	4	R18M*	371	QM*161	11	QN*203	5	R24N*	108	QÑ*291	11
R9L*	540	QM*181	10	QM*163	11	R9N*	506	QN*241	4	QÑ*293	11
QL*91	4	QM*183	10	R15M*	335	QN*91	5	QN*243	4	R28Ñ*	73
QL*93	4	R31M*	284	QM*151	10	QN*93	5	R18N*	361	QÑ*281	8
R10L*	498	QM*311	10	QM*153	10	R10N*	467	QN*181	5	QÑ*283	8
QL*101	4	QM*313	10	R14M*	348	QN*101	5	QN*183	5	R12Ñ*	337
QÑ*121	18	R17O*	442	R9Q*	465	RHR*	111				
QÑ*123	18	R29O*	123	R10Q*	430	QW	22365				
R35Ñ*	285	R28O*	73	R11Q*	332						
QÑ*351	17	R12O*	337	R21Q*	504						
QÑ*353	17	R35O*	285	R32Q*	153						
R16Ñ*	303	R16O*	303	R29Q*	123						
QÑ*161	18	R15O*	292	R28Q*	73						
QÑ*163	18	R14O*	303	R12Q*	337						
R15Ñ*	292	R34O*	486	R35Q*	285						
QÑ*151	17	R33O*	294	R16Q*	303						
QÑ*153	17	R24O*	90	R15Q*	292						
R14Ñ*	303	R18O*	326	R14Q*	303						
QÑ*141	18	RHO*	111	R34Q*	486						
QÑ*143	18	R8P*	3280	R30Q*	56						

R34Ñ*	486	R31P*	241	R17Q*	442
QÑ*341	21	R19P*	255	R33Q*	294
QÑ*343	21	R25P*	9	R24Q*	90
R17Ñ*	442	R20P*	439	R18Q*	326
QÑ*171	20	R9P*	465	RHQ*	111
QÑ*173	20	R10P*	430	R8R*	14489
R33Ñ*	294	R11P*	332	R22R*	1524
QÑ*331	18	R21P*	504	R31R*	241
QÑ*333	18	R32P*	153	R18R*	326
R24Ñ*	90	R29P*	123	R19R*	255
QÑ*241	9	R28P*	73	R25R*	9
QÑ*243	9	R12P*	337	R20R*	439
R18Ñ*	326	R35P*	285	R9R*	465
QÑ*181	17	R16P*	303	R10R*	430
QÑ*183	18	R15P*	292	R11R*	332
RHÑ*	111	R14P*	303	R21R*	504
QÑ*H1	5	R34P*	486	R32R*	153
QÑ*H3	5	R30P*	56	R29R*	123
R8O*	2980	R17P*	442	R28R*	73
R30O*	56	R33P*	294	R12R*	337
R32O*	153	R24P*	90	R35R*	285
R31O*	241	R18P*	326	R16R*	303
R19O*	255	RHP*	111	R15R*	292
R25O*	9	R8Q*	4286	R14R*	303
R20O*	439	R22Q*	1524	R34R*	486
R9O*	465	R31Q*	241	R17R*	442
R10O*	430	R19Q*	255	R33R*	294
R11O*	332	R25Q*	9	R24R*	90
R21O*	504	R20Q*	439	R30R*	56

Anexo 16 – Resultados para el diseño preliminar de la red de intercambio de calor

IC				Corriente caliente		Corriente fría		Corriente caliente		Corriente fría		(TsCC-TeCF)	(TeCC-TsCF)
	Caliente	Fría	Q (kW)	Flujo (kg/s)	cp (kJ/kgK)	Flujo (kg/s)	cp (kJ/kgK)	Te CC (K)	Ts CC (K)	Te CF (K)	Ts CF (K)	ΔT frío (K)	ΔT caliente (K)
1	14	23	4024	29,8	2,66	104,3	3,12	609	558	551	563	7	46
2	15	23	148	7,8	2,66	104,3	3,12	565	558	550	551	8	14
3	16	23	4024	29,8	2,66	104,3	3,12	609	558	538	550	20	59
4 C	QH	23	17880	-	-	104,3	3,12	1080	748	563	618	185	462
6	8	2	1279	52,9	2,47	52,9	2,13	460	450	362	374	87	86
7	8	3	856	52,9	2,47	52,9	1,95	442	436	309	317	127	125
8	8	4	953	52,9	2,47	52,9	2,13	450	442	351	360	91	90
11	8	13	5424	52,9	2,47	91,6	2,15	501	460	390	417	70	84
14 E	8	QW	14489	52,9	2,47	123,8	1,00	436	325	303	420	22	16
16	9	2	581	21,2	2,36	52,9	2,13	415	404	357	362	47	53
21	9	13	1098	21,2	2,36	91,6	2,15	416	394	384	390	10	27
24 E	9	QW	465	21,2	2,36	7,4	4,18	394	385	303	318	82	76
28	10	4	231	59,5	2,31	52,9	2,13	488	486	349	351	137	137
30	10	6	1359	59,5	2,31	52,9	2,47	486	476	471	481	5	5
32	10	13	3171	59,5	2,31	91,6	2,15	476	453	368	384	85	92
35 E	10	QW	430	59,5	2,31	6,9	4,18	453	450	303	318	147	135
43	11	13	1349	22,7	2,58	91,6	2,15	444	421	361	368	60	76
46 E	11	QW	332	22,7	2,58	5,3	4,18	421	415	303	318	112	103
48	12	2	406	15,2	2,60	52,9	2,13	492	482	354	357	129	135
52	12	6	464	15,2	2,60	52,9	2,47	482	470	467	471	3	11
54	12	13	1214	15,2	2,60	91,6	2,15	470	439	355	361	85	109
56	12	27	906	15,2	2,60	7,2	2,65	439	416	373	421	43	19
57 E	12	QW	337	15,2	2,60	5,4	4,18	416	408	303	318	105	98
63	14	6	3719	29,8	2,66	52,9	2,47	534	487	439	467	48	67
65	14	13	1919	29,8	2,66	91,6	2,15	487	463	345	355	117	132
68 E	14	QW	303	29,8	2,66	4,8	4,18	463	459	303	318	156	145
70	15	2	287	7,8	2,66	52,9	2,13	690	677	351	354	326	337
73	15	5	2829	7,8	2,66	52,9	2,24	677	541	383	407	157	269
74	15	6	427	7,8	2,66	52,9	2,47	541	520	436	439	84	102
75	15	7	2456	7,8	2,66	52,9	2,24	520	387	383	404	4	116
76	15	13	691	7,8	2,66	91,6	2,15	387	354	342	345	12	42
79 E	15	QW	292	7,8	2,66	4,7	4,18	354	340	303	318	37	36
85	16	6	3719	29,8	2,66	52,9	2,47	534	487	407	436	80	98
87	16	13	1919	29,8	2,66	91,6	2,15	487	463	332	342	131	145
90 E	16	QW	303	29,8	2,66	4,8	4,18	463	459	303	318	156	145
97	17	13	1731	59,5	2,15	91,6	2,15	390	377	323	332	53	58
100 E	17	QW	442	59,5	2,15	7,1	4,18	377	373	303	318	70	59
105 E	18	QW	326	21,2	2,14	5,2	4,18	339	332	303	318	29	21
115 E	19	QW	255	15,2	2,26	4,1	4,18	381	373	303	318	70	63
117	20	2	547	22,7	2,27	52,9	2,13	392	381	346	351	35	41
122	20	13	1004	22,7	2,27	91,6	2,15	381	362	318	323	44	58
125 E	20	QW	439	22,7	2,27	7,0	4,18	362	353	303	318	50	44
127	21	2	478	15,6	2,19	52,9	2,13	429	415	342	346	73	83
136 E	21	QW	504	15,6	2,19	8,0	4,18	415	333	303	318	30	97
137 E	22	QW	1524	105,8	1,87	24,3	4,18	328	320	303	318	17	10
141 E	24	QW	90	7,2	4,18	1,4	4,18	331	328	303	318	25	13
144 E	25	QW	9	7,2	2,12	0,1	4,18	328	327	303	318	24	10
155 E	28	QW	73	5,3	2,65	1,2	4,18	465	460	303	318	157	147
163	29	13	196	5,4	2,86	91,6	2,15	453	440	318	319	122	133
166 E	29	QW	123	5,4	2,86	2,0	4,18	405	397	303	318	94	87
169 E	30	QW	56	1,8	2,43	0,9	4,18	326	313	303	318	10	8
172	31	3	135	5,4	2,19	52,9	1,95	397	386	308	309	78	88
174	31	13	171	5,4	2,19	91,6	2,15	386	371	317	318	54	68
177 E	31	QW	241	5,4	2,19	3,8	4,18	371	328	303	318	25	53
180 E	32	QW	153	5,4	2,25	2,4	4,18	326	313	303	318	10	8
188 E	33	QW	294	7,9	2,30	4,7	4,18	344	328	303	318	25	26
190	34	2	366	10,3	2,29	52,9	2,13	449	434	339	342	95	107
191	34	3	275	10,3	2,29	52,9	1,95	434	422	305	308	117	126
192	34	4	235	10,3	2,29	52,9	2,13	422	412	347	349	65	73
196	34	13	810	10,3	2,29	91,6	2,15	412	378	313	317	65	95
199 E	34	QW	486	10,3	2,29	7,8	4,18	378	328	303	318	25	60
200	35	1	3337	5,3	2,40	52,9	1,93	414	372	303	336	68	78
201	35	2	184	5,3	2,40	52,9	2,13	460	445	337	339	108	121
202	35	3	168	5,3	2,40	52,9	1,95	372	359	303	305	55	67
207	35	13	401	5,3	2,40	91,6	2,15	445	414	311	313	103	132
208	35	26	42	5,3	2,40	7,2	2,40	359	355	324	326	31	32
210 E	35	QW	285	5,3	2,40	4,5	4,18	355	333	303	318	30	37

Anexo 17 – Resultados para el diseño final de la red integrada de intercambio de calor

IC	Q (kW)	LMTD (K)	UD (kW/m ² ·K)	P	R	FT	A (m ²)	Tipo de IC	Clasificación
1	4 024	21	0,1420	-	-	1	1361	de placas	-
2	148	11	0,1420	-	-	1	98	de placas	-
3	4 024	36	0,1420	0,2	4,1	0,92	859	T-C	2--4
4 C	17 880	303	0,2271	0,1	6,0	0,97	268	Horno	1--2
6	1 279	87	0,1420	0,1	0,9	0,98	106	T-C	2--4
7	856	126	0,1420	0,1	0,8	0,96	50	T-C	1--2
8	953	91	0,1420	0,1	0,9	0,98	76	T-C	2--4
11	5 424	77	0,1420	0,2	1,5	0,98	509	T-C	1--2
14 E	14 489	19	0,1817	0,9	0,9	1	4 244	Enf. Aire	-
16	581	50	0,2271	0,1	2,3	1	51	T-C	1--2
21	1 098	17	0,2271	-	-	1	282	de placas	-
24 E	465	79	0,4968	0,2	0,6	0,99	12	T-C	1--2
28	231	137	0,1420	0,01	0,8	1	12	T-C	1--2
30	1 359	5	0,1420	-	-	1	1 870	de placas	-
32	3 171	89	0,1420	0,1	1,4	1	252	T-C	1--2
35 E	430	141	0,1817	0,1	0,2	1	17	T-C	1--2
43	1 349	68	0,1420	0,1	3,4	1	141	T-C	1--2
46 E	332	107	0,1817	0,1	0,4	1	17	T-C	1--2
48	406	132	0,1420	0,03	2,9	1	22	T-C	1--2
52	464	6	0,1420	-	-	1	521	de placas	-
54	1 214	96	0,1420	0,1	5,0	0,98	91	T-C	1--2
56	906	29	0,2555	0,7	0,5	0,95	121	T-C	2--4
57 E	337	102	0,1817	0,1	0,6	1	18	T-C	1--2
63	3 719	57	0,1420	0,3	1,7	0,92	501	T-C	1--2
65	1 919	125	0,1420	0,1	2,5	0,99	110	T-C	1--2
68 E	303	150	0,1817	0,1	0,3	1	11	T-C	1--2
70	287	331	0,1420	-	-	1	6	T-T	-
73	2 829	208	0,1420	0,1	5,7	0,98	98	T-C	1--2
74	427	93	0,1420	0,03	6,3	1	32	T-C	1--2
75	2 456	33	0,1420	-	-	1	520	de placas	-
76	691	24	0,1420	0,1	9,5	0,98	200	T-C	2--4
79 E	292	37	0,1817	0,3	0,9	0,98	45	T-C	1--2
85	3 719	89	0,1420	0,2	1,7	0,98	301	T-C	1--2
87	1 919	138	0,1420	0,1	2,5	0,99	99	T-C	1--2
90 E	303	150	0,1817	0,1	0,3	1	11	T-C	1--2
97	1 731	56	0,1420	0,1	1,5	1	218	T-C	1--2
100 E	442	64	0,1817	0,2	0,2	1	38	T-C	1--2
105 E	326	25	0,1817	0,4	0,5	0,97	74	T-C	1--2

115 E	255	66	0,1817	0,2	0,5	1	21	T-C	1--2
117	547	38	0,1420	0,1	2,2	0,99	103	T-C	1--2
122	1 004	51	0,1420	0,1	3,8	0,99	141	T-C	1--2
125 E	439	47	0,1817	0,3	0,6	0,98	53	T-C	1--2
127	478	78	0,1420	0,05	3,3	1	43	T-C	1--2
136 E	504	57	0,1817	0,1	5,5	0,97	50	T-C	1--2
137 E	1 524	13	0,1817	-	-	1	645	de placas	-
141 E	90	18	0,4968	0,5	0,2	0,98	10	T-C	1--2
144 E	9	16	0,4968	-	-	1	1	de placas	-
155 E	73	152	0,1817	-	-	1	3	T-T	-
163	196	128	0,1420	0,01	12,8	1	11	T-C	1--2
166 E	123	91	0,6246	-	-	1	2	T-T	-
169 E	56	9	0,6246	-	-	1	10	de placas	-
172	135	83	0,2271	-	-	1	7	T-T	-
174	171	61	0,2271	0,01	16,7	1	12	T-C	1--2
177 E	241	37	0,4968	0,2	2,9	0,94	14	T-C	1--2
180 E	153	9	0,4968	-	-	1	35	de placas	-
188 E	294	26	0,4968	0,4	1,1	0,91	25	T-C	1--2
190	366	101	0,1420	0,03	4,8	1	26	T-C	1--2
191	275	121	0,1420	0,02	4,4	1	16	T-C	1--2
192	235	69	0,1420	0,03	4,8	1	24	T-C	1--2
196	810	79	0,1420	0,04	8,4	1	72	T-C	1--2
199 E	486	40	0,1817	0,2	3,3	0,93	72	T-C	1--2
200	3 337	73	0,1420	0,3	1,3	0,95	339	T-C	1--2
201	184	114	0,1420	0,01	8,8	1	11	T-C	1--2
202	168	61	0,1420	0,02	8,0	1	19	T-C	1--2
207	401	117	0,1420	0,02	15,4	1	24	T-C	1--2
208	42	32	0,2271	-	-	1	6	T-T	-
210 E	285	34	0,1817	0,3	1,5	0,94	50	T-C	1--2

Anexo 18 - Costo de adquisición de los nuevos intercambiadores de calor

IC	A (m²)	Costo₂₀₁₅ (CUC)	IC	A (m²)	Costo₂₀₁₅ (CUC)
1	1 361	1 514 766	90 E	11	99 834
2	98	267 748	97	218	210 184
3	859	642 476	100 E	38	116 611
4 C	268	231 888	105 E	74	138 727
6	106	261 530	115 E	21	105 354
7	50	124 305	117	103	154 791
8	76	239 720	122	141	174 252
11	509	327 045	125 E	53	126 177
14 E	4 244	2 321 661	127	43	119 860
16	51	124 930	136 E	50	124 305
21	282	496 867	137 E	645	856 375
24 E	12	100 214	141 E	10	99 547
28	12	100 214	144 E	1	137 869
30	1 870	1 975 141	155 E	3	18 582
32	252	225 052	163	11	99 834
35 E	17	102 846	166 E	2	16 873
43	141	174 252	169 E	10	116 271
46 E	17	102 846	172	7	22 241
48	22	106 007	174	12	100 214
52	521	737 613	177 E	14	101 155
54	91	148 298	180 E	35	162 409
56	121	261 530	188 E	25	107 986
57 E	18	103 454	190	26	108 654
63	501	324 051	191	16	102 258
65	110	158 494	192	24	107 323
68 E	11	99 834	196	72	137 573
70	6	15 614	199 E	72	137 573
73	98	152 108	200	339	261 243
74	32	112 653	201	11	99 834
75	520	736 646	202	19	104 075
76	200	306 375	207	24	107 323
79 E	45	121 139	208	6	21 573
85	301	245 713	210 E	50	124 305
87	99	152 650			