



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**ANÁLISIS ELECTROTÉCNICO Y ECONÓMICO DE TRANSMISIÓN POR
MEDIO DE SUPERCONDUCTORES EN MODO DE CONVECCIÓN
DE CONDUCCIÓN PARA SU USO EN GUATEMALA**

Guillermo Antonio de la Rosa González

Asesorado por el Ing. Balfre Ernesto Martínez Villatoro

Guatemala, marzo de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS ELECTROTÉCNICO Y ECONÓMICO DE TRANSMISIÓN POR
MEDIO DE SUPERCONDUCTORES EN MODO DE CONVECCIÓN
DE CONDUCCIÓN PARA SU USO EN GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

GUILLERMO ANTONIO DE LA ROSA GONZÁLEZ

ASESORADO POR EL ING. BALFRE ERNESTO MARTÍNEZ VILLATORO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, MARZO DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonzo Rivera
EXAMINADOR	Ing. Jose Guillermo Bedoya Barrios
EXAMINADOR	Ing. Armando Gálvez Castillo
SECRETARIO	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS ELECTROTÉCNICO Y ECONÓMICO DE TRANSMISIÓN POR MEDIO DE SUPERCONDUCTORES EN MODO DE CONVECCIÓN DE CONDUCCIÓN PARA SU USO EN GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, el 17 de febrero de 2011.


Guillermo Antonio de la Rosa

Estados Unidos de América, viernes 13 de julio de 2012.

Ing. Romeo Nefalí López Orozco
Coordinador de Área de Electrotecnia
Escuela de Ingeniería de Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señor Coordinador:

Por este medio informo a usted que he concluido la asesoría al trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS ELECTROTÉCNICO Y ECONÓMICO DE TRANSMISIÓN POR MEDIO DE SÚPER CONDUCTORES EN MODO DE CONVECCIÓN DE CONDUCCIÓN PARA SU USO EN GUATEMALA**, asignado al estudiante Guillermo Antonio de la Rosa González.

Dejo constancia que los análisis y recomendaciones expuestas en el presente trabajo, son responsabilidad del estudiante y del suscrito.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,

Balfre Ernesto Martínez Villatoro
Ing. Electricista y Electrónico
Colegiado 8227





Ref. EIME 22.2013

Guatemala, 28 de SEPTIEMBRE 2012.

Señor Director

Ing. Guillermo Antonio Puente Romero

Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

**Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
ANÁLISIS ELECTROTÉCNICO Y ECONÓMICO DE
TRANSMISIÓN POR MEDIO DE SÚPER CONDUCTORES EN
MODO DE CONVECCIÓN DE CONDUCCIÓN PARA SU USO EN
GUATEMALA, del estudiante Guillermo Antonio de la Rosa
González que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Romeo Neftalí López Orozoco
Coordinador Área Electrotécnica



SRO



REF. EIME 22. 2013.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; GUILLERMO ANTONIO DE LA ROSA GONZÁLEZ titulado: ANÁLISIS ELECTROTÉCNICO Y ECONÓMICO DE TRANSMISIÓN POR MEDIO DE SÚPER CONDUCTORES EN MODO DE CONVECCIÓN DE CONDUCCIÓN PARA SU USO EN GUATEMALA, procede a la autorización del mismo.

Ing. Guillermo Antonio Puente Romero



GUATEMALA, 07 DE MAYO 2,013.

Universidad de San
Carlos de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Unidad de Lingüística

Guatemala, 24 de marzo de 2015
Ling.8/15

Ingeniero
Guillermo Antonio Puente Romero
Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC

Señor director:

Por este medio hago de su conocimiento que la Unidad de Lingüística hace una modificación al título del trabajo de graduación del estudiante **Guillermo Antonio de la Rosa González**, con número de carné: **1991-12476** el cual fue aprobado de acuerdo al protocolo como: **ANÁLISIS ELECTROTÉCNICOS Y ECONÓMICO DE TRANSMISIÓN POR MEDIO DE SÚPER CONDUCTORES EN MODO DE CONVENCCIÓN DE CONDUCCIÓN PARA SU USO EN GUATEMALA.**

La Unidad modifica el título del trabajo en virtud de que el mismo no está bien redactado y propone la siguiente forma: **ANÁLISIS ELECTROTÉCNICOS Y ECONÓMICO DE TRANSMISIÓN POR MEDIO DE SUPERCONDUCTORES EN MODO DE CONVENCCIÓN DE CONDUCCIÓN PARA SU USO EN GUATEMALA.**



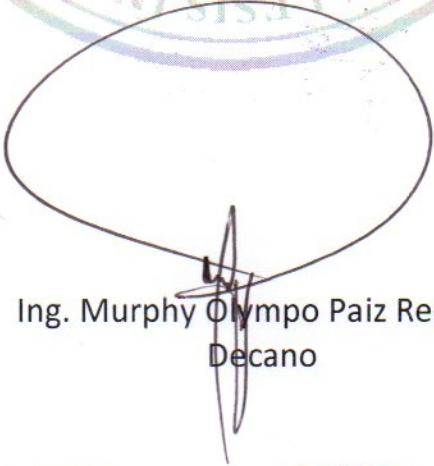
Licenciada Rosa Amelia González Domínguez
Coordinadora de la Unidad de Lingüística



DTG. 131 .2015

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS ELECTROTÉCNICO Y ECONÓMICO DE TRANSMISIÓN POR MEDIO DE SUPERCONDUCTORES EN MODO DE CONVECCIÓN DE CONDUCCIÓN PARA SU USO EN GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario: **Guillermo Antonio de la Rosa González**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 24 de marzo de 2015

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por haberme permitido culminar este trabajo, dándome la fuerza y el entendimiento necesario.
Mi novia	Por haberme dado fuerzas en los momentos de necesidad, soledad y angustia.
Mis padres	Quienes me apoyaron, me dieron el aliento a lo largo de mi carrera universitaria y mi vida, siendo un ejemplo.
Mis hermanos	Que fueron fuente de inspiración.
Mis tíos	Por ser soporte en el transcurso de la carrera.
Mis mentores	Que transfirieron su conocimiento y me honraron con su amistad, de ellos aprendí a ver más allá de los límites. A mi asesor por su tiempo y enseñanzas.
Mis amigos	Gracias.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. PRINCIPIOS DE SUPERCONDUCCIÓN	1
1.1. Análisis de conducción sin fricción	2
1.2. Velocidad de arrastre real de los electrones	2
1.3. Análisis de arrastre de electrones y el modelo de la mesa de villar	4
1.4. Superconductividad	9
1.5. Reseña histórica de los superconductores	12
1.6. Sistemas criogénicos para superconductores	13
1.7. Sistemas básicos de criogenia	16
1.8. Cálculos	17
1.9. Análisis de la diferencia de temperatura media	18
1.10. Análisis de efectividad NTU (ϵ)	19
2. EQUIPOS PARA SUPERCONDUCCIÓN EN PEQUEÑAS DISTANCIAS	23
2.1. Brechas de energía	24
2.2. Temperatura crítica	28
2.3. Diseño seleccionado por el estado de Nueva York	31

2.4.	Parámetros de diseño	35
2.5.	Estación de planta criogénica.....	36
2.6.	Zona de frío.....	37
2.7.	Tipos y configuración de sistemas criogénicos utilizados	39
2.8.	Casos en transitorio	43
2.9.	Sistemas criogénicos utilizados.....	47
2.10.	Aspectos medioambientales de los sistemas criogénicos utilizados	51
2.11.	Número de Nusselt (Nu).....	59
2.12.	Número de Prandtl (Pr)	61
2.13.	Número de Reynolds (Re).....	62
2.14.	Número de Grashof (Gr)	63
2.15.	Número de Rayleigh (Ra).....	64
2.16.	Ejemplo ilustrativo	64
3.	CASOS DE ESTUDIO PARA SU POSIBLE UTILIZACIÓN EN GUATEMALA.....	67
3.1.	La tecnología de superconducción utilizada en Taiwán.....	67
3.2.	El helio como refrigerante en el modelo criogénico taiwanés ..	68
3.3.	Abundancia natural del helio	74
3.4.	Extracción moderna	75
3.5.	Agotamiento en los suministros de helio	77
3.6.	La tecnología de superconducción utilizada en Nueva York....	77
3.7.	Características del nitrógeno.....	79
3.8.	Aplicaciones comunes del nitrógeno	79
3.9.	Breve historia	80
3.10.	Abundancia, obtención	81
3.11.	Compuestos	81
3.12.	Rol biológico	82

3.13.	Isótopos	82
3.14.	Precauciones	82
3.15.	Efectos del nitrógeno sobre la salud	83
3.16.	Comparación económica y su aplicación en territorio guatemalteco	84
3.17.	Datos generales de la GI	86
4.	ANÁLISIS ECONÓMICO DE PÉRDIDAS.....	91
4.1.	Pérdidas de conducción en la red de alta tensión de Guatemala	91
4.2.	Pérdida del conductor	92
4.3.	Pérdida por radiación.....	93
4.4.	Pérdida por calentamiento del dieléctrico	93
4.5.	Pérdida por acoplamiento	93
4.6.	Corona (descargas luminosas)	94
4.7.	Los materiales	94
4.8.	Análisis estadísticos de carga.....	98
4.9.	Aplicación de superconducción y su inversión inicial, mantenimiento y sostenibilidad	101
4.10.	Comparativa de las características eléctricas	109
4.11.	Características de la instalación, características generales ...	113
4.12.	Pérdidas del circuito at	114
	CONCLUSIONES	123
	RECOMENDACIONES.....	125
	BIBLIOGRAFÍA.....	127

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	La mesa de villar y los electrones energizados	5
2.	Los electrones energizados en la mesa de villar en modelo ARK	6
3.	El tiempo de movimiento electrónico	7
4.	El ordenamiento electrónico	8
5.	Intercambiador de calor básico, un refrigerador	14
6.	Interacción electrón-fonón-electrón	25
7.	Acoplamiento de fonones	26
8.	Punto de energía crítica para lograr un superconductor	27
9.	Resistividad de un metal y un superconductor a baja temperatura	28
10.	Función de temperatura	29
11.	Bomba de transferencia de nitrógeno licuado	32
12.	Bomba de nitrógeno	33
13.	Diseño del sistema de enfriamiento criogénico	35
14.	Planta de circulación criogénica de salida, igual es la entrada	36
15.	Área de trabajo inundada de vapor	37
16.	Sistema de condensación seco, es pequeño y caro	38
17.	Sistema de compresión mecánica	41
18.	Sistema de recirculación por bomba mecánica	42
19.	Diagrama del nitrógeno	43
20.	Espesor de superficie	60
21.	Inyector de nitrógeno	78
22.	Disposición de los cables superconductores <i>versus</i> lo cables tradicionales	102

23.	Relación de impedancias.....	103
24.	Estructura del cable HTS	104
25.	Estructura de un cable superconductor de tres fases	105
26.	Estructura transversal del cable superconductor	107
27.	Línea convencional.....	112
28.	Características generales de la instalación	113
29.	Corte transversal de la instalación	114
30.	Relación de cables	118
31.	Comparación de costos en millones de euros.....	119

TABLAS

I.	Relación R/R_o	10
II.	Punto de superconducción en materiales comunes.....	12
III.	Refrigeración por nitrógeno en el proyecto LIPA.....	49
IV.	Sistemas de refrigeración criogénica	51
V.	Componentes químicos en sistemas criogénicos	56
VI.	Clasificación del aporte económico y energético de las líneas de transmisión de la GI.....	86
VII.	Balance de energías.....	87
VIII.	Pérdidas técnicas I	88
IX.	Pérdidas técnicas II	101
X.	Comparación de transporte	109
XI.	Pérdidas de los transformadores	116
XII.	Coste en millones de euros	120

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Y	Admitancia
A	Amperio
$\text{\AA}$	Angstrom
B_c	Campo magnético crítico
C	Capacitancia
cm	Centímetro
σ	Conductividad
GWh	Giga watt-hora
$^{\circ}C$	Grado centígrado
$^{\circ}K$	Grado kelvin
Hz	Hertz
Z	Impedancia
L	Inductancia
∞	Infinito
kA	Kiloamperio
kg/m	Kilogramo por metro
km	Kilómetro
km/h	Kilómetro por hora
kV	Kilovoltio
λ	Longitud de onda
MVA	Mega volt-amperio
Mw	Megawatt
m	Metro

mm	Milímetro
Ω	Ohm
%	Porcentaje
λL	Profundidad de penetración
rms	Raíz media cuadrática
\$	Signo de dólares
€	Signo de euros
Q	Signo de quetzales
T_c	Temperatura crítica
W/m	Watts por metro
Wb	Weber

GLOSARIO

Efecto Meissner

Efecto que consiste en la desaparición total del flujo del campo magnético en el interior de un material superconductor por debajo de su temperatura crítica. Fue descubierto por Walter Meissner y Robert Ochsenfeld en 1933.

Efecto proximidad

El efecto de proximidad es la tendencia de la corriente de viajar en otros patrones no deseables, vueltas o distribuciones concentradas debido a la presencia de campos magnéticos generados por conductores cercanos.

Línea de transmisión

Es una estructura material utilizada para dirigir la transmisión de energía eléctrica en forma de ondas electromagnéticas, comprendiendo el todo o una parte de la distancia entre dos lugares que se comunican.

Superconductividad

Es un efecto que se obtiene en ciertos materiales y aleaciones por debajo de una temperatura crítica (T_c), del orden de algunos $^{\circ}\text{K}$, se observa la desaparición repentina de la resistividad eléctrica. Este fenómeno sorprendente se denomina superconductividad.

Teoría BCS

La teoría BCS muestra que, en ciertas condiciones, la atracción entre electrones, debida a un intercambio de fotones puede exceder ligeramente a la repulsión coulombiana. Los electrones se mantienen unidos débilmente y formarán el llamado par de Cooper (elementos responsables de la superconductividad).

RESUMEN

En el siguiente trabajo de graduación se presenta un análisis a nivel electrónico de la superconductividad. En el capítulo I se presentan los principios de superconducción, así como los conceptos de superconductividad, velocidad y arrastre de los electrones. También una reseña histórica de los superconductores sistemas básicos de criogenia y cálculos concernientes.

En el capítulo II se analizan los equipos de superconducción en pequeñas distancias, conceptos como la brecha energética, efecto túnel, temperatura crítica, tipos y configuraciones de sistemas criogénicos parámetros de diseño. Diseño utilizado en el estado de Nueva York, para terminar finalmente con los aspectos medioambientales de los sistemas criogénicos utilizados.

En el capítulo III se analizan las tecnologías tanto del helio como del nitrógeno, principales refrigerantes en sistemas criogénicos, propiedades del helio muy sorprendentes como el estado de Hell llamado helio superfluido. El efecto *fountain*, producido cuando existe un fluido de Hell entre dos zonas de diferente presión y aspectos como la extracción y agotamiento en los suministros de helio, aplicaciones comunes y sus efectos sobre la salud.

En el capítulo IV se realiza un análisis económico de pérdidas, selección de materiales, análisis estadísticos de carga, introducción de nuevos tipos de cables, aplicación de superconducción y su inversión inicial, finalmente las características generales de una instalación eléctrica.

OBJETIVOS

General

Análisis electrotécnico y económico de transmisión por medio de superconductores en modo de convección de conducción para su uso en Guatemala.

Específicos

1. Presentar los principios de superconducción.
2. Presentar los equipos para superconducción en pequeñas distancias.
3. Mostrar casos de estudio para su posible utilización en Guatemala.
4. Realizar un análisis económico de pérdidas.

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo de graduación se inicia analizando un principio básico en electricidad y electrónica, el cual es la resistencia en todo conductor la cual está en función creciente de la temperatura, dicho de otra manera a una mayor temperatura del material conductor mayor resistencia. Por ello se recurre a la siguiente idea, si la energía transformada en temperatura en un conductor eleva la resistividad, si se baja la temperatura del conductor se baja la resistividad de este. El concepto es simple, menor temperatura en un conductor se traduce en menor resistividad.

La resistencia de los conductores es una función creciente de la temperatura. De lo anterior se puede deducir que existirá una temperatura para la cual la resistencia sea nula. Esta temperatura está cercana al cero absoluto y de aquí se deduce, que la resistencia es sensiblemente proporcional a la temperatura absoluta del conductor.

También es comprobable que la resistencia de algunos conductores se anula a baja temperatura, antes de llegar al cero absoluto. Este fenómeno, llamado superconductibilidad, se presenta también en aleaciones formadas por metales no susceptibles de convertirse en superconductores, y hasta en materiales compuestos, en malos conductores a la temperatura ordinaria pero que a bajas temperaturas se convierten en superconductores.

Las proyecciones económicas de una tecnología que se utilice como estándar global de la superconductividad para cables de alta tensión, hace emular la lucha que se libró entre qué sistema era mejor para la transmisión eléctrica, el sistema de corriente directa o el de corriente alterna. De igual forma hay una lucha empresarial entre el sistema criogénico norteamericano a base de nitrógeno, llamado enfriamiento criogénico y el sistema asiático a base de helio. La posibilidad de usar la superconductividad para transmitir alta potencia genera una visión nueva del transporte de la energía eléctrica, pero que debido a sus altos costos en la actualidad es poco factible su implementación en Guatemala, pero que tarde o temprano se implementará. El sistema de superconducción se caracteriza por: la posibilidad de transmitir una mayor cantidad de energía en menor espacio, pudiendo descongestionar la red eléctrica de cualquier instalación a nivel mundial.

1. PRINCIPIOS DE SUPERCONDUCCIÓN

Un principio básico en electricidad y electrónica es la resistencia en todo conductor la cual está en función creciente de la temperatura. Esto puede ser descrito de la siguiente manera: a una mayor temperatura en el material conductor existe una mayor resistencia. Una manera de expresar lo anterior es verlo a través del siguiente ejercicio:

Cuando se le pregunta a una persona, incluso ingenieros, cual es la velocidad a la que viajan los electrones en un conductor. Es común que respondan que los electrones viajan por un conductor a una velocidad similar a la velocidad de la luz, pero esto no es correcto. La creencia de que la velocidad de los electrones en los conductores de las instalaciones eléctricas, es la velocidad de la luz está muy extendida.

Se cree que los electrones que dan lugar a la corriente eléctrica en los hilos y cables metálicos de las líneas eléctricas se mueven a una velocidad cercana a la de la luz. Esto parece tener su origen en la relación confusa que quizá se establece entre la velocidad de las ondas electromagnéticas, que alcanzan la velocidad de la luz (recordando que cuando la luz ingresa a un medio como un cristal reduce su velocidad). Porque la luz es en realidad ondas electromagnéticas, y la velocidad de arrastre de los electrones dan lugar a la corriente eléctrica en los conductores metálicos. Se verá que los resultados a que da lugar esa hipótesis y su razonamiento es el principio de los superconductores.

1.1. Análisis de conducción sin fricción

La densidad de electrones libres en un conductor eléctrico es cualquier cuerpo que tenga cargas libres. El número de cargas libres por unidad de volumen, que se designa por n , se llama densidad de cargas libres. Por la cantidad de electrones libres los metales son los mejores conductores pues tienen muchos electrones libres. Por ejemplo, en el cobre posee al menos, $8,45 \times 10^{22}$ electrones libres por centímetro cúbico. Esta cantidad es inconcebiblemente grande. La población humana actual es de seis mil millones de personas, o sea, 6×10^9 , cantidad despreciable frente a la de los electrones libres que hay en un centímetro cúbico de cobre. Para comprobarlo basta restar con una calculadora 6×10^9 de $8,45 \times 10^{22}$ el resultado es $8,45 \times 10^{22}$, como si no se hubiera restado nada.

La densidad de electrones libres del resto de los metales es del mismo orden de magnitud. En el aluminio es 6×10^{22} .

1.2. Velocidad de arrastre real de los electrones

La velocidad de arrastre de los electrones libres de los conductores no es la velocidad de la luz, ni próxima a ella. Se ha deducido la fórmula, $j = qnv$, que relaciona la densidad de corriente con la velocidad de las cargas libres que la originan, permite hallar muy fácilmente la velocidad de arrastre de los electrones libres en los conductores de las instalaciones. Si se despeja v de la fórmula citada resulta.

$$\begin{aligned} V &= j/(qn) \\ F &= m \cdot a \quad F = E \cdot q \quad m \cdot a = E \cdot q \\ ma &= E \cdot q \quad v/t = E \cdot q \quad v = q/m + E \end{aligned}$$

Una densidad de corriente muy normal de los conductores de las instalaciones ordinarias es 10 amperios por milímetro cuadrado o menor. Esa densidad de corriente equivale a 1 000 amperios por centímetro cuadrado. Para ese valor, si el conductor es de cobre, la velocidad de arrastre de los electrones es:

$$v = \frac{j}{qn} \cong \frac{1000}{1.602 \times 10^{-19} \times 8.45 \times 10^{22}} \cong 0.07 \text{ cm / s}$$

Menos de un milímetro por segundo. Un electrón tarda dieciséis días y medio en recorrer un kilómetro. Pero, aunque la densidad de corriente fuera de 100 A/mm², que equivale a 10 000 A/cm², la velocidad de los electrones sería de 0,74 cm/s, lo cual es menos de un centímetro por segundo. Este es, el orden de magnitud de la velocidad de arrastre de los electrones libres en los conductores, que depende de la densidad de corriente, pero que es inferior muchas veces al milímetro por segundo. La razón es que, para que pase un amperio a través de la sección de cualquier hilo, los electrones no necesitan moverse de prisa, les basta hacerlo tan lentamente como se ha deducido, porque hay muchos en cada unidad de volumen. Y de lo anterior se deduce que el número de electrones libres que hay en cada milímetro de cable es:

$$0.01 \times 0.1 \times 8.45 \times 10^{22} = 8.45 \times 10^{19}$$

que son:

$$8.45 \times 10^{19} \times 1.602 \times 10^{-19} \cong 13.54 \text{ C}$$

1.3. Análisis de arrastre de electrones y el modelo de la mesa de villar

El Big Bang, literalmente gran estallido, constituye el momento en que de la nada emerge toda la materia. Es el momento en el que Dios con su dedo empujó el cumulo de materia contra el cúmulo de antimateria. Es decir, Dios hizo el origen del Universo. La materia, hasta ese momento, solo era un punto de densidad infinita, que en un momento dado explota generando la expansión de la materia y la antimateria en todas las direcciones, y creando lo que se conoce como el Universo.

Inmediatamente después del momento de la explosión, cada partícula de materia tomó energía y comenzó a alejarse muy rápidamente una de otra, de la misma manera que al inflar un globo este va ocupando más espacio expandiendo su superficie. Los físicos teóricos han logrado reconstruir esta cronología de los hechos a partir de un 1/100 de segundo después del Big Bang. La materia lanzada en todas las direcciones por la explosión primordial está constituida exclusivamente por partículas elementales: electrones, positrones, mesones, bariones, neutrinos, fotones, entre otras, hasta más de 89 partículas conocidas hoy en día.

Según se expandía el Universo, la radiación residual del Big Bang se expandía, por ende los elementos del átomo adquirieron energía. Todo partiendo desde el preámbulo de Big Bang en el cual la materia y la antimateria, poseían una temperatura de cero grados Kelvin o -274 grados centígrados. Al leer esto no se hila una idea entre superconductores, el origen del universo y la mesa de villar. Por lo tanto se necesita de un supermodelo mental para hacerlo.

La figura siguiente muestra una mesa de villar, se debe imaginar que las bolas no están estáticas, estas ruedan por toda la mesa de manera aleatoria, se trata de una mesa sin fricción. Una mesa ideal de este modelo mental, como se analizó anteriormente previo al Big Bang, los átomos y los electrones no tenían energía, pero cuando se produjo la gran explosión de inmediato la temperatura aumentó y como el universo era un punto muy pesado y ardiente, con una temperatura de cien quintillones de grados centígrados de temperatura en una densidad de trillones de trillones de kilogramos por litro.

A mayor temperatura mayor movimiento de los átomos y de los electrones, y la mesa de villar representa los electrones que cuando están en un gradiente de temperatura se mueven más, el movimiento produce calor, y el calor produce movimiento electrónico, que a su vez produce más calor y como se mostró anteriormente, a mayor temperatura mayor la resistencia del conductor.

Figura 1. **La mesa de villar y los electrones energizados**



Fuente: *El billar*. http://1.bp.blogspot.com/-IfiGSgZGijU/UCFYqVe8pJI/AAAAAAAAA04/GErlcT8_SUA/s320/billar.jpg. Consulta: noviembre de 2012.

La experiencia dicta que se puede mostrar más de un ejercicio mental, por ello se debe imaginar la misma mesa de villar pero desde otro ángulo. Ahora viendo esta mesa a vista de hormiga, tal como se muestra en la figura siguiente, si la pregunta es por qué vista de hormiga, es porque los conductores poseen el famoso efecto piel. Por ello es que la mesa de villar es el ejemplo perfecto pues solo sobre la superficie de la pana se da el movimiento de bolas, al igual que en un conductor solo sobre su piel se da el movimiento electrónico. Por ello en la figura siguiente se ve una densidad mayor de bolas cuando en realidad tiene la misma densidad que en la figura uno. A esta perspectiva se le denomina modelo ARK, que es un nombre arbitrario pues es parte de un modelo mental.

Figura 2. **Los electrones energizados en la mesa de villar en modelo ARK**



Fuente: *Billar geo*. <http://image.slidesharecdn.com/billargeo-120521130235-phpapp02/95/billar-geo-1-728.jpg?cb=1337623397>. Consulta: noviembre de 2012.

Como se observó con anterioridad los electrones arbitrariamente se mueven a velocidades bajas y también pareciera que son golpeados, tal como el taco golpea una bola de villar. Como se muestra en la figura número tres, esta figura es de suma importancia pues de igual manera se puede enviar una

bola en una dirección deseada tal cual se hace en un tubo catódico, pero hacer eso consume energía. De igual manera como lo hace la persona con el taco, a fin de ordenar una o todas las bolas por medio del taco gasta energía. Si se desea ordenar los electrones se consume demasiada energía en ello, y se debe eliminar el medio conductor. Por ello un tubo catódico es eficiente en ordenar los electrones pero a cambio se necesita crear un campo magnético tan poderoso, que simplemente fuera de un aparato de TV es inviable económicamente el ordenamiento por campo magnético.

Figura 3. **El tiempo de movimiento electrónico**

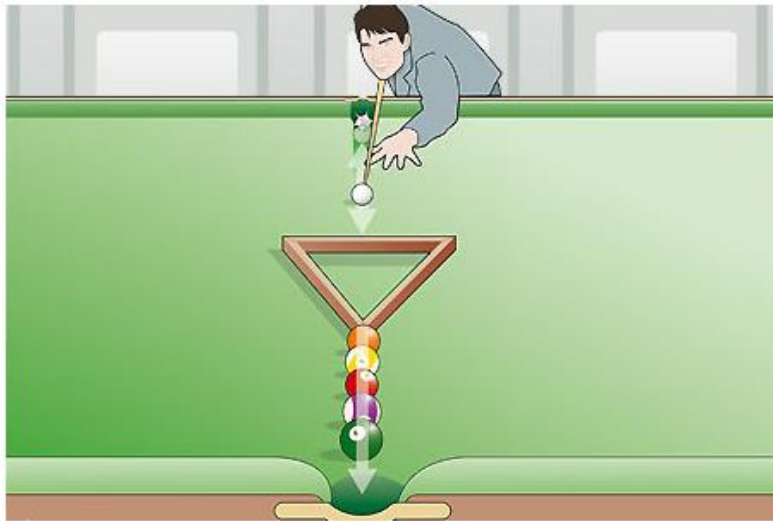


Fuente: *Movimiento electrónico*. <http://www.bing.com/images/search?q=mesa+de+villar&FORM=HDRSC2>. Consulta: junio de 2014.

De ahí viene la idea de no intentar ordenar los electrones. La figura 4 muestra a un jugador de villar que ha ordenado las bolas, pero a coste de una gran energía, tiempo y esfuerzo, algo que la industria no quiere hacer. El ordenamiento de electrones se puede realizar por medio de campos magnéticos, tal cual sucede actualmente con los equipos de tomografías, los cuales ordenan los electrones por medio de campos magnéticos a costes

elevados de energía. Solo imaginar que se necesita ordenar los campos magnéticos de conductores, sería oneroso económicamente.

Figura 4. **El ordenamiento electrónico**



Fuente: *Ordenamiento electrónico*. <http://www.bing.com/images/search?q=mesa+de+villar&FORM=HDRSC2>. Consulta: junio de 2014.

Por ello se recurre a la siguiente idea, si la energía transformada en temperatura en un conductor eleva la resistividad, si se baja la temperatura del conductor se baja la resistividad de este, el concepto es simple, menor temperatura en un conductor se traduce en menor resistividad.

La resistencia de los conductores es una función creciente de la temperatura. De lo anterior se puede deducir que existirá una temperatura para la cual la resistencia sea nula. Esta temperatura está cercana al cero absoluto y de aquí se deduce que la resistencia es sensiblemente proporcional a la temperatura absoluta del conductor.

También es comprobable que la resistencia de algunos conductores se anula a baja temperatura, antes de llegar al cero absoluto, como sucede, por ejemplo, con metales como el mercurio, que posee el problema de ser líquido y es muy difícil actualmente crear un conductor con él. El plomo que es el elemento más reciclable del planeta posee el problema que es altamente contaminante, el estaño, el talio y el tantalio. Por otra parte en otros metales sucede que no hay cambios de resistividad con los cambios de temperatura como por ejemplo: el oro, la plata y el bismuto, no se observa este descenso en la resistividad.

1.4. Superconductividad

Este fenómeno se presenta también en aleaciones formadas por metales no susceptibles de convertirse en superconductores, y hasta en materiales compuestos, en malos conductores a la temperatura ordinaria pero que a bajas temperaturas se convierten en superconductores.

La ley de variación de la resistencia no es lineal, y su curva representativa es muy complicada. Cuando la temperatura se acerca al cero absoluto, la resistividad disminuye cada vez más lentamente y termina, para la mayor parte de los metales, por tomar un valor casi constante. Como se ve en la tabla I donde se dan, para un hilo platino, los valores del cociente R/R_0 entre la resistencia R a diferentes temperaturas T , y la resistencia R_0 a la temperatura de 0°C .

Tabla I. Relación R/R_0

Temperatura absoluta	R/R_0
273,09	1000
20,02 Hidrógeno líquido	0,0171
14,2	0,0135
4,3	0,0115
2,3 Helio líquido	0,0119
1,5	0,0119

Fuente: GONZÁLEZ, Adolfo. *Superconductibilidad de los metales*. p. 3.

Por ello existe un punto “Q” o punto óptimo de temperatura de superconductividad el cual es un análisis económico, que se da de la siguiente manera: para llevar un conductor a los -100 grados centígrados se utiliza medio millón de dólares por unidad de longitud y para -110 grados centígrados se utiliza un millón de dólares. La relación baja de temperatura *versus* erogación económica no es lineal. Por lo tanto, el punto óptimo es encontrar la temperatura que posea la menor resistividad, menor pérdida de energía por conceptos de resistencia del material conductor y menor erogación económica.

Los estudios realizados sobre esta materia demuestran que el fenómeno de la superconductibilidad es bastante complejo, pero sus bases están en cursos básicos impartidos en las aulas, la superconductividad permite desentrañar el mecanismo de la conductibilidad eléctrica.

El punto de transición entre el estado normal y el de superconductores es donde desaparece la resistencia (como se analizó anteriormente es el punto “Q” o estado óptimo de conductividad *versus* economía y recurso de ingeniería). El estado de superconductibilidad no se establece bruscamente, el paso de una

resistencia de valor finito a una resistencia nula, se efectúa en un pequeño intervalo de temperatura, pero de modo continuo. Es decir que en realidad se tiene una curva de transición a lo largo de la cual se disminuye la resistencia muy rápidamente entre dos temperaturas próximas entre sí.

Si se compara la densidad de la corriente en conductores ordinarios o comercialmente usados, y la de los cuerpos superconductores que tienen la capacidad de ser recorridos por corrientes del orden de 1 000 amperios por milímetro cuadrado, para el plomo (que es altamente contaminante), por ejemplo, sin que se desprenda calor alguno apreciables. Sin embargo, si se aumenta la intensidad de la corriente, se llega a un valor llamado límite, llamado umbral de la corriente, a partir del cual pierde el metal su estado de superconductibilidad. Es por ello el uso de aleaciones pues como se mencionó, existen materiales que a temperatura ambiente y superiores no son conductores y únicamente lo son a bajas temperaturas. Cuando se hacen estas aleaciones se agregan propiedades a fin de variar el límite. Cuando se está abajo del umbral no hay desprendimiento de calor, pero este aparece cuando se pasa de ese límite. El valor del umbral de la corriente baja con la temperatura.

Otro de los factores para no utilizar materiales como estaño y plomo para uso de superconductores es el estado cristalino: la cristalización en los conductores ejerce gran influencia sobre la mayor parte de las propiedades físicas. Por ejemplo: una variedad alotrópica del estaño ordinario, el estaño gris, que es de estructura muy granular, no presenta traza alguna de superconductibilidad hasta los 1,8° absolutos. Es demasiado caro llevar al estaño a los casi cero grados absolutos, por ello el estado de cristalización hace inviable al estaño en su uso de superconducción.

En la tabla siguiente se muestran los valores en grados absolutos con el fin de lograr materiales superconductores a partir de elementos en el uso común de la industria.

Tabla II. **Punto de superconducción en materiales comunes**

MATERIAL	TEMPERATURA ABSOLUTA
Plomo	7,2°
Mercurio	4,2°
Indio	3,4°
Estaño	3,2°
Talio	2,47°
Galio	1,07°

Fuente: GONZÁLEZ, Adolfo. *Superconductibilidad de los metales*. p. 6.

1.5. Reseña histórica de los superconductores

El 17 de enero de 1986, los laboratorios de investigación de IBM en Suiza, se logró el primer logro tangible de una superconductividad a alta temperatura. Al lograr enfriar una muestra de óxido de cobre, bario y lantano (se realizó una aleación), se observó que la resistividad eléctrica de la muestra empezó a disminuir rápidamente a una temperatura del orden de los 20 °K.

Al realizar varias combinaciones de aleaciones se logró la concentración de bario adecuada para lograr el estado de superconducción de la muestra a 30 °K.

Una conversión simple dice 30 °K es igual a -243 °C por lo tanto, es todavía una temperatura relativamente baja. Pero, en el campo de los superconductores era posible lograr esas temperaturas con equipo menos

sofisticado, y el nitrógeno comercial podía llevar los elementos a esa temperatura.

El segundo logro importante se llevó a cabo ese mismo año, con una nueva combinación de aleación sustituyendo el vario por estroncio en los compuestos, se consiguió aumentar la temperatura de transición hasta 40 °K, con esto logrando que el nitrógeno necesario fuera menor y la maquinaria lo podía hacer fluir. Para las aplicaciones de superconducción comercial es una ventaja considerable, pues basta con un enfriamiento por nitrógeno líquido, se pueden lograr intercambiadores de temperatura por medio de nitrógeno.

1.6. Sistemas criogénicos para superconductores

Un refrigerador casero y un sistema criogénico utilizado para superconducción no difieren en su teoría, por lo tanto se debe realizar el siguiente ejercicio mental: la energía no se destruye ni se crea, únicamente se transforma. Cuando se encendió una estufa eléctrica en un hogar transformó de varias formas la energía, el agua almacenada en una represa como energía potencial es transformada en energía mecánica por la turbina y luego en energía eléctrica y enviada al hogar, para luego ser transformada en energía térmica. Esta energía térmica es aplicada a los alimentos y los transforma. Por último la energía en los alimentos es absorbida por el cuerpo humano y transformada en energía química por el cuerpo humano.

Lo mismo sucede en la criogenia, si se sabe que la energía solo se transforma y los electrones en movimiento son energía. Se debe trasladar esa energía de electrones de un medio a otro, por medio de la aplicación de los principios de la transferencia de calor al diseño de un equipo, que por medio de

nitrógeno trasfiere la energía del conductor al nitrógeno este circula y lo lleva a un radiador que lleva esa energía del conductor al medio ambiente.

Figura 5. **Intercambiador de calor básico, un refrigerador**



Fuente: Refrigerador compacto. http://mlm-s1-p.mlstatic.com/3130-MLM3936165665_032013-O.jpg. Consulta: noviembre de 2012.

El equipo de criogenia es un equipo de transferencia de calor que se define por las funciones que desempeña en el proceso de superconductores. Al igual que sucede con un refrigerador casero se trata de un grupo de intercambiadores, que hacen que el nitrógeno recupere el calor desde el conductor, esto por medio de dos corrientes en un proceso. El nitrógeno se usa para acumular el calor de los conductores mediante el principio que la temperatura intentará ser uniforme en el espacio. Por lo tanto, el calor se desplazará a las áreas más frías, primeramente se inyecta nitrógeno en una manga que cubre por completo al conductor y generalmente se usa nitrógeno en estado líquido, pues tiene dos estados, líquido y gaseoso.

Luego se produce el primer intercambio, el cable transfiere su temperatura al nitrógeno y se equiparan por ello la necesidad de bombear nitrógeno continuamente, a fin que el nitrógeno equipare temperaturas, fluya y luego las disipe al ambiente en radiadores. Los radiadores se emplean para enfriar el nitrógeno por medio de otro intercambio de calor entre el nitrógeno y el medio ambiente, llevando la temperatura de los cables al medio ambiente, el nitrógeno líquido es el medio enfriador principal. Los condensadores son enfriadores cuyo propósito principal es eliminar calor latente en lugar de calor sensible. Existen elementos llamados hervidores que tienen el proceso eliminar cualquier expansión, en caso que el nitrógeno forme burbujas si pasa de un estado líquido a gaseoso, esto se debe a que el gas ocupa 1 800 veces el volumen del líquido.

En general, el sistema de criogenia es un cambiador de calor recorrido por dos o más medios. En el caso de los superconductores se trata de dos medios. El primero toma la temperatura del conductor y la transfiere al nitrógeno y luego la temperatura del nitrógeno es transferida al ambiente, uno de los cuales cede a los demás calor a frío.

Si un proceso químico debe desarrollarse de una forma segura, es la transición de fase líquida a gaseosa pues si el nitrógeno cambia de fase, hará explotar no solo la manga que recubre el superconductor, sino también los radiadores y tubería en general. Por ello será preciso realizarlo a una determinada temperatura umbral donde el nitrógeno no cambie de fase. El calor así recuperado desde el conductor, puede disiparse hacia la atmósfera.

Como se ha analizado hasta ahora el sistema criogénico es en realidad un intercambiador de calor, y la función general de un intercambiador de calor es transferir calor de un medio a otro.

Los componentes básicos de los intercambiadores se puede ver como una manga que recubre el conductor en todo su trayecto, a fin de convertirlo en un superconductor, por donde un flujo de nitrógeno es bombeado en un círculo cerrado, en donde en un punto el calor recolectado es trasferido a otro medio por medio de un radiador. Existen por tanto tres intercambios de calor que necesitan ser descritos:

- Transferencia de calor convectiva del conductor por medio de un fluido en este caso nitrógeno.
- Transferencia de calor conductiva por medio de la circulación continua del nitrógeno.
- Transferencia de calor convectiva desde el nitrógeno bombeado hasta el radiador que disipa la temperatura hacia el ambiente.

Para desarrollar la metodología para el análisis y diseño de un sistema criogénico, se debe primero tomar en cuenta el problema de la transferencia de calor hacia el fluido por medio de la manga. Todo esto por medio de la piel del conductor.

1.7. Sistemas básicos de criogenia

Un sistema criogénico es utilizado en muchos sistemas químicos o mecánicos. Como por ejemplo para hacer embonar un aro de metal en un cilindro se enfría el cilindro con nitrógeno líquido, a fin que se reduzca el diámetro del cilindro y el aro embone perfectamente con la expansión a temperatura ambiente. Como su nombre lo indica un intercambiador de calor sirve para ganar del conductor al nitrógeno y luego del nitrógeno al ambiente.

El equipo que se utiliza es el siguiente:

- Manga que cubre el conductor
- Nitrógeno en su forma líquida
- Bomba de circulación de nitrógeno líquido
- Radiadores

La diferencia de temperaturas entre el conductor y el fluido (nitrógeno) y la pared de la manga, que es en realidad un tubo que recubre al conductor. Si la temperatura de la circunferencia interior del conductor es casi constante en toda su longitud, se debe hacer circular el nitrógeno, pues no se desea que la temperatura sea constante. Esto debido a que si existe flujo de electrones habrá fricción entre ellos y por lo tanto se producirá calor y conforme la circulación de corriente. Así será el aumento de temperatura a menos que se haga también circular el nitrógeno. Luego el calor que recolecta el nitrógeno por medio de la fricción de los electrones por su paso por el conductor es disipado por el radiador.

1.8. Cálculos

En los intercambiadores criogénicos de calor se debe maximizar el rendimiento del equipo, esto se hace calculando la velocidad del flujo de nitrógeno. Se debe fabricar a fin proporcionar suficiente rendimiento de estos equipos en relación de la temperatura deseada. Se puede trabajar con fórmulas básicas a fin de entender los principios de la criogenia. Una de las herramientas más importantes con las que se cuenta es el software de cálculo, el cual no es más que el ingreso de las fórmulas básicas a controladores tipo PLC, agregado a termo coplas que permite calcular en tiempo real, los cambios aplicando las fórmulas en cualquier situación en las que trabajen los intercambiadores

criogénicos, es de anotar que en los siguientes cálculos se habla de temperatura. Existen infinidad de variables, como la presión, el punto de cambio de fase líquida a gaseosa del nitrógeno que no se abordan por su complejidad y sobre todo por el nivel de destreza en herramientas matemáticas, que se deben poseer para su comprensión. Es de aclarar que el humilde creador del presente trabajo de graduación no posee estos niveles. Es por ello que cuando se diseñan modelos con fines didácticos, se diseñan los sistemas de intercambio de calor en formato especial, esto significa que no hay presiones límite, ni umbrales de cambio de fases de líquido a gaseoso del nitrógeno.

1.9. Análisis de la diferencia de temperatura media

Cuando el calor se transfiere de un sólido (conductor) a un fluido (nitrógeno en fase líquida) y luego a otro ambiente (medio ambiente) a través de una superficie sólida de separación. En este caso es la barrera entre el conductor y el nitrógeno, se dice que el sistema está fluyendo a través de un intercambiador de calor, la diferencia de temperatura local Δt varía a lo largo de la trayectoria del flujo. La tasa de transferencia de calor puede calcularse usando la ecuación básica:

$$q = UA\Delta t_m$$

Donde U es el coeficiente de transferencia de calor uniforme total, A es el área asociada (en este caso es la cara del cilindro a lo largo de su trayectoria que tiene contacto con el nitrógeno) con el coeficiente U, y Δt_m es la diferencia de temperatura media apropiada.

Para un intercambiador de calor a contra flujo o en paralelo, el que es usado cuando se bombea nitrógeno por medio de la manga, con el fin que

nunca exista una equipotencialidad de temperaturas, entre el conductor y el nitrógeno la diferencia de temperatura media viene dada por:

$$\Delta t_m = \Delta t_1 - \Delta t_2 / \ln(\Delta t_1 / \Delta t_2)$$

Donde Δt_1 es la diferencia de temperatura del conductor y Δt_2 es la diferencia de temperatura del nitrógeno, en cada uno de los extremos del intercambiador de calor. Los extremos solo son reconocidos por Δt_2 puesto que si bien existe un cambio de temperatura en el conductor, esta no se considera que fluye de un extremo a otro, aunque exista un flujo de corriente; Δt_m es la diferencia de temperatura media logarítmica (LMTD). Para el caso especial cuando no exista flujo de nitrógeno por la manga, se dice que $\Delta t_1 = \Delta t_2$ (posiblemente solo con un intercambiador de calor con iguales capacidades), que llevan a un indeterminación en la ecuación anterior $\Delta t_m = t_1 = \Delta t_2$, por ello si se analiza con cuidado se ve que no puede existir un intercambiador criogénico si no existe bombeo de nitrógeno por la manga.

1.10. Análisis de efectividad NTU (ϵ)

Los cálculos usando las ecuaciones anteriores para Δt_m son convenientes, cuando las temperaturas de entrada y salida del intercambiador criogénico se conocen en el sólido del conductor y el fluido del nitrógeno. A menudo, las temperaturas de los fluidos dejando el intercambiador son desconocidas, esto se da cuando se desconoce cómo será el intercambio entre el nitrógeno y el medio ambiente. Para eludir los cálculos de ensayo y error, NTU Effectiveness (ϵ) usa tres parámetros a dimensionales: efectividad ϵ , número de unidades de transferencia (NTU), y ratio de tasa de capacidad cr ; no se necesita la diferencia de temperatura media.

Efectividad del intercambiador criogénico de calor ϵ es el ratio entre la máxima tasa de transferencia de calor posible, en un intercambiador de calor a contra flujo de área de superficie infinita, con las mismas tasas de caudal másico y temperaturas de admisión. La máxima tasa de transferencia de calor posible para fluidos provenientes del cable transferidos al nitrógeno entrando a t_{hi} y el fluido frío entrando a t_{ci} es:

$$q_{max} = C_{min} (t_{hi} - t_{ci})$$

Donde C_{min} es el más pequeño del fluido caliente, se dice que es la temperatura proveniente del conductor que está en contacto con el nitrógeno

$$[C_h = (\dot{m}c_p)_h]$$

Y las tasas de capacidad del fluido frío:

$$[C_c = (\dot{m}c_p)_c]$$

W/K; C_{max} es la más grande.

De ahí que se deduce que la tasa de transferencia de calor del sistema criogénico está dada por:

$$q = \epsilon q_{max}$$

O con un tipo de intercambiador y en todos los casos de los intercambiadores, que incluyen a un sistema criogénico esta dado como la efectividad de un intercambiador de calor, que es capaz de expresarse como una función de NTU (número de unidades de transferencia) y el ratio de tasa de capacidad cr.

$$\varepsilon = f(NTU, c_r, \text{Flow arrangement})$$

Donde:

$$NTU = UA/C_{min}$$

$$Cr = C_{min}/C_{max}$$

La efectividad del intercambiador criogénico es independiente de la temperatura de entrada del intercambiador. Para cualquier intercambiador de calor en el que cr es cero, (donde un fluido sufre un cambio de fase, como en un condensador o evaporador, tiene un efectivo $c_p = \infty$), la efectividad es:

$$\varepsilon = 1 - \exp(-NTU)$$

La diferencia de temperatura media viene dada por:

$$\Delta t_m = \frac{(t_{h1} - t_{c1})^\varepsilon}{NTU}$$

Después de encontrar la tasa de transferencia de calor q, las temperaturas de salida para los fluidos de densidad constante se encuentran de ecuaciones ya tabuladas. Las ecuaciones básicas para calcular la efectividad de un intercambiador de calor criogénico son, $N=NTU$ son:

Flujos paralelos: esta ecuación se utiliza para el intercambio inicial de temperatura.

$$\frac{1 - \exp[-N(1 - c_r)]}{1 + c_r}$$

Contra flujo: se utiliza en el cálculo de la circulación del nitrógeno por la manga.

$$\frac{1 - \exp[-N(1 - c_r)]}{1 - c_r \exp[-N(1 - c_R)]}$$

$$c_r \neq 1$$

$$\frac{N}{1 + N}$$

$$c_r = 1$$

Como se puede ver Cr nunca puede tener un valor de 1, esto se traduce como: el valor del flujo de nitrógeno nunca puede ser 1 que equivale al reposo para que haya una temperatura constante, pues si se deja de fluir el nitrógeno tarde o temprano las temperaturas se vuelven equipotenciales.

2. EQUIPOS PARA SUPERCONDUCCIÓN EN PEQUEÑAS DISTANCIAS

El término pequeñas distancias no se refiera a longitudes de un kilómetro, la tecnología aplicada en superconducción opera en distancias de 400 kilómetros. Esto es comprensible pues las distancias de líneas de transmisión en los Estados Unidos no son símiles con las distancias en Guatemala. Guatemala opera distancias lineales máximas de 300 kilómetros. Mientras la distancia entre la presa Hoover y Los Ángeles es de 4 000 kilómetros. Uno de los sistemas más importantes para lograr que los conductores se conviertan en superconductores son los sistemas criogénicos, que por medio del flujo de nitrógeno sobre la superficie del conductor logran temperaturas muy bajas por la cual una sustancia, en este caso el conductor es superconductor. A esta temperatura se le conoce como temperatura de transición (T_c).

La gran mayoría de los superconductores conocidos tienen temperaturas de transición entre 1 °K y 10 °K. De los elementos químicos, el tungsteno tiene la temperatura de transición más baja (0,015 °K) y el niobio la más alta (9,5 °K). Algunos metales, aleaciones, óxidos y compuestos orgánicos se vuelven superconductores cuando se los enfría por debajo de una temperatura crítica, T_c . La fenomenología del estado superconductor presenta algunas notables características. Por un lado el material superconductor pierde su resistencia eléctrica y por lo tanto no disipa energía en forma de calor cuando por él circula una corriente eléctrica.

Un superconductor también se comporta como una sustancia diamagnética perfecta. Este fenómeno se conoce como efecto Meissner. En presencia de un campo magnético moderado, un superconductor genera corrientes superficiales que dan lugar a una magnetización inducida que cancela el campo magnético en su interior. En otras palabras, el superconductor expulsa el campo magnético de su interior. Estos efectos están ausentes a temperaturas mayores que T_c , para las cuales el material presenta un comportamiento normal.

Las temperaturas de transición de algunos elementos. Como la del niobio, aluminio y germanio ($Nb_{12} Al_3 Ge_1$) tiene la temperatura de transición más alta conocida (21 °K).

2.1. Brechas de energía

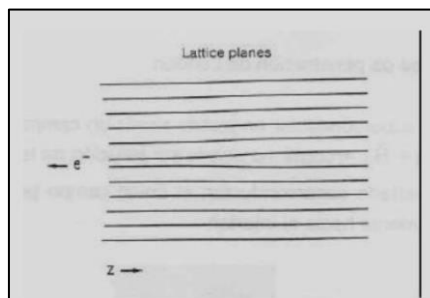
Como se mencionó anteriormente, las propiedades térmicas de los superconductores indican que hay una brecha, entre la distribución de los niveles de energía disponibles en los electrones y por lo tanto un monto finito de energía, designado como debe ser provista a un electrón para excitarlo. Esta energía es máxima en el cero absoluto y cambia muy poco, con incrementos en temperaturas que se aproximan a la temperatura de transición, mientras decrece a cero en estado normal. La Teoría BCS predice una energía de este tipo de dependencia de temperatura.

La teoría BCS intenta explicar la superconductividad a temperaturas próximas al cero absoluto. Cuando los materiales se refrigeran a estas temperaturas, el movimiento de sus átomos se reduce dramáticamente.

La teoría BCS afirma que los electrones que fluyen a través de un superconductor se agrupan en pares (llamados pares de Cooper). Estos pares electrónicos se producen debido a los fonones (partículas asociadas a las vibraciones de la red cristalina); estas crean una especie de pegamento subatómico, el par de electrones deja una estela al moverse a través de la red cristalina. Esta estela es aprovechada por los pares siguientes como camino a través de la red cristalina evitando colisiones con otras partículas, lo que obstaculizaría el flujo y generaría resistencia eléctrica.

De acuerdo a la Teoría BCS, existe un tipo de pares de electrones (electrones de rotación opuesta actuando al unisonó), que en los superconductores es importante para interpretar muchos de los fenómenos de superconductividad. Los pares de electrones llamados pares Cooper, se rompen en la medida en que el superconductor es calentado. Cada vez que un par es roto, un monto de energía se libera haciendo menor la brecha de energía que debe ser abastecido a cada uno de los dos electrones en el par, de tal forma que la energía sea de al menos dos, para ser abastecido a un superconductor.

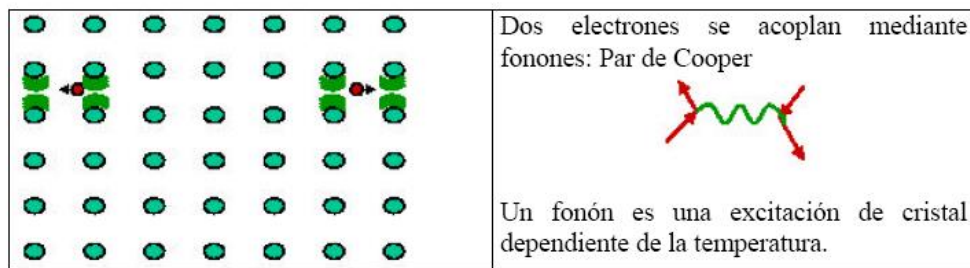
Figura 6. **Interacción electrón-fonón-electrón**



Fuente: Superconductividad. <http://users.df.uba.ar/giribet/f4/Supercv2.pdf>. Consulta: noviembre de 2012.

La interacción anterior da la formación electrón-fonón-electrón de un par de Cooper.

Figura 7. **Acoplamiento de fonones**



Fuente: *Modelo de atracción del par*. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/solids/imgsol/bcs9.gif>. Consulta: noviembre de 2012.

El valor del doble de la brecha de energía a 0 °K (el cual es 2) se asume que es mayor en tanto que la temperatura de transición de un superconductor sea más alta. De hecho, la Teoría BCS predice una relación de este tipo, al que la energía abastecida a un superconductor en cero absoluto, será a 3,53 veces el producto de la constante de Boltzman k y la temperatura de transición T_c en grado Kelvin: un ejemplo mental ilustra mejor lo anterior $2 = 3,53 \text{ k}T_c$. La constante de Boltzman se deriva de las consideraciones teóricas de la distribución de energía entre agregados de partículas (es igual a $1,38 \times 10^{-23}$ joules por grado Kelvin donde es igual a 239 calorías).

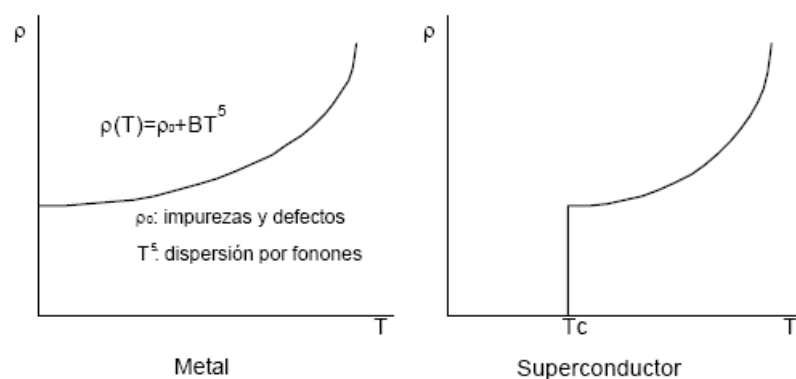
La brecha de energía puede ser mayor precisamente en un experimento de tuneleo (*tunneling* - es un proceso en mecánica cuántica que permite que un electrón se escape de un metal sin adquirir la energía requerida, a lo largo de la prueba de acuerdo a las leyes de la física clásica). En este experimento una muy capa delgada de aislamiento se prepara entre un superconductor metal, se

asume aquí en estado normal. En esta situación, los electrones pueden mecánica-cuánticamente pasar de un estado normal a ser superconductor si la energía es suficiente. Esta energía puede ser provista al aplicar voltaje negativos (V) a un metal normal respecto al voltaje del superconductor.

En mecánica cuántica el efecto túnel es un fenómeno nanoscópico, por el que una partícula viola los principios de la mecánica clásica, penetrando una barrera de potencial o impedancia mayor que la energía cinética de la propia partícula.

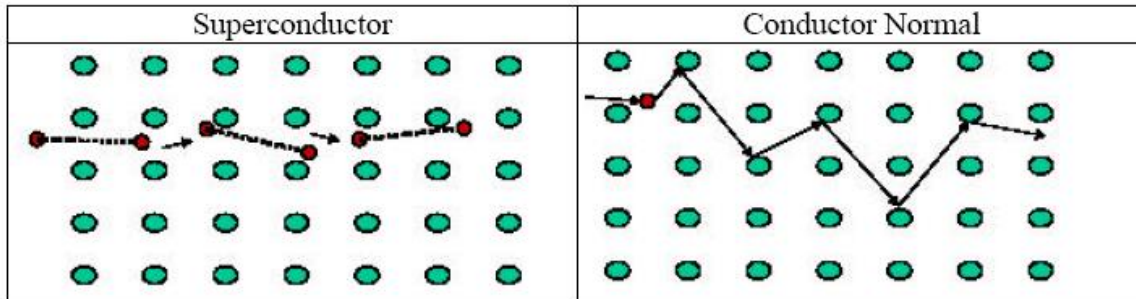
El efecto túnel (*tunnelling*) ocurrirá si eV , el producto de la carga de electrones donde $e = -1,6 \times 10^{-19}$ coulomb y el voltaje es al menos tan grande como la brecha de energía V . En la descripción de lo anteriormente descrito se asume que existen electrones que al aplicarse el efecto túnel, deben tomar su energía a través del voltaje aplicado más que por la excitación térmica.

Figura 8. **Punto de energía crítica para lograr un superconductor**



Fuente: *Superconductividad*. <http://users.df.uba.ar/giribet/f4/Supercv2.pdf>. Consulta: noviembre de 2012.

Figura 9. **Resistividad de un metal y un superconductor a baja temperatura**

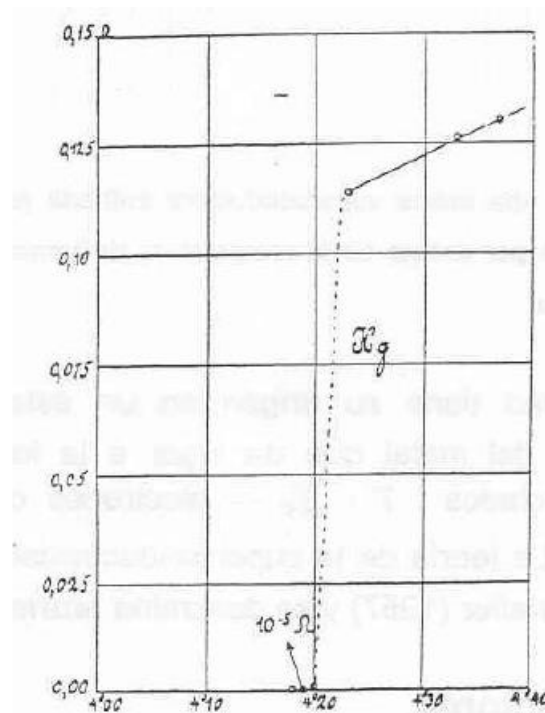


Fuente: elaboración propia, con Microsoft Visio.

2.2. Temperatura crítica

Se sabe que la resistencia de los metales disminuye cuando se enfrían por debajo de ciertas temperaturas, pero no estaba claro que pasa si la temperatura se acercara a 0 °K. Algunos científicos, creían que los electrones que fluyen por el conductor se detendrían, mientras que otros, como Onnes, pensaban que en una temperatura tan baja habría una disminución constante de la resistencia eléctrica, teniendo como consecuencia una mejor conducción. Por lo tanto el concepto práctico de superconductores utiliza el teorema de Onnes, que al pasar una corriente por un alambre de mercurio y medir su resistencia al bajar la temperatura y se observa que a 4,2 °K la resistencia desaparece repentinamente, era cero o nula. La corriente fluía por el alambre de mercurio.

Figura 10. **Función de temperatura**



Fuente: *Superconductividad*. <http://users.df.uba.ar/giribet/f4/Supercv2.pdf>. Consulta: noviembre de 2012.

La figura diez muestra la resistencia (en W) de una muestra de Hg en función de la temperatura (en °K). Esta es la gráfica de Kamerlingh Onnes que marcó el descubrimiento de la superconductividad.

Por lo tanto el proyecto de LIPA se basa en el teorema de Onnes, que al despejar o desaparecer la resistencia bajando la temperatura. Claro que esto es fácil si se toma una porción pequeña de cable, el problema surge cuando el cable mide cuando menos 200 kilómetros. Es acá cuando surge el método de criogenia fluida, en el cual se hace circular nitrógeno líquido a alta presión sobre los cables, si bien el experimento de Onnes logra alcanzar temperaturas de 4,2

grados Kelvin en el laboratorio, el proyecto LIPA alcanza la temperatura de 42 grados Kelvin.

Para que se logre la separación del oxígeno y del nitrógeno del aire, se requiere en primer lugar llegar a licuar el aire (llevarla a estado líquido). Esto se logra cuando las temperaturas son menores que $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (denominadas temperaturas criogénicas). Cabe señalar que la temperatura de licuación del oxígeno es de $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que la de nitrógeno es de $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$.

El proyecto LIPA de superconducción ha sido el producto de 2 años de instalación entre el 2009 y el 2010, el mayor desafío es que se necesita imperiosamente para lograr la superconductividad de temperaturas muy bajas, que solo se pueden obtener usando nitrógeno líquido (elemento difícil de mantener fluyendo sin pérdidas y que requiere de procesos complicados y costosos, para mantenerlo en su fase líquida). La superconductividad aplicada en LIPA se ve obligada a utilizar un revestimiento, sobre el cable hecho en malla de fibra de carbono flexible y un material cerámico aislante. Existen dos desafíos, hacer que el material cerámico sea flexible sobre la superficie, y que sabotadores que disparan a los cables no provoquen fugas.

ADCO trabajó con su equipo de científicos, realizando un trabajo con materiales similares a los que utilizó Onnes. Luego se intentó subir ligeramente la temperatura crítica mezclando compuestos para formar aleaciones superconductoras, y así, en 1993 la temperatura crítica fue duplicada para llegar a los $2,5\text{ }^{\circ}\text{K}$ (pero aún era muy baja para un proyecto financieramente utilizable en transmisión eléctrica). El proceso fue lento y frustrante, para 1999 se encontró la aleación de niobio y aluminio que se vuelve superconductor a $15\text{ }^{\circ}\text{K}$. Sin embargo, no fue sino hasta 2003, cuando la temperatura crítica alcanzó la barrera de los $40\text{ }^{\circ}\text{K}$. Este avance fue muy importante, puesto que el nitrógeno (el cual se licúa a 20° K) podía utilizarse por primera vez como otro

agente refrigerante, el cual por estar en forma licuado, líquida, puede ser bombeado por tuberías. Para demostrar el potencial de la tecnología ADCO instaló en Las Vegas, una línea de transmisión de 1 200 metros, transmitiendo potencia en una línea de 512 KV utilizando la aleación de niobio-aluminio.

Se planea que para el 2022, las líneas de transmisión de las centrales nucleares y de la presa Hoover utilicen superconductores de ADCO. En 2011, la temperatura crítica subió unos pocos grados más (a 53 °K) y durante aproximadamente una década más, ADCO está segura que lograra nuevas aleaciones para llegar al número mágico de 100 grados kelvin. Utilizando nuevos compuestos y aleaciones.

Por lo tanto se defina la temperatura crítica en la actualidad como 42 grados kelvin, que traducido a grados centígrados es: -231,15 grados centígrados.

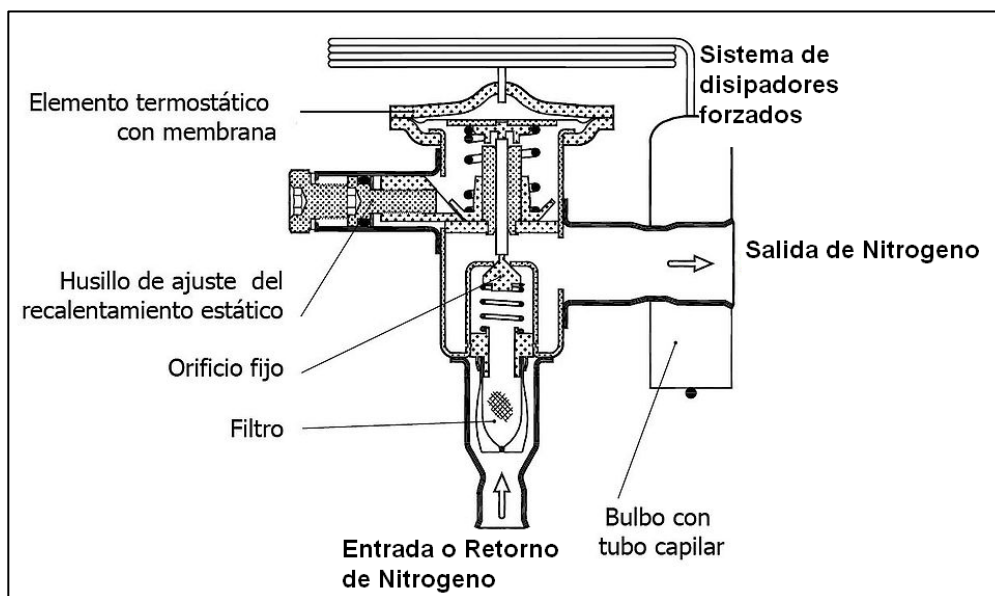
2.3. Diseño seleccionado por el estado de Nueva York

El sistema de enfriamiento para la línea de transmisión del proyecto LIPA es el llamado enfriamiento criogénico de LIPZ, llamado así por la empresa que lo diseñó. El sistema cuenta con un diseño de transferencia de temperatura, el cual intercambia temperatura entre dos zonas de frío, posteriormente los evaporadores de expansión directa, realizan una nueva transferencia de temperaturas, por lo tanto la temperatura extraída a los conductores es transferida a la atmósfera.

Se les denomina sistema de expansión seca o directa, a los sistemas frigoríficos en los cuales la evaporación del refrigerante se lleva a cabo a través de su recorrido por el evaporador.

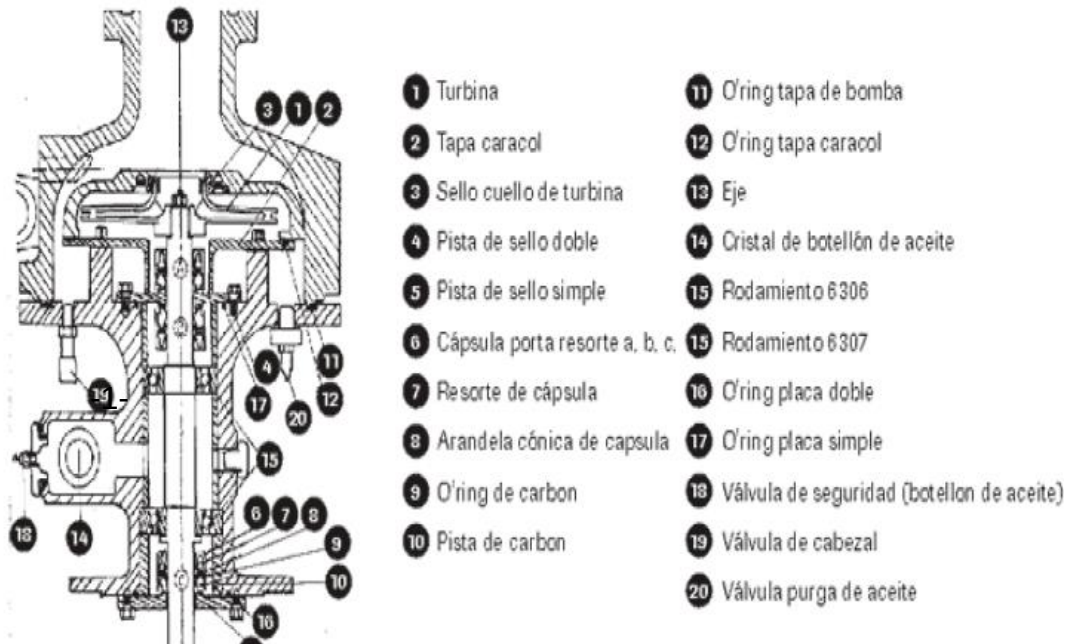
Los denominados sistemas criogénicos de transferencia de temperatura o sistemas de refrigeración, corresponden a arreglos mecánicos que utilizan propiedades termodinámicas de la materia, para trasladar energía térmica en forma de calor entre dos, o más focos de temperatura, conforme se requiera. Están diseñados primordialmente para disminuir la temperatura de los conductores y volverlos por transferencia térmica en superconductores, los conductores están recubiertos por una membrana llamada cámaras frigoríficas o cámaras de transferencia térmica, las cuales pueden contener únicamente a un conductor cada una. Se pueden instalar más de dos, pero en caso de un fallo del sistema criogénico los campos magnéticos se elevan y un cable induciría al otro, provocando fallos en las líneas. Por lo tanto, se adoptó el colocar en cada membrana un solo cable, llamado Condón Criogénico.

Figura 11. **Bomba de transferencia de nitrógeno licuado**



Fuente: *Esquema VET*. http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/01/Esquema_VET.jpg/270px-Esquema_VET.jpg. Consulta: noviembre de 2012.

Figura 12. **Bomba de nitrógeno**



Fuente: *Electrobombas y grupos de presión*. <http://www.kripsol.com/electrobombas-y-grupos-de-presion>. Consulta: noviembre de 2012.

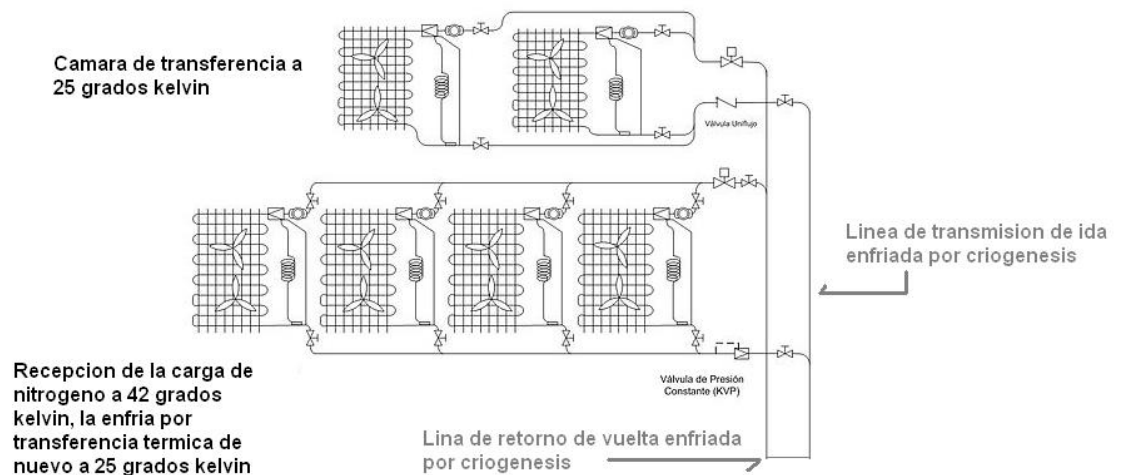
La figura 12 muestra el diseño de la bomba de nitrógeno, es una adaptación de la bomba de hidrógeno, (léase bomba de bombear), utilizada por los transbordadores espaciales que poseen cada bomba la misma potencia que 15 locomotoras. Se debe mencionar la radical diferencia entre un sistema criogénico y un circuito criogénico, siendo este último un mero arreglo para disminuir temperatura el cual se define como concepto, debido a que su diseño (abierto, semiabierto, cerrado), fluido (aire, agua, incluso gas refrigerante) y flujo (solo frío o bomba de calor) varían conforme la aplicación. Estos varían desde el clásico enfriamiento de nitrógeno por intercambio ambiental, por medio de agua hasta el *water cooling* utilizado en enfriamiento para superconductores. Los sistemas criogénicos tienden a ser bastante más complejos que un circuito de refrigeración.

En el estudio acabado y diseño de estos sistemas criogénicos se aplican diversas ciencias, tales como la química, en las propiedades y composición de los refrigerantes; la termodinámica, en el estudio de las propiedades de la materia y su energía interna; la transferencia de calor, en el estudio de intercambiadores de calor y soluciones técnicas; así como la ingeniería mecánica, en el estudio de compresores de nitrógeno para lograr el trabajo de compresión requerido. Se han mencionado estas disciplinas dejando de lado la electricidad, desde los tradicionales conocimientos en corrientes trifásicas para la alimentación de los equipos, hasta conocimientos relativamente avanzados en automatización y PLC, para el control automático que estos requieren cuando están operando el sistema criogénico.

Los sistemas criogénicos se diferencian entre sí, conforme su método de inyección de nitrógeno en su estado licuado o líquido y configuración constructiva, ambos condicionados por sus parámetros de diseño. De esta manera, y haciendo un adecuado balance de masas y energías, es posible encontrar la solución adecuada a cualquier solicitud criogénica.

En la figura siguiente se muestra el sistema de refrigeración de una línea, utilizada en el Proyecto LIPA. Cabe mencionar que posee dos puntos de refrigeración pues, si bien se tiene solo una línea cubierta por la membrana, cuando se encuentra en su camino de ida, cuando vuelve o cierra el circuito toma otra de las líneas, maximizando el trabajo y los recursos. Por lo tanto con un circuito criogénico se vuelven superconductores dos líneas de transmisión, y unificándolas todas, en un solo circuito se puede convertir en un sistema criogénico continuo para todas las líneas de transmisión.

Figura 13. **Diseño del sistema de enfriamiento criogénico**



Fuente: elaboración propia, con Microsoft Visio.

2.4. **Parámetros de diseño**

El diseño de estos sistemas criogénicos se define, principalmente, en función de los siguientes parámetros:

- Temperaturas de operación: (temperaturas de evaporación y condensación).
- Capacidad del sistema, generalmente denominada en KW definida en función de la carga térmica.
- Porcentaje de nitrógeno circulante y perdido de propiedades, condiciones amigables ambientalmente.
- Costos operativos del sistema.
- Sistemas de refrigeración conforme zonas de frío.

2.5. Estación de planta criogénica

Los sistemas de criogénicos implementados en el proyecto LIPA, tanto en la planta de circulación de nitrógeno licuado, como en el área de intercambio de temperatura. Se clasifica primeramente conforme las denominadas zonas de frío o temperaturas para las cuales han sido diseñadas, a la entrada tiene una temperatura de 25 grados Kelvin y a la salida de 42 grados Kelvin. Luego se produce la transferencia de temperaturas y a la salida de nuevo posee 25 grados Kelvin.

Figura 14. **Planta de circulación criogénica de salida, igual es la entrada**



Fuente: Universidad de Alicante. <http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/17271/1/refrigeracion.pdf>. Consulta: abril de 2013.

2.6. Zona de frío

Así se llama el arreglo en el cual el sistema opera bajo una sola temperatura de régimen. Es decir, entre una temperatura de condensación y una sola temperatura de evaporación del nitrógeno, cuando existen dos o más o más zonas de frío. Es en el sistema en el cual el nitrógeno, condensado a una sola temperatura, se evapora a distintos valores en función de distintos puntos. A modo de ejemplo, el cable conductor tiene una temperatura de salida de 25 grados Kelvin, existirán distintos puntos de frío, pues a la salida posee 42 grados. Esto indica que existe una transferencia, pero también distintos puntos de frío.

También se considera los sistemas de criogénesis conforme alimentación de refrigerante, los ductos evaporadores generalmente inundan de vapor las áreas de trabajo como se muestra en la figura siguiente.

Figura 15. **Área de trabajo inundada de vapor**



Fuente: Universidad de Alicante. <http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/17271/1/refrigeracion.pdf>. Consulta: abril de 2013.

En el modelo del diseño se consideró la expansión seca. El cual es parte del efecto del evaporador de expansión seca, y se le denomina sistema de expansión seca, o directa. Al sistema criogénico en el cual la evaporación del nitrógeno se lleva a cabo a través de su recorrido por el evaporador, encontrándose este en estado de mezcla en un punto intermedio de este. Estos sistemas, si bien son los más comunes, no se utilizaron en el proyecto LIPA pues para evitar la condensación se necesitaría elevar el coste del sistema de refrigeración en un 40 % del valor actual. Esto se debe a que su único beneficio es la no condensación, pero poseen de menor capacidad que los de recirculación de líquido.

Figura 16. **Sistema de condensación seco, es pequeño y caro**



Fuente: Universidad de Alicante. <http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/17271/1/refrigeracion.pdf>. Consulta: abril de 2013.

La recirculación licuada es la diferencia a los sistemas de recirculación normales, a los de expansión directa es que el flujo másico de líquido a los evaporadores supera con creces al flujo de vapor producido en el evaporador. Es común el apelativo de sobrealimentación de líquido para los evaporadores de estos sistemas. Estos sistemas son preferentemente utilizados en el laboratorio de campos magnéticos que utilizan helio superenfriado o nitrógeno, posee un número considerable de evaporadores y opera a muy bajas temperaturas, siendo su record los 10 grados kelvin.

2.7. Tipos y configuración de sistemas criogénicos utilizados

Refrigeración por compresión desplaza la energía térmica entre dos focos creando zonas de alta y baja presión confinadas en intercambiadores de calor, mientras estos procesos de intercambio de energía se suceden cuando el nitrógeno se encuentra en procesos de cambio de estado de líquido a vapor y viceversa.

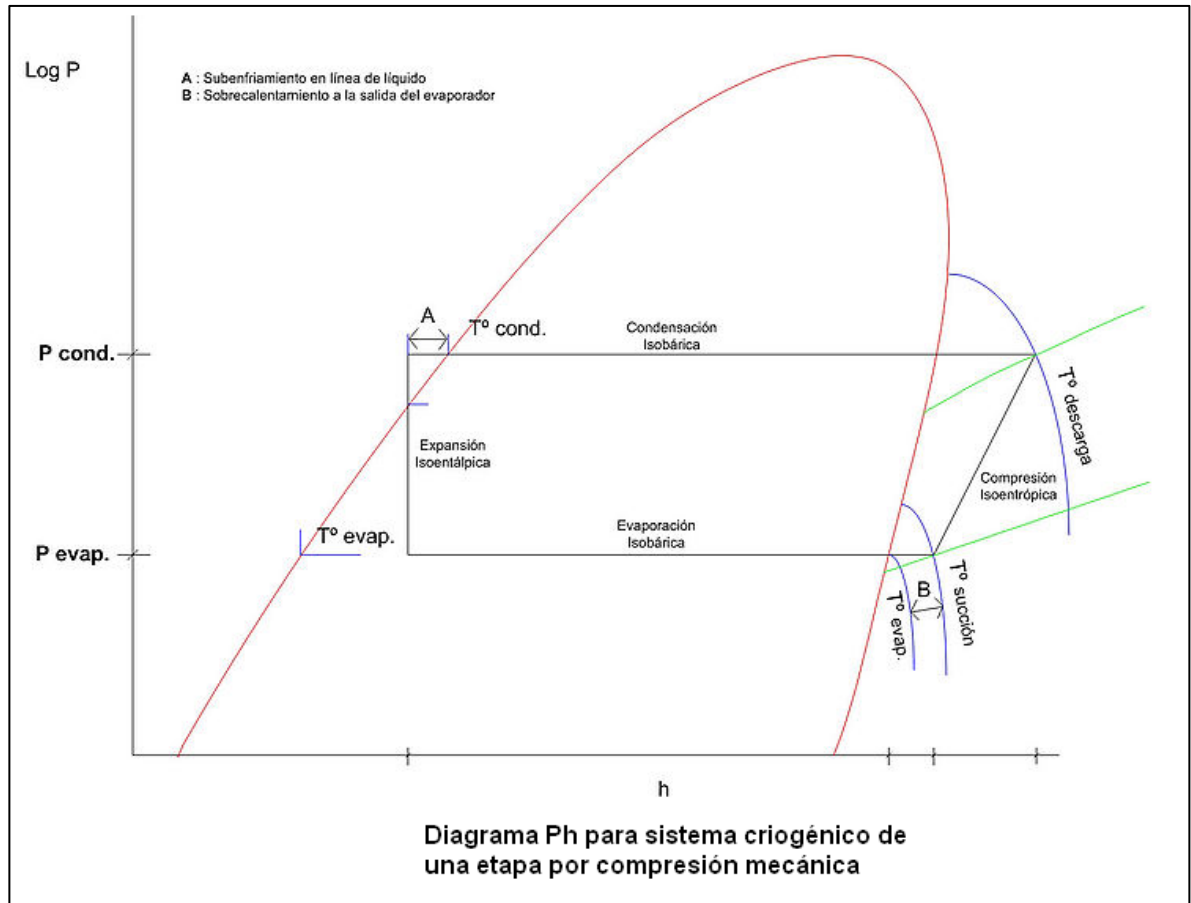
El proceso de criogénesis por compresión se logra evaporando nitrógeno en estado líquido a través de un dispositivo de expansión, dentro de un intercambiador de calor, denominado evaporador. Para evaporarse este requiere absorber calor latente de vaporización. Al evaporarse el nitrógeno cambia su estado a vapor. Durante el cambio de estado el nitrógeno en estado de vapor absorbe energía térmica del medio en contacto con el evaporador, bien sea este medio gaseoso o líquido. A esta cantidad de calor contenido en el cable conductor se le denomina carga térmica. Luego de este intercambio energético, un compresor mecánico se encarga de aumentar la presión del vapor, para poder condensarlo dentro de otro intercambiador de calor conocido como condensador. En este intercambiador se liberan del sistema criogénico tanto el calor latente como el sensible, ambos componentes de la carga térmica.

Ya que este aumento de presión además produce un aumento en su temperatura, para lograr el cambio de estado del nitrógeno y producir el superenfriamiento, es necesario enfriarlo al interior del condensador. Esto suele hacerse por medio de aire y/o agua conforme el tipo de condensador, definido muchas veces en función de la compresión del nitrógeno. De esta manera, el nitrógeno ya en estado líquido, puede evaporarse nuevamente a través de la válvula de expansión y repetir el ciclo de criogénesis por compresión.

Los tipos de compresión son sistemas de criogénesis por compresión, se diferencian o separan en dos grandes tipos:

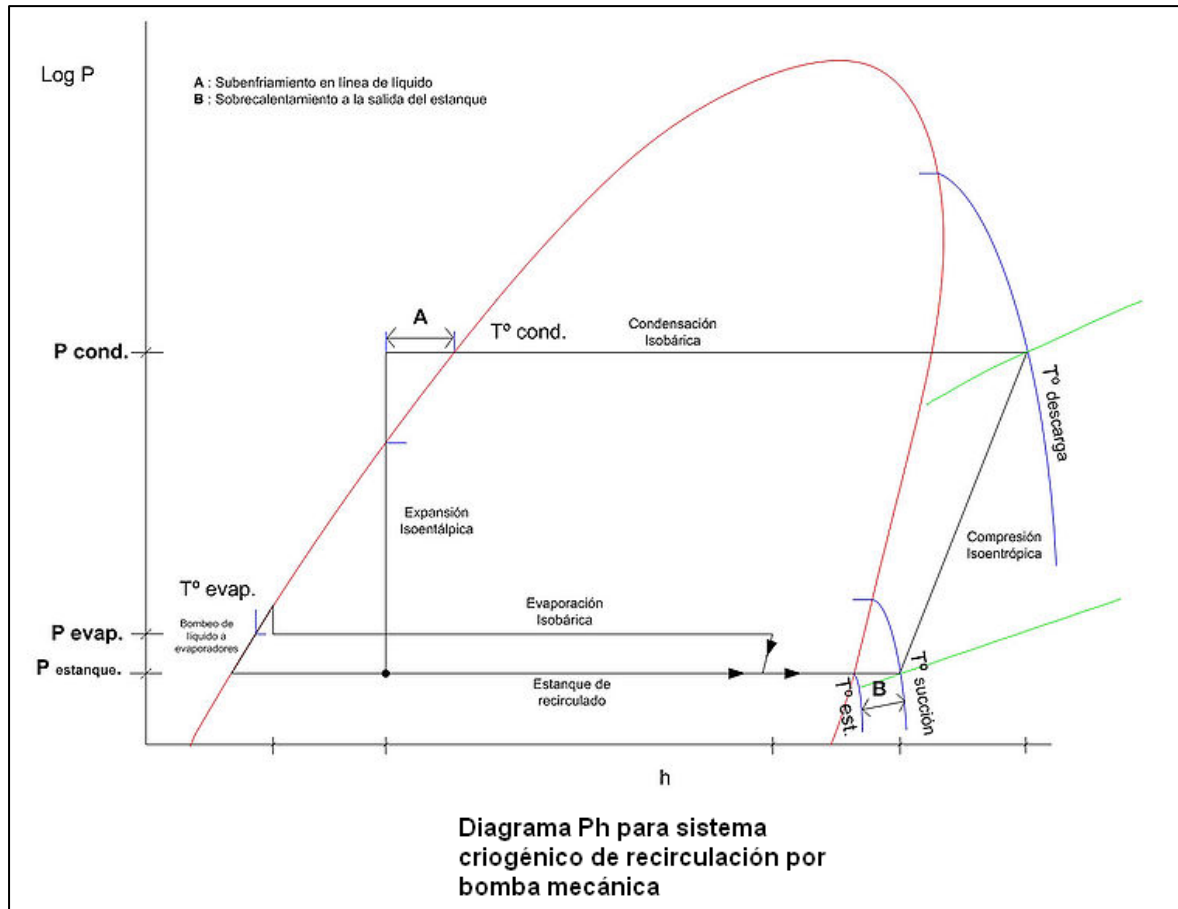
- Sistemas de compresión simple, es el sistema más generalizado de refrigeración. Es la producción de frío por compresión de vapor, que consistente en un circuito cerrado en el que se somete un fluido refrigerante, a sucesivas situaciones de cambios de estado, mediante compresión y expansión, transmitiendo y absorbiendo el calor producido con el ambiente y el medio a refrigerar.
- El segundo es el sistemas de compresión múltiple, que es la solución de compresión ideal para bajas temperaturas debido a las altas relaciones de compresión que estos sistemas superan, y es el utilizando en el proyecto LIPA.
- Por medio de los diagramas presión/entalpía es posible trazar ciclos criogénicos de compresión de diversa naturaleza, determinar capacidad y selección detallada de los componentes y la potencia total del sistema. A continuación se presentan dos ejemplos de sistemas.

Figura 17. Sistema de compresión mecánica



Fuente: Compresión mecánica. [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/52/Ph_simple_etapa.jpg/ 300px-Ph_simple_etapa.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/52/Ph_simple_etapa.jpg/300px-Ph_simple_etapa.jpg). Consulta: abril de 2013.

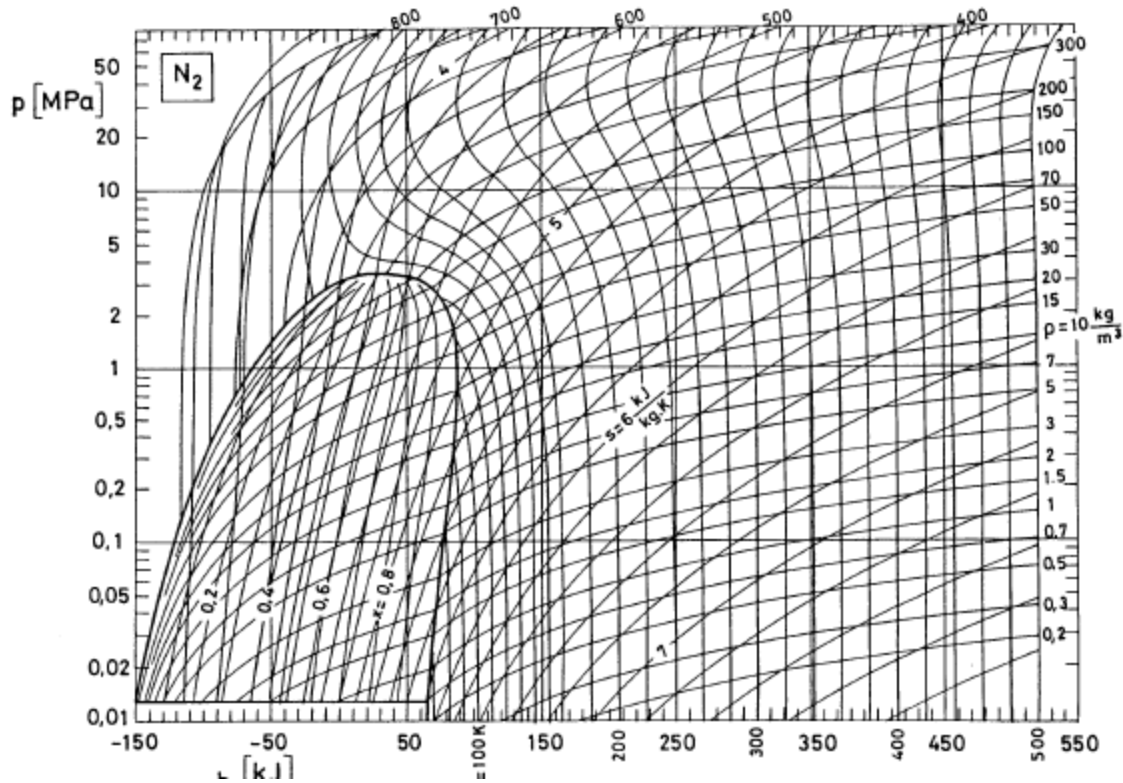
Figura 18. Sistema de recirculación por bomba mecánica



Fuente: Compresión mecánica. <http://www.sabetodo.com/contenidos/multimedia/2501071.gif>.

Consulta: noviembre de 2012.

Figura 19. Diagrama del nitrógeno



Fuente: *Propiedades de las sustancias puras*. <https://encrypted-tbn2.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcT0GjG7MfkxMFVmVuGaAUk5zBqH22RoHH0dWd1h4fsCpPuloU63>. Consulta: noviembre de 2012.

2.8. Casos en transitorio

Luego del diseño base aplicado al proyecto LIPA es necesario encontrar las mejores técnicas disponibles o MTD y se trata de situar el comportamiento medioambiental del sistema de refrigeración criogénico. En el contexto global del proceso de transmisión eléctrica y de minimizar los efectos directos e indirectos de su funcionamiento, de acuerdo con la experiencia de que dicho comportamiento depende en gran medida de la elección del sistema y de su

diseño. Por lo tanto, el criterio a seguir en las nuevas instalaciones criogénicas es prevenir las emisiones con un sistema de refrigeración debidamente diseñado, montado y configurado, además de reducirlas mediante la optimización de su funcionamiento diario.

Los sistemas de refrigeración criogénicas actuales tienen menos posibilidades de prevención a corto plazo con la adopción de medidas tecnológicas, por lo que se hace hincapié en la reducción de las emisiones mediante la optimización del funcionamiento y el control del sistema. Estos sistemas pueden tener muchos parámetros fijos (como el espacio, la disponibilidad de los recursos de explotación o los requisitos legales vigentes), con escaso margen de libertad para introducir cambios. Sin embargo, el enfoque general basado en MTD que se plantea en el proyecto de LIPA se considera un objetivo a largo plazo, adaptable a los ciclos de sustitución de los equipos en las instalaciones ya existentes.

En el enfoque integrado, se reconoce que la refrigeración criogénica es una parte esencial del proceso de un superconductor y que debe considerarse un elemento fundamental del sistema global de transmisión eléctrica del futuro de gestión energética. En los procesos criogénicos, es muy importante utilizar la energía de forma eficiente, tanto desde el punto de vista medioambiental como de la rentabilidad. Lo primero que debe tenerse en cuenta para la MTD es la eficiencia energética total del proceso, antes de adoptar medida alguna para optimizar el sistema criogénico.

Para aumentar su eficiencia energética total, la empresa ADCO intenta reducir la cantidad de calor irre recuperable, realizando una gestión adecuada de la energía y aplicando diversos programas de ahorro integrados, incluido el intercambio de energía entre distintas unidades del proceso criogénico, así

como enlaces con procesos adyacentes. Existe una tendencia hacia un concepto de recuperación de calor, para el sistema de calefacción de zonas circundantes a los equipos criogénicos, cuando los establecimientos industriales están relacionados entre sí o con sistemas de calefacción colectiva o cultivos en invernaderos. Cuando ya no es posible recuperar o reutilizar más calor, puede ser necesario liberarlo al ambiente.

El calor irrecuperable puede ser de nivel bajo (10-25 °C), medio (25-60 °C) y alto (60 °C). Por regla general, se utilizan sistemas de criogénicos por vía húmeda para el calor de bajo nivel y por vía seca para el de alto nivel. Para el nivel medio no hay un principio criogénico preferible y pueden hallarse distintas configuraciones. Una vez optimizada la eficiencia energética total del proceso, queda cierta cantidad de calor irrecuperable de un determinado nivel. Para decidir qué configuración se va a utilizar para disipar este calor, es necesario buscar un equilibrio entre:

- Las necesidades criogénicas del proceso de superconducción
- Las limitaciones locales (incluidas las de carácter legal)
- Los requisitos medioambientales

Las necesidades de superconducción deben quedar siempre satisfechas para asegurar la fiabilidad del proceso, incluidas las fases de salida y entrada de nitrógeno. El proceso debe tener garantizada su temperatura mínima y capacidad de enfriamiento necesario en todo momento, con el fin de aumentar su eficiencia y reducir la pérdida de temperatura y las emisiones al medio ambiente.

Cuanto más sensible a la temperatura es el superconductor, más importante será este aspecto. Las condiciones locales limitan las opciones de diseño y funcionamiento del sistema criogénico. Es el caso del nitrógeno, la disponibilidad de este para la refrigeración, el espacio disponible para los montajes y la sensibilidad de la zona circundante a las emisiones. En función de la demanda y capacidad criogénicas del proceso, la elección del tipo de construcción para una nueva instalación puede ser muy importante (por ejemplo: un sitio donde haya una gran fuente de abastecimiento de plantas de nitrógeno). Si esta elección se rige por otros criterios, las necesidades de criogénicas y las características locales son parámetros fijos.

La meteorología local es importante, ya que afecta a la temperatura del nitrógeno y el aire utilizados. El clima se caracteriza por el patrón de temperaturas de bulbo húmedo y seco. En general, los sistemas están diseñados para satisfacer las necesidades del proceso en las condiciones climáticas menos favorables, es decir, con temperaturas máximas de bulbo húmedo o seco.

El siguiente paso en la selección y el diseño del sistema criogénico va en la dirección de cumplir los requisitos de la MTD, en función de las necesidades del proceso de superconducción y de las limitaciones locales. Esto significa que hay que hacer hincapié en la selección de materiales y equipos adecuados para reducir el mantenimiento, facilitar el funcionamiento del sistema y cumplir los requisitos medioambientales. Además de la liberación de calor al medio ambiente, pueden producirse otros efectos, como la emisión de los aditivos utilizados para acondicionar los sistemas criogénicos. Hay que destacar que, si es posible reducir el nivel y cantidad del calor que se ha de disipar, el impacto ambiental del sistema industrial será menor.

2.9. Sistemas criogénicos utilizados

Los sistemas criogénicos se basan en principios termodinámicos y están diseñados para promover el intercambio de calor entre el proceso, en este caso el cable con propiedades de superconducción y el refrigerante, nitrógeno, y para facilitar la liberación del calor irrecuperable al medio ambiente. Los sistemas de refrigeración criogénica pueden clasificarse en función de su diseño y de su principio básico de funcionamiento: nitrógeno o helio, o una combinación de ambos.

El intercambio calorífico entre el medio de proceso y el nitrógeno o refrigerante se intensifica a través de intercambiadores, donde el refrigerante descarga su calor al ambiente. En los sistemas abiertos, el refrigerante está en contacto con el ambiente, cosa que no ocurre en los sistemas cerrados, donde el refrigerante o el medio de proceso circulan por tubos o serpentines.

Los sistemas sin recirculación suelen utilizarse en instalaciones de gran capacidad, que disponen de un suministro suficiente de nitrógeno para la refrigeración y que están situadas junto a la cámara de intercambiadores superficiales, que sirve como medio receptor de los vertidos. Cuando no se dispone de un suministro de nitrógeno fiable, se utilizan sistemas con recirculación (torres de refrigeración para nitrógeno en forma forzada).

En las torres de recirculación de nitrógeno abiertas, el nitrógeno refrigerante se enfría, transferencia con una corriente de aire. Estas torres están equipadas con dispositivos que aumentan la superficie de contacto de aire y agua.

La corriente de aire se crea tipo mecánico, utilizando ventiladores. Las instalaciones de pequeña o gran capacidad utilizan mucho las torres de tipo mecánico, mientras que las instalaciones de gran capacidad (como las industrias las utilizadas en superconducción eléctrica), utilizan principalmente las torres de tipo natural.

En los sistemas de circuito cerrado, los tubos o serpentines por los que circula el nitrógeno o el medio de proceso, tienen su propio sistema de refrigeración con el que enfrían el nitrógeno que contienen. En los sistemas de proceso húmedo, la corriente de aire enfría por evaporación, los tubos o serpentines rociados con agua. Los sistemas de proceso seco solo utilizan la corriente de aire. En ambos casos, los serpentines pueden ir provistos de aletas, que amplían la superficie de refrigeración y, por lo tanto, el efecto refrigerante. Los sistemas húmedos de circuito cerrado, se utilizan mucho en la industria para las instalaciones de menor capacidad. El principio de refrigeración con aire seco puede encontrarse en pequeñas instalaciones de laboratorios de superconducción o también en grandes tramos de conducción eléctrica, cuando no se dispone de nitrógeno suficiente.

Los sistemas de refrigeración por nitrógeno híbrida, abierta o cerrada, son torres mecánicas de diseño especial que pueden utilizar la vía seca o la húmeda, para reducir la formación de penachos visibles. Con la opción de que los sistemas funcionen por la vía seca (en particular, las pequeñas unidades de tipo celular) durante períodos de baja temperatura del nitrógeno, puede reducirse además el consumo anual de nitrógeno.

La tabla siguiente ejemplifica las características técnicas y termodinámicas de los diferentes sistemas utilizados en el proyecto LIPA, para la refrigeración de los conductores que se utilizan en las instalaciones de superconducción.

Tabla III. Refrigeración por nitrógeno en el proyecto LIPA

Sistema de refrigeración	Medio refrigerante	Principio básico de refrigeración	Aproximación mínima (K) ⁴⁾	Temperatura final mínima alcanzable en el medio de proceso ⁵⁾ (°K)	Capacidad del proceso industrial (MW _{th})
Sistema abierto sin recirculación, directo.	Nitrógeno	Conducción / convección	3 – 5	18 – 20	< 0,01 – > 2.000
Sistema abierto sin recirculación, indirecto.	Nitrógeno	Conducción / convección	6 – 10	21 – 25	< 0,01 – > 1.000
Sistema abierto con recirculación, directo.	Nitrógeno	Evaporación ³⁾	6 – 10	27 – 31	< 0,1 – > 2.000
Sistema abierto sin recirculación, indirecto.	Nitrógeno	Evaporación ³⁾	9 – 15	30 – 36	< 0,1 – > 200
Sistema húmedo de circuito cerrado.	Nitrógeno	Evaporación + convección	7 – 14 ⁷⁾	28 – 35	0,2 – 10
Sistema de aire seco de circuito cerrado.	Nitrógeno	Convección	10 – 15	40 – 45	< 0,1 – 100
Sistema abierto híbrido.	Nitrógeno	Evaporación + convección	7 – 14	28 – 35	0,15 – 2,5 ⁶⁾
Sistema abierto cerrado.	Nitrógeno	Evaporación + convección	7 – 14	28 – 35	0,15 – 2,5 ⁶⁾

Fuente: *Sistemas de refrigeración*. <http://www.prtr-es.es/data/images/Resumen%20Ejecutivo%20BREF%20Refrigeraci%C3%B3n%20y%20Vac%C3%ADo-0BBE00E0169AC61A.pdf> Consulta: noviembre de 2012.

En la tabla tres se especifican las características de los sistemas de refrigeración por nitrógeno utilizados en el proyecto de LIPA, en un entorno climático como el del estado de Nueva York. La temperatura final del medio de proceso que sale del intercambiador, depende de la temperatura del nitrógeno y del diseño del sistema de refrigeración. El nitrógeno tiene mayor capacidad térmica específica que el helio y, por lo tanto, es el mejor refrigerante. La temperatura del helio y del nitrógeno que se utilizan como medios refrigerantes, depende de las temperaturas locales de bulbo húmedo y seco. Cuanto más elevadas sean estas, más difícil será conseguir que el proceso alcance una temperatura final deseada.

La temperatura final del proceso se obtiene sumando la temperatura ambiente mínima (del nitrógeno), y la diferencia mínima necesaria entre la temperatura del refrigerante (que entra al sistema de refrigeración), y la temperatura del medio de proceso después del intercambiador (que sale del sistema), la cual recibe también el nombre de aproximación (térmica). Desde el punto de vista técnico, la aproximación puede ser muy pequeña por diseño, pero el coste es inversamente proporcional a la capacidad. Cuanto menor es la aproximación, menor puede ser la temperatura final.

Cada intercambiador tiene su propia aproximación y cuando se instalan intercambiadores adicionales, se suman todas las aproximaciones a la temperatura del nitrógeno (que entra al sistema), para obtener la temperatura final que puede alcanzarse en el proceso.

En los sistemas de criogénesis indirectos se utilizan intercambiadores adicionales, cuando se instala un circuito de refrigeración suplementario. Este circuito secundario se conecta al primario por un intercambiador. Los sistemas indirectos se utilizan cuando es rigurosamente obligado evitar fugas de sustancias de proceso al medio ambiente.

En los sistemas de refrigeración que se utilizan en el sector de la superconducción eléctrica, las aproximaciones y capacidades de refrigeración mínimas son algo diferentes que en los laboratorios de superconducción, debido a las especiales características del proceso de condensación de vapor. A continuación se resumen las distintas aproximaciones y capacidades de generación de energía.

En la tabla siguiente se ejemplifica la capacidad y características termodinámicas de los diferentes sistemas de refrigeración criogénica que se utilizan en proyectos de superconducción.

Tabla IV. **Sistemas de refrigeración criogénica**

Sistema de refrigeración	Aproximaciones aplicadas (K)	Capacidad del proceso de generación de energía (MW _{th})
Sistemas abiertos sin recirculación.	13-20 (diferencia terminal 3-5)	< 2.700
Torre de refrigeración abierta de proceso húmedo.	7-15	< 2.700
Torre de refrigeración abierta de proceso híbrido.	15-20	< 2.500
Condensador refrigerado por aire seco.	15-25	< 900

Fuente: *Sistemas de refrigeración*. <http://www.prtr-es.es/data/images/Resumen%20Ejecutivo%20BREF%20Refrigeraci%C3%B3n%20y%20Vac%C3%ADo-0BBE00E0169AC61A.pdf> Consulta: noviembre de 2012.

2.10. Aspectos medioambientales de los sistemas criogénicos utilizados

Los aspectos medioambientales de los sistemas criogénicos varían según su configuración, pero lo más importante es aumentar la eficiencia energética total y la reducción de las emisiones al medio. Los niveles de emisión y consumo son muy específicos de la instalación y cuando es posible cuantificarlos, presentan grandes variaciones. De acuerdo con la filosofía del enfoque integrado basado en las MTD, hay que tener en cuenta los efectos cruzados en la evaluación de cada aspecto medioambiental y de las medidas de reducción conexas.

- Consumo de energía

El consumo específico de energía, directo o indirecto, es un aspecto medioambiental importante para todos los sistemas criogénicos. El consumo indirecto de energía es el que corresponde al proceso de superconducción. Este consumo puede aumentar si el rendimiento del sistema de refrigeración no es óptimo debido a su configuración, lo cual puede dar lugar a un aumento de la temperatura del proceso (ΔK), que se expresa en $kWe/MWth/K$.

El consumo directo de energía se expresa en $kWe/MWth$ y hace referencia a la cantidad de energía que consumen todos los equipos (bombas, ventiladores) del sistema de refrigeración por cada $MWth$ que se disipa.

Medidas para reducir el consumo indirecto de energía son:

- Seleccionar la configuración que tenga menor consumo indirecto (en general, sistemas sin recirculación).
- Aplicar un diseño con pequeñas aproximaciones.
- Reducir la resistencia al intercambio calorífico mediante un correcto mantenimiento del sistema de refrigeración criogénico.

Como ejemplo, si se trata de una línea de transmisión, al pasar a un sistema con recirculación se produce un aumento del consumo de energía de los equipos auxiliares, así como una merma de eficiencia en el ciclo térmico.

Para reducir el consumo directo, existen bombas y ventiladores más eficientes. Se puede reducir la resistencia y las caídas de presión del nitrógeno en el proceso, modificando el diseño del sistema de refrigeración o instalando eliminadores de deriva de baja resistencia y membranas termotécnicas

especiales en las torres. La correcta limpieza química o mecánica de las superficies es esencial para mantener baja la resistencia del proceso en funcionamiento.

- Nitrógeno: el nitrógeno es importante en los sistemas de proceso como principal refrigerante en los métodos de superconducción, pero también como medio receptor de los vertidos que se generan. Cuando se realizan grandes circulaciones de nitrógeno, las impurezas de otros gases y otros elementos son arrastrados y golpeados. El vertido de grandes cantidades de nitrógeno también puede afectar al medio, pero este impacto puede controlarse colocando las tuberías de toma y desagüe gaseoso en puntos adecuados, y evaluando los flujos para comprobar la adecuada mezcla y dispersión advectiva del nitrógeno vertido.

El consumo de nitrógeno oscila entre 1 500 m³/h/MWth para línea de transmisión en sistema abierto de proceso híbrido, y hasta 8 600 m³/h/MWth para un sistema abierto sin recirculación. Para reducir las grandes tomas de nitrógeno que necesitan los sistemas sin recirculación, es necesario cambiar a sistemas recirculantes. De este modo, se reducen también los vertidos de grandes cantidades de agua caliente y las emisiones de productos químicos y residuos. El consumo de agua de los sistemas recirculantes puede reducirse aumentando el número de ciclos, mejorando el proceso de reposición.

- Emisiones de calor superficial

Como ya se ha dicho, las emisiones de calor pueden causar un impacto ambiental. Factores de influencia son, por ejemplo, la capacidad de refrigeración del nitrógeno y su temperatura y situación ecológica. Los vertidos de residuos que se han calentado tras ser utilizadas como medio refrigerante,

pueden hacer que se sobrepasen los niveles de calidad medioambiental correspondientes a las temperaturas que se registran durante el período estival.

La Directiva 78/659/CEE aplicada en el proyecto LIPA refleja los requisitos térmicos aplicables a dos sistemas ecológicos del estado de Nueva York, dado que las plantas de enfriamiento criogénico se encuentran en las riveras del río Hudson afectan a las aguas de salmónidos y aguas de ciprínidos. Con respecto al impacto ambiental que producen las emisiones de calor, no solo importa la temperatura propia de las aguas receptoras, también el aumento de temperatura que se registra en los límites de la zona de mezcla, como consecuencia de los vertidos calientes del proceso de refrigeración del nitrógeno. El alcance del impacto ambiental depende tanto de la cantidad como del nivel del calor emitido en relación con las dimensiones de la masa de agua receptora. Si los vertidos se realizan en masas de agua relativamente pequeñas y el penacho de agua caliente alcanza la margen opuesta del río o canal, pueden crear barreras a la migración de los salmónidos.

Además de estos efectos, las elevadas temperaturas que producen las emisiones de calor pueden provocar un aumento de la respiración y de la producción biológica (eutrofización), reduciendo la concentración de oxígeno en el agua.

A la hora de diseñar un sistema de refrigeración criogénico, deben tenerse en cuenta todos estos aspectos y las posibilidades de reducir el calor que se disipa en las aguas superficiales.

- Emisiones de sustancias a las aguas superficiales

Las sustancias que emiten los sistemas de refrigeración a las aguas superficiales pueden ser:

- Aditivos que se añaden al nitrógeno refrigerante y sus componentes reactantes.
- Sustancias que son transportadas por el aire a una torre de refrigeración.
- Productos de la corrosión de los equipos que integran los sistemas de refrigeración.
- Fugas de productos químicos de proceso y los productos de su reacción.

Para garantizar el correcto funcionamiento de los sistemas criogénicos puede ser necesario tratar el agua refrigerante para evitar la corrosión, la oxidación y las micro/macroincrustaciones en los equipos. El tratamiento será diferente según se trate de sistemas con o sin recirculación.

En estos últimos, pueden ser tratamientos bastante complejos, que utilicen muy diversos productos químicos. En consecuencia, las emisiones que generan las purgas de estos sistemas también son muy variables y es difícil establecer niveles representativos. A veces se aplica un tratamiento a las aguas purgadas antes de realizar la descarga. Las emisiones de biocidas oxidantes en los sistemas abiertos sin recirculación (medidas como oxidantes libres en la salida) oscilan entre 0,1 [mg FO/l] y 0,5 [mg FO/l], en función de las pautas y frecuencias de dosificación.

En la tabla siguiente, se muestran los componentes químicos de los tratamientos aplicados al agua utilizada en sistemas criogénicos abiertos y recirculantes.

Tabla V. **Componentes químicos en sistemas criogénicos**

Ejemplos tratamiento químico * de	Problemas de calidad del agua					
	Corrosión		Oxidación		Bioincrustaciones	
	Sistemas sin recir- culación	Sistemas recircu- lantes	Sistemas sin recir- culación	Sistemas recircu- lantes	Sistemas sin recir- culación	Sistemas recircu- lantes
Zinc		X				
Molibdatos		X				
Silicatos		X				
Fosfonatos		X		X		
Polifosfonatos		X		X		
Esteres poliólicos				X		
Compuestos orgánicos naturales				X		
Polímeros	(X)		(X)	X		
Biocidas no oxidantes						X
Biocidas oxidantes					X	X
* el cromato ya no se usa tanto como antes, debido a su fuerte impacto ambiental.						

Fuente: *Sistemas de refrigeración*. <http://www.prtr-es.es/data/images/Resumen%20Ejecutivo%20BREF%20Refrigeraci%C3%B3n%20y%20Vac%C3%ADo-0BBE00E0169AC61A.pdf> Consulta: noviembre de 2012.

Una forma de reducir las fugas y la corrosión puede ser seleccionar e instalar equipos criogénicos, hechos de materiales adecuados para el entorno en el que han de funcionar. Este entorno se define por:

- Las condiciones del proceso, como la temperatura, la presión o el caudal
- Los medios refrigerados
- Las características químicas del agua refrigerante

Los materiales más utilizados para fabricar intercambiadores, conductos, bombas y carcasas son el acero al carbono, la niquelina y varias clases de acero inoxidable, pero cada vez se utiliza más el titanio (Ti). También se aplican revestimientos y pinturas para proteger la superficie.

- Uso de biocidas

Los sistemas abiertos sin recirculación se tratan principalmente con biocidas oxidantes para evitar las macroincrustaciones. La cantidad aplicada puede expresarse en equivalentes del cloro por MWth, en relación con el alcance de las incrustaciones en el intercambiador o en sus proximidades. Utilizar halógenos es perjudicial para el medio ambiente, porque se forman subproductos halogenados.

En los sistemas abiertos con recirculación, el nitrógeno se somete a un pretratamiento contra la oxidación, la corrosión y la microincrustación. Debido a que los sistemas recirculantes trabajan con volúmenes de nitrógeno relativamente menores. Es posible aplicar con éxito tratamientos alternativos como el ozono o la luz ultravioleta, aunque requieren condiciones de proceso específicas y pueden ser bastante caras.

- Refrigeración por convección

La convección es el mecanismo de transferencia de calor a través de un fluido con movimiento masivo de este, para el presente caso la circulación de nitrógeno en forma masiva sobre el cable superconductor. En la convección existe movimiento del fluido a nivel macroscópico, mientras que en la conducción existe movimiento a nivel microscópico, atómico o molecular, pero

no a nivel macroscópico, entendiendo como nivel macroscópico movimiento de volúmenes relativamente grandes del fluido.

La convección se clasifica en natural y forzada. En la convección forzada se obliga al fluido a fluir mediante medios externos, como un ventilador o una bomba. En la convección natural el movimiento del fluido es debido a causas naturales, como el efecto de flotación, el cual se manifiesta con la subida del fluido caliente y el descenso del fluido frío.

La convección forzada se clasifica a su vez en externa e interna, dependiendo de si el flujo de fluido es interna o externa. El flujo de un fluido se clasifica como interno o externo, dependiendo de si se fuerza al fluido a fluir por un canal confinado (superficie interior) o por una superficie abierta. El flujo de un fluido no limitado por una superficie (placa, alambre, exterior de un tubo) es flujo externo. El flujo por un tubo o ducto es flujo interno si ese fluido está limitado por completo por superficies sólidas. El flujo de líquidos en un tubo se conoce como flujo en canal abierto si ese tubo está parcialmente lleno con el líquido y se tiene una superficie libre.

La velocidad de transferencia de calor a través de un fluido es mucho mayor por convección que por conducción. Cuanto mayor es la velocidad del fluido mayor es la velocidad de transferencia de calor.

La transferencia de calor por convección depende de las propiedades del fluido, de la superficie en contacto con el fluido y del tipo de flujo. Entre las propiedades del fluido se encuentran: la viscosidad dinámica μ , la conductividad térmica k , la densidad ρ . También se podría considerar que depende de la viscosidad cinemática ν , puesto que $\nu = \mu / \rho$. Entre las propiedades de la superficie que intervienen en la convección están la

geometría y la aspereza. El tipo de flujo, laminar o turbulento, también influye en la velocidad de transferencia de calor por convección.

En cualquier caso, la velocidad de transferencia de calor por convección siempre es proporcional a la diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido. Este hecho se modela matemáticamente mediante la Ley de Enfriamiento de Newton: $q_{\text{punto}} = h (T_s - T_f)$ o $Q_{\text{punto}} = h A_s (T_s - T_f)$, donde T_s es la temperatura de la superficie en contacto con el fluido y T_f es la temperatura del fluido lo suficientemente lejos de dicha superficie. La influencia de las propiedades del fluido, de la superficie y del flujo se cuantifica en el coeficiente de película o coeficiente de transferencia de calor por convección (h).

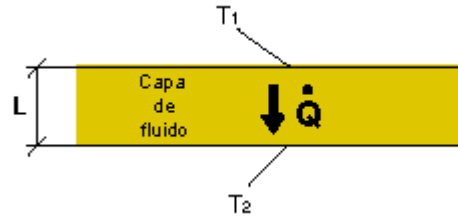
En el análisis de la convección es práctica común quitar las dimensiones a las expresiones fisicomatemáticas que modelan el mecanismo y agrupar las variables, dando lugar a los números adimensionales. En convección se emplean los siguientes números adimensionales:

2.11. Número de Nusselt (Nu)

Representa la relación que existe entre el calor transferido por convección a través del fluido y el que se transferiría si solo existiese conducción.

Se considera una capa de fluido de espesor L con sus superficies a diferentes temperaturas T_1 y T_2 , $T_1 > T_2$, $DT = T_1 - T_2$, como se muestra en la figura siguiente.

Figura 20. **Espesor de superficie**



Fuente: elaboración propia.

El flujo de calor debido a la convección será: $q\text{-punto convección} = h \Delta T$, mientras que el flujo de calor si solo existiera conducción sería $q\text{-punto conducción} = k (\Delta T / L)$. Dividiendo ambas expresiones, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{\dot{q}_{\text{conv}}}{\dot{q}_{\text{cond}}} = \frac{h \Delta T}{k \frac{\Delta T}{L}} = \frac{h L}{k} = Nu$$

En general se puede escribir como:

$$Nu = \frac{h L_c}{k}$$

Donde L_c es la longitud característica.

Para un tubo circular, como lo es cobertor del superconductor que alojará el nitrógeno es:

$$Nu = \frac{h D}{k}$$

Donde D es el diámetro interior del tubo.

Para un tubo no circular:

$$Nu = \frac{h D_{hid}}{k}$$

Donde:

- D_{hid} es el diámetro hidráulico = $(4 A_c) / p$
- A_c : área de la sección transversal del tubo
- p : perímetro de la sección transversal

Cuanto mayor es el número de Nusselt más eficaz es la convección.

Un número de Nusselt de $Nu = 1$, para una capa de fluido, representa transferencia de calor a través de esta por conducción pura. El número de Nusselt se emplea tanto en convección forzada como natural.

2.12. Número de Prandtl (Pr)

Representa la relación que existe entre la difusividad molecular de la cantidad de movimiento y la difusividad molecular del calor, o entre el espesor de la capa límite de velocidad y la capa límite térmica, como se observa en la ecuación siguiente.

$$Pr = \frac{\text{Difusividad molecular de la cantidad de movimiento}}{\text{Difusividad molecular del calor}} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu C_p}{k}$$

El número de Prandtl va desde menos de 0,01 para los metales líquidos hasta más de 100 000 para los aceites pesados. El Pr es del orden de 10 para el agua. Los valores del número de Prandtl para los gases son de alrededor de 1, lo que indica que tanto la cantidad de movimiento como de calor se difunden por el fluido a una velocidad similar. El calor se difunde con mucha rapidez en los metales líquidos ($Pr \ll 1$) y con mucha lentitud en los aceites ($Pr \gg 1$) en relación con la cantidad de movimiento. Esto indica que la capa límite térmica es mucho más gruesa para los metales líquidos y mucho más delgada para los aceites, en relación con la capa límite de velocidad. Cuanta más gruesa sea la capa límite térmica con mayor rapidez se difundirá el calor en el fluido.

El número de Prandtl se emplea tanto en convección forzada como natural.

2.13. Número de Reynolds (Re)

Representa la relación que existe entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas que actúan sobre un elemento de volumen de un fluido. Es un indicativo del tipo de flujo del fluido, laminar o turbulento.

$$Re = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{U_f L_c}{\nu} = \frac{\rho U_f L_c}{\mu}$$

Donde U_f es la velocidad del flujo del fluido a una distancia lo suficientemente alejada de la superficie.

Lc es la longitud característica: para una placa plana Lc = distancia al borde de ataque de la placa. Para un tubo de sección circular Lc = diámetro (D). Para un tubo de sección no circular Lc = diámetro hidráulico (Dhid).

- ν es la viscosidad cinemática
- Un valor grande del número de Reynolds indica régimen turbulento
- Un valor pequeño del número de Reynolds indica régimen laminar

El valor del número de Reynolds para el cual el flujo se vuelve turbulento es el número crítico de Reynolds. Este valor crítico es diferente para las diferentes configuraciones geométricas.

- Para una placa plana Re crítico = 5 E5.
- Para tubos: si $Re < 2\,300$ el flujo es laminar. Si $2\,300 < Re < 10\,000$ el flujo es de transición. Si $Re > 10\,000$ el flujo es turbulento.
- El número de Reynolds solo se utiliza en convección forzada.

2.14. Número de Grashof (Gr)

Representa la relación que existe entre las fuerzas de empuje y las fuerzas viscosas que actúan sobre el fluido. Es un indicativo del régimen de flujo en convección natural, equivalente al número de Reynolds en convección forzada.

$$Gr = \frac{g \beta (T_s - T_f) L_c^3}{\nu^2}$$

Donde g es la aceleración de la gravedad.

- β es el coeficiente de expansión volumétrica de una sustancia; representa la variación de la densidad de esa sustancia con la temperatura a presión constante. Para un gas ideal $\beta = 1 / T$; T es la temperatura absoluta en K.
- L_c es la longitud característica. Para una placa vertical de longitud L , $L_c = L$. Para un cilindro de diámetro D , $L_c = D$.
- ν es la viscosidad cinemática.
- El número de Grashof solo se utiliza en convección natural.

2.15. Número de Rayleigh (Ra)

Es función del número de Grashof y del número de Prandtl. Su valor es el número de Grashof multiplicado por el número de Prandtl.

$$Ra = Gr Pr$$

2.16. Ejemplo ilustrativo

Por medio del ejercicio siguiente se ilustra un el planteamiento de un sistema de refrigeración por convección, consiste en conocer el valor del coeficiente de película h . Una vez conocido este coeficiente es inmediato calcular la potencia térmica puesta en juego mediante la Ley de Enfriamiento de Newton: $Q_{\text{punto}} = h A (T_t - T_s)$.

- El análisis de la convección está basado en datos experimentales que se presentan mediante las llamadas correlaciones. Existen casos que permiten abordarlos analíticamente, pero son los menos y no son prácticos desde el punto de vista ingenieril.
- El coeficiente de película h se calcula a partir del número de Nusselt pues $Nu = (h L) / k$ y, entonces, $h = (Nu k)/L$.
- Para el cálculo del número de Nusselt hay que distinguir entre convección forzada y natural.
- En convección forzada el número de Nusselt es función del número de Reynolds y de Prandtl, $Nu = f(Re, Pr)$
- En convección natural el número de Nusselt es función del número de Grashof y de Prandtl o del número de Rayleigh y de Prandtl puesto que $Ra = Gr Pr$. $Nu = f(Ra, Pr) = f(Gr, Pr)$
- El método de cálculo de la potencia térmica puesta en juego en la convección es el siguiente:
- Se analizan las condiciones en la que tiene lugar la convección (geometría de la superficie, convección natural o forzada, tipo de flujo) para seleccionar la correlación adecuada.
- A partir de la correlación adecuada y los datos conocidos se calcula el número de Nusselt.

- Una vez conocido el número de Nusselt se calcula el coeficiente de película: $h = (Nu \cdot k) / L$.
- Se calcula la potencia térmica mediante la Ley de Enfriamiento de Newton: $Q_{\text{punto}} = h (T_f - T_s)$

3. CASOS DE ESTUDIO PARA SU POSIBLE UTILIZACIÓN EN GUATEMALA

Una de las estadísticas más estremecedoras del sector eléctrico es la afirmación que la generación eléctrica y por ende el Kw hora, será cada vez más caro. Se estima que a partir del 2016, se eleve a un ritmo de un 19 por ciento anual. Esto se deberá al aumento de la demanda y sobre todo al coste de los combustibles, fósiles, y a la elevada inversión inicial de la implementación de energía renovables.

Los datos indican que para el 2020 deberá existir el 54 % de la energía eléctrica del tipo renovable, la demanda máxima diaria del sistema eléctrico tanto mundial como nacional será del 75 % superior a lo que es ahora. Por ello la necesidad de paliar las pérdidas en los sistemas de transmisión eléctrica.

3.1. La tecnología de superconducción utilizada en Taiwán

American Superconductor Corporation, es una de las compañías asiáticas que ha desarrollado superconductores para el transporte de energía eléctrica sin pérdidas. A diferencia de ADCO, la empresa American Superconductor Corporation, ASC, utiliza helio como refrigerante, el modelo Taiwanés proviene de la tecnología utilizada en la fabricación de satélites taiwaneses. Es importante el cambio de refrigerante, pues la tecnología de circulación cambia radicalmente, el helio es similar en costo. La razón para utilizar Helio es crear una tecnología totalmente diferente a la estadounidense, es una competencia que emula la lucha empresarial por un formato tecnológico. Se puede recordar la lucha que existió entre la generación eléctrica a principios del siglo veinte

cuando la lucha entre la Edison General Electric y WestingHouse, con el la generación eléctrica de corriente continua y corriente alterna, la lucha terminó siendo ganada por el modelo alterno de WestingHouse. Hoy casi un siglo después ADCO que es una empresa hermana de la que en algún tiempo fue Edison General Electric, apuesta todo por su modelo a base de nitrógeno, contra el modelo taiwanés a base de helio.

3.2. El helio como refrigerante en el modelo criogénico taiwanés

La conservación del refrigerante para satélites infrarrojos en el espacio es posible gracias a la invención de Sir James Dewar, que construyó el termo en 1892. El termo, como es sabido de la experiencia en la vida diaria, es un recipiente para evitar la transferencia de calor y mantiene un elemento a temperaturas frías.

Mientras que un sistema mecánico para refrigeración a baja escala es muy ineficiente, puesto que utiliza energía de la red eléctrica para extraer calor en un refrigerador. Un sistema pasivo tiene la ventaja que regula el calentamiento inexorable del sistema de una forma controlada y lenta. El sistema criogénico taiwanés se basa en el modelo del termo. Este elimina la posibilidad de transferencia de calor por conducción, creando un recipiente enquistado en otro, a diferencia del modelo de ADCO que necesita una circulación constante de nitrógeno. El modelo taiwanés solo necesita circulación en intervalos, pues las paredes del encapsulado de los cables superconductores que los separan contienen un vacío.

Por supuesto, existe una transferencia de calor, pero esta es muy lenta, así que el sistema es ineficiente cuando se inicializa, si el modelo de ADCO

logra llegar a los 30 grados kelvin en horas, el modelo taiwanés necesita de doce días para lograrlo por medio del vacío y el helio.

Como se ha indicado la utilidad del helio como refrigerante en el espacio, donde existe un vacío absoluto es fácil de realizar. Sin embargo, para crear una capa de vacío absoluto entre el superconductor y el helio se necesita de bombas de vacío de gran poder. Por lo tanto, la energía que se necesita para crear ese vacío es enorme, pero se compensa con el hecho que solo se necesita crear el vacío cuando se inicializa el sistema y no de manera continua.

El helio es el segundo elemento en orden en la tabla periódica, (tiene dos protones y dos electrones) y también es el segundo elemento más abundante del universo, después del hidrógeno. Como referencia de este gas se puede decir que se encontró indicios de su existencia en el espectro de la corona solar en 1868 por Pierre Janssen, y se lo llamó helio pensando que era un elemento no existente en la Tierra. En 1895 pudo ser aislado en la Tierra. Con la llegada de la teoría cuántica se pudo explicar el origen de las líneas espectrales, y las misteriosas líneas desconocidas resultaron ser las de un elemento con otro protón más.

A fin de utilizarlo para refrigeración el modelo taiwanés necesita que el helio sea ajustado a las condiciones de presión, para hacer posible la transformación en líquido a menos de -200°C , superando en temperatura a otros refrigerantes tradicionales en los laboratorios, como el nitrógeno líquido.

Esta propiedad del helio lo hace tan atractivo pues puede alcanzar temperaturas de unos pocos Kelvin. Cambiando las condiciones de presión se pueden alcanzar temperaturas menores. Cuando la presión alcanza a altas atmósferas, los efectos cuánticos empiezan a jugar. Por procesos de

magnetización y desmagnetización se pueden llegar a temperaturas del orden de cien milésimas de Kelvin, es por ello que no necesita de una circulación continua como el modelo de ADCO a base de nitrógeno.

Si se baja la temperatura del helio hasta 5,2 Kelvin, se transforma en helio líquido (HelI), un líquido como otro cualquiera. Pero si se continúa disminuyendo la temperatura manteniendo una presión moderada se llega a un punto donde se produce una transición a otro tipo de líquido, alrededor de 2,17 K a bajas presiones. Este es el HelII, el llamado helio superfluido.

En la transición al estado superfluido ocurren hechos peculiares: la constante dieléctrica experimenta un cambio abrupto, ocurre una discontinuidad en el coeficiente de expansión térmica, y el calor específico a volumen constante del helio tiene una singularidad a 2,19 K. Este es el punto conocido como λ .

El HelII tiene propiedades extrañas, una de ellas es la capacidad que tiene de fluir a través de pasajes microscópicos sin fricción aparente. El efecto conocido como efecto fuente (*fountain effect*) es el producido cuando existe un flujo de HelII entre dos zonas de diferente presión, desde alta a baja presión.

Lo que es sorprendente es que la región con baja presión se enfría. Esto se explica por el modelo de dos-fluidos, por el cual el HelII se describe como un superfluido de viscosidad cero junto con un fluido normal. La relación entre el superfluido a el total se aproxima a uno, cuando la temperatura se acerca el cero absoluto.

En el estado de superfluidez presenta resistencia cero al flujo. Ese fenómeno fue descubierto en 1937 por Peter Kapitza. En ese estado, el HelII

puede formar películas delgadas de un espesor de no más de 100 átomos. Su conductividad llega a 3 000 000, de veces la del Hell, y fluye de las regiones frías a calientes. Estas propiedades del Hell fueron observadas en los años treinta. Se descubrió entonces que el helio podía pasar por lugares que no podían ser atravesados por el helio líquido o gaseoso, comportándose como si no tuviera viscosidad.

El estado de superfluidez es la segunda apuesta de Taiwán, dado que no se necesita de un bombeo continuo, el helio al llegar al estado de superfluidez no necesita ser bombeado en lo absoluto por periodos de años, pues el calor se transportaría de inmediato a las estaciones, a los extremos de los superconductores. Es de aclarar que para llegar al estado de superfluidez es necesario una presión enorme pues es una condición una temperatura de 2,7 grados kelvin. Pero la apuesta por ganar el modelo único de superconducción que se adopte mundialmente es un reto que Taiwán apuesta.

A fin de recalcar las propiedades del Hell, debe explicar el modelo de las propiedades del Hell. Este es el modelo de Landau de los dos fluidos, donde se representa al líquido formado de una mezcla de dos componentes, una de las cuales se comporta siguiendo las leyes de la hidrodinámica, mientras que la segunda en una componente superfluida, libre de entropía y sin fricción.

Aunque se conocen las propiedades del helio superfluido, existen problemas para utilizarlo en sistemas de superconducción, que deben solucionarse antes de poder usarse como refrigerante en un recipiente alrededor de un superconductor y sobre todo, alcanzar la presión necesaria para alcanzar los 2,7 grados kelvin en el espacio compresionado. Se debe solucionar la cuestión tecnológica de como contener el helio de manera tal, que se escape el vapor a medida que se evapore mientras que el líquido esté

contenido dentro del cobertor del superconductor. También está el problema del desarrollo de los materiales que no permitan la fuga del helio súper fluido, pues como se analizó anteriormente el helio superfluido se escapa muy fácilmente por medio de los materiales aislantes convencionales.

El premio taiwanés es desarrollar para la industria de la transmisión eléctrica el helio superfluido, este producto de enfriamiento criogénico sirve como excelente refrigerante para enfriar instrumentos a pequeña escala. En los años setenta la NASA realizó experimentos para utilizar el helio en el espacio como refrigerante.

El problema de contener el helio no es trivial. El helio está manteniendo fríos que se encuentran disipando calor. Por lo tanto, debe evaporarse para llevarse el calor generado por esos elementos. Por lo tanto, se tiene el helio en un recipiente similar a un termo pero a extremas presiones, pero debe permitir el vapor que se escape a fin de continuar el enfriamiento de los cables superconductores. En el uso como refrigerante de superconductores y dadas las enormes longitudes, se recuerda que en un laboratorio se usan modelos de metros y en un uso industrial se habla de cientos de kilómetros. Sobre todo en las presiones la mayor preocupación es evitar que el helio se filtre hacia el espacio exterior, teniendo en cuenta que por su condición de superfluido puede atravesar la menor filtración en el sistema.

El Dr. Dustin Chen y colegas de la Universidad del tecnológico de Taiwán propusieron una idea ingeniosa. Primero, el hecho de que el helio es superfluido, y pasa por zonas donde no pasaría un líquido normal o un gas. La idea es poner un tapón poroso en la tubería de ventilación a los extremos en las estaciones de superconductores, que permite al helio a fluir fuera del

contenedor puesto que la presión en el *dewar* aumenta cuando el líquido comienza a evaporarse.

Cuando el helio alcanza la parte exterior del tapón se evapora en el espacio y enfría la parte exterior del tapón que pasa al ponerse más fría que el interior del *dewar*. Se obtiene una de las cosas extrañas del helio superfluido. Resulta ser que le gusta moverse hacia temperaturas más altas.

Por lo tanto, mientras que la evaporación enfría el exterior del tapón, el superfluido fluye hacia el interior del *dewar*, que está más tibio, formando una *back pressure*, que actúa como una pared que mantiene el resto del helio superfluido en el *dewar* enfriando los instrumentos.

Pruebas del Jet Propulsion Laboratory de la NASA también sirvieron para aclarar otro problema: donde se encuentra el helio dentro del *dewar* utilizado en superconductores. Para ello, se debe recordar que el helio superfluido tiene unas fuerzas cohesivas que son las más débiles de la naturaleza. Un investigador lo pone en estas palabras: un átomo de helio superfluido estaría al lado de cualquier cosa antes que estar al lado de otro átomo de helio superfluido. Por lo tanto, en el ambiente dentro del espacio compresionado para los superconductores, el helio forma una película (*film*) sobre la superficie del espacio vacío entre el helio y el superconductor, manteniendo el vapor de helio en el medio. De esta manera el helio siempre se encuentra en contacto con las paredes, absorbiendo el calor que se genera. Además, el helio fluye hacia la parte del contenedor que está más caliente y por lo tanto funciona mejor, como mejor refrigerante para el sistema.

3.3. Abundancia natural del helio

El helio es el segundo elemento más abundante del universo conocido tras el hidrógeno y constituye alrededor del 23 % de la masa bariónica del universo. La mayor parte del helio se formó durante la nucleosíntesis del Big Bang, en los tres primeros minutos después de este. De esta forma, la medición de su abundancia contribuye a los modelos cosmológicos. En las estrellas, el helio se forma por la fusión nuclear del hidrógeno en reacciones en cadena protón-protón y en el ciclo CNO, los cuales forman parte de la nucleosíntesis estelar.

En la atmósfera terrestre la concentración de helio por volumen es de tan solo 5,2 partes por millón. La concentración es baja y prácticamente constante a pesar de la continua producción de nuevo helio, debido a que la mayor parte del helio en la atmósfera se escapa al espacio debido a distintos procesos. En la heterósfera terrestre, una parte de la atmósfera superior, el helio y otros gases ligeros son los elementos más abundantes.

Casi todo el helio presente en la Tierra es el resultado de la desintegración radiactiva, y por tanto, un globo de helio terrestre es, en esencia, una bolsa de partículas alfa expelidas por este proceso. El helio se encuentra en grandes cantidades en minerales de uranio y torio, incluyendo cleveita, pechblenda, carnotita y monacita, ya que estos emiten partículas alfa (núcleos de helio, He^{2+}) y los electrones se combinan de inmediato con ellas, tan pronto como las partículas son detenidas por la roca. De esta manera, se estima que unas 3 000 toneladas de helio se generan al año en toda la litósfera. En la corteza terrestre, la concentración de helio es de 8 partes por mil millones.

En el mar, la concentración es de solo 4 partes por billón. También hay pequeñas cantidades en manantiales de aguas minerales, gas volcánico, y

hierro meteórico. Debido a que el helio es atrapado de manera similar al gas natural por una capa impermeable de roca, las mayores concentraciones de este elemento en el planeta se encuentran en el gas natural, de donde se extrae la mayor parte del helio comercial. La concentración varía en una amplia gama de unas pocas ppm hasta más del 7 % en un pequeño campo de gas en el condado de San Juan, Nuevo México.

3.4. Extracción moderna

Para su uso a gran escala, si el modelo taiwanés de superconducción llega a prevalecer, el helio se estreraría por destilación fraccionada a partir del gas natural, que contiene hasta un 7 % de helio. Al tener un punto de ebullición más bajo que cualquier otro elemento, se utilizan bajas temperaturas y altas presiones para licuar casi todos los demás gases (principalmente nitrógeno y metano). El helio crudo resultante se purifica por medio de exposiciones sucesivas a temperaturas bajas, en la que casi todo el nitrógeno y los otros gases restantes se precipitan fuera de la mezcla gaseosa. Como una fase de purificación final, se utiliza carbón activado, lo que da como resultado helio grado A, con una pureza del 99,995 %.

La principal impureza en el helio grado A es el neón. En la fase final de la producción, la mayoría del helio que se produce es licuado por medio de un proceso criogénico. Esto es necesario para aplicaciones que requieren helio líquido y también permite a los proveedores de helio, reducir el costo en el transporte a larga distancia, dado que la mayoría de los contenedores de helio líquido tienen una capacidad cinco veces mayor que la de los camiones cisterna que trasportan helio gaseoso.

En 2008, alrededor de 169 millones de metros cúbicos estándar (SCM, por sus siglas en inglés, definidos como un metro cúbico a una presión de 1 atm y a una temperatura de 15 °C) de helio, se extrajeron a partir del gas natural o de reservas de helio. De estos, aproximadamente el 78 % provinieron de los Estados Unidos, el 10 % de Argelia, y del resto la mayor parte fueron extraídos en Rusia, Polonia y Qatar. En los Estados Unidos, la mayor parte del helio se extrae a partir del gas natural de los campos de Hugoton y otros cercanos en Kansas, Oklahoma y Texas. En 2000, los EE. UU. tenían reservas de helio en complejos de pozos, de alrededor de $4,2 \times 10^9$ SCM. Esta cantidad es suficiente para unos 25 años de uso mundial, o de 35 años de consumo de EE. UU., aunque se espera que factores en el ahorro y el procesamiento impacten los números efectivos de las reservas. Se estima que las reservas básicas de helio aún no probadas que se pudieran obtener a partir de gas natural en los EE. UU. son de $3,1$ a $5,3 \times 10^{13}$ SCM, o aproximadamente cuatro órdenes de magnitud mayor que las reservas probadas.

El helio se debe extraer principalmente del gas natural, debido a que su presencia en el aire es solo una fracción comparada con la de la del neón, y sin embargo, su demanda es mucho mayor. Se estima que si toda la producción de neón se reinstrumentará para ahorrar helio, se satisfarían un 0,1 % de las demandas mundiales de helio. Igualmente, solamente un 1 % de las demandas mundiales de helio se podrían satisfacer reinstrumentando todas las plantas de destilación de aire. El helio puede ser sintetizado por medio del bombardeo de litio o boro utilizando protones de alta velocidad. Sin embargo, este método de producción es totalmente inviable económicamente.

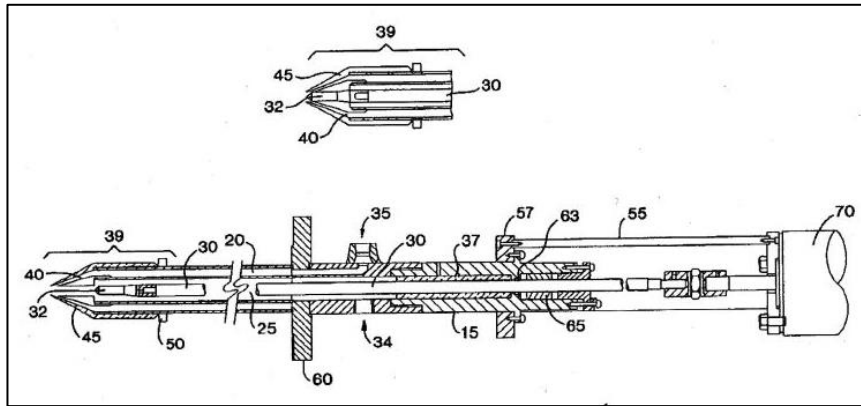
3.5. Agotamiento en los suministros de helio

El modelo taiwanés de imponerse tendría el problema de enfrentarse al agotamiento del helio, pues las reservas actuales de helio se están utilizando mucho más rápido de lo que este elemento se puede reponer. Dada esta situación, hay grandes preocupaciones de que el suministro de helio pueda agotarse pronto. En las reservas más grandes del mundo, en Amarillo, Texas, se espera que este gas se agote en los próximos ocho años. Esto podría prevenirse si los actuales usuarios capturasen y reciclasen el gas y si las compañías de petróleo y gas natural, hiciesen uso de técnicas de captura de helio al extraerlos.

3.6. La tecnología de superconducción utilizada en Nueva York

La apuesta de la empresa ADCO y por tanto del estado de Nueva York es la tecnología a base de nitrógeno para enfriar superconductores, el alma del sistema de enfriamiento es el compresor de nitrógeno el cual es un sistema de suministro de criógeno líquido, que comprende: un tubo inyector que tiene un primer extremo y un segundo extremo. Y una fuente de criógeno líquido (nitrógeno) para proporcionar un flujo de criógeno líquido directamente hacia el interior del tubo inyector, caracterizado por un eje de accionamiento dentro del mismo, siendo móvil el eje de accionamiento hacia el primer extremo, para detener el flujo de criógeno líquido desde este. La figura siguiente muestra el inyector.

Figura 21. **inyector de nitrógeno**



Fuente: *Método para usar nitrógeno líquido a presión elevada para enfriar factores.*

<http://patentados.com/img/2008/04/metodo-para-usar-nitrogeno-liquido-a-presion-elevada-para-enfriar-reac.jpg>. Consulta: diciembre de 2012.

Uno de los temores es que el uso de nitrógeno pueda causar explosiones, y se creen accidentes como el Hindenburg, dado que comúnmente se cree que el nitrógeno es un combustible y es capaz de explotar. Esto debido a lo mostrado en películas donde se muestra al nitrógeno como un combustible para automóviles de carreras. Sin embargo, el nitrógeno es considerado un gas inerte y no es inflamable. Este se puede utilizar inclusive para apagar o extinguir un fuego. En estado líquido si es congelante, por su baja temperatura. Se debe entender que el oxígeno no es inflamable, es oxidante, solo apoya la combustión, (combustión=oxidación) y combustión, oxidación no son sinónimos de explosión. Si se enciende un fosforo su cabeza se inflama, arde, aunque no haya aire u oxígeno. El palito del fosforo arde debido a que tiene parafina o es de madera y usa el 19,5 del oxígeno que contiene el aire. Si aplicas oxígeno, en ambos casos hará que arda más vivamente, habrá una óptima oxidación.

3.7. Características del nitrógeno

El nitrógeno es un elemento químico, de número atómico 7, símbolo N y que en condiciones normales forma un gas diatómico (nitrógeno diatómico o molecular), que constituye del orden del 78 % del aire atmosférico. Por ello el interés de ADCO en desarrollar el nitrógeno, es un gas que difícilmente se agotará en un corto plazo. En ocasiones es llamado ázoe, antiguamente se usó también Az como símbolo del nitrógeno.

3.8. Aplicaciones comunes del nitrógeno

La aplicación comercial más importante del nitrógeno diatómico es la obtención de amoníaco por el proceso de Haber. El amoníaco se emplea con posterioridad en la fabricación de fertilizantes y ácido nítrico.

Las sales del ácido nítrico incluyen importantes compuestos como el nitrato de potasio (nitro o salitre empleado en la fabricación de pólvora) y el nitrato de amonio fertilizante.

Los compuestos orgánicos de nitrógeno como la nitroglicerina y el trinitrotolueno son a menudo explosivos, pero esto no significa que el nitrógeno en su estado líquido o gaseoso se convierta en un explosivo. La hidracina y sus derivados se usan como combustible en cohetes.

El ciclo de este elemento es bastante más complejo que el del carbono, dado que está presente en la atmósfera no solo como N_2 (78 %), sino también en una gran diversidad de compuestos. Se puede encontrar principalmente como N_2O , NO y NO_2 , los llamados NO_x . También forma otras combinaciones con oxígeno tales como N_2O_3 y N_2O_5 (anhídridos), precursores de los ácidos

nitroso y nítrico. Con hidrógeno forma amoníaco (NH_3), compuesto gaseoso en condiciones normales.

Al ser un gas poco reactivo, el nitrógeno se emplea industrialmente para crear atmósferas protectoras y como gas criogénico, para obtener temperaturas del orden de 78 K de forma sencilla y económica.

3.9. Breve historia

El nitrógeno (del latín *nitrum* -i y este del griego *νίτρον*, *nitro* -nombre que históricamente ha sido usado en forma vaga para referirse a diversos compuestos de sodio y de potasio que contienen nitrógeno-, y -geno, de la raíz griega *γεν-*, generar) se considera que fue descubierto formalmente por Daniel Rutherford en 1772, al dar a conocer algunas de sus propiedades. Sin embargo, por la misma época también se dedicaron a su estudio Scheele que lo aisló, Cavendish y Priestley.

El nitrógeno es un gas tan inerte que Lavoisier se refería a él como azote (*ázoe*) que significa sin vida (o tal vez lo llamó así por no ser apto para respirar). Se clasificó entre los gases permanentes, sobre todo desde que Faraday no consiguiera verlo líquido a 50 atm y $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$, hasta los experimentos de Pictet y Cailletet que en 1877 consiguieron licuarlo.

Los compuestos de nitrógeno ya se conocían en la Edad Media; así, los alquimistas llamaban agua *fortis* al ácido nítrico y agua regia a la mezcla de ácido nítrico y clorhídrico, conocida por su capacidad de disolver el oro.

3.10. Abundancia, obtención

El nitrógeno es el componente principal de la atmósfera terrestre (78,1 % en volumen) y se obtiene para usos industriales de la destilación del aire líquido. Está presente también en los restos de animales, por ejemplo el guano, usualmente en la forma de urea, ácido úrico y compuesto de ambos.

También ocupa el 3 % de la composición elemental del cuerpo humano.

Se han observado compuestos que contienen nitrógeno en el espacio exterior y el isótopo nitrógeno-14 se crea en los procesos de fusión nuclear de las estrellas.

3.11. Compuestos

Con el hidrógeno forma el amoníaco (NH_3), la hidracina (N_2H_4) y el aziduro de hidrógeno (N_3H , también conocido como azida de hidrógeno o ácido hidrazoico). El amoníaco líquido, anfótero como el agua, actúa como una base en una disolución acuosa, formando iones amonio (NH_4^+), y se comporta como un ácido en ausencia de agua, cediendo un protón a una base y dando lugar al anión amida (NH_2^-). También se conocen largas cadenas y compuestos cíclicos de nitrógeno, pero son muy inestables.

Con los halógenos forma: NF_3 , NF_2Cl , NFCI_2 , NCl_3 , NBr_3 , NH_3 , NI_3 , NH_3 , N_2F_4 , N_2F_2 (cis y trans), N_3F , N_3Cl , N_3Br y N_3I .

Con el oxígeno forma varios óxidos que se han nombrado: el nitroso o gas de la risa, el nítrico y el dióxido de nitrógeno. Son producto de procesos de combustión contribuyendo a la aparición de episodios contaminantes de *smog*

fotoquímico. Otros óxidos son el trióxido de dinitrógeno (N_2O_3) y el pentóxido de dinitrógeno (N_2O_5), ambos muy inestables y explosivos.

3.12. Rol biológico

El nitrógeno es componente esencial de los aminoácidos y los ácidos nucleicos, vitales para la vida y los seres vivos. Las legumbres son capaces de absorber el nitrógeno directamente del aire, siendo este transformado en amoníaco y luego en nitrato por bacterias que viven en simbiosis con la planta en sus raíces. El nitrato es posteriormente utilizado por la planta para formar el grupo amino de los aminoácidos de las proteínas, que finalmente se incorporan a la cadena trófica (véase también el ciclo del nitrógeno).

3.13. Isótopos

Existen dos isótopos estables del nitrógeno, N-14 y N-15, siendo el primero, que se produce en el ciclo carbono-nitrógeno de las estrellas, el más común sin lugar a dudas (99,634 %). De los diez isótopos que se han sintetizado, uno tiene un período de semidesintegración de nueve minutos (el N-13), y el resto de segundos o menos.

Las reacciones biológicas de nitrificación y desnitrificación influyen de manera determinante en la dinámica del nitrógeno en el suelo, casi siempre produciendo un enriquecimiento en N-15 del sustrato.

3.14. Precauciones

Los fertilizantes nitrogenados son una importante fuente de contaminación del suelo y de las aguas. Los compuestos que contienen iones de cianuro

forman sales extremadamente tóxicas y son mortales para numerosos animales, entre ellos los mamíferos.

3.15. Efectos del nitrógeno sobre la salud

Las moléculas de nitrógeno, en estado natural, se encuentran principalmente en el aire. En el agua y en los suelos el nitrógeno puede ser encontrado compuesto, en forma de nitratos y nitritos.

Los humanos han cambiado radicalmente las proporciones naturales de nitratos y nitritos, mayormente debido a la aplicación de estiércoles que contienen nitrato. El nitrógeno es emitido en grandes cantidades por las industrias. A lo largo de la historia, se nota un incremento de la presencia de nitratos y nitritos en el suelo y en el agua, como consecuencia de reacciones que tienen lugar en el ciclo del nitrógeno. Esto se refleja en un incremento de la concentración de nitrógeno en las fuentes utilizadas para consumo humano, y por ende también en el agua potable.

Los nitratos y nitritos son conocidos por causar varios efectos sobre la salud humana. Estos son los efectos más comunes:

- Tiene reacciones con la hemoglobina en la sangre, causando una disminución en la capacidad de transporte de oxígeno por la sangre (nitrito).
- Provoca la disminución del funcionamiento de la glándula tiroidea. (nitrato).
- Ocasiona un bajo almacenamiento de la vitamina A (nitrato).
- Favorece la producción de nitrosaminas, las cuales son conocidas como una de la más común causa de cáncer (Nitratos y nitritos).

3.16. Comparación económica y su aplicación en territorio guatemalteco

Se muestra a continuación un esbozo del plan estratégico de reducción de pérdidas en las líneas de transmisión elaborado por los ingenios: Palo Gordo, Guadalupe, Santa Teresa, Magdalena, San Diego, Tulula, Madre Tierra, Pantaleón, La Unión, Trinidad, Concepción, El Baúl, Los Tarros, La Sonrisa, Santa Ana, El Pilar, Tierra Buena.

El listado anterior enumera los ingenios que poseen y participan en la generación eléctrica y su venta al sistema eléctrico nacional, por ello figura como el modelo de pérdidas en transmisión y el beneficio que genera la instalación de superconductores en líneas de transmisión eléctrica en Guatemala.

El presente es un análisis económico técnico, sobre las pérdidas de energía eléctrica de la gremial de ingenios que producen energía eléctrica haciendo una descripción global de pérdidas técnicas.

La Gremial de Ingenios, llamada en los sucesivo GI, encuentra un nivel de pérdidas en las líneas de transmisión de 11,01 %, al cierre del primer semestre del 2008. Las pérdidas se descomponen en propias de la línea y propias de las uniones o empalmes, las cuales llegan a ser de 11,01 %, dado que el nivel de pérdidas de la línea es estándar para el resto de la infraestructura del país, se prioriza el estudio de esta pues es similar con el resto del país.

Se analizan los costos unitarios en que se incurrirá al reducir individualmente las pérdidas de la línea, así como la recuperación de la inversión al instalar un sistema de superconductores en Guatemala, para con esto saber la rentabilidad de cada inversión y su orden de prelación.

Si bien todas las acciones para reducir pérdidas en un sistema eléctrico son necesarias, y teóricamente muchas de ellas podrían realizarse simultáneamente. Resulta impropio invertir en acciones que tienen un gran costo, en donde su tiempo de recuperación es a largo plazo. Por este motivo se priorizará la reducción de pérdidas comerciales, el plan estratégico presenta un orden de prelación con base en la relación costo-beneficio de las acciones del mismo.

Para las pérdidas por la línea de transmisión se proponen hasta el momento únicamente acciones de un plan estratégico, basado en la reingeniería de procesos y auditorías en el sitio, a los sistemas de medición. El estudio de GI no analiza en ningún momento un sistema de superconductores.

Se posterga la implementación de la reducción de las pérdidas en las líneas de transmisión, hasta que la reducción de las mismas sea más económica que la reducción de las pérdidas comerciales y en tanto sea rentable.

La GI presenta un nivel de pérdidas de 11,01 % que equivale a 5 482,64 Mwh mensuales aproximadamente, esta cantidad de energía representa USD 504 172,03 mensuales.

El 11,01 % de pérdidas se divide en 5,01 % de pérdidas técnicas y el 6 % de pérdidas generales. En el estudio de trabajo la GI se desarrolla un plan estratégico priorizado, para reducir las ineficiencias en los procesos técnicos, y la reducción de pérdidas generales.

El elevado porcentaje de pérdidas indica una ineficiencia en no eliminable de la propia línea de transmisión.

3.17. Datos generales de la GI

La GI tiene un aporte de potencia que equivale al 70 % de la energía necesaria por los departamentos de la costa sur, es decir que de 25 814 kilómetros cuadrados y 125 899 viviendas. La GI la clasificación de clientes y consumo de energía se muestra en la tabla siguiente. Se tiene un resumen semestral de los abonados por tipo de servicio en el cual se puede apreciar que, a los abonados de tipo Industrial se le debe tener un control especial en la prestación del servicio eléctrico.

Tabla VI. **Clasificación del aporte económico y energético de las líneas de transmisión de la GI**

Tipo de Cliente	Abonados		Consumo		Precio Total	
	Cantidad	%	Kwh	%	Total con cargos USD.	%
Residencial	59.381	88,9	45.898.841	50,63	6.106.219,28	53,53
Comercial	5.826	8,72	14.255.641	15,73	1.701.030,68	14,91
Industrial	507	0,76	10.554.402	11,64	1.370.027,32	12,01
Bomba de Agua	71	0,11	6.183.413	6,82	775.275,10	6,80
Entidades Oficiales	319	0,48	3.085.739	3,4	345.467,51	3,03
Alumbrado público	9	0,01	8.559.629	9,44	942.952,90	8,27
Asistencia Social	77	0,12	803.887	0,89	66.218,91	0,58
Beneficio Público	602	0,9	1.313.928	1,45	100.697,82	0,88
Total	66.792	100	90.655.480	100	11.407.889,52	100

Fuente: AGUIRRE HERNÁNDEZ, Douglas. *Plan estratégico de reducción de pérdidas comerciales de la empresa eléctrica Los Ríos C. A.* p. 3.

Por lo tanto si se aplica el 11 % a 11 407 889,52 nos da un total de pérdidas semestrales en la línea de transmisión de: USD 1 256 008,63 de pérdidas mensuales.

Luego se analiza el balance de energía, en la determinación de los balances energéticos se considera la energía comprada y generada, la energía de autoconsumo, la energía facturada y la energía de pérdidas técnicas).

En la tabla siguiente se puede observar el balance de energía hasta el primer semestre del 2008, donde se tiene que existe un 11,06 % de pérdidas.

Tabla VII. **Balance de energías**

Empresa	
Energía Disponible Sistema (Mwh)	109,943.10
Energía Disponible Distribuidor (Mwh)	104,799.15
Energía Facturada a Clientes No Regulados (Mwh)	215.58
Energía Facturada a Clientes Regulados (Mwh)	71,687.77
Energía Entregada a Terceros (Mwh)	5,143.95
Pérdidas Ocasionadas por Terceros (Mwh)	-
Perdidas Distribuidor (Mwh)	32,895.81
Pérdidas de Energía (%)	31.39
Demanda Máxima (Mw)	42.03
Promedio Semestral de Clientes	65,798
Precios Medios (USD ¢/kWh)	8.94

Fuente: AGUIRRE HERNÁNDEZ, Douglas. *Plan estratégico de reducción de pérdidas comerciales de la empresa eléctrica Los Ríos C. A.* p. 4.

Luego se analizan las pérdidas técnicas. Estas pérdidas se deben a la energía consumida por los equipos relacionados a los procesos de generación, transmisión y distribución, la misma que no es facturada. Es un fiel reflejo del estado y la ingeniería de las instalaciones eléctricas, dependen básicamente, del grado de optimización de la estructura del sistema eléctrico y de las políticas de operación y mantenimiento. Su mayor concentración, es ocasionada por la

transmisión de energía eléctrica por medio de conductores, transformadores y otros equipos del sistema de distribución (efecto Joule, pérdidas en el núcleo), así como por las ocasionadas en las líneas de transmisión por el efecto corona.

Tabla VIII. **Pérdidas técnicas I**

Elemento	Porcentaje (%)	Energía (MWH)	Costo (US\$)
Líneas de Subtransmisión	1	1,051.49	\$ 74,024.90
Subestación	0.66	691.77	\$ 48,700.61
Alimentadores Primarias	2.35	2,461.71	\$ 173,304.38
Transformadores	2.64	2,767.09	\$ 194,803.14
Redes Secundarias	3.03	3,179.16	\$ 223,812.86
Alumbrado Publico	0.84	871.64	\$ 61,363.46
Acometidas	0.49	512.49	\$ 36,079.30
TOTAL	11.01	11,535.35	\$ 812,088.64

Fuente: AGUIRRE HERNÁNDEZ, Douglas. *Plan estratégico de reducción de pérdidas comerciales de la empresa eléctrica Los Ríos C. A.* p. 4.

El cálculo estimado para las líneas de transmisión utilizando superconductores del proyecto LIPA de ADCO en la GI es de USD 525 000,00 que es un total de quinientos veinticinco millones de dólares. Si las pérdidas se estiman en 1,2 millones de dólares mensuales el cálculo estimado para recuperar la inversión inicial es de 457 meses, esto da un total de 36 años para recuperar la inversión.

Si bien este dato es desalentador, se debe recordar que esto es ahora, cuando solo el estado de Nueva York lo está utilizando y está financiado por la empresa ADCO, a modo de prueba de su tecnología y ningún país aún ha pedido la instalación de este tipo de tecnología. La proyección de ADCO es que

en él 2020, la tecnología de ADCO sea el común denominador en los sistemas de líneas de transmisión por medio de superconductores. Esto quiere decir que existirá una reducción en los costos de la tecnología y sobre todo acceso a financiamiento para adoptarla.

4. ANÁLISIS ECONÓMICO DE PÉRDIDAS

Para propósitos de análisis, las líneas de transmisión frecuentemente se consideran totalmente sin pérdidas, Sin embargo, en realidad existen pérdidas en la línea que se traducen en pérdidas económicas. En el capítulo anterior se sabe que el área de la costa sur posee un índice de pérdidas de la línea del 11 %, mientras que en Honduras el índice se acerca al 30 %, hay varias formas en que la potencia se pierde en la línea de transmisión. Son pérdida del conductor, pérdida por radiación, pérdida por el calentamiento del dieléctrico, pérdida por acoplamiento y descarga luminosa (corona).

4.1. Pérdidas de conducción en la red de alta tensión de Guatemala

La red eléctrica en Guatemala adolece de las mismas pérdidas que el resto de sistemas de transmisión eléctrica del resto del mundo, para propósitos de análisis regularmente las líneas de transmisión instaladas en el país, se consideran totalmente sin pérdidas. Sin embargo, en realidad, hay varias formas en que la potencia se pierde en la línea de transmisión del país, estas son:

- Pérdidas del conductor
- Pérdida por radiación
- Pérdida por el calentamiento del dieléctrico
- Pérdida por acoplamiento, y descarga luminosa (corona)

4.2. Pérdida del conductor

Debido a que la corriente fluye a través de una línea de transmisión y la línea de transmisión tiene una resistencia finita, hay una pérdida de potencia inherente e inevitable. Esto a veces se llama pérdida del conductor o pérdida por calentamiento del conductor y es simplemente, una pérdida por calentamiento.

Como la resistencia se distribuye a lo largo de la línea de transmisión, la pérdida por calentamiento del conductor es directamente proporcional al cuadrado de longitud de la línea. Además, porque la disipación de potencia es directamente proporcional al cuadrado de la corriente, la pérdida del conductor es inversamente proporcional a la impedancia característica.

Para reducir las pérdidas del conductor, simplemente debe acortarse la línea de transmisión, o utilizar un cable de diámetro más grande (deberá mantenerse en mente que cambiar el diámetro del cable, también cambia la impedancia característica y en consecuencia, la corriente).

Regularmente para propósitos de análisis se consideran las líneas sin pérdidas o ideales, como todo en los salones de clase se considera ideal, pero no lo son. En las líneas existen ciertos tipos de pérdidas, a continuación se hará una breve descripción de ellas.

Como todos los materiales semiconductores tienen cierta resistencia finita, hay una pérdida de potencia inherente e inevitable.

4.3. Pérdida por radiación

Si la separación entre los conductores en una línea de transmisión es una fracción apreciable de una longitud de onda, los campos electrostáticos y electromagnéticos que rodean al conductor hacen que la línea actúe como antena y transfiera energía a cualquier material conductor cercano.

4.4. Pérdida por calentamiento del dieléctrico

Una diferencia de potencial entre dos conductores de una línea de transmisión causa la pérdida por calentamiento del dieléctrico. El calor es una forma de energía y tiene que tomarse de la energía que se propaga a lo largo de la línea. Para líneas dieléctricas de aire, la pérdida de calor es despreciable. Sin embargo, para líneas sólidas, se incrementa la pérdida por calentamiento del dieléctrico con la frecuencia.

4.5. Pérdida por acoplamiento

La pérdida por acoplamiento ocurre cada vez que una conexión se hace de o hacia una línea de transmisión, o cuando se conectan dos partes separadas de una línea de transmisión. Las conexiones mecánicas son discontinuas (lugares donde se encuentran materiales diferentes). Las discontinuidades tienden a calentarse, a radiar energía, y a disipar potencia.

4.6. Corona (descargas luminosas)

La corona es una descarga luminosa que ocurre entre los dos conductores de una línea de transmisión, cuando la diferencia de potencial entre ellos excede el voltaje de ruptura del aislante dieléctrico. Generalmente, una vez que ocurre una corona, se puede destruir la línea de transmisión.

4.7. Los materiales

Se consigue plantear el problema de la selección de los materiales de la línea de transmisión tradicional y el de articulación de estos materiales entre sí, el espacio (problema de estructura), o en el tiempo (problema de estrategia). Estas dimensiones tienen correlaciones estrechas entre sí, la selección de un material influye en las estructuras y en las estrategias. Una de las grandes dificultades en la planificación de la línea de transmisión convencional consiste en saber plantear el problema globalmente, sin tener que marginar una de estas dimensiones y sobre todo lo que concierne a la calidad del servicio, gastos y las pérdidas.

La calidad del servicio consiste en que las interrupciones del servicio de la energía eléctrica deben ser lo menos frecuente posible, evitando los cortes largos que cubran territorio muy amplio. Debe existir continuidad en el servicio de la energía eléctrica y para esto los elementos fundamentales que componen el sistema deben funcionar adecuadamente. Se ve que existirá siempre una falla residual que cuando ocurre, no es necesariamente por error y nunca se puede proteger de manera total contra ella, solo es posible hacer una elección de una política de gastos asociada a un riesgo de falla por interrupción.

La planificación debe ayudar a efectuar esta elección. Lo anterior parece carecer de sentido, pero es esencial al momento de utilizar una red de superconductores, que tan rápido responden a las fallas y cómo se comportan ante ellas. De igual manera se desconoce el costo de las correcciones y sobre todo la calidad del servicio y el tiempo en que se puede corregir una interrupción.

La mayor preocupación hasta el momento en las instalaciones eléctricas tradicionales, es que hay que tomar en cuenta en la utilización de los costos de materiales, es corregir en ello toda influencia coyuntural para solo conservar lo que está ligado a la estructura de los materiales. De este modo, muchas veces se tiene que utilizar fórmulas generales que puedan ser interpoladas o extrapoladas a materiales que todavía no existen, y para los cuales pudiera eventualmente recomendarse su uso. Una fórmula de costo estructural de las líneas de AT (alta tensión) y MAT (media alta tensión).

$$C = K (a + b + U + Cnts + d(n-1)nts + eG)$$

Donde:

t número de ternas (conjunto de 3 líneas 3"), U tensión de servicio máxima, n número conductores por fase, s sección de un conductor elemental, G sección total de los cables de guarda.

Las fórmulas anteriores son fundamentales para una buena planificación, ya que se prefiere estudiar sobre una red en desarrollo, la oportunidad de introducir materiales de características diferentes a la que generalmente son utilizados y de buscar los tamaños óptimos. Los gastos relativos a las pérdidas intervienen a todos los niveles de la planificación. Para una obra dado el costo

actualizado de las pérdidas, sobre su duración de vida, es del orden de la magnitud del costo de la obra, por lo tanto el proyecto de ADCO debe ser monitoreado en costos y materiales, a fin de aplicar los enunciados anteriores en la planificación de un sistema de superconducción en Guatemala.

También se debe contemplar que la potencia que pasa por la línea, en un período anual. En realidad no es constante, pudiéndose caracterizar la potencia transmitida mediante cierto diagrama denotando cierta energía anual pérdida por efecto Joule valorizándose esta, calculando el precio de costo anual del KW de pérdidas en punta o pico, este precio solo es válido para un diagrama de utilización determinado de la línea y hora por hora, entre este diagrama y la monótona de los consumos totales, pero como en un superconductor carece de campos magnéticos, el efecto Joule no existe.

Para una calidad de servicio al utilizar superconductores debe tener una importancia específica en líneas de transporte a construir, para suministrar en la punta o pico, la potencia que será disipada en pérdidas, puesto que a pesar de tratarse de un superconductor. Pero aun así existen pérdidas y el valor del deterioro de la calidad del servicio (medido en función del aumento del promedio de energía no distribuida), debido al hecho de que una parte de la energía es disipada en pérdidas.

Solo se puede encontrar la función de costo de una instalación de superconductores, compuesta de un gasto anual y de una inversión, si se actualiza la suma de los gastos anuales sobre el período de vida de la línea. Por lo tanto, en el análisis de costo para la construcción de una línea de superconductores, se deben analizar variables que son las que demuestran la factibilidad de o justificación del proyecto. Teniendo en cuenta, por ejemplo, el costo de una potencia promedio anual más un valor actualizado de incrementos

de demanda (tomado del análisis estadístico), incluido en esta las pérdidas de transmisión previamente analizadas. Se toma de base también, el costo actualizado de la inversión inicial afectada por una tasa atractiva, y los costos de mantenimiento anuales que son series uniformes de egresos. La justificación saldrá, del método de estudio utilizado, VPN o TIR, o costos capitalizados de inversión perpetua (menos recomendado debido a su análisis perpetuo) donde se manejarán los desembolsos o ingresos anualizados en el o los períodos estimados.

$$VPN = INVERSIÓN + \frac{\text{COSTOS}(\text{factor de cálculo, } i\%, N)}{i\%} - \frac{\text{BENEFICIOS}(\text{factor de cálculo, } i\%, N)}{i\%}$$

El costo capitalizado de las pérdidas kilométricas de los superconductores, se realiza sobre un período de vida proyectado. Para el período de vida de la obra sobre todo de los sistemas de enfriamiento criogénico, la potencia máxima que pasa por la línea (en ausencia de fallas en las obras circundantes) se asume que es constante cada año. Asumiendo que las variaciones son mínimas, así como el costo anual del KW de pérdidas (!j), correspondiente a la utilización de superconductores. El costo kilométrico, para un número de conductores por haces determinado y los sistemas de enfriamiento criogénico de las líneas, se plantea con una formulación sencilla la siguiente relación:

$$C_t = C_l + C_p = A + B U + C S + c$$

$$C_p = 3 \frac{\text{---}}{S \cdot I^2 \text{ max. !j. " I / (I+i)^X, X = N}}$$

Si i es la tasa de actualización, N el período de vida de la línea, A constantes de costos (\$ / Km) para herrajes, B constante de costo para la

tensión (\$ / KV. Km), C constante de costo para la sección del conductor incluyendo el sistema de enfriamiento.

$$C_s = (3 I_{\max}^2 \frac{C}{S}) / S, (\$ / \text{mm}^2 \cdot \text{KM})$$

c costo de pérdidas ($\frac{P}{S} = \frac{3 I_{\max}^2 c}{S}$),
 (c = $\frac{3}{S} \cdot I_{\max}^2$), S es la sección total de un conductor de fase, U la tensión máx. entre fases.

La potencia económica máxima a transmitir es:

$$P_{\max} = U \cdot I_{\max} \cdot \sqrt{3} \cos \phi$$

Pérdidas en el pico, reducidas al kilómetro de línea:

$$P_j = 3 \frac{I_{\max}^2 c}{S}$$

4.8. Análisis estadísticos de carga

Cuando no se conoce la carga máxima operable por los superconductores, la variable explicativa en el modelo será generalmente la capacidad instalada de transformación al nivel de voltaje considerado, a causa de la estabilidad empírica de la relación:

Capacidad de transmisión de los superconductores / Demanda máxima a este nivel de la red.

Esta relación puede variar de 2,5 en alta tensión a la mitad para baja Tensión según el factor de potencia y los márgenes operativos que se

consideran deseables. De acuerdo con los problemas metodológicos profundos que plantea el enfoque estadístico para el cálculo del costo marginal de transmisión, será útil completar este enfoque mediante el cálculo de un costo de desarrollo medio.

Inversiones de superconductores durante un período / aumento de la potencia suministrada.

El cálculo práctico del costo de adelantamiento plantea varios problemas que no son específicos de este enfoque:

Es necesario determinar una depreciación económica para los diferentes tipos de equipo, como el encapsulado y los sistemas criogénicos, y esta depreciación depende de parámetros económicos (ritmo de progreso tecnológico, en 1ra inversión, ponderación de los costos de operación en comparación con el costo de inversión, tasa de aumento de los cargos de mantenimiento, entre otros) es diferente a la depreciación contable originada esencialmente por las normas fiscales.

La distribución los costos de mantenimiento entre los diferentes equipos (líneas, cables, enfriamiento criogénico y encapsulado), está determinada a menudo más o menos arbitrarias que conviene confrontar con los resultados de un estudio estadístico.

Un análisis de la tasa de progreso técnico en las inversiones y del ritmo de crecimiento de los gastos de mantenimiento, conduce a una depreciación económica del primer año de 4,7 % para líneas, cables, encapsulado y sistemas criogénicos. La tasa de actualización es de 16 %.

Otro factor es la importancia de la infraestructura que se considera deseable instalar en función de una demanda. Si esta inversión está sobredimensionada y la demanda crece poco, no existirá una correlación estadística entre ambas sino a largo plazo.

Aunque a un nivel muy global y en el transcurso de muchos años, los enfoques incrementales y estadísticos corresponden al mismo costo de desarrollo, dan resultados diferentes según el grado de individualidad con aumento de la demanda. La sobreestimación del costo marginal es tanto más grande, cuanto más fuertes los rendimientos de escala y menor que el ritmo de crecimiento de la demanda.

Luego se analizan las pérdidas técnicas. Estas pérdidas se deben a la energía consumida por los equipos relacionados a los procesos de generación, transmisión y distribución, la misma que no es facturada. Es un fiel reflejo del estado y la ingeniería de las instalaciones eléctricas, dependen básicamente, del grado de optimización de la estructura del sistema eléctrico, y de las políticas de operación y mantenimiento. Su mayor concentración, es ocasionada por la transmisión de energía eléctrica por medio de conductores, transformadores y otros equipos del sistema de distribución (efecto Joule, pérdidas en el núcleo), así como por las ocasionadas en las líneas de transmisión por el efecto corona.

Tabla IX. **Pérdidas técnicas II**

Elemento	Porcentaje (%)	Energía (MWH)	Costo (US\$)
Líneas de Subtransmisión	1	1,051.49	\$ 74,024.90
Subestación	0.66	691.77	\$ 48,700.61
Alimentadores Primarias	2.35	2,461.71	\$ 173,304.38
Transformadores	2.64	2,767.09	\$ 194,803.14
Redes Secundarias	3.03	3,179.16	\$ 223,812.86
Alumbrado Publico	0.84	871.64	\$ 61,363.46
Acometidas	0.49	512.49	\$ 36,079.30
TOTAL	11.01	11,535.35	\$ 812,088.64

Fuente: AGUIRRE HERNÁNDEZ, Douglas. *Plan estratégico de reducción de pérdidas comerciales de la empresa eléctrica Los Ríos C. A.* p. 4.

En la tabla anterior se muestran las pérdidas actuales, las pérdidas al utilizar superconductores en porcentaje es el siguiente.

Total: 0,0978
 Energía MWH: 101,62
 Costo US\$ 7164,56

4.9. Aplicación de superconducción y su inversión inicial, mantenimiento y sostenibilidad

La posibilidad de usar la superconductividad para transmitir alta potencia genera una visión nueva del transporte de la energía eléctrica, que tarde o temprano se implementará en Guatemala. El sistema de superconducción se caracteriza por: la posibilidad de transmitir una mayor cantidad de energía en

menor espacio pudiendo descongestionar la red eléctrica, sin la necesidad de construir nuevas infraestructuras.

En la figura siguiente se muestra la comparación de capacidades de transporte entre los cables convencionales y su equivalente superconductor. Es de hacer notar el menor requerimiento de espacio de los cables superconductores.

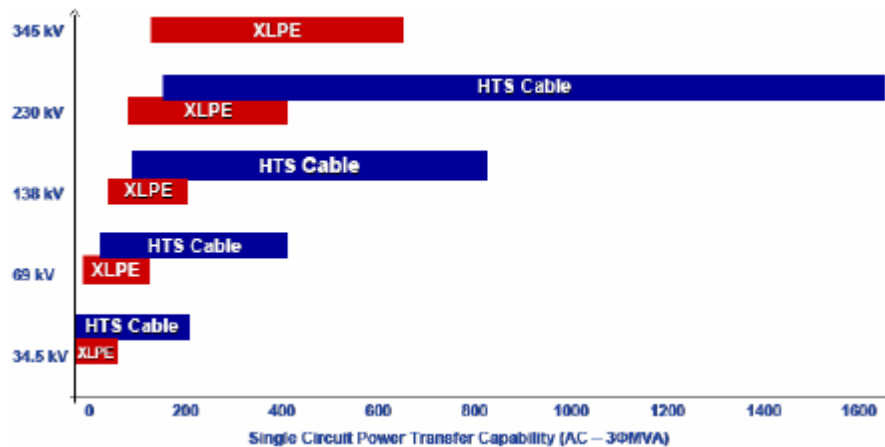
Figura 22. **Disposición de los cables superconductores versus lo cables tradicionales**



Fuente: *Impacto de un cable superconductor sobre la eficiencia energética de la red eléctrica.*
<https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6397/2/Impacto%20de%20un%20cable%20superconductor%20sobre%20la%20eficiencia%20energ.pdf>. Consulta: noviembre de 2012.

La posibilidad de transmitir mucha mayor corriente por lo que sin aumentar la tensión pueden transportar mayor cantidad de energía. En efecto, los cables superconductores tienen una impedancia incomparablemente menor, por lo que pueden transportar energía a mayores distancias a tensiones menor, tal cual lo muestra la figura siguiente.

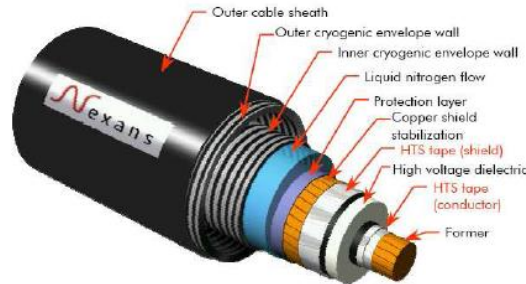
Figura 23. Relación de impedancias



Fuente: *Impacto de un cable superconductor sobre la eficiencia energética de la red eléctrica*.
<https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6397/2/Impacto%20de%20un%20cable%20superconductor%20sobre%20la%20eficiencia%20energ.pdf>. Consulta: noviembre de 2012.

La introducción de un nuevo tipo de cables, el llamado cable HTS, que es el cable superconductor utilizado en el proyecto LIPA enfriado por nitrógeno, que tiene la capacidad de eliminar por completo la emisión de campo magnético, mediante el uso de la pantalla superconductora incluida en su arquitectura, lo que bloquea las interferencias producidas por la red y reduce los posibles riesgos de salud asociados.

Figura 24. **Estructura del cable HTS**



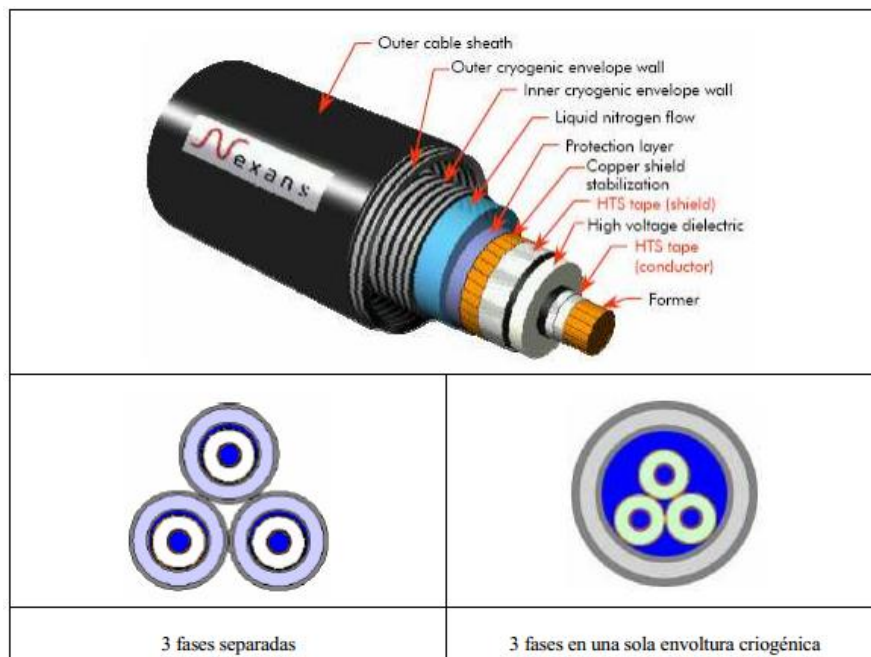
Fuente: *Impacto de un cable superconductor sobre la eficiencia energética de la red eléctrica*.
<https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6397/2/Impacto%20de%20un%20cable%20superconductor%20sobre%20la%20eficiencia%20energ.pdf>. Consulta: noviembre de 2012.

El uso de los superconductores modifica radicalmente el diseño, la operación y el mantenimiento de los equipos. Los transformadores, limitadores de corriente, motores, conductores y sistemas de almacenado de energía son los principales productos que tienen un impacto importante en transmisión y distribución. Las principales ventajas que ofrecen estos sistemas incluyen la reducción de las pérdidas eléctricas, la reducción del tamaño de los equipos y un ciclo de vida más prolongado. El cable HTS es conocido como cable *cold dielectric* (dieléctrico frío) monofásico (CD).

La diferencia más importante es el empleo de un material dieléctrico, proporcionando un aislamiento eléctrico compatible con las temperaturas criogénicas. El nitrógeno líquido que actúa como refrigerante circula por la cavidad interna del criostato, proporcionando la refrigeración necesaria y contribuyendo a el aislamiento eléctrico, entre las capas superconductoras interiores y la capa de apantallamiento más exterior. Estos tipos de cables ofrecen varias ventajas importantes:

- Reducción de las pérdidas AC: permite espaciar las estaciones de refrigeración y el equipamiento auxiliar necesitado para asegurar las operaciones de fiabilidad.
- Baja inductancia (cable VLI) (la pantalla electromagnética reduce drásticamente su impedancia).
- Anulación completa de radiaciones electromagnéticas al exterior del ensamblaje del cable.

Figura 25. **Estructura de un cable superconductor de tres fases**



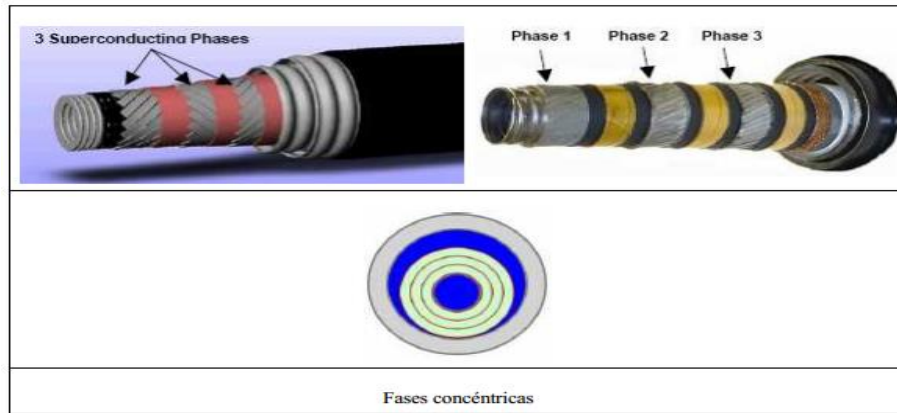
Fuente: *Impacto de un cable superconductor sobre la eficiencia energética de la red eléctrica.*
<https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6397/2/Impacto%20de%20un%20cable%20superconductor%20sobre%20la%20eficiencia%20energ.pdf>. Consulta: noviembre de 2012.

Las 3 fases separadas no emiten EMF (campo electro-magnético) gracias a su pantalla superconductora. El apantallamiento realizado por el superconductor (es diamagnético), también es eficaz a baja frecuencia e incluso con campos magnéticos estacionarios, lo que repercute en una disminución de su inductancia. Esta solución es particularmente adaptada a la transmisión de alta tensión y pueden ser tendidos en distancias grandes.

La opción de incluir las 3 fases en una sola envoltura criogénica (Sumitomo) no produce EMF, por la propia cancelación de corrientes y por la pantalla que impide además el acoplamiento de campos entre las tres fases. Es un diseño compacto y sus pérdidas son menores debido a la menor superficie exterior. La contracción y expansión se compensan dentro de la envoltura criogénica, ya que a diferencia de las 3 fases separadas, las 3 fases están aquí trenzadas, lo que permite compensar naturalmente el fenómeno de contracción térmica (variación de unos 0,3 % de la longitud) que aparece cuando el cable está refrigerado.

De hecho, los dispositivos de gestión de esta contracción, que se sitúan normalmente al nivel de los terminales, no son necesarios. Esta geometría está bien adaptada para las medias tensiones y las más bajas de las altas tensiones (60-70 kV).

Figura 26. **Estructura transversal del cable superconductor**



Fuente: *Impacto de un cable superconductor sobre la eficiencia energética de la red eléctrica*.
<https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6397/2/Impacto%20de%20un%20cable%20superconductor%20sobre%20la%20eficiencia%20energ.pdf>. Consulta: noviembre de 2012.

La configuración en fases concéntricas, se detalla en la figura anterior. El campo electromagnético está compensado y una pantalla de cobre conectada al neutro recubre el conjunto. Es un diseño compacto que optimiza el uso de cintas HTS. Es apropiado para las medias tensiones.

Se han realizado multitud de proyectos relacionados con cables superconductores, pero solo algunos de ellos han sido instalados y probados en redes eléctricas. El primer sistema que se instaló en una subestación lo realizó NKT Cables en Dinamarca, conectado en marzo 2001, y suministró energía a zonas residenciales y comercios de Copenhague. El sistema, formado por tres cables monofásicos WD de 30 000 metros, suministraba 2 kA a 36 kV y estuvo funcionando durante 2 años hasta que se decidió dismantelar a causa de problemas con el sistema de crio-refrigeración.

Otro proyecto importante lo realizó SuperPower, con la participación de BOC (miembro de Linde Group), Sumitomo Electric Industries, Ltd. y National Grid, en Albany (Estados Unidos) y se energizó en julio 2006. El cable HTS 1G de diseño CD, que conectaba dos subestaciones de National Grid a una tensión de 34,5 kV, suministraba 0,8 kA (48 MVA) y tenía una longitud de 35 000 metros. Dispone de una interconexión intermedia, un tramo de cable 1G, de 35 000 metros, fue reemplazado este en 2008 por un cable 2G, lo que acabó el proyecto el 13 de junio 2008.

El proyecto Columbus, realizado en Ohio por South Wire NKT Cables (Ultera), AMSC (American Superconductor), Praxair, American Electric Power y Oak Ridge Nacional Laboratory, se inició en abril de 2002 y se energizó en agosto de 2006. Consta de un cable de 200 000 metros triaxial CD de 13,2 kV y suministra 3 000 kA, y alimenta el equivalente de 36 000 hogares.

El proyecto LIPA, realizado en Long Island por AMSC, Nexans, Air liquide y Long Island Power Authority, se inició en marzo 2003 y es el primer cable que funciona a tensión de transporte de 138 kV y suministra 2,4 kA, una potencia de 574 MVA equivalente a alimentar 300 000 hogares. Tiene una longitud de 65 000 m y consta de tres cables monofásicos de diseño CD. Dicho proyecto tiene una segunda fase que consiste en reemplazar el actual 1G por un cable 2G.

El fuerte crecimiento de consumo eléctrico en la ciudad de Nueva Orleans provoca la saturación de la red de distribución de 13 kV. La dificultad de conseguir derecho de paso para líneas aéreas de 230 kV o 13 kV, la pequeña disponibilidad de espacio para nuevas subestaciones de 230 kV o ampliaciones dentro de áreas densamente urbanas, lo cual comporta baja calidad de suministro de la red de 13 kV, han desembocado en un proyecto de un cable

HTS de 160 000 metros a 13,8 kV que transmitirá 600 MVA a una pequeña subestación emplazada dentro del área urbana, con una única estación criorefrigeradora, por lo que se ahorran transformadores y se consiguen los requerimientos del futuro crecimiento de demanda.

En Barcelona, Endesa ha entregado un premio Novare al Consejo Superior de Investigación Científicas (CSIC) para desarrollar conjuntamente con Nexans, Labein-Tecnalia y la Universidad Autónoma de Barcelona, un cable HTS de 25 kV y 111 MVA de 190 000 metros que se probará probablemente en 2013. Este cable constituirá el cable de mayor potencia a este nivel de tensión.

4.10. Comparativa de las características eléctricas

En la tabla siguiente se muestra la comparativa de las propiedades eléctricas de un cable superconductor (Cables HTS Cold dielectric) y de un cable subterráneo. Este estudio ha sido hecho para tensiones de 120 kV a 60 Hz y una misma capacidad de transporte.

Tabla X. Comparación de transporte

Tecnología	Resistencia (Ω/m)	Inductancia (mH/km)	Capacidad (nF/km)
HTS Cold dielectric	0.0001	0.06	200
Convencional XLPE	0.03	0.36	257
Cable aéreo	0.08	1.26	8.8

Fuente: F. SCHMIDT, A. Allais. *Superconducting cables of power transmission applications – a review*. <http://cds.cern.ch/record/962751/files/p232.pdf>. p. 234.

En la evolución de la red con la demanda creciente hay dos aspectos que preocupan. En primer lugar una necesidad de mejorar su estabilidad y, en segundo lugar la necesidad de incluir generación dentro de la misma red y a niveles de distribución. Este segundo punto, da lugar a un cambio de concepto que se conoce como generación distribuida. En ambos casos se debe unir todas las subredes al resto de la red de forma redundante con una concepción bidireccional creando lo que se llama redes super-seguras (un ejemplo lo constituye el proyecto de LIPA de ADCO en Long Island) junto con la generación distribuida.

En consecuencia se han de unir eléctricamente, de una manera u otra, las diferentes subestaciones. De momento para poder transmitir suficiente energía, el enlace se hace mediante líneas de alta tensión que, según los casos, significa la inclusión de dos transformadores. La posibilidad de unir las subestaciones directamente a media tensión, conllevaría al abandono de los transformadores.

Desde el punto de vista del flujo de energía, existe una diferencia importante entre un enlace en el nivel de alta tensión y otro en el nivel de media tensión. Ya que el flujo de energía, en la concepción convencional, es desde generación hacia el consumo, en la subestación el flujo de energía iría de alta a media tensión, el circuito de enlace por alta tensión tendría que comprender forzosamente, y como mínimo, un transformador en el caso de que la energía fuera transportada al conjunto a través de otra línea de alta tensión y dos en el caso de que la energía se considerara proporcionada desde el nivel de media tensión.

En la concepción de redes con generación distribuida, el enlace a alta tensión tiene que tener en cuenta la presencia de dos transformadores para toda la energía que se produce en el nivel de media tensión, ya que el flujo producción-usuario se realizaría en el esquema media tensión-alta tensión-media tensión.

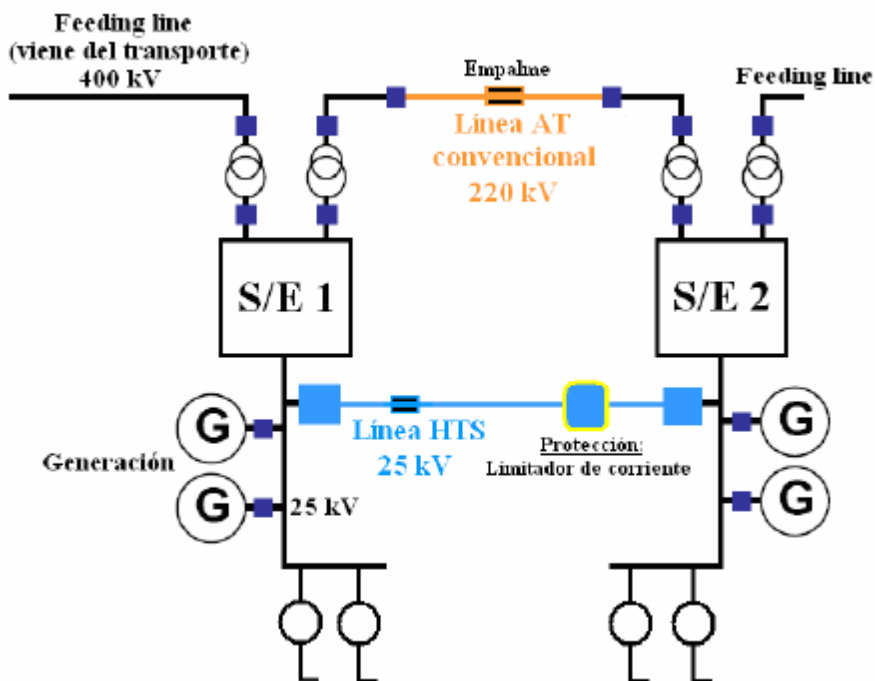
En este apartado, se tomarán dos subestaciones genéricas en una ciudad de alta densidad como lo es la ciudad de Guatemala, la densidad energética y se analizarán las diferencias de pérdidas que se consiguen entre un enlace de AT convencional y una línea HTS. Se compararán las pérdidas de energía de esta línea con una línea superconductora cuya corriente nominal sería de 10 000 A. Hasta ahora ningún cable superconductor ha sido diseñado para transportar tal intensidad y, de acuerdo con la figura siguiente está más allá del límite de lo estimado como eficiente para el nivel de 25 kV.

La falta de datos validados nos lleva a establecer la comparación estimando las pérdidas por analogías a lo que existe (proyecto LIPA), mediante un escalado lineal que constituye una cota superior, por lo que no se tiene referencia para decidir hasta qué punto las hipótesis hechas pueden ser válidas. La aproximación se hará mediante una herramienta de cálculo de las pérdidas (utilizando la intensidad admisible exacta para la línea convencional).

El circuito permite enlazar la subestación 1, con la subestación 2. Se supone que el tendido de este circuito está realizado en su totalidad mediante tubulares hormigonados. La canalización tiene una longitud de aproximadamente 85 000 metros con dos puntos de unión a lo largo del recorrido.

Se trata de una línea de 220 kV, de cables de sección de 1 000 mm² de cobre. La línea está constituida por un circuito formado por tres conductores, cada uno independiente y con aislamiento seco de polietileno reticulado (XLPE).

Figura 27. **Línea convencional**



Fuente: *Impacto de un cable superconductor sobre la eficiencia energética de la red eléctrica*.
<https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6397/2/Impacto%20de%20un%20cable%20superconductor%20sobre%20la%20eficiencia%20energ.pdf>. Consulta: noviembre de 2012.

La figura anterior es la representación esquemática del enlace entre dos subestaciones con generación dispersa conectada a MT.

4.11. Características de la instalación, características generales

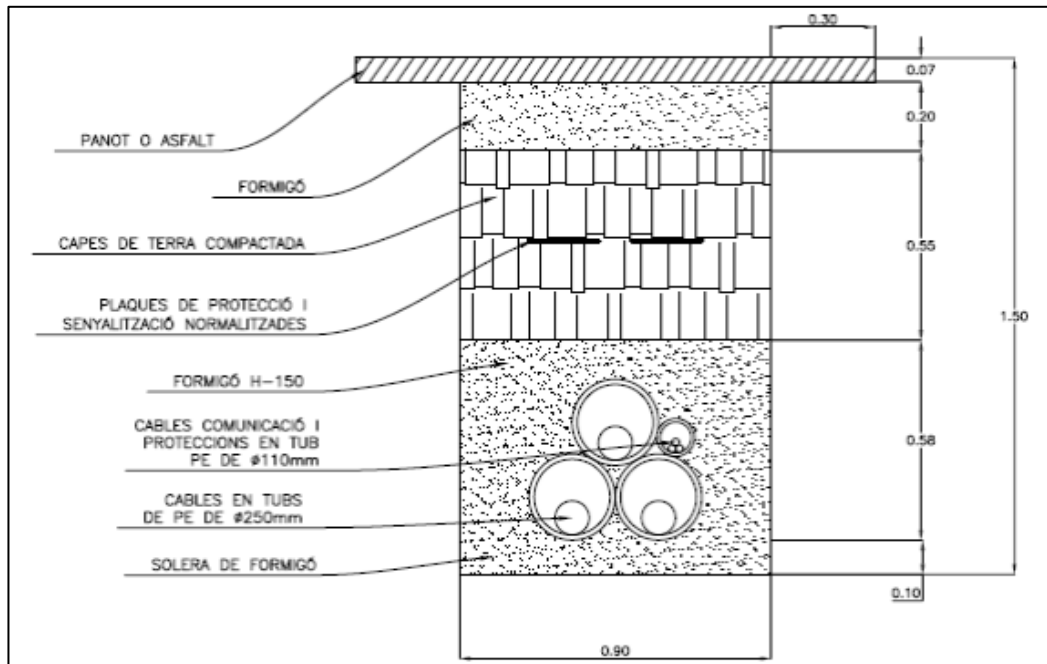
A continuación se muestra la tabla de las características generales de una instalación típica de la costa sur de Guatemala.

Figura 28. Características generales de la instalación

Longitud	1 390 metros
Tensión nominal	220 kV
Intensidad admisible	1 084 A
Potencia máxima de transporte	413 MVA
Número de circuito	1
Número y tipos de conductores	3 de 1000 mm ² Cu XLPE
Tiempo de accionamiento de la protección del cable	0,5 segundos
Intensidad de corto circuito en el conductor	202 kA
Tipo de canalización	Tubulares hormigonados
Disposición de los conductores	En triangulo
Profundidad de la instalación al eje del tubular	1,24 metros
Puesta a tierra de las pantallas metálicas	Cross-Bonding

Fuente: *Impacto de un cable superconductor sobre la eficiencia energética de la red eléctrica*.
<https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6397/2/Impacto%20de%20un%20cable%20superconductor%20sobre%20la%20eficiencia%20energ.pdf>. Consulta: noviembre de 2012.

Figura 29. Corte transversal de la instalación



Fuente: *Impacto de un cable superconductor sobre la eficiencia energética de la red eléctrica*.
<https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6397/2/Impacto%20de%20un%20cable%20superconductor%20sobre%20la%20eficiencia%20energ.pdf>. Consulta: noviembre de 2012.

Ha sido evaluado que la resistencia del conductor en corriente alterna a la temperatura de servicio es $R_{km AC} = 0,0254 \text{ W}$.

4.12. Pérdidas del circuito at

En la línea actual para calcular las pérdidas, se tendría que tomar en cuenta:

- Las pérdidas resistivas en los cables
- W potencia pérdida por metro longitud línea en W pérdida = 3´´

- Las pérdidas dieléctricas en los cables (en caso de Alta Tensión las pérdidas ya no son insignificantes). Aquí representan unos 4,5 W/m
- Las pérdidas en los 2 empalmes y pérdidas en los terminales

En los empalmes y terminales dichas pérdidas deben ser menores o como máximo iguales que en el cable, pero de todas formas no son relevantes ya que las pérdidas que se originan están dadas por unidad de longitud y lógicamente los empalmes y terminales, representan una longitud mínima en la instalación aunque tengan una resistencia específica mayor. Es decir, se calculará la pérdida en el cable sin tener en cuenta los empalmes y terminales.

- Las pérdidas de dos transformadores

No se tiene referencia de los equipos de transformación, por lo que se utilizan los datos procedentes de un estudio realizado por Leonardo ENERGY Transformers. Las pérdidas en los transformadores que funcionan en un régimen de factor de carga comprendido entre 50 % y 90 %, son equivalentes a un 0,5 % de la energía transformada. Así se tienen las pérdidas siguientes al nivel de los transformadores:

Tabla XI. **Pérdidas de los transformadores**

Factor de carga	Potencia transmitida (MVA)	Pérdidas 1 transformador (kW)	Pérdidas 2 transformadores (kW)
0	0	0	0
0,1	41,3	206,5	413
0,2	82,6	413	826
0,3	123,9	619,5	1239
0,4	165,2	826	1652
0,5	206,5	1032,5	2065
0,6	247,8	1239	2478
0,7	289,1	1445,5	2891
0,8	330,4	1652	3304
0,9	371,7	1858,5	3717
1	413	2065	4130

Fuente: <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6397/2/Impacto%20de%20un%20cable%20superconductor%20sobre%20la%20eficiencia%20energ.pdf>. Consulta: noviembre de 2012.

Luego se analizan las pérdidas del circuito con cable HTS, en el cual la potencia transmisible de un sistema trifásico de cable superconductores muestra (25 k V, $I_c = 5\,000$ A) es de 138 MVA. De hecho para transmitir una potencia de 413 MVA se tiene que utilizar un cable de corriente crítica, 3 veces más importante que la del cable muestra o 4 veces más importante que la de los cables del proyecto LIPA. Es decir, una corriente crítica de 15 000. Se tomará un cable de tipo Cold dieléctrico triaxial.

Se supondrá que, igualmente a la línea que ya existe, la línea de cables superconductores contiene dos empalmes a lo largo de su recorrido. Para evaluar las pérdidas del circuito superconductor, se tendría que tomar en cuenta:

- Las pérdidas en los cables
- Las pérdidas en los terminales
- Las pérdidas de los 2 empalmes

Las pérdidas en los terminales en el caso de cables superconductores, son mayores que en el caso de cables convencionales, lo que no es el caso de los empalmes. Para una línea de esa longitud el valor de las pérdidas en los terminales, queda dentro del error con que han sido consideradas las pérdidas totales. Sin embargo, la utilización de una línea superconductora permite liberarse de los transformadores de tensión.

Las gráficas dan los valores de pérdidas AC del conductor y de la pantalla HTS en el caso del proyecto LIPA. De la misma manera que para el cable muestra, para evaluar las pérdidas AC en el caso de este cable de corriente crítica igual a 15 000 A, se va a suponer, como cota superior, que la variación de las pérdidas AC en función de la corriente crítica del cable es lineal. Es decir, que se multiplicarán los resultados del proyecto LIPA por el cociente 4.

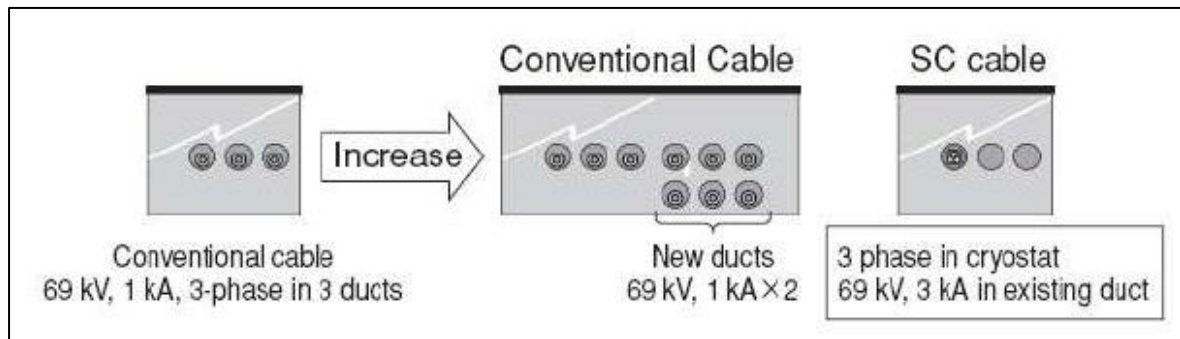
3750 15000

Por ejemplo se considerará que las pérdidas AC en el conductor para un factor de carga igual a 100 % son de 10,92 W /m.

Luego la comparativa de los costos globales para la construcción de un sistema convencional y un sistema hts (ejemplo). En este apartado, se compara el coste global de la instalación de dos sistemas equivalentes (un sistema convencional y un sistema HTS), sobre un ejemplo bien preciso. Este análisis ha sido realizado en 2011 en el ámbito del proyecto Albany. Así pues, el cable superconductor del estudio es de primera generación (HTS 1G).

Se supone que se tiene en una zona urbana de la Costa Sur de Escuintla, con elevada densidad de servicios, una línea de 3 fases separadas que transmiten 69 kV a 1 kA. Para este sistema trifásico convencional, 3 conductos (uno para cada cable) son necesarios. Si se quiere multiplicar la máxima potencia transmisible por 3, se necesita 6 nuevos conductos para poner nuevos cables de 1 kA. Sin embargo, al utilizar un cable superconductor de tipo triaxial (69 kV, 3 kA), se puede alcanzar el mismo resultado sin construir ninguno nuevo conducto. Se utilizaría uno de los conductos existentes para ubicar el cable superconductor y se quitaría las 2 fases convencionales restantes (2 conductos quedan vacíos).

Figura 30. **Relación de cables**



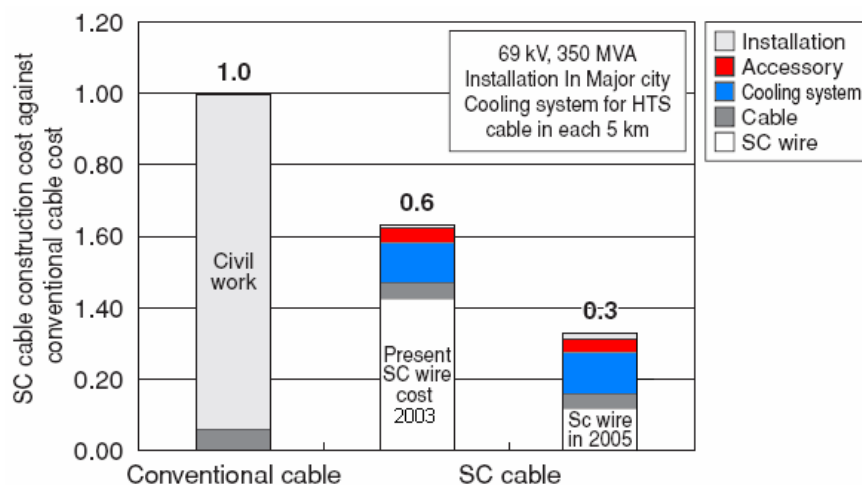
Fuente: <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6397/2/Impacto%20de%20un%20cable%20superconductor%20sobre%20la%20eficiencia%20energ.pdf>. Consulta: noviembre de 2012.

La figura anterior muestra el aumento de la capacidad de 1 kA a 3 kA, el coste de construcción de nuevos conductos, en particular en una ciudad de alta densidad como Tokio, Nueva York o Barcelona es extremadamente elevado. La figura siguiente muestra una comparación de los precios de construcción de las líneas convencionales y la línea superconductora, según las condiciones

evocadas previamente. Para la solución convencional, la mayoría del coste de la instalación proviene de la obra civil, mientras que en el caso de la solución superconductora, el material superconductor utilizado en el cable mismo tiene mayor influencia sobre el costo final.

El precio de la edificación de la línea superconductora, ha sido calculado suponiendo que se utilizan los conductos existentes y que las estaciones de criogenia se encuentran cada 5 kilómetros. El hecho de poder utilizar canalizaciones existentes vuelve el cable superconductor más competitivo.

Figura 31. **Comparación de costos en millones de euros**



Fuente: *Impacto de un cable superconductor sobre la eficiencia energética de la red eléctrica*.
<https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6397/2/Impacto%20de%20un%20cable%20superconductor%20sobre%20la%20eficiencia%20energ.pdf>. Consulta: noviembre de 2012.

La comparación se realiza en euros, por ser una moneda más estable a largo plazo.

Al disminuir el precio del material superconductor utilizado en el cable superconductor, se disminuye sensiblemente el coste global del sistema. Actualmente (2011), el precio de los materiales superconductores de segunda generación, es muchísimo más elevado que el precio de la primera generación como se ve en la tabla siguiente.

Tabla XII. **Coste en millones de euros**

	1G	2G
Coste (€/kA m)	77	310

Fuente: <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6397/2/Impacto%20de%20un%20cable%20superconductor%20sobre%20la%20eficiencia%20energ.pdf>. Consulta: noviembre de 2012.

Los cables HTS serán capaces transportar capacidades de 4 hasta 5 kA, lo que representa mucho más de la capacidad de los cables convencionales. De hecho, se podrá utilizar un equipo adaptado a más baja tensión, impidiendo a la vez las pérdidas del efecto Joules típicas de las aplicaciones de alta corriente y también los costes de los transformadores para elevar y disminuir la tensión (además de sus pérdidas propias).

Es necesario el análisis de la ampliación de los sitios de localización de los generadores, al reducir las caídas de tensión, los cables HTS *cold-dielectric* permiten colocar nuevos generadores más lejos de los centros urbanos (donde los costes son más bajos), o de incluir generación dentro de la red urbana mediante sistemas de almacenamiento (vehículo eléctrico), generación fotovoltaica u otras fuentes de energía renovable. Esto permite mejorar la

calidad del aire y la salud pública en las zonas donde la población es muy concentrada.

La utilización de las estructuras ya existentes, los cables HTS Cold-dielectric requieren un menor derecho de paso con respecto a los circuitos convencionales. De hecho, pueden ser tendidos a través de los corredores existentes y en el mejor de los casos a través de las canalizaciones existentes, reduciendo el tiempo para obtener nuevas autorizaciones y por consecuencia resolviendo rápidamente los problemas de congestión.

Otras de las ventajas es la mejor control y seguridad de la red y el flujo de potencia en un cable es inversamente proporcional a su impedancia. Al ser de muy baja impedancia, el cable HTS *cold-dielectric* facilita el flujo de corriente. De hecho se disminuye de manera importante las pérdidas eléctricas al favorecer la vía de transmisión con pérdidas minimizadas.

Gracias a su impedancia bajísima (cable VLI = Very Low Impedance), los cables HTS permiten controlar el flujo de potencia en la red al utilizar reguladores convencionales de ángulos de fases. (Eso proporciona los mismos beneficios que los dados por los sistemas de transmisión flexible AC o la transmisión DC.)

El cálculo estimado para las líneas de transmisión en los departamentos de la Costa Sur de Guatemala, utilizando la tecnología de superconductores del proyecto LIPA de ADCO, es de USD 525 000,00 que es un total de quinientos veinticinco millones de dólares. Si las pérdidas se estiman en 1,2 millones de dólares mensuales, el cálculo estimado para recuperar la inversión inicial es de: 457 meses, esto da un total de 36 años para recuperar la inversión.

Si bien este dato es desalentador, se debe recordar que esto es ahora, cuando solo el estado de Nueva York lo está utilizando. Está financiado por la empresa ADCO, a modo de prueba de su tecnología y ningún país aún ha pedido la instalación de este tipo de tecnología. La proyección de ADCO es que en el 2020, la tecnología de ADCO sea el común denominador en los sistemas de líneas de transmisión por medio de superconductores. Esto quiere decir que existirá una reducción en los costos de la tecnología y sobre todo acceso al financiamiento para adoptarla.

CONCLUSIONES

1. Al hacerse un análisis comparativo de las pérdidas/consumo de un sistema convencional con un sistema superconductor, se observa que la mayoría de la energía se pierde en los transformadores y de hecho hace el sistema superconductor mucho más eficiente.
2. Actualmente los cables superconductores no son competitivos comercialmente con respecto a los cables aéreos normales, a menos que cubran una gran distancia.
3. En los casos en que las líneas de transmisión deben ser subterráneas hay una ventaja económica, con la utilización de los cables superconductores.
4. Con el uso de los cables superconductores se obtiene ahorro energético en las líneas de media tensión, con respecto a los cables convencionales.
5. Es factible utilizar los cables superconductores, ya que habría una reducción en el costo de obra civil y menor inversión en equipos de transmisión convencional.

RECOMENDACIONES

1. Utilizar la tecnología norteamericana de cables superconductores a base de nitrógeno, puesto que el equipo, tecnificación y tecnología son de uso más generalizado a nivel mundial actualmente.
2. En zonas de alto impacto visual como la ciudad de Guatemala, se puede utilizar también la obra gris de otras instalaciones, tales como las de cable de telecomunicaciones, ya que no genera campos electromagnéticos, pagando únicamente derecho de uso, minimizando así los costos de una obra exclusiva para los cables.
3. Utilizar en montañas y explanadas, torres ya existentes puesto que es más barato este tipo de estructuras en áreas rurales.

BIBLIOGRAFÍA

1. AGUIRRE HERNÁNDEZ, Douglas. *Plan estratégico de reducción de pérdidas comerciales de la empresa eléctrica Los Ríos C. A.* Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2003. 9 p.
2. *Billar geo.* [en línea]. <http://image.slidesharecdn.com/billargeo-120521130235-phpapp02/95/billar-geo-1-728.jpg?cb=1337623397>. [Consulta: noviembre de 2012].
3. *El billar.* [en línea]. http://1.bp.blogspot.com/-IfiGSgZGIjU/UCFYqVe8pJI/AAAAAAAAA04/GErlcT8_SUA/s320/billar.jpg. [Consulta: noviembre de 2012].
4. *Electrobombas y grupos de presión.* [en línea]. <http://www.kripsol.com/electrobombas-y-grupos-de-presion>. [Consulta: noviembre de 2012].
5. GONZÁLEZ, Adolfo. *Superconductibilidad de los metales.* Argentina: Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, 2009. 17 p.
6. *Impacto de un cable superconductor sobre la eficiencia energética de la red eléctrica.* [en línea]. <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6397/2/Impacto%20de%20un%20cable%20superconductor%20so>

bre%20la%20eficiencia%20energ.pdf. Consulta: noviembre de 2012.

7. *Movimiento electrónico.* [en línea].
<http://www.bing.com/images/search?q=mesa+de+villar&FORM=HDRSC2>. [Consulta: junio de 2014].
8. *Ordenamiento electrónico.* [en línea].
<http://www.bing.com/images/search?q=mesa+de+villar&FORM=HDRSC2>. [Consulta: junio de 2014].
9. *Propiedades de las sustancias puras.* [en línea]. <https://encrypted-tbn2.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcT0GjG7MfkxMFVmVuGaAUk5zBqH22RoHH0dWd1h4fsCpPuloU63>. [Consulta: noviembre de 2012].
10. Superconductividad. [en línea].
<http://users.df.uba.ar/giribet/f4/Supercv2.pdf>. [Consulta: noviembre de 2012].
11. Universidad de Alicante. [en línea].
<http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/17271/1/refrigeracion.pdf>. [Consulta: abril de 2013].