

UNIVERSIDAD SAN SEBASTIÁN

FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA

SEDE SANTIAGO

RENIO: UN DESAFÍO TECNOLÓGICO

Trabajo de proyecto de título para optar al título de Ingeniero Civil en Minas

Profesor Guía: PhD. Roberto Acevedo Llanos

Alumno: Erick Fabián Montecino Castañeda

Santiago, Chile

2019

En Santiago, el de	_ de 2019 los abajo firmantes dejan
constancia que el alumno	de la carrera
Ingeniería Civil en minas ha aprobado la tesi	s para optar al título de licenciado en
ciencias de la Ingeniería con una nota de	_

AGRADECIMIENTOS

Debo dar gracias a los docentes que a lo largo de los años se han encargado que aprenda y me desarrolle como universitario en el área del saber. Han sido gran cantidad los profesores, entre los que destaco a Andrés Soto, Roberto Acevedo y Vlamir Muñoz, que han marcado mi carrera universitaria algunos con los cuales incluso he compartido más que una relación docente alumno, a ellos, por darme la oportunidad y entregarme parte de los conocimientos necesarios para desarrollarme como persona y profesional se los agradezco mucho.

RESUMEN

En este trabajo de título se indaga en forma exhaustiva y analítica uno de los recursos metálicos que se extrae de la industria de la minería. De acuerdo con lo indicado por la U.S. Geological Survey (2018) Chile es el líder mundial en producción de Renio. Este trabajo tiene como visión (sueño) y misión (estrategia) el sugerir una cadena global que integre los tópicos relevantes, desde el conocimiento básico de este metal, pasando por todas y cada una de las etapas hasta alcanzar a cubrir razonablemente la utilización de este recurso metálico. La estrategia seguida en este escrito incluye áreas tales como la fisicoquímica y la formación de compuestos en los cuales Renio está presente. De igual forma se intenta abordar en forma sistemática sus propiedades y tópicos minerogeológicos. Se entregan aspectos relevantes con referencia a sus aplicaciones y una mirada concienzuda y rigurosa del mercado mundial. Es necesario destacar que parte de este trabajo de título se encuentra inspirado parcialmente en el trabajo realizado por la Comisión Chilena de Cobre (COCHILCO) en el año 2016 que lleva por nombre "Mercado del renio y su producción en Chile" desde donde se toman algunos tópicos y se desarrollan más detalladamente los aspectos del área minera.

ABSTRACT

In this title work, it explores in a thorough and analytical way one of the metallic resources that is extracted from the mining industry. In accordance with what is indicated by the U.S. Geological Survey (2018) Chile is the world leader in the production of Rhenium the chemical element. This work has as vision (dream) and mission (strategy) to suggest a global chain that integrates the relevant topics, from the basic knowledge of this metal, going through each and every one of the stages until reaching to reasonably cover the use of this metallic resource. The strategy followed in this paper covers areas such as physical chemistry and the formation of compounds in which Rhenium is present. In the same way it is tried to approach in a systematic way its properties and mininggeological topics. Relevant aspects are delivered with reference to their applications and a thorough and rigorous view of the world market. It is necessary to point out that part of this title work is partially inspired by the work carried out by the Chilean Copper Commission (COCHILCO) in 2016, which is called "Rhenium Market and its production in Chile" from which some of the topics and develop more in detail aspects mainly of the mining area.

ÍNDICE

AGRADEC	IMIENTOS	II
RESUMEN		I\
ABSTRAC	т	٠١
1. ASPE	CTOS GENERALES	2
1.1. PRC	DBLEMA	2
1.2. HIP	ÓTESIS	2
1.3. OBJ	ETIVOS GENERALES	3
1.4. OBJ	ETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.5. INTF	RODUCCIÓN	2
2. RENIC	: UNA MIRADA DESDE LA GEOLOGÍA Y LA MINERÍA	
	IIO EN LA NATURALEZA	
2.1.1.	RENIÍTA	5
2.1.2.	RENIO CONTENIDO EN MOLIBDENITA	8
2.1.2	2.1. CRISTALOGRAFÍA DE LA RENIÍTA	9
2.1.3.	PROPUESTA GEOLÓGICA	10
2.2. MIN	ERÍA DEL RENIO	11
2.2.1.	PÓRFIDO CUPRÍFEROS	11
2.2.2.	PÓRFIDO DE MOLIBDENO	14
2.2.3.	ESTRATOLIGADOS DE COBRE EN ROCA SEDIMENTARIA	14
2.2.4.	YACIMIENTOS DE URANIO	15
2.3. REC	CURSOS Y RESERVAS	15
3. ANÁL	ISIS Y PROPUESTA DE LA CADENA PRODUCTIVA DE RENIO	17
3.1. CON	ICEPTOS GENERALES	17
3.2. MOL	LIBDENOS Y METALES S.A. (MOLYMET)	17
3.2.1.	MOLYMET EN LA INDUSTRIA MINERA	18
3.3. PRC	OCESO BASE PARA LA PROPUESTA	19
3.3.1.	ANÁLISIS Y PROPUESTA DE OBTENCIÓN	19
3.4. DIS	CUSIÓN	24
3.5. DES	ARROLLOS TECNOLÓGICOS	25
3.6. REA	CCIONES EN LA CADENA PRODUCTIVA DEL RENIO	25
3.7. PRI	NCIPALES PRODUCTOS DE LA RECUPERACIÓN DE RENIO	27

4.	CHILE	EN I	EL MERCADO DEL RENIO	28
	4.1. PRO	DUC	CCIÓN MUNDIAL ANUAL DE RENIO	28
	4.2. EVO	LUC	IÓN HISTORICA DEL VALOR DEL RENIO	30
	4.3. NUE	VAS	EMPRESAS PRODUCTORAS DE RENIO	31
	4.3.1.	M	OLYB	32
5.	USOS	DE F	RENIO	33
	5.1. USO	ΤĺΡ	ICO POR PRODUCTO	33
	5.2. CON	SUN	MO ANUAL DE RENIO	33
	5.2.1.	SL	JPERALEACIÓN EN LA INDUSTRIA AERONÁUTICA	34
	5.2.1	.1.	REPRESENTACIÓN DEL USO DE RENIO EN ASPAS	36
	5.2.1	.2.		
	5.2.1	.3.	OTROS USOS DE UNA SUPERALEACIÓN	39
	5.2.2.	CA	ATALIZADORES PLATINO-RENIO	40
	5.2.3.	US	SOS MENORES DE RENIO	40
	5.2.3	.1.	ALEACION TUNGSTENO-RENIO (WRe)	40
	5.2.3	.2.	ALEACIÓN MOLIBDENO-RENIO (MoRe)	41
	5.2.3	.3.	ISÓTOPOS EN LA MEDICINA: RENIO-188	42
	5.2.3	.4.	DATACIONES RENIO-OSMIO	42
6.	SUSTI	ΓUΤ	OS Y RECICLAJES DE RENIO	45
	6.1. SUS	TITU	JCIÓN DE RENIO EN PRODUCTOS CLAVE	45
	6.2. MER	CAE	OO DE RECICLAJE	47
			EL MUNDO MICRO	
	7.1. PALA	۱BR	AS INTRODUCTORIAS	48
	7.2. MEC	ÁNI	CA CUÁNTICA	48
	7.2.1.	DE	EFINICIÓN GENERAL DE LA MECÁNICA CUÁNTICA	48
	7.2.2.	ME	ECÁNICA CUÁNTICA DE LOS ELEMENTOS	50
	7.2.3.	ΝÚ	ÚMEROS CUÁNTICOS	51
	7.3. CON	TRA	ACCIÓN DE LOS LANTÁNIDOS	54
	7.4. ESC	ALA:	S DE ELECTRONEGATIVIDADES	55
	7.4.1.	EL	ECTRONEGATIVIDAD DE PAULING	55
	7.4.2.	EL	ECTRONEGATIVIDAD DE SANDERSON	58
	7.4.2	.1.	APLICACIÓN DE SANDERSON	60
	743	FI	FCTRONEGATIVIDAD DE MULLIKAN	63

7.4.4. RESUMEN DE ELECTRONEGATIVIDADES	65
7.4.5. ESTADOS DE OXIDACIÓN	65
7.4.6. PROPIEDADES PERIÓDICAS ADICIONALES	67
7.5. OTROS CONCEPTOS IMPORTANTES	67
7.5.1. VOLUMENES ATÓMICOS Y MOLECULARES	67
7.5.2. RELACIONES DE TAMAÑO	68
8. COMPUESTOS EN LOS CUALES PARTICIPA RENIO	70
8.1. COMPUESTOS DE RENIO	70
8.2. HEPTAÓXIDO DE RENIO (Re ₂ O ₇)	73
8.2.1. PROPIEDADES DE LOS ÓXIDOS COMUNES DE RENIO	73
9. CONCLUSIONES	75
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
ANEXO I	86
PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS	86
ANEXO II	88
ABUNDANCIA EN LA CORTEZA TERRESTRE	88
ANEXO III	90
ISÓTOPOS DE RENIO	90
ANEXO IV	91
ÓXIDOS DE RENIO	91
HEPTAÓXIDO DE RENIO (Re ₂ O ₇)	91
DIÓXIDO DE RENIO (ReO ₂)	91
TRIÓXIDO DE RENIO (ReO ₃)	92
OTROS ÓXIDOS DE RENIO	92
APÉNDICE I	94
TABLA PERIÓDICA DE ELECTRONEGATIVIDADES	94
APÉNDICE II	96
DETERMINACIÓN DE RENIO EN MOLIBDENITA	96
APÉNDICE III	97
PROPLIESTA PARA LA ELECTRONEGATIVIDAD DE SANDERSON	07

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: PROPIEDADES DE LA RENIÍTA	6
Tabla 2: RENIO CONTENIDO EN CONCENTRADO NACIONAL	12
Tabla 3: RENIO CONTENIDO EN CONCENTRADOS DE EE. UU	13
Tabla 4: RECURSOS Y RESERVAS DE RENIO POR PAÍS	16
Tabla 5: CAPACIDAD MÁXIMA INSTALADA POR EMPRESA AL 2012	32
Tabla 6: PRODUCTOS DE RENIO Y SU APLICACIÓN USUAL	33
Tabla 7: COMPOSICIÓN DE LAS SUPERALEACIONES BASE NÍQUEL	35
Tabla 8: PRODUCCIÓN DE RENIO DE LA UNIÓN EUROPEA	47
Tabla 9: ELECTRONEGATIVIDAD DE PAULING	56
Tabla 10: CÁLCULO DEL GAS NOBLE (ΔGN)	62
Tabla 11: NÚMEROS DE COORDINACIÓN	69
Tabla 12: COMPUESTOS DE RENIO	70
Tabla 13: COMPUESTOS RENIO-CLORO	71
Tabla 14: COMPUESTOS RENIO-FLUOR AZUFRE	
Tabla 15: ÓXIDOS DE RENIO	
Tabla 16: PROPIEDADES FÍSICO QUÍMICAS DEL RENIO	
Tabla 17: ISÓTOPOS DE RENIO	90
Tabla 18: VALORES PARA PROPUESTA DE ECUACIÓN	98
ÍNDICE DE GRÁFICAS	
Gráfica 1: PRODUCCIÓN HISTÓRICA DE RENIO 2004-2017	28
Gráfica 2: PRODUCCIÓN MUNDIAL DE RENIO EN 2017	
Gráfica 3: VALOR PROMEDIO ANUAL DE RENIO METÁLICO EN POLVO	
Gráfica 4: ESTIMACIÓN DEL USO DE RENIO ANUAL (2017)	
Gráfica 5: EVOLUCIÓN DE LAS ALEACIONES	
Gráfica 6: SUSTITUTOS DEL RENIO SEGÚN EL ÁREA	
Gráfica 7: COEFICIENTES DE DILATACIÓN TÉRMICA	

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: CRISTALES DE RENIÍTA	5
Ilustración 2: RENIÍTA OBSERVADA POR UN MICROSCOPIO ELECTRÓNICO.	7
Ilustración 3: RENIO Y RENIÍTA EN MOLIBDENO	8
Ilustración 4: ReS ₂ y MoS ₂	9
Ilustración 5: DIAGRAMA DE FLUJO	20
Ilustración 6: PROCESO PRODUCTIVO	23
Ilustración 7: DIAGRAMA DE FLUJO MODIFICADO	24
Ilustración 8: ASPAS DE SUPERALEACIÓN	37
Ilustración 9: REPRESENTACIÓN DE UNA TURBINA	38
Ilustración 10: REPRESENTACIÓN DE UN MOTOR F100	39
Ilustración 11: ORBITALES s(ROJO), p(AMARILLO), d(azul), f(VERDE)	52
Ilustración 12: NÚMEROS CUÁNTICOS DE RENIO	54
Ilustración 13: COMPUESTO DE RENIO-3	66
Ilustración 14: ÁTOMOS POR ELEMENTO POR CADA 106 Át. DE SÍLICE	88
Ilustración 15: TABLA PERIÓDICA DE ELECTRONEGATIVIDAD	95

1. ASPECTOS GENERALES

1.1. PROBLEMA

El Renio [75Re] es un metal con un comportamiento singular debido a que es afectado de manera directa por la contracción lantánida que ocurre posterior al elemento Lantano [57La] donde el sistema periódico cambia de los elementos de transición a una tabla adicional en la parte inferior llamada elementos de transición interna, donde el último elemento de estos, Lutecio [71Lu], da paso nuevamente a los elementos de transición afectando el cálculo teórico de las propiedades de los elementos que comparten este grupo (grupo 6) por lo que se requieren de estudios experimentales para obtener valores objetivos. Esta condición conlleva a que exista poca información y estudios al respecto. Adicional a su comportamiento existe hermetismo en la industria, cuando se refiere a información concreta sobre este metal, lo cual es un problema para los ingenieros en formación que desean interiorizarse en el tema en especial a los lectores en habla hispana.

1.2. HIPÓTESIS

Basados en conocimientos previos a la escritura de este escrito es posible postular algunas hipótesis cuyo cumplimiento se analiza con más detalle en la parte final de este trabajo:

- Se conoce que la abundancia de este elemento es baja en comparación al resto de los elementos que se encuentran en la corteza terrestre, por lo que las fuentes existentes de este metal requieren de un análisis con mucho mayor grado de detalle.
- Debido a la poca información clara y detallada existente se requiere proponer algunos tópicos para lograr unificarlos a gran escala.

 Se asume que el aplicar análisis a escalas nuevas o poco desarrolladas, como la electronegatividad de Sanderson, requiere de análisis que posiblemente conlleven a otros estudios derivados de este.

1.3. OBJETIVOS GENERALES

El tema dice relación con el elemento químico Renio [75Re] y el propósito de este trabajo de título es presentar y desarrollar un escrito que unifique de manera general tópicos macro que dicen relación con su producción y uso en la industria moderna, el cual requiere de una visión geológica para una posterior propuesta de procesamiento de este metal, hasta tópicos micro relevantes para su procesamiento tales como las propiedades y el comportamiento del Renio, todo esto en beneficio del lector que requiera antecedentes del Renio y sus usos industriales, información de difícil acceso debido al hermetismo y a la poca información que existe para el público en general.

1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Con el fin de lograr de manera óptima el principal objetivo, a continuación se describen los objetivos específicos a lograr en este trabajo de título:

- Analizar la fuente de procedencia del Renio, su abundancia y menas a nivel nacional con un enfoque a Chile cuando corresponda.
- Proponer una cadena de producción este metal, analizando su producción a nivel nacional y el impacto que éste genera en el mercado mundial.
- Identificar el uso de este metal incluyendo ejemplos referenciales de éstos.
- Presentar los principales compuestos de los que forma parte el Renio y sus principales características.

1.5. INTRODUCCIÓN

El descubrimiento de Renio se atribuye a tres científicos de origen Alemán que, mediante un análisis espectrográfico con rayos x, han reportado el detectar este metal en el año 1925 y cuyos nombres son Ida Eva Tacke, Walter Noddack y Otto Karl Berg. Este elemento cuenta con la particularidad de haber sido predicho por el creador de la tabla periódica Dimitri Mendelev quien al momento de ordenar los elementos descubiertos a la fecha de la creación de la tabla tuvo que predecir mediante cálculos algunos de los elementos faltantes debido a existencia de lagunas (espacios vacíos entre elementos) siendo el Renio uno de los elementos que Mendelev predijo. Los trabajos de investigación efectuados en el período 1925-1928 permiten el descubrir el Renio en Minerales de Platino, Columbita, Gadolinita y Molibdeno. El nombre Renio, proviene del latín Rhenus (nombre original del rio Rin, uno de los fluviales más importantes en Europa) debido a que el análisis que data del año 1925 se realiza en las cercanías de aquel río. Desde un punto de vista del sistema periódico y de propiedades asociadas, se sabe que Renio es un elemento de la tercera serie de transición y goza de un color blanco platinado con brillo metálico. Texto inspirado en el podcast que comparte Scerri (2017) en conjunto con el resumen histórico entregado por la Royal Society of Chimestry (RSC) en 2017, ambos publicado por RSC.

2. RENIO: UNA MIRADA DESDE LA GEOLOGÍA Y LA MINERÍA

2.1. RENIO EN LA NATURALEZA

2.1.1. **RENIÍTA**

El Renio como metal nativo (Re) es muy escaso en la superficie terrestre, como muestra el anexo II, al igual que su forma de sulfuro llamado Reniíta (ReS₂), nombre adjudicado debido al Renio presente en su composición, mineral cuya existencia está asociada habitualmente a las fumarolas de volcanes, ambiente geológico donde según comparte Mindat (2018) ha sido descubierto este mineral en el año 1994 siendo posteriormente aceptado en 2004 como mineral por la International Mineralogical Association (IMA). La ilustración 1 muestra una de las fotografías que se tienen de este mineral publicada por Nishio-Hamane D. (2015) en donde se aprecia Reniíta como cristales grises-negros brillantes los cuales se encuentran depositados en una roca de matriz volcánica:



Ilustración 1: CRISTALES DE RENIÍTA FUENTE: Nishio-Hamane D.

El conocimiento existente sobre este sulfuro es escaso, por lo que este tópico (Reniíta) se trata en base a una visión general del primer escrito oficial aceptado el cual se encuentra en su idioma nativo, ruso, estudio publicado por Znamensky

et al. (2005) y que lleva por nombre "Reniíta, ReS₂, el sulfuro natural de Renio proveniente desde las fumarolas del volcán Kudryavy" (Traducido del ruso al español). Este mineral fue descubierto en el volcán Kudryavy, Rusia, volcán que tal como comparte Nature en publicación realizada por Korzhinsky, Tkachenko, Shmulovich, Tara y Steinberg (1994) "es del tipo calco-alcalino el cual se caracteriza por liberar gas caliente hasta 910°C los cuales se han reportado estables por lo menos 30 años a la fecha de la publicación del estudio. El volcán tiene la particularidad de contar en la composición gaseosa que libera mineral de sulfuro de Renio como único catión por lo que este volcán es el primer lugar informado en donde se encuentra mineral de Renio puro con concentraciones en un rango de 2-10 ppb" (Texto traducido y contextualizado). El texto nativo publica en su abstract en inglés algunas características tales que, debido a la alta rareza del sulfuro formado en el ambiente volcánico, corresponden a las propiedades medidas y calculadas en actualidad. Con el fin ampliar el conocimiento del comportamiento geológico de la Reniíta como mineral, la tabla 1 resume algunas de las características de este mineral:

Propiedad	Reniíta	Unidad/otros
Formula Química	ReS ₂	Sulfuro
Densidad (calculada)	7,598	g/cm ³
Peso molecular	250,34	g/mol
Color		gris-plata
Transparencia		Opaco
Raya		Negra
Brillo		Metálico
Sistema cristalino		Triclínico
Tenacidad		Elástica
Clivaje	Perfecto	[100]

Tabla 1: PROPIEDADES DE LA RENIÍTA

FUENTE: Mindat

Otro tópico que destacar de la publicación realizada por Znamensky et al. (2005) es la siguiente ilustración:

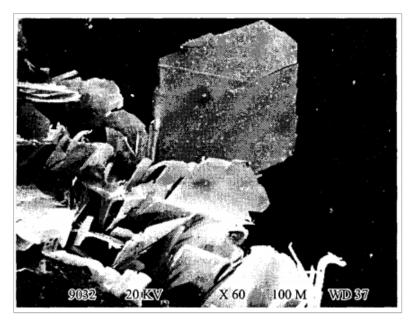


Ilustración 2: RENIÍTA OBSERVADA POR UN MICROSCOPIO ELECTRÓNICO FUENTE: Reniíta, ReS2, el sulfuro natural de Renio proveniente desde las fumarolas del volcán Kudryavy (Traducido)

La ilustración 2 muestra una imagen obtenida en un microscopio electrónico en donde es posible apreciar un cristal de forma laminar y rómbico que se encuentra sobre una drusa conformada por cristales más pequeños los cuales todos son de Reniíta. Según los conocimientos geológicos con los que cuenta Mindat al año 2018 el volcán Kudryavy, Rusia, es uno de los 8 casos reportados de donde se tiene conocimiento que existe Reniíta en el mundo, los otros casos son de los países: Austria, Botsuana, Brasil, Canadá, dos fuentes en Grecia y Japón. Aunque la misma fuente agrega que las localidades listadas deben considerarse cuestionables por falta de información al respecto.

2.1.2. RENIO CONTENIDO EN MOLIBDENITA

La principal fuente de procedencia de este metal se debe a la molibdenita (MoS₂) producto que, en Chile, se obtiene subordinadamente desde la extracción de Cobre a nivel nacional. Según el estudio publicado por la Revista de Asociación Geológica de Argentina (1971) realizado por Angelelli, Rosales y Schalamuk "el Renio⁺⁴, de radio iónico 0,72 Å, reemplaza al Mo⁺⁴, de radio iónico 0,72 Å" (1971, p. 154) en donde parte del MoS₂ pasa a ser reemplazado por ReS₂ (como aproximación correcta). El reemplazo se visualiza de mejor manera al observar las siguientes fotomicrografías compartidas por Voudouris et al. (2013) en donde se aprecia Renio y Reniíta contenidos en una roca con matriz de cuarzo como muestra la siguiente ilustración:

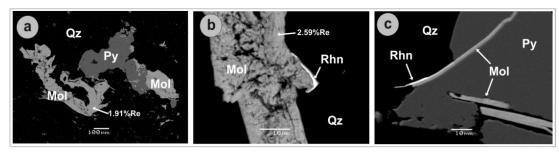


Ilustración 3: RENIO Y RENIÍTA EN MOLIBDENO
FUENTE: Molibdenita extremadamente rica en Renio de pórfidos Cu-Mo-Au en el noreste de Grecia (Traducido)

LEYENDA: QZ Cuarzo | Py Pirita | Mol Molibdenita | Rhn Reniíta

En la ilustración 3 se muestran tres fotomicrografías realizadas a una roca matriz de cuarzo (Qz), según el estudio realizado por Voudouris et al. (2013) a molibdenitas provenientes de pórfidos Cu-Mo-Au al noreste de Grecia, que se comparte con el objetivo de esclarecer cómo se relaciona el Renio y la Reniíta con la molibdenita de manera observable. Se aprecia que en la primera ilustración (3.a) que existe molibdenita (Mol) en conjunto con pirita (Py) en donde las mediciones según el estudio mineralógico indican un enriquecimiento de un 1,91% de Renio en peso. En la ilustración (3.b y 3.c) existe molibdenita enriquecida con Renio, reemplazando al mineral principal, junto con Reniíta (Rhn) que rodea al Molibdeno.

2.1.2.1. CRISTALOGRAFÍA DE LA RENIÍTA

Las estructuras del Azufre y del Renio, son ortorrómbica y hexagonal respectivamente, sin embargo, en conjunto ambos elementos (ReS₂) forman un enrejado con estructura cristalina similar a la del MoS₂ pero del tipo triclínica mientras que la de la molibdenita es hexagonal. El que el Azufre ortorrómbico y Renio hexagonal formen ReS₂ triclínico se produce de la siguiente forma: en un tiempo cero (t=0) ambos iones constituyentes se encuentran separados a una distancia infinita y a medida que se avanza en la escala de tiempo las densidades de carga asociadas a cada ion se juntan hasta tal punto que la energía potencial es un mínimo global, es decir, se genera en ese periodo de tiempo la máxima estabilidad generando espacialmente ReS₂ triclínico. En este mínimo global sus estructuras se disponen espacialmente minimizando las repulsiones entre densidades de carga lo cual conduce a una distribución espacial distinta a las elementales originales del Azufre y Renio.

Con fines ilustrativos y de aclarar de manera visual las similitudes de las estructuras cristalinas, aportando a la presentada relación entre radios iónicos descrita en el tópico anterior, se presenta la siguiente ilustración (modificada):

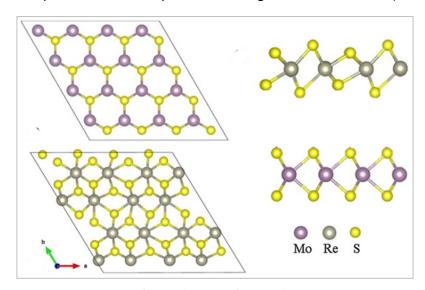


Ilustración 4: ReS₂ y MoS₂ FUENTE: Propiedades electrónicas ajustables de la hetero estructura MoS₂ | ReS₂ van der Waals del estudio de los primeros principios (Traducido)

En la ilustración 4 que comparte Luo, Xu y Song (2017) es posible apreciar la similitud de ambas distribuciones espaciales en donde, como se menciona en el tópico anterior, el Molibdeno en la molibdenita es reemplazado espacialmente de manera mínima, en partes por millón, por Renio formando así el disulfuro de Renio (ReS₂).

2.1.3. PROPUESTA GEOLÓGICA

Basados en el concepto de que el sulfuro de Renio que se encuentra en el volcán Kudryavy proviene desde magmas que exhalan Renio en conjunto con Azufre formando Reniíta es posible proponer que ambos tópicos expuestos anteriormente se asocian (Reniíta exhalada por el volcán Kudryavy y el reemplazo iónico de Renio por Molibdeno en la molibdenita) mediante un análisis de la formación a nivel geológico de la molibdenita entregando una posible solución al cómo se deposita el Renio en la molibdenita y una conexión entre ambos conceptos sin alejarse demasiado de la realidad.

Considerando la ocurrencia de Reniíta asociada a fases gaseosos de volcanes como un indicador de que el Renio tiene afinidad por la fase gaseosa, entonces en el ambiente de formación de la molibdenita, es posible que su transporte desde fuentes magmáticas sea en estado gaseoso. Bajo esta condición podría reemplazar al Molibdeno de la molibdenita una vez que dichos gases interactúen con la molibdenita o bien una parte menor del Renio se mantiene en la fase liquida y la mayor parte en la fase gaseosa. Para corroborar esto se requiere un estudio de los diagramas de fase Renio-Azufre-Molibdeno y otros elementos necesarios para el ambiente de formación siendo esta una propuesta en base a los conocimientos geológicos y a la literatura existente presentada por Chirif y Acosta (2013).

2.2. MINERÍA DEL RENIO

Si bien, como se indica anteriormente, la principal fuente de procedencia del metal proviene principalmente desde Renio incorporado en molibdenita. El siguiente tópico busca el comprender más sobre las fuentes mineras desde donde proviene la molibdenita y su extracción en Chile. De manera ilustrativa se presentan algunos de los tipos de yacimientos donde se encuentra presente Renio en el mundo según comparte John, Seal y Polyak (2017) por medio del U.S. Geological Survey:

- Pórfidos cupríferos
- Pórfidos de Molibdeno
- Estratoligados de Cobre
- Yacimientos de Uranio
- Kupferschiefer
- Depósitos tipo Merlín (Re-Mo)

Si bien la fuente de procedencia de este metal es amplia tal como comparte John et al. (2017) estos yacimientos presentados desde donde es potencialmente extraíble este metal no toman en cuenta el factor económico ni su rentabilidad y, en este tópico, solo alguno de estos son motivo de estudio. Para comenzar se presenta la principal fuente de procedencia mundial que corresponde a yacimientos de tipo pórfido cuprífero.

2.2.1. PÓRFIDO CUPRÍFEROS

La mayor parte de la procedencia de Molibdeno a nivel mundial se encuentra asociada a depósitos pórfido cupríferos en donde operaciones mineras lo producen como producto subordinado del Cobre en forma de concentrado de molibdenita el cual, según John et al. (2017), contiene en su composición Renio en un rango de 100 a 3.000 ppm.

Debido a que Chile es el mayor productor mundial de Renio se infiere que la mayor parte de la producción anual, de este metal a nivel mundial, se obtiene desde el concentrado de molibdenita, que se obtiene a su vez del procesamiento de sulfuros primarios de pórfidos cupríferos del territorio nacional siendo esta la fuente principal de Renio. Ésta fuente de procedencia del metal se complementa en el total de la producción mundial con otros países productores del metal, los cuales son Armenia, México, Perú, Rusia y otros de menor impacto cuya producción de Renio también se debe a la explotación de pórfidos cupríferos.

Chile, en primer lugar, Polonia, en segundo lugar, y Estados Unidos, en tercer lugar, son los mayores productores de Renio de los últimos años, de ellos solo Estados Unidos y Chile cuentan con estudios publicados de sus depósitos de pórfidos cupríferos por parte de la U.S Geological Survey (John et al., 2017) desde donde se produce concentrado de molibdenita con leyes de Renio que se resumen en las tablas 2 y 3:

Chile		Renio Contenido en concentrado de MoS₂ (ppm)		Renio contenido Tons	
Mina	Deposito tipo	Mínimo	Máximo	Promedio	Tons
Teniente	Cu-(Mo-Au)	25	1,154	420	2760
Salvador	Cu-(Mo-Au)	-	-	585	825
Escondida	Cu-(Mo-Au)	95	1805	886	1030
Los bronces-Rio Blanco	Cu-(Mo-Au)	104	898	265	1500
Los pelambres	Cu-(Mo-Au)	450	820	600	1120
Chuquicamata- RT	Cu-(Mo-Au)	93	262	265	3800
Collahuasi	Cu-Mo	368	448	395	820

Tabla 2: RENIO CONTENIDO EN CONCENTRADO NACIONAL FUENTE: Rhenium, U.S Geological Survey (pp. 38-41)

Como se aprecia en la tabla 2 los depósitos pórfidos cupríferos chilenos presentados en la tabla se encuentran ligados a Mo y Mo-Au que cuenta con Renio contenido en un promedio cercano a las 500 ppm en el concentrado de molibdenita (según estimaciones realizadas por la misma fuente). Estados Unidos, ver tabla 3, cuenta con una mayor ley de Renio contenido en las molibdenitas que en el caso chileno las cuales extraen desde sus depósitos pórfidos cupríferos. Si bien la procedencia del metal es la misma, pórfido cuprífero con Molibdeno u/y Oro, es posible apreciar que el promedio estimado de Renio contenido en el concentrado en las operaciones mineras de Estados Unidos es mayor que en el caso de Chile, pero por otro lado el contenido total de Renio es mayor en Chile.

Estados Unidos		Renio Contenido en concentrado de MoS2 (ppm)		Renio Contenido Tons	
Mina	Deposito tipo	Mínimo	Máximo	Promedio	-
Bagdad	Cu-(Mo-Au)	330	642	460	130
Bingham	Cu-(Mo-Au)	130	2000	250	714
Butte	Cu-(Mo-Au)	-	-	240	585
Castle Dome	Cu-Au	1200	1750	1750	230
Copper Creek	Cu	534	2107	1165	6.7
Ely	Cu	1250	2840	1600	200
San Manuel- Kalamazoo	Cu-Mo	700	1200	900	229

Tabla 3: RENIO CONTENIDO EN CONCENTRADOS DE EE. UU. FUENTE: Rhenium, U.S Geological Survey (pp. 38-41)

Es importante destacar que las tablas 2 y 3 son estimaciones que se han realizado a diversos yacimientos con distintas cantidades de muestras en cada uno lo cual no permite una correcta comparación en base a la diferencia de muestras estudiadas. Los datos tabulados en la tabla 2 y 3 han sido obtenidos desde la U.S. Geological Survey (2017) entidad la cual ha realizado este estudio

con sus respectivos cálculos y estimaciones al año 2014. Es importante agregar que la selección de las mineras tabuladas anteriores ha sido de manera arbitraria sin ánimo favorecer las observaciones realizadas.

2.2.2. PÓRFIDO DE MOLIBDENO

Debido a que en Chile no se tienen antecedentes de yacimientos del tipo pórfido de Molibdeno, según resume el mapa minero nacional publicado y actualizado periódicamente por SONAMI (2018), no es posible asociar esta fuente de procedencia con nuestro país, sin embargo, la información que comparte el John et al. (2017) mediante la U.S Geological Survey (2017) resume que países como Canadá, China y Estados Unidos cuentan con yacimientos del tipo pórfido de Molibdeno con contenido de Renio, países los cuales tienen como factor común que el Renio contenido en concentrados de molibdenita se encuentra en menor proporción, en ppm, que en los yacimientos de tipo pórfido cuprífero. A modo ilustrativo depósitos canadienses de pórfido de Molibdeno como Boss Mountain, Carmi y Endako cuentan con Renio contenido en la molibdenita en promedios de 80, 58 y 35 ppm respectivamente.

2.2.3. ESTRATOLIGADOS DE COBRE EN ROCA SEDIMENTARIA

Otra fuente de procedencia de este metal es en estratoligados de Cobre en roca sedimentaria, donde países como Polonia o Kazakstán extraen Renio desde estos depósitos. Basado en un estudio publicado por la Revista geológica de Chile en 1998 realizado por Vivallo y Henriquez (1998) es correcto mencionar que, tras un análisis mineralógico realizado a distintos yacimientos de este tipo en Chile ubicados en el sector cordillera de la costa de Antofagasta (lugar donde existen una cantidad considerable de yacimientos de este tipo), ninguno de estos

depósitos del tipo Cu, Cu-Au y Cu-Fe presenta Renio en su contenido. En estos depósitos destacan elementos como lantánidos, Molibdeno y Uranio.

Es importante el destacar que el estudio mencionado no indica si se han estudiado todos los elementos y no se ha encontrado Renio o si simplemente no se encuentra este metal en estos depósitos. La existencia de Molibdeno abre la duda sobre la existencia de Renio en este tipo de yacimientos a nivel nacional, sin embargo, la fuente no declara nada al respecto abriendo un abanico de preguntas sobre si existe contenido de Renio en estos yacimientos sin existir una respuesta clara.

2.2.4. YACIMIENTOS DE URANIO

Se tienen registros de que anteriormente se produjo este metal en Uzbekistán el cual fue producido como producto subordinado de los depósitos de Uranio tipo arenisca, aunque actualmente se recupera desde un depósito similar de Uranio en Kazakstán. En Chile existen estudios de posibles yacimientos de Uranio, pero el estudio realizado no ha logrado recopilar fuente alguna que corrobore o desestime si existe contenido en Renio en este tipo de formaciones en nuestro país.

2.3. RECURSOS Y RESERVAS

Chile es el país con la mayor producción a nivel mundial de Renio y dispone de importantes reservas producto de la gran cantidad de yacimientos pórfido cupríferos que contienen una buena cantidad de Renio, como se menciona en tópicos anteriores. El resumen de los recursos de los mayores productores a nivel mundial, según un estudio realizado por U.S Geological Survey (2009), se encuentra simplificado en la tabla 4:

	Reservas	Reservas rentables
Unidad	Ton	%
Estados Unidos	390	15,9
Armenia	95	3,9
Canadá	32	1,3
Chile	1300	53,0
Kazakstán	190	7,7
Perú	45	1,8
Rusia	310	12,6
Otros países	91	3,7
Total	2453	100 %

Tabla 4: RECURSOS Y RESERVAS DE RENIO POR PAÍS

FUENTE: U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries 2009 (p. 133)

Como es posible apreciar en la tabla 4, Chile cuenta con el 53% de las reservas del total mundial triplicando a Estados Unidos en toneladas y casi cuadriplicando la cantidad de reservas con las que cuenta Rusia, países que se posicionan en el segundo y tercer puesto respectivamente.

3. ANÁLISIS Y PROPUESTA DE LA CADENA PRODUCTIVA DE RENIO

3.1. CONCEPTOS GENERALES

Generalmente la literatura menciona dos formas conocidas de extraer este metal; primaria y secundaria. La obtención primaria de Renio permite obtener este metal a partir del proceso de tostación de gases de molibdenita lo cual, en términos generales, consiste en la extracción y posterior procesamiento de los gases generados. La denominada producción secundaria consiste en el proceso de extracción de Renio por medio de un proceso de reciclaje.

3.2. MOLIBDENOS Y METALES S.A. (MOLYMET)

Chile es el principal productor de Renio a nivel mundial, y esto se debe en gran parte a la empresa Molymet S.A, empresa que cuenta con plantas procesadoras de concentrado en cinco países en mundo encontrándose dos de estas en Chile ubicadas en las comunas de San Bernardo y Mejillones, Planta Nos y Planta Mejillones respectivamente, desde donde se producen distintos productos de Molibdeno y algunos derivados de éste siendo el Renio el más importante. Molymet comercializa algunos productos que son obtenidos según distintas etapas post proceso de tostación de la molibdenita donde el producto final de Renio se encuentra en diversas proporciones según el commodity requerido. Algunos de los productos disponibles a la venta son Renio metálico en polvo, Renio metálico en briquetas, Perrenato de Amonio y ácido Perrénico.

Es importante destacar que las plantas de la empresa Molymet procesan concentrado de Molibdeno proveniente de distintas partes del mundo siendo CODELCO uno de sus abastecedores a nivel nacional.

3.2.1. MOLYMET EN LA INDUSTRIA MINERA

El señalar la conexión que existe entre la empresa Molymet como productora y la industria minera es importante debido a que existe una particularidad que se resume a continuación y que se encuentra basado en el reporte entregado por Molymet de nombre "Resultados al primer semestre del 2017" (2017).

La empresa cuenta con tres modelos de negocios los cuales son:

- Ventas propias: Negocio en el cual Molymet compra el concentrado de molibdenita y lo procesa en su planta para la posterior venta de los productos generados.
- Maquilas: Las empresas mineras entregan el concentrado a Molymet para que esta lo procese y entregue de vuelta un producto comerciable por la empresa minera. En este modelo de negocios a Molymet se le paga por el procesamiento.
- Subproducto: En el proceso de tostación y oxidación al que es sometido el Molibdeno es posible recuperar subproductos para comerciar estos, donde destaca el Renio, Cátodos de Cobre y Ácido sulfúrico.

La importancia de destacar los negocios realizados por la empresa es debido a la curiosa situación que ocurre ya que la empresa Molymet es la mayor productora mundial de Renio pero ésta solo procesa y produce este metal sin operar ningún proceso extractivo de los minerales de mena que le anteceden al Renio en su producción, siendo dependiente de las empresas extractivas y productoras de Cobre. CODELCO mediante sus divisiones Chuquicamata, División Andina, División Salvador y el Teniente, cuenta con contratos con Molymet donde esta última realiza labores de maquila a los concentrados producidos por CODELCO, mismo negocio tiene con la minera Lumina Copper (Caserones) y Sierra Gorda. Molymet también presta servicio y realiza negocios con otros abastecedores de la materia prima que operan en Chile los cuales son:

minera Los Pelambres, Minas de Anglo American Chile, así como también otras mineras internacionales.

3.3. PROCESO BASE PARA LA PROPUESTA

Para ejemplificar el proceso de obtención del Renio es necesario procesar los concentrados de molibdenita con contenido en ReS₂ y obtener desde estos primeramente el sólido Perrenato de Amonio (APR). Por este motivo, este tópico apunta a ejemplificar, resumir y proponer reacciones y procesos para comprender el cómo se obtiene esta materia prima con contenido de Renio en base al conocimiento de una planta piloto ubicada en Gwangyang, Corea del Sur, según indica la publicación que lleva por nombre "Recuperación de Renio desde humo proveniente de un tostador de molibdenita como Perrenato de Amonio de alta pureza" (Traducida desde el inglés) realizada por Kim, Park, Seo, Tran y Kim (2015) publicación la cual se encuentra a continuación traducida, modificada y complementada.

3.3.1. ANÁLISIS Y PROPUESTA DE OBTENCIÓN

Es importante destacar que, si bien la propuesta se basa en la publicación anteriormente introducida, solo conceptos generales son insertos en este tópico ya que se busca tener una visión general del procesamiento de Renio con una visión que apunta a la química de reacciones que se producen en este proceso.

El proceso de obtención es realizado en una planta piloto la cual ha logrado recuperar Renio al producir Perrenato de Amonio desde una solución acuosa producto del tratamiento de gases producido desde la planta que trata humo que se deriva desde un tostador de molibdenita. La siguiente ilustración (traducida) es un diagrama de flujo que representa el proceso de obtención desde la tostación de molibdenita:

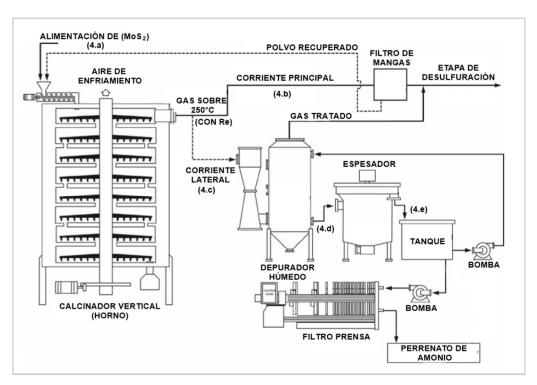


Ilustración 5: DIAGRAMA DE FLUJO

FUENTE: Recuperación de Renio desde humo proveniente de un tostador de molibdenita como Perrenato de Amonio de alta pureza (Traducido)

La ilustración 5 es un diagrama de flujo de una planta piloto añadida a la planta principal de producción de trióxido de Molibdeno, MoO₃, la cual es alimentada con molibdenita (4.a), MoS₂, con contenido en Renio en forma de sulfuro, ReS₂. El concentrado de molibdenita es introducido al horno por la parte superior de este en contra de una corriente de aire caliente ya que en el interior del horno se tiene un flujo de aire caliente que va desde la zona inferior a la superior mientras que la molibdenita desciende desde la zona superior a la inferior hasta salir transformada en MoO₃ en la parte inferior del horno. La reacción que se produce dentro del horno es la siguiente:

$$2MoS_2(s) + 7O_2(g) \rightarrow 2MoO_3(s) + 4SO_2(g)$$

Esto ocurre debido a que, si bien la molibdenita cuenta con un punto de fusión de 1750°C (CRC Handbook of Chemistry and physics, 2005), a temperaturas entre 550°C y 650°C se oxida generando el producto principal de la planta MoO₃.

El trabajar con estas temperaturas no solo produce el producto principal de la planta, MoO₃, sino que también permite que el sulfuro de Renio reaccione generando Heptaóxido de Renio como gas como se explica en la reacción 1 (Rxn 1, pág. 26).

Es conocido que el gas cuenta en su composición con presencia de óxidos de Cobre, Molibdeno, Renio, Arsénico y SO₂|SO₃ y que a la salida del horno este gas tiene una temperatura de sobre 250°C. Éste gas tiene dos caminos de procesos, uno es el que envía éste al filtro de mangas para una etapa de desulfuración y limpieza como corriente directa (4.b) en donde se genera una precipitación de polvo que es reinyectado al horno y otro camino consiste en que parte de estos gases son derivados al depurador húmedo para su procesamiento (4.c).

El equipo más importante en el proceso de obtención de APR es el depurador húmedo el cual recibe los gases con contaminantes salientes del horno siendo llevados a la parte central del equipo donde mediante rociadores de gotitas limpian el gas contaminado. Esto produce que por la parte superior del equipo se libere gas limpio el cual se conecta a la salida del filtro de mangas, mientras que los contaminantes gaseosos que contenía este humo son depresados al contacto con el agua llevados al siguiente proceso.

Luego la solución acuosa generada a partir de los gases es llevada al espesador (4.d) en donde ocurren dos etapas, la primera utiliza cal (pulpa de cal) para precipitar parte del MoO₃, Arseniato, y otras impurezas como hidróxidos debido a que la cal aumenta el valor del pH a mayor que 8 generando la condición para que ocurran estas precipitaciones. La segunda etapa se encarga de precipitar MoO₃*3H₂O al añadir ácido sulfúrico (H₂SO₄), debido a que la solución acuosa disminuye su pH a un valor menor que 3. Debido a que la publicación de origen surcoreana no indica donde se realizan estas etapas se proponen dos posibilidades: primero estas etapas efectivamente se realizan en el espesador y, segundo, es la existencia de al menos dos espesadores para realizar ambas precipitaciones según corresponda el pH. Retomando el proceso de obtención de

APR, el trabajo usado de referencia indica que la solución acuosa que queda cuenta principalmente con Renio como ReO₄⁻ (Ion perrenato) y algo de Molibdeno los cuales son llevados a la etapa de extracción por solventes, sin embargo, estas etapas no aparecen en el esquema del proceso por lo que se propone que luego del espesador la solución acuosa rica en Renio se almacena en un tanque para ingresar posteriormente a la etapa de extracción por solventes.

La etapa de extracción por solventes utiliza una fase orgánica (compuesta por los extractantes Alamine 304-1 e Isodecanol mientras que el diluyente es Anysol-150) con compuestos a distintas razones mientras que la etapa de re-extracción se realiza con hidróxido de amonio (NH₄OH). Para una mayor comprensión del texto se indican los componentes involucrados en el proceso de extracción por solventes:

Orgánico: R₃N

Ácido sulfúrico: $(H^+)(HSO_4^-)$ o H_2SO_4

Hidróxido de amonio: $(NH_4^+)(OH^-)$ o NH_4OH

Las siguientes reacciones especifican más la etapa de extracción por solventes. Inicialmente el orgánico es activado utilizando ácido sulfúrico:

$$R_3N(org) + (H^+)(HSO_4^-)(aq) \rightarrow [R_3N(H^+)][HSO_4^-](org)$$

El Renio contenido como anión en la solución acuosa (ReO₄-) realiza un cambio iónico con el sulfato de manera tal que el orgánico retiene el ion H⁺ (ion Hidrógeno) y por lo tanto también al ion Perrenato como muestra la reacción:

$$[R_3N(H^+)][HSO_4^-](org) + ReO_4^-(aq)$$

 $\rightarrow [R_3N(H^+)][ReO_4^-](org) + HSO_4^-(org)$

Posteriormente, en la etapa de re-extracción, se utiliza hidróxido de amonio en donde ocurre un cambio iónico entre este y el Renio en conjunto con el orgánico lo que produce el primer producto llamado Ácido Perrénico:

$$[R_3N(H^+)][ReO_4^-](org) + (NH_4^+)(OH^-)(aq)$$

 $\rightarrow (NH_4^+)(ReO_4^-)(aq) + H_2O + R_3N(org)$

Las soluciones acuosas que se extraen con contenido en Renio y Molibdeno se ajustan para alcanzar un pH 6-8 usando ácido sulfúrico para precipitar APR dejando el Renio residual y casi todo el Molibdeno detrás. El Perrenato de Amonio que se obtiene es llevado a procesos de filtrado, lavado y secado obteniendo así la primera materia prima.

Toda la complejidad de este proceso queda resumida en la ilustración 6:

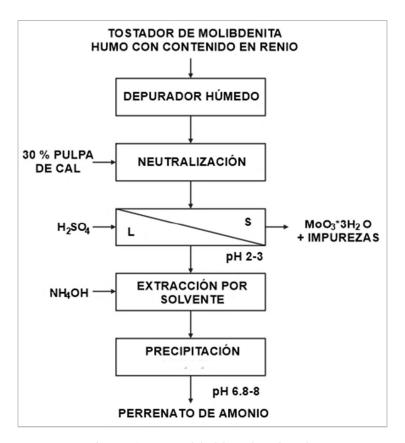


Ilustración 6: PROCESO PRODUCTIVO

FUENTE: Recuperación de Renio desde humo proveniente de un tostador de molibdenita como Perrenato de Amonio de alta pureza (Traducido)

LEYENDA: L Líquido | S Sólido

3.4. DISCUSIÓN

El proceso mencionado busca mantener la mayor cantidad de datos que se entregan en la publicación considerada realizada por Kim et al. (2015), sin embargo, existe información incompleta que obliga a presentar una propuesta para dar sentido a los procesos, siendo uno de los temas a discutir la presencia en el diagrama del espesador y el tanque y la ausencia de equipos de extracción por solventes. El diagrama de flujo de la ilustración 5 presenta un espesador y un tanque, equipos los cuales suelen ser utilizados para la extracción de Renio, post depurador húmedo, pero se usan en un proceso de intercambio iónico y no en uno de extracción por solventes. Para que la obtención de Renio sea llevada a cabo por SX se requiere, como mínimo, de dos piscinas de limpieza junto con una planta de extracción por solventes. Todo lo presentado hasta aquí requiere asumir y proponer el uso del tanque y el espesador. La siguiente ilustración (modificada) representa de mejor manera el proceso de extracción del Renio:

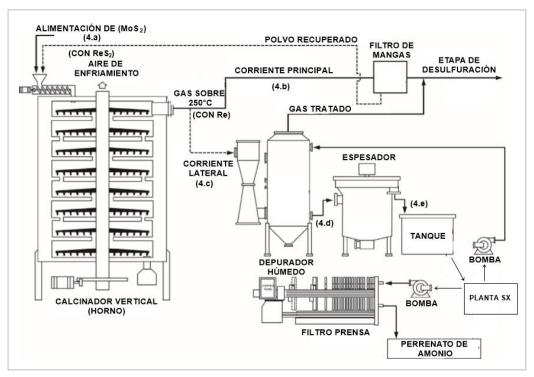


Ilustración 7: DIAGRAMA DE FLUJO MODIFICADO

FUENTE: Recuperación de Renio desde humo proveniente de un tostador de molibdenita como Perrenato de Amonio de alta pureza (Traducido)

Como es posible apreciar en la ilustración 7, en comparación con la ilustración 5, se mantiene la figura del espesador asumiendo que en este se realizan las limpiezas correspondientes y no en piscinas, también se añade una figura rectangular que representa la planta de extracción por solventes (SX) en donde se realiza el proceso de extracción y en donde suceden las reacciones presentadas anteriormente.

3.5. DESARROLLOS TECNOLÓGICOS

Estudios recientes como el realizado por Vargas (2014) o el realizado por Salakhova, Majidzade, Novruzova, Kalantarova y Huseynova (2012) presentan una propuesta en la cual indican que existe una salida alternativa a la cadena productiva que se detalla en el tópico anterior. Esta alternativa requiere que, luego de precipitar el Renio a ion perrenato en el depurador húmedo y a una posterior limpieza de estos (que se propone es en los espesadores), el ion Perrenato que se encuentra en la solución acuosa ya sin contaminantes sea llevado a un proceso de electrodeposición desde donde se produce Renio metálico. Cabe destacar que estas investigaciones se encuentran en etapas preliminares y son presentadas como propuestas productivas a futuro.

3.6. REACCIONES EN LA CADENA PRODUCTIVA DEL RENIO

Continuando con el análisis de cómo se producen las materias primas provenientes desde el procesamiento del Renio, el siguiente tópico propone las reacciones necesarias para el proceso productivo de este metal, luego de la liberación del Renio contenido en la molibdenita, para formar distintos compuestos. Las siguientes reacciones químicas explican la formación de uno de

los compuestos que se expone en los siguientes capítulos, capítulo 8, y se presenta una propuesta del cómo se obtiene el producto final:

Es necesario conocer las temperaturas a las cuales trabaja el horno de tostación ya que el proceso de tostación de la molibdenita ocurre a una temperatura de entre 600°C a 700°C en paralelo con la oxidación del disulfuro de Renio (ReS₂) contenido en la molibdenita la cual ocurre a una temperatura de entre 500°C a 700°C en el mismo horno. Conocidos estos parámetros, y que el disulfuro de Renio se oxida a temperaturas de 600°C, la siguiente reacción produce el primer producto requerido para continuar con la cadena productiva, el cual se conoce como Heptaóxido de Renio:

$$4ReS_2(s) + 15O_2(g) \rightarrow 2Re_2O_7(g) + 8SO_2(g) (Rxn 1)$$

La ilustración 5 indica que los gases salientes del horno se encuentran a temperaturas sobre 250°C a lo que se añade que el Heptaóxido de Renio se encuentra en estado gaseoso a temperaturas sobre 360°C, según indica la tabla 15, corroborando de esta medida que la reacción se cumple lo que da paso a la siguiente reacción propuesta. El Heptaóxido de Renio producido, que se encuentra en estado gaseoso, es un compuesto bastante soluble en agua por lo que el siguiente paso es precipitar este compuesto mediante la adición de agua tal como se presenta en la siguiente reacción:

$$Re_2O_7(g) + H_2O(l) \rightarrow 2HReO_4(l) (Rxn 2)$$

El producto generado es Ácido Perrénico, primera materia prima, el cual es tratado con hidróxido de amonio para generar una nueva materia prima conocida como Perrenato de Amonio. Cabe destacar que esta ecuación se propone como resumen a todo el proceso que se realiza en la etapa de extracción por solventes presentada anteriormente:

$$HReO_4(l) + NH_4OH(l) \rightarrow NH_4ReO_4(s) + H_2O(l) (Rxn 3)$$

Este producto, tal como se indica en el tópico anterior, requiere de procesos de filtrado y secado para su comercialización, y evidentemente este compuesto requiere de algunos tratamientos adicionales para obtener el metal puro. Para lograr este objetivo el Perrenato de Amonio se reduce mediante la inyección de hidrogeno para generar como producto el Renio metálico en polvo, listo para su uso en pulvimetalurgia y en los distintos usos que se detallan posteriormente:

$$2NH_4ReO_4(s) + 7H_2(g) \rightarrow 2Re(s) + 8H_2O + 2NH_3 (Rxn 4)$$

El polvo de Renio obtenido es llevado a un proceso de sinterización donde se compactan a alta presión los polvos para posteriormente realizar un tratamiento térmico, a una temperatura inferior a la de fusión, generando así el Renio metálico en briquetas.

3.7. PRINCIPALES PRODUCTOS DE LA RECUPERACIÓN DE RENIO

Perrenato de Amonio: Cristales pequeños de color blanco con un contenido de 66,4% de Renio.

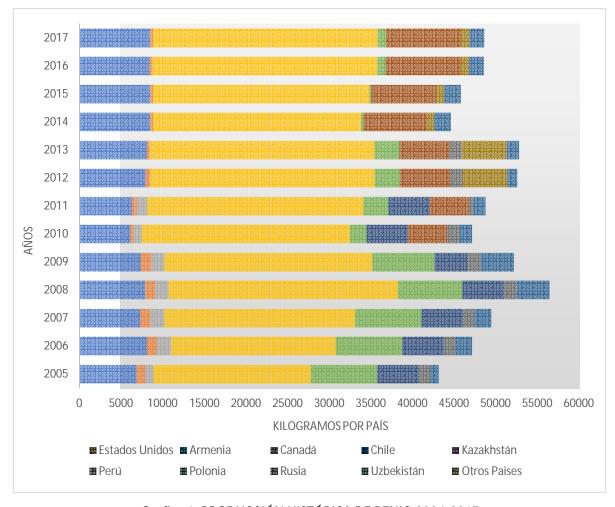
Renio metálico en polvo: Polvo de Renio color gris que cuenta con una composición de 99,97% de Renio y el restante en impurezas donde destaca Oxígeno con 2500 ppm.

Renio metálico en briquetas: Producto final de Renio el cual son pastillas color gris con forma de elipsoide achatada con bordes relativamente planos. Su composición es 99,98% Renio con Oxígeno como la impureza mayor la cual se encuentra en 600 ppm.

4. CHILE EN EL MERCADO DEL RENIO

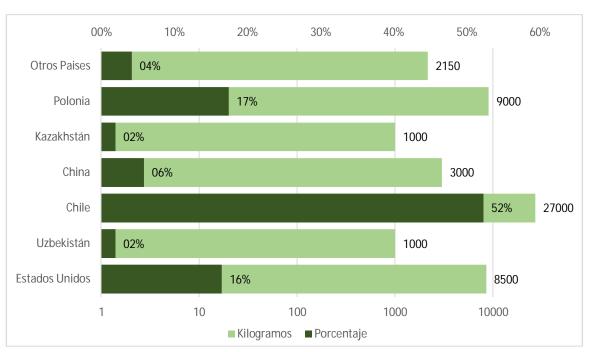
4.1. PRODUCCIÓN MUNDIAL ANUAL DE RENIO

Si bien la producción mundial de estos últimos 14 años, 2004 a 2017, se encuentra en un promedio de 49.000 kg año, existen sólo dos países, Chile y Estados Unidos, que en este lapso han mantenido o aumentado su producción anual. Países como China y Uzbekistán se han incorporado recientemente al mercado generando un pequeño impacto en el mercado tal como se representa en la gráfica 1 que ha sido realizada en base a las estimaciones publicadas por U.S. Geological Survey en los periodos de 2004 a 2017:



Gráfica 1: PRODUCCIÓN HISTÓRICA DE RENIO 2004-2017 FUENTE: U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries

De la gráfica 1 es posible inferir que Chile y Estados Unidos mantienen y/o aumentan su producción a lo largo de los años, mientras que países como Canadá y Perú desde el año 2012 no producen Renio lo que, posiblemente, es por la baja en el valor del metal que ha llegado a su menor valor desde el año 2007. Es posible apreciar, según muestra la misma gráfica, que en los últimos años Chile ha predominado en el mercado del Renio con producciones en un rango de 40% y 55% aproximadamente del total mundial, lo que posiciona a Chile en el liderazgo de la producción histórica. Es importante destacar que la alta producción de Renio en Chile no es solo gracias a los concentrados originados en Chile ya que la empresa Molymet, empresa productora de Renio en Chile, cuenta con aportes de concentrados de Bélgica y México (Molymet, 2017).

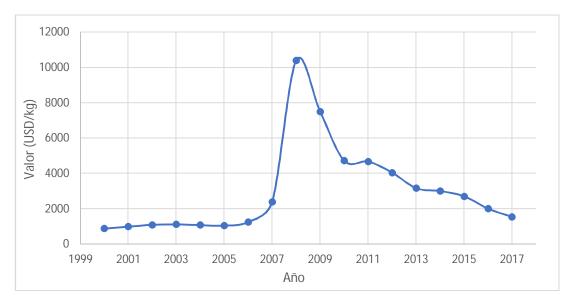


Gráfica 2: PRODUCCIÓN MUNDIAL DE RENIO EN 2017 FUENTE: U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries (2018, p. 134)

La grafica 2 resume la predominancia en la producción de Renio de nuestro país en el año 2017 el cual alcanzo una cifra aproximada de 27.000 kg de Renio lo que se traduce en un 52% de la producción mundial seguido con Polonia y Estados Unidos con 17% y 16% de producción a nivel mundial respectivamente.

4.2. EVOLUCIÓN HISTORICA DEL VALOR DEL RENIO

A nivel comercial el producto destaca en su promedio de venta histórico por su alto valor conseguido que comienza en 2007 y declina en 2009, el cual es producto de la alta demanda debido a diversos factores que afectaron la demanda en el mercado elevando su costo a un peak de aproximadamente 10.500 USD/kg costo que, a diez años de su alta máxima histórica, se encuentra muy alejado del valor actual. La gráfica 3 muestra el valor del metal en los últimos años:



Gráfica 3: VALOR PROMEDIO ANUAL DE RENIO METÁLICO EN POLVO FUENTE: U.S. Geological Survey (p. 154)

Como muestra la gráfica 3 el valor del Renio por kilogramo va en descenso desde su alza máxima en 2008 donde su valor anual promedio fue de 10.500 USD/Kg según comparte el U.S. Geological Survey (2018) debido a que el mercado de este metal reaccionó ante el aumento de la demanda de la industria aeronáutica¹. El análisis publicado por Polyak (2008) mediante U.S. Geological Survey en el

¹ El párrafo publicado por Polyak (2008) se encuentra escrito con el objetivo de cuadrar la información con el estudio publicado por Hacket (2016) realizado por Graedel (2016).

Minerals YearBook del mismo año (2008) resume que el alza del valor del Renio se debe al alto requerimiento de este metal en aquel año ya que, por ejemplo, la empresa Boeing Co. esperaba un aumento en su producción de aproximadamente 40 aviones, en paralelo con otras empresas como Airbus S.A.S. la cual también esperaba un alza de 17 aviones. Por su parte el ejército de Estados Unidos requería de la producción de 3000 aviones F-35, 6000 motores y 700 F-22 Raptors, lo cual ha detonado en el año 2008 el alto valor de este metal en el periodo mencionado. En el mismo año de su alza la crisis económica (2008-2009) junto con el desarrollo de nuevas aleaciones para las aspas de las turbinas por parte de General Electric hizo declinar su valor gradualmente, tal como indica Graedel (2016) citado por Hacket (2016) en su publicación "Escases Elemental" (2016), retomando así paulatinamente el valor promedio que presentaba este metal entre los años 2000 y 2006 llegando al año 2017 a alcanzar un valor anual promedio de 1.550 dólares por kilogramo.

4.3. NUEVAS EMPRESAS PRODUCTORAS DE RENIO

Debido a su alto costo actual por kilogramo, el valor del Renio es atractivo para productores nuevos, sin embargo, a las empresas no les resulta rentable producir este metal debido a que este se encuentra en su mayoría contenido en molibdenita, como se describe anteriormente, por lo que es poco probable que nuevas empresas produzcan este metal si estas con anterioridad no se encuentran inmersas en la minería del cobre o del Molibdeno ya que la producción de Renio resulta rentable al ser como mínimo un producto subordinado de otro producto. Esto genera que, como el caso de Chile, las grandes producciones de Cobre incrementan la producción de Molibdeno (como producto subordinado) y por ende el Renio (como producto subordinado de otro producto subordinado). A esto se debe agregar que otra limitante es la capacidad de procesamiento con la que cuentan las empresas ya inmersas en el mercado del Renio como es en el caso de la planta con la que cuenta Molymet, la cual es

la empresa con la planta de procesamiento de mayor capacidad en el mundo. Ver tabla 5.

Capacidad de las plantas por empresas productoras							
Productor	País	Capacidad de tratamiento anual (kg/año)					
Molymet	Chile	40000					
Zhezkazganredmet	Kazakstán	8250					
Phelps Dodge	Estados Unidos	7000					
Navoi	Uzbekistán	5000					
KGHM Ecoren	Polonia	2100					
Jiangxi Copper	China	1800					
Uralelectromed	Rusia	1000					
ZCMC	Armenia	1000					
Total		66150					

Tabla 5: CAPACIDAD MÁXIMA INSTALADA POR EMPRESA AL 2012 FUENTE: Jacqueline Calvillo, Universidad San Sebastián. (2017)

La tabla 5 que comparte Jacqueline Calvillo (2017) resume la capacidad con la que cuenta cada empresa para la producción de Renio a la fecha 2012, donde es posible apreciar la participación con la que cuenta Molymet, con más del 60% de la capacidad mundial para producir este metal, limitando así a los productores de molibdenita a comerciar su concentrado o tratar este en países con capacidad para recuperar y aprovechar metales valiosos.

4.3.1. MOLYB

Debido a que CODELCO es una de las empresas con la cual Molymet tiene contratos para tratar sus concentrados de Cobre y Molibdeno, ésta se encuentra creando su filial llamada Molyb la cual tiene como objetivo tratar por ellos mismos estos concentrados y así, en conjunto con abaratar costos, obtener sus propios productos subordinados entre los que destaca el Renio. Sin embargo, actualmente el proyecto se encuentra en construcción y no existe más información al respecto de éste.

5. USOS DE RENIO

5.1. USO TÍPICO POR PRODUCTO

Debido a la reducida cantidad de productos de Renio, como se explica en capítulos anteriores, estos tienen como fin distintos usos relativamente específicos incluso si es un producto distinto. El MSP-REFRAM (2017) comparte una tabla resumen (Traducida) en donde señalan las aplicaciones típicas por producto:

Producto	Uso típico
Perrenato de amonio (APR)	Utilizado para producir Renio metálico y ácido perrénico, fabricación de catalizadores de reformado Pt-Re, adicción en Superaleaciones.
Ácido perrénico	Fabricación de catalizadores de reformado Pt-Re.
Renio metálico en polvo	Adicción en Superaleaciones, producción de alambres, cinta, otros. Producción de Renio metálico en briquetas.
Renio metálico en briquetas	Adición a Superaleaciones

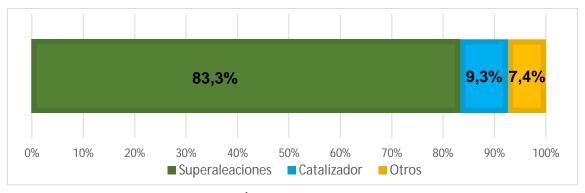
Tabla 6: PRODUCTOS DE RENIO Y SU APLICACIÓN USUAL

FUENTE: MSP-REFRAM (2017, p. 15)

5.2. CONSUMO ANUAL DE RENIO

Como se aprecia en la tabla 6 el Renio tiene algunos usos siendo los más comunes el utilizar este elemento para fabricar catalizadores de reformado Pt-Re y como adición en Superaleaciones. Esto facilita que sea posible agrupar el consumo mundial de este elemento en tres distintos grupos donde existe una clara predominancia en su consumo anual por parte de las Superaleaciones, las cuales consumen 83% del Renio a nivel mundial, seguido por su uso en catalizadores, con 9% del total, y el restante para usos varios que se detallan

posteriormente. La gráfica 4 representa la estimación anual sobre el consumo de este metal según el estudio realizado por John et al. (2017):



Gráfica 4: ESTIMACIÓN DEL USO DE RENIO ANUAL (2017)

FUENTE: U.S. Geological Survey, Rhenium (p. 3)

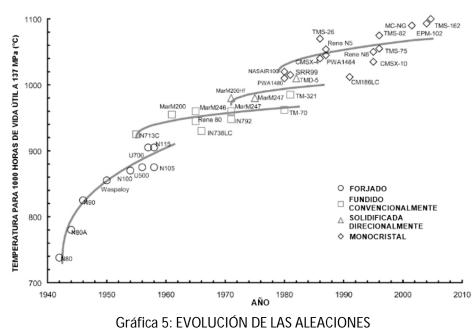
5.2.1. SUPERALEACIÓN EN LA INDUSTRIA AERONÁUTICA

El mayor uso en el consumo de este metal es en las superaleaciones donde el metal base comúnmente es Níquel y éste en conjunto con Renio, más otros metales, forman una superaleación la cual cuenta con una alta resistencia al calor como característica principal. Si se analiza con un poco más de detalle el uso de estas superaleaciones, cómo lo ha realizado John et al. (2017), es posible encontrar que el uso más común de éstas se encuentra en las aspas de los aviones, ya sean de uso militar o comercial, las cuales cuentan con una vida útil aproximada de 10 años por lo que se requiere constantemente de Renio en una superaleación. Sobre la composición de las aleaciones es correcto afirmar que el contenido en Renio va en un rango de 3 a 6 %, el cual indica una cantidad aproximada de este metal contenido en las aleaciones a base de Níquel. Con el fin de especificar la cantidad de Renio contenida según el tipo de aleación se presenta la siguiente tabla que comparte MSP-REFRAM (2017):

Composición de superaleaciones monocristalinas (%)							
Superaleación	Generación	Generación Cr Co Mo W				Re	
CMSX-4	Segunda	6,5	9,0	0,6	6,0	3,0	
RENE' N5	Segunda	7.0	8,0	2,0	5,0	3,0	
SC 180	Segunda	5,0	10,0	2,0	5,0	3,0	
CMSX10	Tercera	2,0	3,0	0,4	5,0	6,0	
RENE' N6	V6 Tercera		12,5	1,4	6,0	5,4	

Tabla 7: COMPOSICIÓN DE LAS SUPERALEACIONES BASE NÍQUEL FUENTE: MSP-REFRAM (2017, p. 16)

En la tabla 7 se encuentran un resumen de algunas de las aleaciones, desde la segunda generación, en la que es posible apreciar algunos de los metales con los que cuenta una superaleación en base de Níquel, la cantidad de manera porcentual que contiene de cada uno de estos metales, el nombre de la aleación, y su generación. Una de las observaciones importantes sobre las generaciones en las superaleaciones es que solo desde la segunda generación incluyen el Renio en su composición, así como también que todas estas son monocristalinas. Para comprender la evolución de las aleaciones la siguiente grafica muestra el desarrollo de estas a lo largo de los años:



FUENTE: Fundamentos y aplicaciones de superaleaciones (2008, p. 19) (Traducido)

La gráfica 5 publicada por Reed (2008) resume la evolución de estas aleaciones en el tiempo comenzando desde las forjadas de manera simple hasta las superaleaciones monocristalinas utilizadas actualmente las cuales aparecen entre los años 70-80. Como es posible apreciar, en la gráfica 5, las superaleaciones monocristalinas más recientes cuentan con un aumento en su temperatura en comparación con la primera generación para 1000 horas de vida útil a 137 MPa desde su primera aparición. También es importante destacar los grupos de superaleaciones a los cuales el mercado los define como "generaciones". A modo ilustrativo el primer grupo en donde se encuentran las aleaciones PWA1480, SRR99, y otras es llamado la primera generación de superaleaciones monocristalinas las cuales, como se menciona anteriormente, no cuentan con Renio en su composición siendo recién utilizado este metal en superaleación a finales de los 90 cuando aparecen las superaleaciones de segunda generación.

5.2.1.1. REPRESENTACIÓN DEL USO DE RENIO EN ASPAS

Con el fin de representar de mejor manera el uso de este metal en la industria, a continuación se representa de manera visual la importancia de las propiedades del Renio en la composición de superaleaciones en conjunto con algunos desarrollos tecnológicos que grandes empresas han realizado con este metal en la industria aeronáutica.

Uno de los problemas comunes con los que cuenta la aeronáutica (en la antigua aeronáutica) es presentado Knight (2015) y publicado por la por BBC (2015) donde se indica el problema como tal y el desarrollo tecnológico que se produjo para contrarrestar este donde se indica que: el consumo de este metal en las aspas de las turbinas no solo se debe a que estas necesitan soportar altas temperaturas, sino que también a que estas giran a una velocidad tan alta que su carga centrifuga es equivalente a muchas toneladas que, en conjunto con el

problema de la alta temperatura, provoca un nuevo problema llamado "arrastre" el cual se resume en que el aspa se alarga lentamente y comienza a golpear la parte interior de la turbina. Esto se debe a que las aspas cuentan con pequeños cristales (granos, ilustración 8.a) y a que estos pueden deslizarse y el material deformarse generando daños internos en la turbina por lo que el añadir Renio ayuda al control de deslizamiento de las aspas (Texto resumido y contextualizado).

Una de las empresas que desarrollo tecnología para combatir este problema fue la empresa Rolls-Royce Holdings que, en una de sus divisiones, ha trabajado en el desarrollo tecnológico de sus aspas con el fin de contrarrestar el problema generado por el "arrastre" creando un aspa compuesta por una gran cantidad de metales, entre ellos Renio, la cual cuenta en su composición de un solo gran cristal (monocristal, ilustración 8.c). La siguiente ilustración muestra la evolución de las aspas desarrollado por la empresa Rolls-Royce:

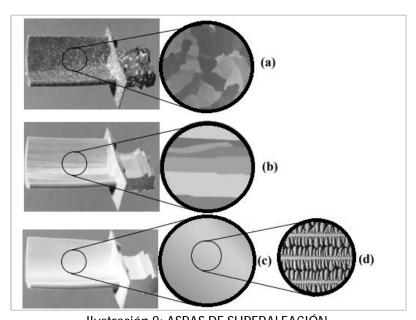


Ilustración 8: ASPAS DE SUPERALEACIÓN
FUENTE: Análisis de la selección de grano durante la solidificación direccional de palas de turbina de gas (2007, p. 5) (Traducido)

La ilustración 8 se encuentra modificada comparado con la original publicada por Dong (2007) en donde se aprecia la evolución de las aspas de superaleación con

base de Níquel siendo su objetivo el detener el arrastre buscando nuevas aleaciones y metales que colaboren con el objetivo. En la ilustración es posible apreciar la sección (8.a) la cual muestra un aspa con cristales (granos) convencional que tiene el problema del "arrastre". La sección (8.b) es un aspa con granos columnares en una dirección especifica. Las secciones (8.c) y (8.d) muestran un aspa con un solo cristal de manera uniforme y una vista ampliada de las aspas de un solo cristal donde se muestra una estructura cristalina dendrítica calculada respectivamente.

5.2.1.2. REPRESENTACIÓN DE SU USO EN AERONÁUTICA

La empresa mencionada, Rolls-Royce, también entrega información sobre las partes de un motor donde se utilizan aleaciones y superaleaciones según lo requieran las condiciones a las que trabaja el sector. Con el fin de lograr una visión general aplicada del uso de Renio la siguiente ilustración muestra una turbina de un avión comercial y su respectiva composición metálica publicada por Sourmail (s.f.):



Ilustración 9: REPRESENTACIÓN DE UNA TURBINA FUENTE: Sourmail, T. (s.f.)

La diversa cantidad de metales con las que se compone una turbina cualquiera sea esta, tomando como ejemplo la línea Trent de Rolls-Royce, se debe particularmente a la utilidad que tiene en cada área este metal en donde el Titanio (Azul) es ideal por su fuerza y densidad para aspas de baja temperatura, pero no para las aspas de altas temperaturas en donde éste es remplazado por superaleaciones de Níquel (Rojo), mientras que el acero (Amarillo) se utiliza para las partes estáticas que componen el compresor.

Otras empresas productoras de equipamiento aeronáutico también utilizan superaleaciones para sus motores en la misma industria. La siguiente ilustración que comparte Jones (2012) es la representación de un motor F100 con un corte lateral que muestra los componentes del motor militar comúnmente equipado en aviones de combate F-15 Eagle o F-16 Fighting Falcons creado por la empresa Pratt & Whitney en donde parte de su composición es de Renio en una superaleación de segunda generación:

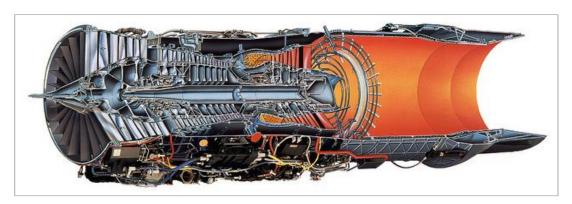


Ilustración 10: REPRESENTACIÓN DE UN MOTOR F100 FUENTE: Pratt & Whitney drawing

5.2.1.3. OTROS USOS DE UNA SUPERALEACIÓN

En una medida bastante menor, también existe el uso de estas superaleaciones para otros artefactos, el cual se subdivide en usos de éste para la industria automotriz, herramientas, y turbinas de gas industrial.

5.2.2. CATALIZADORES PLATINO-RENIO

El segundo grupo con mayor demanda de Renio, aproximadamente 8 veces menos que el anterior, es en el área de los catalizadores en la industria del petróleo principalmente como catalizador Platino-Renio el cual, según un estudio realizado por AMMTIAC (s.f.), se utilizan estos metales en la refinación del petróleo con el fin de hacer gasolina de alto octanaje libre de plomo. Agregan también que otro de los beneficios del Renio en los catalizadores es su excelente resistencia a la intoxicación por Nitrógeno, Azufre y Fosforo. A lo anterior se añade lo indicado por Dekker (1980) que resume que los catalizadores son simplemente Platino con una base de sílice o aluminio-sílice en donde se añade Renio con el fin de obtener un catalizador más estable que permite operar a presiones bajas.

5.2.3. USOS MENORES DE RENIO

El último y pequeño grupo consumidor de Renio son las aleaciones, entre las que se destacan: Renio-Tungsteno y Renio-Molibdeno. Su uso se resume en tubos de vacío, tubos de rayos X, instrumental médico, ampolletas de flash, termopar, entre otros.

5.2.3.1. ALEACION TUNGSTENO-RENIO (WRe)

Uno de los usos del Renio, presentado por Rhenium Alloys (2018)², es debido al uso habitual de éste como aleación con tungsteno en sensores para medir temperatura llamados termopar. Los sensores comunes cuentan con un problema de temperatura debido a que el metal del que están hechos a una

² La fuente "Rhenium Alloys" fue traducida y contextualizada con el fin de relacionar esta de buena manera con la publicación realizada por "U. Autónoma de Madrid" en ambos tópicos (WRe y MoRe).

temperatura sobre la de recristalización, sobre 1200°C, produce un comportamiento frágil en el sensor, y el añadir Renio se reduce este tipo de problemas aumentando la temperatura de recristalización, la ductilidad y la resistencia a la rotura alcanzando temperaturas de medición de hasta 2000°C según comparte la Universidad Autónoma de Madrid (2017). Esta aleación también se utiliza para producir alambres de pequeño diámetro y gran resistencia mecánica. Sus razones de aleación se encuentran estandarizadas siendo las más comunes entre fabricantes: W-Re 3%, W-Re 5%, W-Re 25%, W-Re 26% y W-Re 27% en donde el Renio contenido es el número porcentual mencionado y siendo 27% aproximadamente el límite de solubilidad de Renio en Tungsteno tal como indica el estudio realizado por Lassner y Schubert (1999). Otra característica importante de esta aleación la entrega un estudio realizado por la NASA (1968) en donde se indica que las aleaciones WRe que cuentan con un 22 a 28 % de Renio en Tungsteno son aleaciones del tipo superplásticas, las cuales exhiben elongaciones de al menos un 200% según pruebas realizadas por la misma entidad.

5.2.3.2. ALEACIÓN MOLIBDENO-RENIO (MoRe)

Las aleaciones MoRe, según comparte Rhenium Alloys (2018), cuentan con un amplio uso dentro de los que destacan varillas, placas, tuberías entre otras, abarcando áreas específicas como hornos de alta temperatura, electrónica, termopar, etc. debido a que esta aleación entrega alta ductilidad y resistencia. En el uso específico como termopar, la aleación tiene un alcance máximo de 1650°C valor que comparte la Universidad Autónoma de Madrid (2017). Al igual que en la aleación anterior los porcentajes de cada elemento se encuentran estandarizados siendo algunos de los comunes: Mo-Re 41%, Mo-Re 44,5% y Mo-Re 47,5% en donde el Renio es el contenido porcentual mencionado.

5.2.3.3. ISÓTOPOS EN LA MEDICINA: RENIO-188

Debido a la alta cantidad de isotopos con los que cuenta el Renio, ver anexo III, uno de estos es muy útil en la medicina moderna como es el caso del isotopo radioactivo ¹⁸⁸Re. Su aplicación médica según comparte Joint Stock Company Isotope (2016) se debe a que es un emisor Beta con una corta vida media, 16,9 horas aproximadamente, el cual permite sinterizar radiofármacos para diagnosticar tumores malignos, metástasis ósea, artritis y otras enfermedades. Este isotopo se puede obtener de distintas fuentes de procedencia tal como indica el licenciado Marcos Tassano (2014) en donde menciona que "el ¹⁸⁸Re puede separarse por reacción nuclear, así como también a través de un generador ¹⁸⁸W". Esta última fuente, generador ¹⁸⁸W, cuenta con una serie de ventajas las cuales son compartidas por Joint Stock Company Isotope (2016) y resumidas a continuación:

Económicas: ya que producir este isotopo mediante reacción nuclear tiene un alto costo.

Presencia de radiación beta y gama: la cual asegura un alto efecto terapéutico junto con el recibir información visual en cámaras gama convencionales (beta y gama respectivamente).

Corta vida media: entrega seguridad a los pacientes, personal y al medio ambiente.

5.2.3.4. DATACIONES RENIO-OSMIO

Otro uso del Renio es en la industria minera es la geocronología uso el que, según publica Amezcua, Avendaño, Martínez y García (s.f.), se produce mediante decaimiento radioactivo producido por el isotopo Renio¹⁸⁷ el cual, según se menciona en el anexo III, es un isótopo inestable que mediante el decaimiento radioactivo se transforma en Osmio¹⁸⁷. Este cuenta con una vida media de 42*10³

millones de años y su rango de datación va desde los 10 a los 4500 millones de años. Si bien esta técnica es poco común en las dataciones, se reporta su aplicación en yacimientos de sulfuros primarios, tales como los Pórfidos Cupríferos, y en diversos tipos de rocas que contienen sulfuros tales como pirita, y molibdenita con contenidos de Renio y Osmio adecuados para la aplicación de esta técnica, tal como se detalla en los siguientes párrafos.

La datación radiométrica Renio-Osmio se basa en el decaimiento isotópico β del ¹⁸⁷Re a ¹⁸⁷Os. Estos son dos elementos fuertemente siderófilos y calcófilos por lo que son usados en dataciones de menas de sulfuros (D´Annunzio, 2016, p.44).

Sobre el uso en geocronología del Re-Os en 2016 D'Annunzio comparte lo siguiente:

El Renio y el Osmio presentan un marcado fraccionamiento entre el manto y la corteza. El Renio es moderadamente incompatible por lo cual es separado del manto hacia los líquidos magmáticos, mientras que el osmio, que es altamente compatible, permanece en al manto. Por estas cualidades, el sistema Re-Os posee un gran potencial en geocronología en especial para la datación de yacimientos minerales, como así también en los estudios geoquímicos sobre la formación de los magmas y de la evolución de la corteza terrestre y el manto (D´Annunzio, 2016, p.235).

Sobre los isotopos de Renio y el decaimiento radiactivo McCandless, Ruiz y Campbell (1993) comparte que el Renio tiene dos isótopos naturales: ¹⁸⁵Re y ¹⁸⁷Re, de los cuales el último es radiactivo y decae en el isótopo estable del osmio ¹⁸⁷Os. Por su parte, este elemento presenta siete isótopos naturales estables de masas 184, 186, 187, 188, 189, 190 y 192. Debe mencionarse que el ¹⁸⁶Os también se produce por el decaimiento α del isótopo radiactivo del platino ¹⁹⁰Pt, aunque en este caso la baja concentración de este radionucleido en la Naturaleza y el alto valor de su vida media da lugar a cantidades insignificantes de ese isótopo del Osmio.

McCandless et al. (1993) comparten también que la Datación de Re-Os además de ser útil en la datación de sulfuros en especial en pirita y molibdenita, suministra datos que combinados con los que se puedan hallar por medio de los métodos Rb-Sr, Sm-Nd, Lu-Hf y U-Pb, facilitan las investigaciones sobre la diferenciación del magma y de la evolución y crecimiento de la corteza continental y del manto. También hablan sobre la confiabilidad en este método de datación, la cual depende de la pérdida de Re en la molibdenita por procesos hidrotermales, así como por proceso de alteración cercanos a la superficie, posteriores a la formación primaria de la molibdenita, por lo que previo a las técnicas a aplicar para la datación se requiere aplicar una serie de técnicas analíticas no destructivas, tales como análisis con microsonda, XRD, BSE, y microscopía infrarroja, para detectar la presencia de alteración en molibdenita y determinar si los minerales seleccionados son adecuados para una datación Re-Os.

Para la extracción del Renio y del Osmio contenidos en sulfuros tales como molibdenita y pirita existen técnicas analíticas específicas que incluyen en términos generales una separación adecuada de los minerales a tratar, aplicar una serie de procesos químicos orientados primero a preparar la muestra para una extracción adecuada, lograr la extracción de cada elemento por medio de procesos químicos específicos, proceder a aplicar una técnica analítica que permita cuantificar adecuadamente la cantidad de Renio y Osmio extraída de la muestra, para luego pasar a aplicar las metodologías que permite comparar el contenido de Renio con el de Osmio para calcular el tiempo durante el cual ha estado activo el decaimiento y por lo tanto estimar el tiempo transcurrido desde la formación del mineral analizado y por ende obtener la edad geológica del proceso genético primario del yacimiento en estudio. Algunos textos que detallan procesos de extracción, de análisis, así como de aplicación para fines radiométricos son los de los autores McCandless et al (1993), Freydlier et al (1997), Suzuki et al (2000), Suzuki et al (2001), Barra y Ruiz (2003), Selby et al (2003) y D'Annunzio (2016).

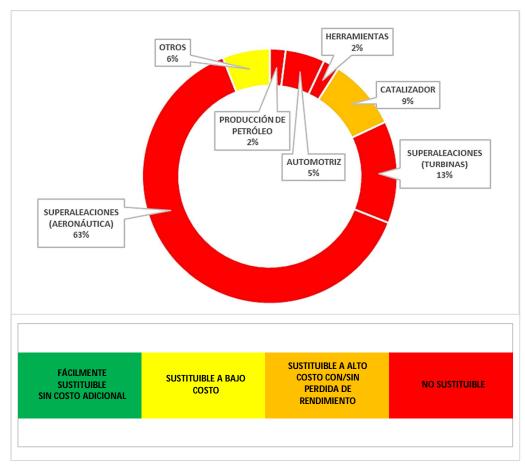
6. SUSTITUTOS Y RECICLAJES DE RENIO

6.1. SUSTITUCIÓN DE RENIO EN PRODUCTOS CLAVE

El alto valor del metal para los consumidores en la industria aeronáutica estimula la constante búsqueda de sustitutos que logren tener la misma utilidad del Renio pero a un valor menor. Según resume U.S. Geological Survey (2018) en el área de catalizadores el Iridio, junto con el Estaño, han alcanzado una buena recepción en el mercado, lo que amenaza a los catalizadores utilizados actualmente de Platino-Renio. Otro de sus potenciales sustitutos, en el área de las aleaciones, es más específicamente en el uso como termopar en donde actualmente el mercado cuenta con aleaciones de Rodio-Iridio, la cual se ha demostrado alcanza una temperatura de medición hasta 2000°C según comparte la Universidad Autónoma de Madrid (2017) en donde esta aleación supera el rango de medición de MoRe, 1650°C, e iguala al de las aleaciones WRe. Cabe destacar que cada una de estas aleaciones cuenta con aspectos positivos y negativos tales como un alto costo en algunas alternativas, su aplicación y vida útil.

En general, debido a su alto costo de producción y a las variables que se mencionan con anterioridad, el mercado del Renio se encuentra amenazado constantemente por metales como el Indio, Selenio, Tungsteno, entre otros, los cuales se encuentran en estudio con el fin de reemplazar este costoso y escaso metal. Esta amenaza posiblemente se diluya con el tiempo debido a que, según el estudio de Graedel (2016), una serie de metales o metaloides estudiados, 62 en total, no cuentan con sustitutos que los reemplacen de manera eficiente. Entre estos elementos se encuentra el Renio, un metal en donde sus sustitutos cuentan con un bajo rendimiento ubicando a este metal en el grado más alto en su escala por lo que eventualmente podría no tener reemplazante eficiente si el metal escasea en un futuro.

Complementando lo indicado por Graedel (2016) un análisis que comparte la MSP-REFRAM (2017) sobre la sustitución del metal en función a su aplicación individual indica lo siguiente:



Gráfica 6: SUSTITUTOS DEL RENIO SEGÚN EL ÁREA FUENTE: MSP-REFRAM, RHENIUM

El estudio resume la posible sustitución de este metal en diferentes áreas en donde se aprecia que las características que agrega el Renio a las aleaciones son, con la tecnología y conocimientos actuales, insustituibles o sustituibles con un alto costo y/o perdida de rendimiento adicional siendo su sustitución en el mercado actual postergada a futuros años a la espera del descubrimiento de aleaciones nuevas o de una tecnología que haga económicamente factible la extracción en mayores cantidades de este metal.

6.2. MERCADO DE RECICLAJE

Sobre el reciclaje de este metal, MSP-REFRAM (2017) comparte que en la Unión Europea existe una clara predominancia de Alemania en el total de Renio producido desde esta fuente el cual, en su totalidad en la Unión Europea, es de 7 toneladas anuales las cuales se subdividen de la siguiente manera según el país productor:

Producción de reciclaje						
País	Producción (kg)					
Alemania	4000					
Francia	1000					
Estonia	1000					
Republica checa	500					
Polonia	500					

Tabla 8: PRODUCCIÓN DE RENIO DE LA UNIÓN EUROPEA FUENTE: MSP-REFRAM (2017)

Como muestra la tabla 8 la producción por reciclaje es en cantidad importante teniendo en cuenta que la producción mundial anual, desde la fuente primaria, es cercana a 50.000 kilogramos, producción la cual no considera cantidad proveniente del reciclaje. En nuestro continente existe producción desde esta fuente por parte de Estados Unidos, pero no existe información clara sobre cantidad..

7. RENIO EN EL MUNDO MICRO

7.1. PALABRAS INTRODUCTORIAS

Preliminarmente, se realiza una revisión de tópicos relevantes que apoyan los conceptos a tratar en este escrito con el propósito de que el lector comprenda los conceptos que se tratan en el desarrollo de este capítulo. Se estima relevante introducir al lector en temas formales y en aplicaciones para lo cual se incluyen algunos ejemplos ilustrativos donde se realizan análisis al elemento en cuestión, Renio, y a otros compuestos como referencia. Especial énfasis ha sido focalizado hacia la definición de la escala de electronegatividad de Sanderson quien define de manera más correcta a los elementos en comparación con la escala de L. Pauling (escala que al igual que la de Mullikan también se comparte con el fin de plasmar los primeros cimientos para trabajos posteriores). El desarrollo de este capítulo se basa en las publicaciones realizadas por el docente guía PhD. Roberto Acevedo y en la publicación realizada por Morales y Meruane (1964).

7.2. MECÁNICA CUÁNTICA 7.2.1. DEFINICIÓN GENERAL DE LA MECÁNICA CUÁNTICA

Primeramente, se definen conceptos básicos referidos a cuerpos grandes y pequeños en sentido absoluto, considerando que la física y la química de materiales corresponden a una manifestación de envergadura de fenómenos a escala microscópica siendo necesario revisar tópicos de mecánica cuántica.

Hacia el año 1925, surge la Mecánica Cuántica (mecánica de objetos pequeños en sentido absoluto) como una respuesta natural a la imposibilidad de reproducir datos experimentales a escala microscópica. En estas condiciones, los Pilares Fundamentales de las Ciencias Naturales (determinismo y causalidad) simplemente no son aplicables a escala microscópica, lo cual no significa que las leyes que rigen la Mecánica Clásica (objetos grandes en sentido absoluto)

pierdan validez. Se trata simplemente de aceptar que la Mecánica Clásica no fue pensada como tampoco desarrollada (al nivel que se le conoce) para el mundo de partículas pequeñas en sentido absoluto. El conocer que los objetos pequeños sufren alteraciones (perturbaciones) significativas por el simple expediente de observarlos resulta importante para el entendimiento de estos. Adicionalmente a las Ciencias solo les interesa el estudio de observables físicos y, por lo tanto, solo podemos observar un objeto como el resultado de la interacción de éste con un objeto externo. Para estos efectos, resulta importante señalar que con total independencia del observador y del avance tecnológico debe existir un "límite" el cual es inherente a la naturaleza de las cosas y, en consecuencia, no es posible ir más allá de ese límite. En consecuencia, sí en el límite (característico del objeto) la perturbación (alteración) que este experimenta es pequeña por el expediente de observarlo, entonces podemos decir que el objeto es grande en sentido absoluto. Una situación distinta ocurre en el caso de los objetos pequeños los cuales, en el límite por el acto de observarlos, experimentan perturbaciones grandes. La separación entre grande y pequeño es crucial, se puede señalar que la Mecánica Clásica es aplicable a objetos grandes en sentido absoluto en cambio en el caso de los objetos pequeños en sentido absoluto surge la Mecánica Cuántica.

Algunos valores cuánticos calculados mediante experimentos se resumen y añaden con propósitos ilustrativos:

$$_{_{1}}^{1}p \rightarrow m = 1,0075700\,uma$$
, $_{_{-1}}^{0}e \rightarrow m = 0,0005486\,uma$ y $_{_{0}}^{1}n \rightarrow m = 1,00893uma$ (protón, electrón, neutrón).

La notación presentada cuenta con un subíndice a la izquierda el cual indica la carga en unidades ues (Sistema CGS 1e: 4,8*10⁻¹⁰ ues) y un supra-índice a la izquierda que es la aproximación al entero más próxima de la masa de la partícula expresa en unidades de masa atómica (1 uma: 1/No= 1,66*10⁻²⁴ grs).

7.2.2. MECÁNICA CUÁNTICA DE LOS ELEMENTOS

La mecánica cuántica nos indica que se cumplen algunas reglas de las cuales solo se presenta una debido a que el tema es extenso y a que este capítulo busca una visión general para el lector. La regla que destaca dice que las configuraciones preferidas son aquellas de capas electrónicas completas o semicompletas siendo necesario el conocer el orden energético, el cual es de la siguiente forma:

$$(1s)(2s)(2p_X,2p_Y,2p_Z)(3s)(3p_X,3p_Y,3p_Z)(4s)(3d_z^2,3d_x^2-y^2,3d_{xy},3d_{xz},3d_{yz})....$$

$$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10}$$

Ya que los elementos se ordenan según sus electrones en base a este orden energético es posible indicar algunos ejemplos explícitos con fines ilustrativos de cómo se ordenan los elementos según este orden:

$$Z=2$$
 (1s²) = (He) Capa completa

Z=5 (1s²) (2s²2p¹2p2p) El electrón puede tener espín alfa o beta y ocupar cualquier estado 2p.

$$Z=10 (1s^2) (2s^22p^22p^2) = (Ne) Capa completa.$$

El aplicar este concepto con el Renio entrega algunas apoximaciones:

Para esto se requiere de la configuración electrónica del Renio, la cual se obtiene directamente del sistema periódico o realizando un análisis más profundo. Ya que el Renio cuenta con setenta y cinco electrones y este se encuentra entre los gases nobles Xenón [54Xe] y Radón [86Ra] es posible ordenar la configuración electrónica del este metal de la siguiente forma [54Xe]4f¹⁴5d⁵6s², en donde el Xenón resume los primeros cincuenta y cuatro electrones del Renio y el orden energético siguiente 4f¹⁴5d⁵6s² entrega los veintiún electrones faltantes completando así los setenta y cinco.

Conocida la configuración electrónica del Renio ([54Xe]4f¹⁴5d⁵6s²) se observa que la penúltima capa (5d) cuenta con una capacidad para cobijar un máximo de 10 electrones (existen 5 estados permitidos del tipo 5d) en consecuencia, la capa semi-completa que garantiza mayor estabilidad es del tipo (5d⁵) y la capa más externa queda como (6s²).

7.2.3. NÚMEROS CUÁNTICOS

De la configuración electrónica obtenida anteriormente es posible obtener información relevante a nivel cuántico, para esto es necesario conocer algunos conceptos introductorios para así continuar con el análisis de la configuración electrónica del Renio.

Primeramente, es necesario conocer que no es posible precisar la ubicación de los electrones debido a su comportamiento dual (se comportan como onda y partículas a la vez), sino que es posible determinar una probabilidad alta de donde se encuentren estos la cual es de aproximadamente 91%, valor el cual proviene del cuadrado de la función de onda (ψ^2). Esta región probabilística en donde es posible encontrar al electrón se conoce como orbital atómico.

La función de onda mencionada proviene de la ecuación independiente del tiempo de Schrödinger ecuación la cual es la siguiente:

$$\hat{H}\psi = E\psi$$
 Ecuación de Schrödinger

En donde \widehat{H} es un operador Hamiltoniano, E la energía del estado de la función de onda y ψ la función de onda. Al desarrollar esta ecuación esta se extiende debido a que el operador Hamiltoniano se subdivide en energías cinética, potencial y en una ecuación laplaciano que, por motivos prácticos, solo se mencionan. La resolución de esta ecuación que se realiza en átomos hidrogenoides (átomos con un núcleo y un electrón) requiere de parámetros restrictivos que resultan ser números enteros que se obtienen matemáticamente

desde esta ecuación los cuales son llamados números cuánticos y que se describen a continuación:

Número cuántico principal (n): este número describe el tamaño del orbital atómico en donde los números más altos son orbitales de mayor volumen.

Número cuántico angular (I): este número describe la forma del orbital atómico que, por sus siglas en inglés, son s (Sharp), p (Principal), d (Diffuse) y f (Fundamental).

Número cuántico magnético (ml): determina la orientación espacial del orbital y va desde -l, 0, +l.

Al resolver la ecuación de Schrödinger se obtiene la función de onda que entrega la forma de los orbitales atómicos, típicos para el átomo hidrogenoide, los cuales son:

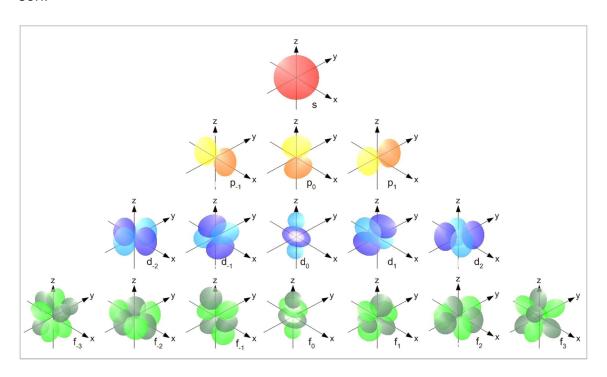


Ilustración 11: ORBITALES s(ROJO), p(AMARILLO), d(azul), f(VERDE) FUENTE: Pérez, J (s.f)

La ilustración 11 compartida por Pérez (s.f.) muestra en su parte superior una esfera que simplifica en donde el electrón se encuentra la mayor parte del tiempo en las tres dimensiones del espacio (x,y,z).

Orbital s, l=0, ml=0.

Con respecto a su tamaño es necesario conocer que el volumen del orbital s varia de manera creciente:

Con 1s<2s<3s<... con respecto a su volumen.

Orbital p, l=1, ml=-1, 0, +1.

En el orbital p se tienen 3 orbitales (p_x, p_y, p_z) en distintas direcciones en un plano tridimensional debido a que ml cuenta con 3 valores.

Orbital d, l=2, ml=-2, -1, 0, +1, +2.

Replicando el caso anterior debido a que existen 5 valores de ml existen 5 orientaciones diferentes en el plano tridimensional $d_x^2-y^2$, d_{xy} , d_{z}^2 , d_{yz} , d_{xy} .

Orbital f, l=3, ml=-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3.

El orbital f es el más exótico en cuanto a forma de los 4 y debido a su l=3 estos cuentan con 7 formas distintas f_{xz}^2 , f_{xyz} , f_{xyz} , $f_{x(x^2-3y^2)}$, f_z^3 , f_{yz}^2 , $f_{z(x^2-y^2)}$, $f_{y(y^2-3x^2)}$.

Cabe mencionar que el cuarto número cuántico no mencionado es el spin (ms) el cual solo puede tomar dos valores +1/2 y -1/2 y que completa la lista de los números cuánticos mencionados anteriormente.

Conocido el origen de los números cuánticos que es posible obtener desde la configuración electrónica, la siguiente ilustración es una representación de los números cuánticos que se obtienen desde la configuración electrónica del Renio:

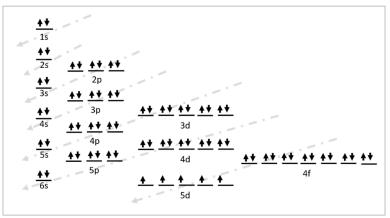


Ilustración 12: NÚMEROS CUÁNTICOS DE RENIO

FUENTE: Elaboración propia

En la ilustración 12 es posible apreciar los setenta y cinco electrones del Renio (rectas con direcciones arriba y abajo) ordenados según el principio de Aufbau. El Renio cuenta con un número cuántico principal (n) 5 en notación cuántica u "O" en notación espectroscópica. Su número cuántico secundario (l) es 2 debido a que d es igual a 2, su número cuántico magnético (ml) es +2 entregado por el electrón posicionado en 5d. El spin (ms) es de +1/2 según indica la dirección de la última recta dibujada, último electrón, que se posiciona en 5d.

7.3. CONTRACCIÓN DE LOS LANTÁNIDOS

Para comprender a que se refiere este tópico y en que afecta este hecho a los elementos, entre los que destaca el Renio, el siguiente tópico se basa en responder a la siguiente interrogante:

"¿Cómo se explica la contracción lantánida? Al ir del lantano (Z = 57) al lutecio (Z = 71) se observa que el radio iónico disminuye en 18,3 pm. El llenado electrónico de los orbitales 4f produce una contracción gradual, llamada contracción lantánida, no sólo en los radios iónicos sino también en los tamaños atómicos. A medida que se avanza del Lantano al Lutecio se incrementa la carga nuclear y el número de electrones en el nivel f se

incrementa; sin embargo, debido al poco efecto pantalla que brinda un electrón a otro en el nivel f, la carga nuclear efectiva que experimenta cada electrón aumenta, produciéndose una reducción del tamaño de la capa f. Es necesario informar que dicha disminución de tamaño no es muy regular. Ahora bien, habría que añadir a la explicación ya dada, el efecto relativístico, que contribuye con aproximadamente un 10% a esta contracción" (Mario Ceroni-Galloso, 2005, p. 62).

Ceroni-Galloso (2005) sugiere algunos términos que no son tratados en este texto, sin embargo, resume de buena manera lo que se produce en el radio iónico y en la capa f.

7.4. ESCALAS DE ELECTRONEGATIVIDADES

La electronegatividad (□) es una propiedad de los sistemas, tanto atómicos como moleculares definida como la capacidad de un átomo, ion o molécula de atraer hacia sí los electrones compartidos en el enlace químico. A continuación se presentan tres escalas que se basan en distintos conceptos.

7.4.1. ELECTRONEGATIVIDAD DE PAULING

Con el propósito de disponer de una escala de electronegatividades Linus Pauling asocia a Hidrógeno el valor 2,1 obteniendo un valor máximo para Flúor equivalente a 4,0. A modo ilustrativo algunos valores de electronegatividades de casi la totalidad de metales de transición se indican a continuación:

H (2,1) (Referencial)		-	-	-	-		
Ti (1,3)	V (1,6)	Cr (1,6)	Mn (1,5)	Fe (1,8)	Co (1,8)	Ni (1,8)	Cu (1,9)
Zr (1,4)	Nb (1,6)	Mo (1,8)	Tc (1,9)	Ru (2,2)	Rh (2,2)	Pd (2,2)	Ag (1,9)
Hf (1,3)	Ta (1,5)	W (1,7)	Re (1,9)	Os (2,2)	Ir (2,2)	Pt (2,2)	Au (2,4)

Tabla 9: ELECTRONEGATIVIDAD DE PAULING

FUENTE: Sistema Periódico

Se observa a lo largo de un período (filas) un aumento de la electronegatividad de izquierda a derecha como también una disminución al descender en un grupo (columnas) del sistema periódico.

Los valores de electronegatividades permiten establecer una distinción (arbitraria, pero con algún grado de utilidad) entre metales y no metales en el sistema periódico. Se considera el valor de 2,1 correspondiente a Hidrógeno como una suerte de límite entre el carácter metálico y no metálico de los elementos químicos. Para valores de electronegatividades inferiores a 2,1 se habla de metales y para valores superiores a 2,1 se habla de no metales. Esta división en una primera aproximación no es tan exacta por cuanto aparecen problemas en el caso de elementos químicos con valores de electronegatividades cercanas al valor 2,1. Algunos ejemplos son:

P(2,1), As(2,0), Renio(1,9) entre otros.

Estos son algunos de los elementos químicos que, bajo condiciones especiales, presenta propiedades intermedias entre metales y no metales.

Con respecto a la formulación Pauling establece que la energía de un enlace covalente en una molécula diatómica heteronuclear del tipo AB puede representarse, en una primera aproximación cruda, como el simple promedio aritmético de las energías de disociación de los enlaces $A_2(g)$ y $B_2(g)$, es decir, en una aproximación de orden cero es correcto escribir:

$$E(A-B) = \frac{1}{2} \{ E(A_2) + E(B_2) \}$$

La expresión anterior es una aproximación relativamente primaria por tanto imprecisa, de modo que se requiere recurrir al proceso experimental el cual indica lo siguiente:

Energía de enlace (Promedio aritmético) E(AB)

Energía de enlace (experimental) E_{AB}^{exp}

Para una serie de moléculas diatómicas heteronucleares, existen un Δ el cual es distinto de cero y definido por medio de la identidad:

$$\Delta = E_{AB}^{\rm exp} - E(AB)$$

A modo de ejemplo, para la columna de los Halógenos: ₉F, ₁₇Cl, ₃₅Br, ₅₃l y ₈₅At, los valores experimentales de las energías de enlace(Kcal/mol) en moléculas asociadas a este grupo en el sistema periódico son los que se indican:

$$F_2$$
 Cl_2 Br_2 I_2 H_2
 $36,3$ $58,0$ $46,1$ $36,1$ 104
 HF HCl HBr HI
 $134,6103,2$ $87,5$ $71,4$
 $64,3$ $22,2$ $12,45$ $1,35$ Δ
 FCl FBr $Cl-Br$ $Cl-I$ $Br-I$
 $60,6$ $61,0$ $52,3$ $50,3$ $42,5$
 $13,3$ $20,65$ $0,25$ $3,25$ $1,4$ Δ

Estos resultados entregan tendencias interesantes de añadir y compartir en este escrito:

Los valores de Δ para los sistemas del tipo HX (con X: F, Cl, Br, I) decrecen de izquierda a derecha lo cual se interpreta de la forma que se indica: A mayores valores de Δ es posible intuir una mayor polarización de los enlaces y en consecuencia un mayor carácter iónico del enlace.

De acuerdo con las tendencias observadas Pauling sugiere que los valores de Δ se deben a una estabilización de los sistemas por existencia de estructuras

resonantes. Así por ejemplo a modo ilustrativo para el sistema HCI, es posible escribir el par iónico H⁺ CI⁻ (la formación de estos pares iónicos es real, sin embargo, en estado gaseoso su ocurrencia es en una fracción bastante menor que la correspondiente al enlace covalente polar de la molécula HCI).

Los valores de Δ aumentan en la medida que se incrementa el carácter iónico del enlace, es decir, mientas mayor sea la diferencia de electronegatividades entre los átomos enlaces. En este sentido, es posible declarar con propiedad la existencia de moléculas caracterizadas por: enlaces covalentes puros, enlaces covalentes polares y enlaces iónicos.

7.4.2. ELECTRONEGATIVIDAD DE SANDERSON

Al igual que la escala de L. Pauling es relevante el entendimiento de manera general de la escala de Sanderson. Sanderson introduce el concepto de electronegatividad (relación de estabilidad) como el cociente entre la densidad electrónica media del átomo (D) y su densidad electrónica ideal (Di).

$$RE = \frac{D}{Di}$$
 (Ecuación 1)

La densidad electrónica media (D) se estima bajo el supuesto que el átomo es perfectamente esférico y con una nube electrónica asociada uniforme, tanto en la periferia como en las proximidades del núcleo.

$$D = \frac{Z}{\frac{4}{3} * \pi * (r)^3}$$
 (Ecuación 2)

Con r como el radio covalente en unidades de Angstrom (1 Å: 1,00*10-8 cm).

La densidad electrónica ideal Di es aquella que tendría el átomo sí manteniendo su número atómico (Z) poseyese la configuración de gas noble. La ecuación y las densidades electrónicas de los gases nobles son las que se indican a continuación:

$$Di = GasNobleInferior + PosiciónElemento * \frac{\Delta GasNoble}{ElementosTotales}$$
 (Ecuación 3)

Los valores de densidad electrónica ideal (D_i) para los gases nobles son; He (0,59), Ne (1,06), Ar (0,82), Kr (1,27), Xe (1,41) y Rn (2,09).

La escala de relaciones de estabilidad (RE) de Sanderson contempla un valor máximo de 5,75 para Flúor y un valor mínimo para Cesio de 0,49. En el caso de Hidrógeno el valor reportado es 3,55 y, al igual que en la escala de L. Pauling, este valor se considera como una suerte de límite entre metales y no metales. Es importante señalar que los valores de las relaciones de estabilidad de Sanderson se ajustan en una mejor forma a las propiedades químicas y físicas de los elementos y de sus compuestos cuando se comparan con las estimaciones empleando la escala de electronegatividades de Pauling.

Es importante señalar que las relaciones de estabilidad de los elementos muy metálicos, exceptuando Sodio, han sido determinadas introduciendo factores de corrección. Los valores corregidos para algunos elementos, a modo de ejemplo, son los que se indican a continuación:

$$RE(H)=3,55$$
; $RE(Li)=0,74$; $Re(Be)=1,91$; $RE(Mg)=1,56$.

Adicionalmente, la escala de Sanderson indica en forma clara y precisa la relación entre el tamaño de un átomo y su electronegatividad por cuanto las densidades electrónicas son funciones directas del número atómico y del radio covalente. De esta forma los elementos de menor radio deberían poseer los mayores valores de relaciones de estabilidad. Se infiere, de la ecuación 1, que la influencia del radio es mucho mayor que la del número atómico (recordar que, en la definición de relación de estabilidad, los radios aparecen en el denominador elevados al cubo).

Existe una ecuación que relaciona los valores de relaciones de estabilidad (RE) con las electronegatividades de la escala de Pauling, por medio de la relación:

$$\chi_P = (0,21RE+0,77)^2$$

7.4.2.1. APLICACIÓN DE SANDERSON

Según publica Moeller (1994), una única fuente encontrada al respecto, el valor de la electronegatividad del Renio en la escala de Sanderson dicta que este metal cuenta con una electronegatividad de 1,53 lo que lo define como un elemento muy metálico a diferencia de lo que propone Pauling.

Para realizar el cálculo e intentar obtener este valor de manera teórica se propone el siguiente ejemplo ilustrativo con el elemento Flúor con RE conocida de 5,75. Para esto es necesario conocer que Flúor cuenta con: Z=9, un radio covalente de 0,72 Å y que se encuentra entre el gas noble Helio (Di: 0,59) y Neón (Di:1,06) siendo la diferencia entre estos ΔGN:0,47 (Delta gases nobles). Su posición luego del gas noble Helio es la séptima de ocho (Neón es el octavo). Con estos datos es posible realizar el cálculo de la electronegatividad según Sanderson. Al reemplazar los valores entregados en las ecuaciones 2 y 3 se obtiene:

$$Con D = \frac{9}{\frac{4}{3}x\pi x (0.72 \text{ Å})^3} = 5.7593$$

$$Con Di = 0.59 + 7x \frac{0.47}{8} = 1.0012$$

Los valores obtenidos se reemplazan en la ecuación 1 obteniendo como resultado la relación de estabilidad del Fluor:

$$RE = \frac{D}{Di} = \frac{5,75939}{1,00125} = 5,75 \frac{e^{-}}{\mathring{A}^{3}}$$

Con esto se comprueba teóricamente que la relación de estabilidad o la electronegatividad según esta escala para Flúor es de 5,75. Si se repite este cálculo con cualquier elemento que no se encuentre bajo la influencia de la contracción lantánida, ni bajo las correcciones puntuales que se presentan en el tópico anterior, el resultado es obtenible mediante el mismo proceso debido a que existe linealidad en el valor ΔGN. Sin embargo, debido a la contracción lantánida

presente en el periodo en el que se encuentra el Renio este cálculo no resulta lineal tal como se presenta con Flúor.

Si se trabaja con el valor para Renio de 1,53 y con algunos elementos bajo esta influencia cenarnos al Renio, es posible proponer una tabla con los valores que se requieren de cada elemento en función a la electronegatividad tabulada ya que estos valores no son lineales como en el caso anterior.

Aplicando este modelo lineal al Renio se observa lo siguiente:

Renio: Z=75, un radio covalente de 1,28 Å, se encuentra entre el gas noble Xenón (Di: 1,41) y Radón (Di:2,09) siendo la diferencia entre estos ΔGN:0,68. Observación: Su posición luego del gas noble Xenón es la séptima de diez y ocho elementos (Radón es el décimo octavo) si solo se cuentan los elementos que se encuentran dentro de la carta periódica principal, de no ser así su posición luego del gas noble Xenón es la vigésimo primera (21) de treinta y dos (Radón es la trigésimo segunda) esta vez contando los lantánidos. Al realizar los reemplazos correspondientes se obtiene:

$$Con D = \frac{75}{\frac{4}{3}x\pi x(1,28 \text{ Å})^3} = 8,5420$$

$$Con Di para 18 \ elementos = 1,41 + 7x \frac{0,68}{18} = 1,6744 \text{ (a)}$$

$$Con Di para 32 \ elementos = 1,41 + 21x \frac{0,68}{32} = 1,8562 \text{ (b)}$$

$$RE (a) = \frac{D}{Di} = \frac{8,5420}{1,6744} = 5,1015 \frac{e^-}{\text{Å}^3}$$

$$RE (b) = \frac{D}{Di} = \frac{8,5420}{1,8562} = 4,6018 \frac{e^-}{\text{Å}^3}$$

Como es posible observar en ambas resoluciones el valor resultante (5,1 y 4,6) no es el esperado (1,53) esto debido a lo mencionado anteriormente. Si se asume que los datos estregados de electronegatividades según Moeller (1994) son correctos, se propone el calcular los ΔGN de algunos elementos comenzando

desde la electronegatividad publicada con el objetivo de obtener, en un futuro, algún factor corrector que agrupe estos elementos y expanda el conocimiento existente sobre esta escala.

Con las ecuaciones iniciales (ecuación 1,2 y 3) se busca despejar el ΔGN y obtener una ecuación final en función de los parámetros conocidos: Radio covalente, Z, Relación de estabilidad (electronegatividad), Numero de elementos y Posición del elemento. Al reemplazar la ecuación (3) en la ecuación (1) y realizando la algebra correspondiente se obtiene la nueva ecuación:

$$\Delta GasNoble = \frac{(D - RE * (GasNobleInf)) * N\'umeroDeElementos)}{Posici\'on * RE} Ecuaci\'on 4$$

Ya que la densidad electrónica (D) es una constante se trabaja directamente como D. Esta ecuación permite analizar la variación existente entre el Δ GN indicando la no linealidad al aplicar esta escala en los elementos del periodo 6.

-	Та	W	Re	Os	Ir
RE (□)	1,21	1,39	1,53	1,67	1,78
D (calculado)	7,2466	8,0451	8,5420	9,0747	9,1941
ΔGN con 32 ele.	7,7118	7,0045	6,3588	5,8530	5,2246
Posición	19	20	21	22	23
ΔGN con 18 ele.	16,4841	13,1335	10,7305	9,0538	7,5104
Posición	5	6	7	8	9

Tabla 10: CÁLCULO DEL GAS NOBLE (ΔGN)

FUENTE: Elaboración propia

La tabla calculada teóricamente mediante los valores conocidos entrega una observación que abre posibilidades a futuro debido a que, si los valores de electronegatividad publicados por Moeller (1994) se encuentran correctos, se observa una tendencia que se próxima a lo lineal con disminuciones en un rango de 0,7 a 0,5 cuando se obtiene la diferencia entre gases nobles (ΔGN) al

incorporar los 32 elementos en el cálculo, siendo este un primer paso para que en el futuro se investigue alguna función que logre agrupar los valores tabulados por Moeller. De modo complementario el apéndice III propone ecuaciones que dan respuesta a este problema.

A modo ilustrativo se comprueba la electronegatividad del Renio mediante el cálculo que propone Sanderson:

$$Con D = \frac{75}{\frac{4}{3}x\pi x (1,28 \text{ Å})^3} = 8,5420$$

$$Con Di para 32 elementos = 1,41 + 21 * \frac{6,3588}{32} = 5,5829$$

$$RE (a) = \frac{D}{Di} = \frac{8,5420}{5,5829} = 1,53 \frac{e^-}{\mathring{\Delta}^3}$$

El Renio cuenta con un valor de 1,53 según el cálculo realizado en este tópico resultando correcta la propuesta si es que el valor tabulado también lo está. Este valor resume que el Renio se encuentra definido como un elemento metálico si se compara con el divisor de ambos grupos, Hidrogeno RE:3,55.

7.4.3. ELECTRONEGATIVIDAD DE MULLIKAN

Si bien a lo largo de este trabajo esta escala no es utilizada el añadir la electronegatividad de Mullikan es importante si se desea una continuación de futuros estudios relacionados con el tema debido a que, como se presenta en este tópico, es posible relacionar esta escala con la de Pauling y obtener valores de gran importancia. Inicialmente es necesario conocer que en esta escala se utilizan los conceptos de potenciales de ionización y de electroafinidades los cuales se definen a continuación:

Potencial de Ionización (PI) es la energía que se requiere para extraer del átomo el electrón más débilmente retenido por el núcleo. Para el caso polielectrónico se dispone de tantos valores de potenciales de ionización como número de electrones.

 $E + PI_1 \rightarrow E^+ + 1e^-$. En este proceso el ión E^+ y el electrón quedan separados a una distancia que tiende a infinito (completamente expulsado del átomo).

La electroafinidad (EA) corresponde al proceso.

$$E+1e^- \rightarrow E^- + EA$$
 (Proceso exotérmico)

 $E^- + 1e^- \rightarrow E^{-2}$ (Proceso endotérmico). por cuanto existe una repulsión electroestática entre el anión y el electrón de modo que el proceso de producirse significa un consumo de energía.

En los términos anteriores, Mullikan propone una escala de electronegatividades basadas en los valores de los primeros potenciales de ionización y de la electroafinidad, por medio de una relación del tipo:

$$\chi_{M} = \frac{1}{2} \left(|PI_{1}| + |EA| \right)$$

Esto se interpreta como la capacidad de un átomo de ceder y de capturar electrones. Las Escalas de Pauling y de Mullikan se relacionan entre sí, por medio de la expresión:

$$\chi_P = \frac{\chi_M}{2,78}$$

Esta expresión es de gran importancia, por cuanto nos permite estimar en forma aproximada los valores de las electroafinidades de los elementos (datos muy escasos desde un punto de vista experimental) a partir de los valores de los primeros potenciales de ionización.

7.4.4. RESUMEN DE ELECTRONEGATIVIDADES

En la escala de electronegatividad de Sanderson, ver apéndice I, Renio cuenta con un valor de 1,53 y en la escala de L. Pauling su electronegatividad es de 1,90. Es importante plasmar que significan estos valores, por lo que se requiere considerar que en este punto se produce una diferencia importante entre ambas escalas: en la escala de Pauling los elementos químicos con valores de electronegatividades menores que 2,1 (valor divisorio del Hidrógeno) se consideran metales y con valores superiores a 2,1 se hablan de no metales al igual que con la escala de Sanderson la cual cuenta con un valor para Hidrógeno de 3,55. La complejidad del tema ocurre en escala de Pauling para aquellos elementos químicos que cuentan con valores de electronegatividades cercanas a 2,1, los cuales bajo determinadas condiciones tienen comportamientos mixtos, es decir, se comportan como metales o no metales. Si se compara el valor para Renio en la escala de Sanderson (1,53) con Hidrógeno (3,55), éste aparece como un recurso netamente metálico lo que entrega una definición más clara del comportamiento de este metal (comportamiento metálico). Esto, en principio, suponiendo que las electronegatividades son independientes de los estados de oxidación (esto es en la escala de L. Pauling).

7.4.5. ESTADOS DE OXIDACIÓN

Los estados de oxidación conocidos en Renio tal como presenta Greenwood y Earnshaw (1997) son: -3,-1,0,1,2,3,4,5,6 y 7 en donde los más comunes, según el sistema periódico, son 2, 4, 6, 7, -1. De estos estados es posible inferir que en algunos compuestos Renio es electronegativo (estados de oxidación negativos; -1 y -3, captura electrones), sin embargo, en la mayoría de los casos es electropositivo (0,1,2,3,4,5,6 y 7, cede electrones).

Debido a la rara naturaleza del estado de oxidación (-3) en este metal, es necesario realizar un análisis más profundo sobre este estado. Es conocido que el Renio tiene un gran abanico de estados de oxidación en donde, en su mayoría, tiende a ceder electrones (Estados positivos), sin embargo, basados en la literatura publicada por Greenwood y Earnshaw (1997) es conocido que el Renio no sólo cuenta con un estado de oxidación electronegativo de -1, sino que también cuenta con un estado de oxidación en el cual el Renio tiene la capacidad de receptar tres electrones (Estado de oxidación -3) que se presenta en el compuesto "Tetracarbonilo de Renio" Re(CO)4-3", el cual es representado por la siguiente ilustración propuesta por el suscrito:

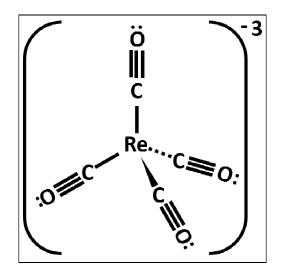


Ilustración 13: COMPUESTO DE RENIO-3

FUENTE: Elaboración propia

La ilustración 13 es una molécula propuesta por el suscrito basado en el cálculo de los enlaces para formar octetos y espacialmente inspirada en la figura conocida como "tetracarbonilo de Níquel" (Ni(CO)₄) la cual es una figura tetraédrica descrita por Greenwood y Earnshaw (1997). Con respecto a la geometría del compuesto de Renio con estado de oxidación (-3), debido a que el Renio comparte grupo con los elementos Manganeso y Tecnecio se conoce que tienen propiedades semejantes a estos siendo correcto señalar, en adición a la fuente que propone este compuesto, que el Renio cuenta con la misma geometría

del tipo Tetraédrica (T_d) al igual que estos elementos cuando cuentan con estado de oxidación (-3) siendo correcto el proponer una figura en base al tetracarbonilo de Níquel.

7.4.6. PROPIEDADES PERIÓDICAS ADICIONALES

Dentro de los comportamientos periódicos del Renio, los radios iónicos al encontrarse en un estado (+4), (+5), (+6) y (+7) son 0,63 Å, 0,58 Å, 0,55 Å y 0,53 Å respectivamente. Este elemento periódico cuenta con una estructura cristalina hexagonal compacta con constantes de red a: 0,2760 nm y b=c: 0,4458 nm. El Renio elemental posee setenta y cinco electrones y por esto cuenta con 75 potenciales de ionización en donde el primer valor de estos es de 760 kJ/mol, el segundo, tercero y el cuarto potencial es de 1260, 2510 y 3640 todos en unidades kJ/mol valores que entrega Periodic Table (2017).

7.5. OTROS CONCEPTOS IMPORTANTES

7.5.1. VOLUMENES ATÓMICOS Y MOLECULARES

El volumen atómico se puede obtener a partir de la relación:

$$V = \frac{M(PA)}{d}$$

Esto se traduce en que el volumen es el cociente entre la masa de un mol de átomos y la densidad (propiedad intensiva, es decir, su valor no depende de la cantidad de sustancia que se considere). En el caso de arreglos atómicos similares o iguales es posible, en una primera aproximación, sugerir que los volúmenes atómicos son directamente proporcionales a los cubos de los radios atómicos (en el supuesto grueso de considerar a los átomos como esferas de un radio atómico dado). En este caso y aceptando este supuesto es correcto escribir:

$$V \approx R^3 - - > \frac{V_1}{V_2} = \frac{R_1^3}{R_2^3}$$

Ya que se asume una esfera, y este volumen cuanto se tiene un radio r es conocido, la relación V_1/V_2 corresponde a una aproximación muy gruesa, sin embargo, puede ser aplicada a elementos químicos ordenados espacialmente en un mismo tipo de red cristalina. Debemos señalar que estamos considerando los radios metálicos de los elementos, es decir, el que presenta el átomo en el elemento libre (radio atómico) y no así en el caso de sistemas compuestos por dos o más átomos enlazados en enlaces covalentes puros (diferencia de electronegatividad nula) y covalentes polares (diferencia de electronegatividad distintas de cero).

Es correcto agregar que los volúmenes atómicos aumentan en cada grupo con el incremento del número atómico, a su vez, en un mismo período los volúmenes atómicos disminuyen desde los metales alcalinos (valor máximo) hasta los metales de transición, aumentando luego gradualmente hasta el gas noble correspondiente. En un grupo, el aumento de volumen es más marcado en los metales que en los no metales

Los elevados volúmenes atómicos de los metales alcalinos explican su baja densidad, bajo de fusión y escaza dureza (metales blandos). En cambio, los metales del grupo I-B (Cu, Ag, Au), entre los cuales es correcto agregar el Renio (grupo VII-B) junto a otros metales de transición, presentan volúmenes atómicos más pequeños por ende son más densos, con mayores puntos de fusión y más duros que los metales alcalinos.

7.5.2. RELACIONES DE TAMAÑO

En el transcurso del escrito se mencionan algunos arreglos cristalinos que dicen relación con el cómo dos estructuras cristalinas completamente diferentes, como el caso de Azufre y Renio para formar ReS₂, se unen para formar este

compuesto con una nueva estructura. Profundizando en el lenguaje y el qué es cada una de estas a continuación se presenta una tabla resumen la cual entrega información sobre la coordinación de los elementos según su tamaño en distintos arreglos:

NC	DE	$R_1/R_2 = x = r_C/r_A$	NC: Número de coordinación DE: disposición espacial
8	ccc	> 0,73	x: Relación de radios
6	O_{h}	0,414 < x < 0,73	ccc: cúbica centrada en las caras
4	$D_{4h}^{''}$	0,414 < x < 0,73	O_h : disposición espacial octaédrica
4	T_d	0,225 < x < 0,414	$D_{\scriptscriptstyle 4h}$: cuadrado plano
¬	_	•	T_{d} : disposición tetraédrica
3	D_{3h}	0,15 < x < 0,225	
2	$D_{\scriptscriptstyle \! \infty h}, C_{\scriptscriptstyle \! \infty v}$	< 0,15	D_{3h} : disposición triangular en el plano

Tabla 11: NÚMEROS DE COORDINACIÓN FUENTE: Elaboración propia

Los valores presentados en la tabla 11 son todos obtenidos de cálculos teóricos, a modo ilustrativo se considera el caso de un cuadrado plano que obedece a la notación de grupo puntual D_{4h}, molécula del tipo AB₄, donde A el átomo central y los cuatro ligandos B en los vértices del cuadrado plano.

Si
$$R_1 = R_{AB}$$
 y $R_2 = R_{BB}$, $R_1 = r_C + r_A$ y $R_2 = 2r_A$

Se cumple que:

$$z = 2R_1 --> z^2 = 2R_2^2 = (2R_1)^2 --> 2R_1 = R_2\sqrt{2} --> \frac{R_1}{R_2} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Reemplazado R₁ y R₂ en la ecuación resultante se obtiene que:

$$r_{C}/r_{A} = \sqrt{2} - 1 \approx 0,414$$

obteniendo así el resultado tabulado anteriormente. Cabe destacar que la notación actual: r_c es el radio del catión (A) y r_a es el radio del anión (B)).

8. COMPUESTOS EN LOS CUALES PARTICIPA RENIO

8.1. COMPUESTOS DE RENIO

El Renio participa en una gran variedad de compuestos³ ya sean simples o complejos debido al gran abanico de estados de oxidación con lo que cuenta este elemento, algunos de los cuales resumen en la siguiente tabla:

Compuesto	Formula	Compuesto	Formula
Rhenium(I) oxide	Re ₂ O	Rhenium(VII) sulfide	Re ₂ S ₇
Rhenium(I) iodide	Rel	Rhenium(VII) oxide	Re ₂ O ₇
Rhenium(II) oxide	ReO	Rhenium (VII) oxide	Re ₂ O ₇
Rhenium(II) iodide	Rel ₂	Rhenium trioxybromide	ReO₃Br
Rhenium(III) bromide	ReBr ₃	Rhenium diboride	ReB ₂
Rhenium(III) chloride	ReCl₃	Rhenium dioxitrifluoride	ReO ₂ F ₃
Rhenium(III) lodide	Rel ₃	Rhenium pentacarbonyl	Re ₂ (CO) ₁₀
Rhenium(III) oxide	Re ₂ O ₃	Rhenium dioxyfluoride	ReO ₂ F ₂
Rhenium(VI) oxide	ReO ₂	Rhenium oxytrifluoride	ReOF ₃
Rhenium(IV) sulfide	ReS ₂	Rhenium heptaselenide	Re ₂ Se ₇
Rhenium(IV) chloride	ReCl ₄	Rhenium trioxyfluoride	ReO₃F
Rhenium(IV) bromide	ReBr ₄	Rhenium Hexachloride	ReCl ₆
Rhenium(IV) iodide	Rel ₄	Rhenium dioxydibromide	ReO ₂ Br ₂
Rhenium(IV) selenide	ReSe ₂	Rhenium dioxydifluoride	ReO ₂ F ₂
Rhenium(IV) fluoride	ReF ₄	Rhenium heptafluoride	ReF ₇
Rhenium(IV) telluride	ReTe ₂	Rhenium trioxide	ReO ₃
Rhenium(V) oxide	Re ₂ O ₅	Rhenium oxytetrafluoride	ReOF ₄
Rhenium(V) chloride	ReCl₅	Rhenium ReOC	
	0.		
Rhenium(VI) fluoride	ReF ₆	Rhenium trioxychloride	ReO ₃ Cl
Perrhenate (anion)	ReO ₄		
Hydrated rhenium(VII)	oxide	Re2O7(OH2)2	
(Perrhenic Acid)			

Tabla 12: COMPUESTOS DE RENIO FUENTE: Elaboración Propia

³ La tabla conserva los nombres de los compuestos en inglés ya que no todos los compuestos cuentan con traducción al español. Tabla realizada con el aporte de diversas fuentes: Greenwood y Earnshaw (1997), Rhenium Wikipedia (2018).

Es importante destacar los grupos que se forman según el elemento que acompaña al Renio en su composición, si bien este metal cuenta con compuestos simples como Cloruros, Fluoruros o Sulfuros entre los complejos se destacan los compuestos Organorenio los cuales describen compuestos con enlaces Renio-Carbono tales como Re₂(CO)₁₀, Re(CO)₅Br entre otros compuestos los cuales son tratados de manera profunda por la literatura existente (Kemmit y Peacock, 1975). Con el fin de tener un entendimiento mayor sobre estos compuestos y el cómo se comportan según la información existente, la tabla 13 entrega una aproximación de las propiedades que tiene el Renio cuando se encuentra en un compuesto con otro elemento:

Compuestos de Renio y Cloro									
Nombre	Tricloruro de Renio			Hexacloruro de Renio					
Fórmula	(ReCl ₃) ₃	ReCl ₄	ReCl₅	ReCl ₆					
Estado de oxidación de Re	[+3]	[+4]	[+5]	[+6]					
Solubilidad: En agua fría			Se descompone	Soluble; se descompone					
Solubilidad: En agua caliente	Soluble	Soluble; se descompone	Se descompone	Soluble; se descompone					
Estructura molecular	CI Re	Cl	CI CI CI CI	CI CI CI CI CI CI CI					
También soluble en:	Ácidos y Bases	HCI	HCl y Bases	HCI					
CII.	Dases								

Tabla 13: COMPUESTOS RENIO-CLORO

FUENTE: Variadas fuentes

Las estructuras moleculares presentadas en la tabla 13 y 14 han sido redibujadas por el autor del trabajo en base a la información de manera digital existente sobre el tema: ChemSrc (2018), Wikipedia (2019). La información sobre solubilidad tabulada en las tablas 13 y 14 proviene de Leddicotte (1961) en su publicación "The radiochemistry of Rhenium".

Compuestos de Renio y Flúor Azufre									
Nombre	Tetrafluoruro de Renio	Hexafluoruro de Renio	Disulfuro de Renio	Heptasulfuro de DiRenio					
Fórmula	ReF ₄	ReF ₆	ReS ₂	Re ₂ S ₇					
Estado de oxidación del Renio	[+4]	[+6]	[+2]	[+7]					
Solubilidad: En agua fría	Se descompone	Soluble; se descompone	Insoluble	Insoluble					
Solubilidad: En agua caliente	Se descompone	Soluble; se descompone	Insoluble	Insoluble					
Estructura molecular	F Re F F	F F Re F	S — Re — S	S S H H Re Re S S S					
También soluble en:	40% HF	-	HNO ₃	HNO3, Alcohol, H ₂ O ₂					

Tabla 14: COMPUESTOS RENIO-FLUOR | AZUFRE FUENTE: Variadas fuentes

Las tablas 13 y 14 amplían el conocimiento que se tiene de los compuestos en los que participa el Renio resumiendo en estas su estructura molecular, su solubilidad en distintas condiciones de temperatura (la fuente no especifica las temperaturas exactas) y su solubilidad con agentes adicionales, sin embargo, los compuestos tabulados no son los más comunes. Para comprender la producción de Renio metálico es necesario conocer el principal compuesto de Renio, el cual forma en conjunto con Oxígeno generando así Heptaóxido de Renio. A modo complementario en el anexo IV se añaden la formación de otros óxidos de Renio.

8.2. HEPTAÓXIDO DE RENIO (Re₂O₇)

Es correcto agregar que el Heptaóxido de Renio, tal como comparte Sims y Wyler (1952) e inspirado en su publicación, es el óxido más común de los compuestos Oxígeno-Renio. Su formación se presenta en las ecuaciones siguientes que resumen dos rutas de obtención de este óxido las cuales son: (a) Formación de Heptaóxido al encontrarse expuesto el metal con el aire, así como también es posible su formación al calentar este metal. (b) Alternativamente es posible obtener este compuesto mediante la oxidación de óxidos menores.

$$4Re + 7O_2 \rightarrow 2Re_2O_7$$
 (a)
 $4ReO_2 + 3O_2 \rightarrow 2Re_2O_7$ (b)

8.2.1. PROPIEDADES DE LOS ÓXIDOS COMUNES DE RENIO

Para formar el compuesto inicial desde donde se obtiene el Renio, formación de Heptaóxido de Renio, es necesario comprender las propiedades de este. Por lo que para formar el principal producto que se vende al mercado de Renio, como metal en polvo o como briquetas, es clave conocer la solubilidad del Heptaóxido de Renio debido a que gracias a esta característica se comienza con la cadena productiva del metal tal como se explica en capítulos anteriores. Para concluir con el análisis de los compuestos Oxígeno-Renio se resumen las propiedades de los óxidos comunes de Renio en la siguiente tabla, tabla 15, en conjunto con algunas de sus características fisicoquímicas:

Sobre las fuentes que componen la tabla 15, ésta ha sido construida casi en su totalidad por datos tabulados en CRC Handbook of Chemistry (2005) obteniendo desde esta fuente: la masa molar, color, densidad, estructura cristalina, temperaturas de fusión y ebullición. Sobre las estructuras moleculares estas han sido redibujadas según las figuras obtenidas desde National Center for

Biotechnology Information (2018). La estructura cristalina ortorrómbica del Heptaóxido de Renio proviene desde el sitio web The materials Proyect (2018).

ÓXIDOS COMUNES DE RENIO							
Nombre	Heptaóxido de Renio	Trióxido de Renio	Dióxido de Renio				
Formula molecular	Re ₂ O ₇	ReO₃	ReO ₂				
Densidad (g/cm³)	6,1	6,9	11,4				
Estructura Molecular	O O O O O O Re		O == Re == O				
Estructura cristalina	Ortorrómbico	Cúbica	Ortorrómbico				
Estado a 20°C	Sólido	Sólido	Sólido				
Masa molar (g/mol)	484,410	234,205	218,206				
Temperatura de fusión (°C)	297	400 (descomposición)	900 (descomposición)				
Temperatura de ebullición (°C)	360	-	-				
Color	Amarillo	Rojo oscuro	Gris				
Solubilidad: En agua fría	Muy soluble	Insoluble	Insoluble				
Solubilidad: En agua caliente	Muy soluble	Insoluble	Insoluble				
También soluble en:	Muy soluble en alcohol, ácidos y bases	Bases, HNO ₃ y H ₂ O ₂	HNO ₃ y H ₂ O ₂				

Tabla 15: ÓXIDOS DE RENIO

FUENTE: Variadas fuentes

9. CONCLUSIONES

En esta memoria se ha seleccionado el elemento periódico Renio, metal presente en Chile, y su elección se fundamenta en que este metal presenta excelentes propiedades, en donde principalmente destaca el ser capaz de soportar altísimas temperaturas entre otras características que se resumen en los capítulos tratados y anexos. Inicialmente, se han propuesto una serie de hipótesis que en el desarrollo del escrito se abordan.

Sobre la producción y uso de este metal, nuestro país es el principal productor y es el que cuenta con la mayor cantidad de reservas siendo el metal utilizado principalmente en motores de la industria aeronáutica. Chile es un importante productor debido a dos factores: la gran cantidad de procesamiento con la que cuenta Molymet y la gran minería del Cobre de Chile que produce concentrado de Molibdeno en Chile, como producto subordinado de la industria del Cobre, lo que permite su producción en importantes cantidades a nivel mundial.

Las publicaciones utilizadas de referencia requieren de propuestas para unificar el contenido y dar un orden lógico y entendible al lector, esto debido al hermetismo que existe en la industria como a que nuestro país centra sus objetivos en el conocimiento del Cobre y no en otras materias primas por lo que las publicaciones sobre el tema en cuestión son escasas e incompletas. Este motivo conlleva a que tópicos puntuales tales como Geología, Planta, Compuestos, entre otros, requieran de la formulación de propuestas que no necesariamente deben ser consideradas ciertas pero que se basan en el conocimiento que se tiene al respecto del tema, entregando una visión más completa de todo lo relacionado al Renio sin alejarse de la realidad.

Sobre la existencia de nuevas escalas de electronegatividades que expresen el comportamiento del Renio, la escala de Sanderson es una de las herramientas más poderosas para intentar comprender que el Renio cuenta con un comportamiento netamente metálico en casi todas las ocasiones, sin embargo, esta escala presenta limitaciones debido a la cantidad de información existente.

Esta última observación presenta nuevas oportunidades para continuar con el desarrollo del trabajo no solo en el Renio, sino que también en los elementos que se ven afectados por la contracción de los lantánidos.

Con relación al objetivo relacionado con la fuente principal de este metal, debido al intercambio iónico existente entre Molibdeno y Renio y a lo escaso que resulta ser este metal, se sabe que Chile es el país que cuenta con la mayor cantidad de reservas a nivel mundial. La investigación realizada en el transcurso de este estudio indica que para conocer en detalle el porqué el Renio suele encontrarse asociado a un pórfido cuprífero en cantidades mayores que a un pórfido de Molibdeno requiere efectivamente de una investigación de mayor alcance.

Sobre la cadena de producción es evidente que la fuente citada cuenta con información limitada en su estudio publicado, así como también presenta inconsistencias en la ilustración del proceso. Es por este motivo que la propuesta de la planta requiere de una verificación empírica si es que se desea una buena comprensión de esta, lo que conlleva a que se proponga un nuevo diseño, en la ilustración del proceso, basado en el proceso productivo real tal como comparte COCHILCO (2016).

Los ejemplos presentados según el uso de este metal expresan el uso de estos en el área aeronáutica principalmente. Sobre los compuestos que conforma el Renio resulta interesante el destacar que se presentan compuestos poco conocidos como los organorenio, los cuales representan los compuestos Renio-Carbono así como también el destacar el tetracarbonilo de Renio en donde el metal en estudio presenta el raro estado de oxidación (-3). El estudio de alguno de los compuestos ha permitido la compresión, en parte, de la planta de procesamiento debido a que el recuperar el Renio comienza desde la oxidación de este al generar Heptaóxido de Renio el cual debido a sus propiedades estudiadas es altamente soluble y fácil de precipitar, corroborando así los tópicos presentados inicialmente.

Sobre la ocurrencia de la Reniíta, la propuesta de formación se encuentra en base a la afinidad que se le adjudica en la fase gaseosa a este mineral. En esta fase se propone que el transporte de Renio es mediante el estado gaseoso y líquido, luego de la condensación del gas, para posteriormente depositarse y realizar el intercambio iónico interactuando ambos elementos directamente en la fase gaseosa o en la fase condesada (liquida). Se recomienda que para corroborar esta propuesta se requiere del estudio de diagramas fase de Renio-Azufre-Molibdeno y elementos adicionales necesarios para la formación.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Améstica, L. Quijada R. Villaseca, D. (2010). Molibdeno: Propiedades, aplicaciones Mercado. Recuperado de http://www.molymet.cl/en/Innovacion/Reportes%20de%20Innovacin/Publi cacion%20 Comotech.pdf
- Amezcua, M. Avendaño, D. Martínez, G. García, L. (s.f.) Radioisotopía. Recuperado de http://usuarios.geofisica.unam.mx/cecilia/CT-SeEs/DatRadioisitopica13-2.pdf
- Angellini, B. Rosales, A. Schalamuck, I. (1971). Geoquímica del Renio. Un ensayo a molibdenitas argentinas. Revista de la asociación geológica Argentina. 26(2), 154. Recuperado de https://books.google.cl/books?id=YhtV7eACODMC&pg=PA154&lpg=PA154&dq=radio+ionico+renio&source=bl&ots=jjXMpW7mo4&sig=n3v5r1F2rHOmCQRop915hNHnSGE&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjvnfbS4czbAhVGF5AKHWJXBQkQ6AEwCnoFCAEQiwE#v=onepage&q=radio%20ionico%20renio&f=false
- Armed services technical information agency. (1952). Investigation of Rhenium I. A survey of the literature. Recuperado de https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/001698.pdf
- BBC. (2015). El metal que hizo posible los vuelos baratos. Recuperado el día 30 de julio de 2018, de https://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/05/150521_ciencia_niquel_me tal_barato_vuelos_avion_lv
- Calvillo, J. (2017). Estudio de mercado y análisis de prefactibilidad técnica de una planta de Renio. (Memoria para optar al título de Ingeniero civil industrial, Universidad san Sebastián, Santiago de Chile). Recuperado de http://repositorio.uss.cl/
- ChemSrc. (2018). rhenium IV fluoride. Recuperado el día 30 de Julio de 2018 de, https://www.chemsrc.com/en/cas/15192-42-4_1176052.html
- Chirif, H. Acosta, J. (2013). Modelo de yacimientos y metalogenia del Perú. Recuperado de http://www.proexplo.com.pe/2013/programa/cursos_cortos/Yacimientos% 20y%20Metalogenia/EVOLUCION%20GEOLOGICA%20PERU.pdf
- COCHILCO. (2016). Mercado del renio y su producción en Chile. Recuperado de

- https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Informe%20mercado%20Renio.pdf
- Cusicanqui, H. Paredes, E. (1960). Determinación de Renio en molibdenita.

 Recuperado de

 https://revistas.uchile.cl/index.php/AFCFM/article/download/36943/38696/
- Dekker, M. (1980). Petroleum Refining. Technology and economics. Recuperado de https://books.google.cl/
- Dong, H. (2007). Fig 8. Nickel-base superalloy turbine blades solidified as (a) equiaxed grains, (b) columnar grains, (c) a single crystal, (d) an enlarged view of the single crystal blade showing detailed dendritic structure calculated using CAFD solidification software (12) Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/44261273_Analysis_of_Grain_Selection_during_Directional_Solidification_of_Gas_Turbine_Blades
- D´Annunzio, M. (2016). Caracterización metalogenética y controles de la mineralización de Au diseminado en brechas del distrito minero Gualcamayo, Precordillera Central, provincia de San Juan. (Tesis de Doctor en geología, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca). Recuperado de https://drive.google.com/file/d/1YthFC77TsAotIV4QX-nwvQLQQZAFmbml/view
- Freydier, C., Ruiz, J., Chesley, J., McCandless, T. y Munizaga, F. 1997. Re-Os isotope of sulfides from felsic igneous rocks: application to base metal porphyry mineralization in Chile. Recuperado de https://arizona.pure.elsevier.com/en/publications/re-os-isotopesystematics-of-sulfides-from-felsic-igneous-rocks-a
- Garfinkle, M. Witzke, W. Klopp, W. (1968). Superplasticity in Tungsten Rhenium alloys. Recuperado de https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19680021133.pdf
- Gordon, H. (2011). Relative Abundance of rare earth. [Imagen] Recuperado de https://www.sigmaaldrich.com/technical-documents/articles/materials-science/rare-earth-crisis.html
- Greenwood, N. Earnshaw, A. (1997). Chemiestry of the elements. https://books.google.cl/books/about/Chemistry_of_the_Elements_2nd_Ed ition.html?id=vFu9BQAAQBAJ&redir_esc=y
- Hackett, J. (2016). Escasez elemental: la mayoría de los metales de los que depende la tecnología moderna carecen de sustitutos. Investigación y

- ciencia. Recuperado https://www.investigacionyciencia.es/files/23635.pdf
- Hyun, K. Jong, P. Sang, S. Tam, T. Myong, K. (2015). Recovery of rhenium from molybdenite roaster fume as high purity ammonium perrhenate. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Sangyun_Seo2/publication/2787427 43_Recovery_of_rhenium_from_a_molybdenite_roaster_fume_as_high_p urity_ammonium_perrhenate/links/5bdab70792851c6b279dde66/Recover y-of-rhenium-from-a-molybdenite-roaster-fume-as-high-purity-ammonium-perrhenate.pdf
- John, D. Seal II, R. Polyak, D. (2017). Figure P2. Pie chart showing major end uses of primary rhenium as a percentage of world consumption in 2012. Total world production for the year was between 50 and 54 metric tons. Approximately 83 percent of the rhenium from primary sources was used to make superalloys, mainly for the aerospace industry. [Imagen]. Recuperado de https://pubs.usgs.gov/pp/1802/p/pp1802p.pdf
- John, D. Seal II, R. Polyak, D. (2017). Rhenium. Recuperado de https://pubs.usgs.gov/pp/1802/p/pp1802p.pdf
- Joint Stock Company Isotope. (2016). Rhenium-188 (W-188/Re-188) Recuperado el día 11, de Junio del 2018 de http://www.isotop.ru/en/production/medical/427/447/
- Jones, M. (2012). F100 engine Pratt and Whitney cutaway drawing. [Imagen]. Recuperado de https://www.flickr.com/photos/multiplyleadership/6838743675
- Kemmitt, R. Peacock, R. (1975). The Chemistry of Magnese, Technetium and Rhenium.

 Recuperado

 de https://books.google.cl/books?id=79U_DQAAQBAJ&pg=PA983&lpg=PA983&dq=kemmitt+teacock+rhenium&source=bl&ots=XFfV45-iGl&sig=b6OHxooMP-fu-SFshWUenJjMR1A&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwiK6JTx1OnfAhUBIZAKHaz3A0MQ6AEwDHoECAcQAQ#v=onepage&q&f=false
- Kirk-Othmer. (1996). Encyclopedia of Chemical Technology (4th edition). Recuperado de https://es.scribd.com/document/347834426/Encyclopedia-of-Chemical-Technology-Vol-21
- Knight, L. (2015). El metal que hizo posible los vuelos baratos. Recuperado el día 30 de julio de 2018, de

de

- https://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/05/150521_ciencia_niquel_me tal_barato_vuelos_avion_lv
- Korzhinsky, M. Tchenko, S. Smulovich, K. Taran, Y. Steinberg, G. (1994) Discovery of a pure rhenium mineral at Kudryavy volcano. Nature. [369], 51-52. Recuperado de https://doi.org/10.1038/369051a0
- Lassner, E. Schuber, Wolf-Dieter. (1999). Tungsten Properties, Chemistry, Technology of the elements, Alloys, And Chemical compounds. Recuperado de https://books.google.cl/books?id=foLRISkt9gcC&pg=PA256&redir_esc=y #v=onepage&q&f=false
- Leddicotte, G. (1961). The Radiochemistry of Rhenium. Recuperado de https://books.google.cl/books?id=DZYrAAAAYAAJ&pg=PA5&dq=rhenium &hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwik1-fP
 ODcAhXOPpAKHdC7DlsQ6AEIOzAD#v=snippet&q=hot&f=false
- Live, D. (2005). CRC Handbook of chemistry and physics. Recuperado de http://diyhpl.us/~nmz787/mems/unorganized/CRC%20Handbook%20of% 20Chemistry%20and%20Physics%2085th%20edition.pdf
- Lu, M. Xu, Y. Song, Y. (2017). Top views of (a), and (b) ReS₂ monolayers respectively. (c) side view of de MoS₂|ReS₂ vdW heterostructure. The interlayer distance (d) changes along the c-axis. [Imagen]. Recuperado de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402617307696
- Mario Ceroni-Galloso. (2005). Efectos relativistas aplicados a la química.

 Recuperado de http://www.scielo.org.pe/pdf/rsqp/v71n1/a07v71n1.pdf
- McCandless, T. Ruiz, J. Campbell, A. (1992). Rhenium behavior in molybdenite in hypogene and near-surface environments Implications for Re-Os geochronometry. Recuperado de https://drive.google.com/file/d/1Vo31YqoqY-ioUGOeWrcsP44xwCyKra6U/view
- McCandless, T. Ruiz, J., Campbell, A. (1993). Rhenium behavior in molybdenite in hypogene and near- suface environments: implications for Re- Os geochronometry. Recuperado de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/001670379390176W
- Mindat. (2005). Rheniite. Recuperado el 6 de julio del 2017, de https://www.mindat.org/

- Moeller, T. (1994). Química Inorgánica. Recuperado de https://es.scribd.com/document/150713767/Quimica-InorganicaT-MOLLER
- Molibdenos y metales S.A. (2017). Resultados al primer trimestre del 2017. Recuperado de http://www.molymet.cl/
- Morales, B. Meruane, C. (1964). Problemas y ejercicios de químicainorgánica.

 Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/325536603_PROBLEMAS_Y_E JERCICIOS_DE_QUIMICA_INORGANICA
- Molymet S.A. (2918). Industria Metálica/ superaleaciones. Recuperado de http://www.molymet.cl/es/Productos/Paginas/Metallic-Superalloys-Industries.aspx
- MSP-REFRAM. (Marzo, 2017). Rhenium production. Trabajo presentado en la conferencia de MSP-REFRAM de Bruselas. Recuperado de http://prometia.eu/wp-content/uploads/2017/03/8_MSP-REFRAM-Rhenium-production-SotA_W.-Kurylak.pdf
- MSP-REFRAM. (Marzo, 2017). Rhenium production. Trabajo presentado en la conferencia de MSP-REFRAM de Bruselas. Recuperado de http://prometia.eu/wp-content/uploads/2017/03/8_MSP-REFRAM-Rhenium-production-SotA_W.-Kurylak.pdf
- MSP-REFRAM. (S.F). RHENIUM. Recuperado de http://prometia.eu/wp-content/uploads/2014/02/RHENIUM.pdf
- Naor, A. Noam, E. Gileadi, E. Taylor, R. (2012). Properties and applications of Rhenium and its alloys. Recuperado de http://www.afs.enea.it
- Naor, A. Noam, E. Gileadi, E. Taylor, R. (2012). Properties and applications of Rhenium and its alloys. Recuperado de http://www.afs.enea.it
- Nature. (2014). Different crystal structure and band structure of ReS₂ from conventional sTMDs. [Imagen]. Recuperado de https://www.nature.com/articles/ncomms4252
- Nishio-Hamane, D. (2015). Rheniite2. [Imagen]. Recuperado de https://www.flickr.com/photos/dnishiohamane/23062358576/in/photolist-ayYZR5-B8WBJ1
- Pérez, J. (s.f.). Orbitales atómicos 1927. [Imagen]. Recuperado de https://infogram.com/atomo-1gv02gxeg3llp1x

- Periodic Table. (2017). Ionization Energies of the elements. Recuperado el día 10 de Diciembre del 2018 de http://periodictable.com/Properties/A/IonizationEnergies.al.html
- Polyak, D. (2010). Minerals Yearbook Rhenium. Recuperado de https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rhenium/myb1-2008-rheni.pdf
- PROMETIA (2018). Information on Rhenium Production/Demand from recycling source. Recuperado el Día 11 de Diciembre de 2018 de http://prometia.eu/dss/
- Rhenium Alloys. (2018). Molybdenum-Rhenium (MoRe). Recuperado el día 5 de junio de 2018, de http://rhenium.com/molybdenum-rhenium.html
- Rhenium Alloys. (2018). Tungsten-Rhenium (WRe). Recuperado el día 5 de junio de 2018, de http://rhenium.com/tungsten-rhenium.html
- Roger C. Reed. (2006). The superalloys fundamentals and Applications.

 Recuperado de https://scholar.google.cl/scholar?q=The+superalloys+fundamentals+and+
 Applications&hl=es&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholart
- Royal Society of Chemistry. (2017). Periodic Table: Rhenium. Recuperado el día 31, mayo de 2018 de http://www.rsc.org/periodic-table/element/75/rhenium
- Salkhova, E. Majidzade, V. Novruzova, F. Kalantarova, P. Huseynova, R. (2012). The electrodeposition of Rhenium in Alkaline and Acidic Elektrolytes. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/303074163_The_Electrodeposition_of_Rhenium_in_Alkali_ne_and_Acidic_Electro_lytes
- Sims, C. Wyler, E. (1952). Investigations of rhenium I. a survey of the literature. Recuperado de https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/001698.pdf
- Sociedad nacional de minería. (2018). Mapa Minero. Recuperado de http://www.sonami.cl/site/mapaminero/#close
- Sourmail, T. (2003). Coating for turbine blades. [Blog] Recuperado de http://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2003/Superalloys/coatings/index.html
- Suzuki, K., Feely, M. and O'Reilly, C. (2000) Disturbance of the Re-Os chronometer of molybdenites from the late-Caledonian Galway Granite, Ireland, by hydrothermal fluid circulation. Recuperado de

- https://www.researchgate.net/publication/238665927_Disturbance_of_the _Re-Os_chronometer_of_molybdenites_from_the_late-Caledonian_Galway_Granite_Ireland_by_hydrothermal_fluid_circulation
- Suzuki, K., Kagi, H., Nara, M., Takano, B. and Nozaki, Y. (2000) Experimental alteration of molybdenite: of the Re-Os system, infrared spectroscopic profile and polytype. Recuperado de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016703799002914
- Tassano, M. (2014). Desarrollo, caracterización y estudio de nanosistemas dendriméricos como posibles radiofármacos para el tratamiento de cáncer. (Tesis de maestría en ciencias biológicas). Universidad de la Republica. Uruguay.
- The materials Proyect. (2018). Re₂O₇. Recuperado de https://materialsproject.org/materials/mp-1016092/
- U.S. Geological Survey. (2006-2018). Rhenium mineral yearbook. Recuperado de https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rhenium/
- U.S. Geological Survey. (2009). Minerals commodity summaries 2009. Recuperado de https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2009/mcs2009.pdf
- U.S. Geological Survey. (2013). Metals price in the United States through2010.

 Recuperado de https://pubs.usgs.gov/sir/2012/5188/sir2012-5188.pdf
- U.S. Geological Survey. (2018). Rhenium mineral commodity summaries. Recuperado de https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rhenium/mcs-2018-rheni.pdf
- Universidad Autónoma de Madrid. (2017). Tipos de Termopares. Recuperado el día 9 de Julio de 2018, de https://www.uam.es/docencia/labvfmat/labvfmat/Anexo/termopar2.htm
- Vargas, A. (2014). Producción electrometalúrgica de óxidos de Renio. (Tesis para optar al grado de doctor en ciencias de la ingeniería, mención ciencia de los materiales, Universidad de Chile, Santiago). Recuperado de repositorio.uch.cl
- Vivallo, W. Henríquez, F. (1998). Génesis común de los yacimientos estratoligados y vetiformes de Cobre del Jurásico Medio a Superior en la

- Cordillera de la Costa, Región de Antofagasta, Chile. Revista geológica de Chile. 25(2). (-)
- Voudouris, P. Melfos, V. Spry, P. Bindi, L. Moritz, R. Ortelli, M. Kartal, T. (2013). Photomicrographs of molybdenite and Rheniite-bearing assemblages in quartz veins from the northeastern Greek prospects. [Imagen]. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/259799446_Extremely_Re-Rich_Molybdenite_from_Porphyry_Cu-Mo-Au_Prospects_in_Northeastern_Greece_Mode_of_Occurrence_Causes_of_Enrichment_and_Implications_for_Gold_Exploration
- Wikipedia. (2018). Metal refractario. Recuperado el 16 de Diciembre del 2018 de https://es.wikipedia.org/wiki/Metal_refractario
- Wikipedia. (2018). Rhenium. Recuperado el 16 de Diciembre del 2018 de https://en.wikipedia.org/wiki/Rhenium
- Winter, M. (2018). Rhenium: Isotope data. Recuperado el día 6, Junio de 2018 de https://www.webelements.com/rhenium/isotopes.html
- Znamensky, V. Korzhinsky, M. Steinberg, G. Tkachenko, S. Yakushev, A. Laputina, I. Bryzgalov, I. Samotoin, N. Magazina, L. Kuzmina, O. Organoca, N. Rassulov, V. Chaplygin, I. (2005). Rhomb-shaped lamellar crystal of reniite on a druse segregation of its smaller crystals. [Imagen]. Recuperado de http://rruff.info/rruff_1.0/uploads/ZRMO134N5_32.pdf

ANEXO I

PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

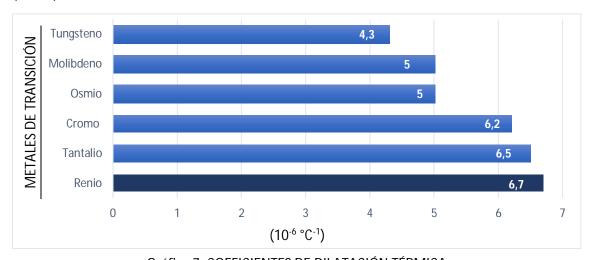
Con relación a sus características físicas y químicas, el Renio es un metal color plateado que cuenta con propiedades especiales que lo posicionan como un metal útil en aleaciones que requieran de gran resistencia a altas temperaturas esto debido a propiedades como su alto punto de fusión, alto punto de ebullición (calculado), buen coeficiente de expansión térmica, entre otras propiedades que se resumen en la siguiente tabla:

Propiedad del elemento	Valor	Unidad Otros
Temperatura de fusión	3180	(°C)
Temperatura de ebullición	5926	(°C)
Constante de Red (a)	0,2760	nm
Constante de Red (c)	0,4458	nm
Resistividad eléctrica (20°C)	19,3	μ*(Ω*cm)
Conductividad Térmica (0-100) °C	0,400	W/(cm*K)
Módulo de Elasticidad	0,46	Pa.
Calor especifico 20°C	25,1	J/(mol*K)
Estructura cristalina	Hexagonal Compacta	
Dureza Mohs	7	

Tabla 16: PROPIEDADES FÍSICO QUÍMICAS DEL RENIO FUENTE: Kirk-Othmer (p. 165)

Otra característica destacable de este metal es que es uno de los pocos metales refractarios los cuales comúnmente son cinco elementos si no se extiende esta definición, según comparte Wikipedia (2018), siendo los elementos restantes el Niobio, Molibdeno, Tantalio y Tungsteno. Esto se traduce en que el Renio es un metal que junto con tener una alta resistencia al calor cuenta también con una alta resistencia al desgaste siendo esta característica lo que conlleva a que el

Renio sea utilizado principalmente en pulvimetalurgia (metalurgia de polvos) con el objetivo de añadir sus excelentes propiedades en aleaciones con otros metales tal cómo se detalla en el trabajo de título. Otra característica relevante es su buen coeficiente de expansión térmica (valor bajo) en donde solo es superado por cinco elementos entre ellos el Molibdeno, su principal fuente de procedencia, ver gráfica 7, lo que lo convierte en un metal útil para aplicaciones en donde se requiera cambios de temperatura tal como indica Améstica, Quijada y Villaseca (2010):



Gráfica 7: COEFICIENTES DE DILATACIÓN TÉRMICA FUENTE: Molibdeno: Propiedades aplicaciones mercado (p. 4)

ANEXO II

ABUNDANCIA EN LA CORTEZA TERRESTRE

Una característica que se escapa del ámbito fisicoquímico pero que tiene un alto impacto en su valor en el mercado es lo escaso que resulta ser el Renio en la corteza terrestre, en comparación al resto de los elementos, donde generalmente su concentración en ésta es cercana a un 0,000188 parte por millón según comparte el Royal Society of Chemistry (2018), posicionando al Renio como el septuagésimo noveno (79°) elemento en la escala de contenido en la corteza terrestre posicionado por debajo de metales preciosos como Oro o Platino lo cual queda representado de mejor manera en la siguiente ilustración (Traducida):

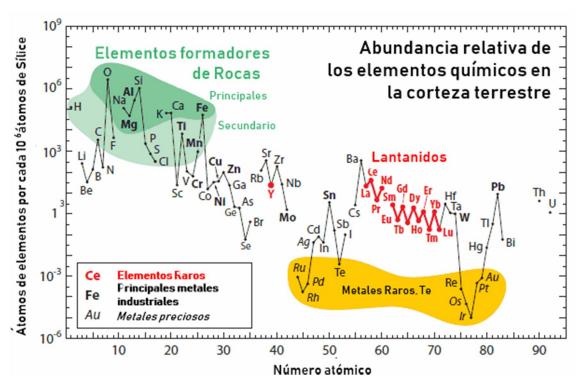


Ilustración 14: ÁTOMOS POR ELEMENTO POR CADA 106 Át. DE SÍLICE FUENTE: Gordon (s.f.) citado por SIGMA-ALDRICH (2011)

La ilustración 14 compartida por Gordon (s.f.) muestra los elementos periódicos que son posibles de encontrar de manera natural en la corteza terrestre ordenados según su número atómico en el eje de las abscisas y su abundancia en relación con 10⁶ átomos de sílice en el eje de las ordenadas. Es necesario destacar que en la ilustración 14 se exceptúan los gases nobles, los elementos Tecnecio (43), Telurio (52), Prometio (61) y todos los elementos sucesores al Bismuto (83) excepto Torio (90) y Uranio (92). Es conocido que el Renio es un metal de bajo contenido promedio en la corteza el cual, particularmente, se encuentra mayormente concentrado en tres países, Estados Unidos, Canadá y Chile, los cuales cuentan con aproximadamente el 80% del total mundial, traducido en aproximadamente 8500 toneladas de Renio como muestra la tabla 4.

ANEXO III

ISÓTOPOS DE RENIO

El Renio cuenta con una gran cantidad de isótopos mayormente radioactivos e inestables y de manera natural cuenta con dos isotopos (185 Re y 187 Re). El primero isótopo, 185 Re, es estable en la naturaleza y cuenta con una abundancia natural relativa de 37,4%. El segundo isótopo, 187 Re, tiene la particularidad de ser inestable, a diferencia del primero, pero cuenta con una alta vida media que se estima cercana a 41,2x109 años. También, éste isotopo se encuentra con una abundancia natural relativa de 62,6% aproximadamente. La siguiente tabla resume estas y otras propiedades de manera complementaria a lo escrito:

Isótopo	Tipo de isótopo		Masa (Da) ⁴	Vida media	Modo de desintegración	
¹⁸² Re	Radio activo		181,95	2,67 días	EC a ¹⁸² W	
¹⁸³ Re	Radio activo		182,95	70 días	EC a ¹⁸³ W	
¹⁸⁴ Re	Radio activo		183,95	38 días	EC a ¹⁸⁴ W	
¹⁸⁵ Re		Natural	184,95			
¹⁸⁶ Re	Radio activo		185,95	3,78 días	EC a ¹⁸⁶ W; β- a ¹⁸⁶ Os	
¹⁸⁷ Re		Natural	186,95			
¹⁸⁸ Re	Radio activo		187,95	16,94 días	β- a ¹⁸⁸ Os	
¹⁸⁹ Re	Radio activo		188,95	24 horas	β- a ¹⁸⁹ Os	

Tabla 17: ISÓTOPOS DE RENIO

FUENTE: Winter, M.

_

⁴ Masa atómica unificada Dalton (Da) equivalente a 1,66x10⁻²⁷ Kg

ANEXO IV

ÓXIDOS DE RENIO

Inicialmente, el siguiente tópico se basa principalmente en una publicación realizada por Sims y Wyler (1952) desde la cual se han analizado tópicos que se consideran relevantes para plasmar algunas de las formaciones de compuestos con las que cuenta el Renio en conjunto con Oxígeno. A continuación se presentan los óxidos de Renio más comunes:

HEPTAÓXIDO DE RENIO (Re₂O₇)

Este óxido es el más común de los compuestos Oxígeno-Renio. Su formación se presenta en las ecuaciones siguientes que resumen dos rutas de obtención de este óxido las cuales son: (a) Formación de Heptaóxido al encontrarse expuesto el metal con el aire, así como también es posible su formación al calentar este metal. (b) Alternativamente es posible obtener este compuesto mediante la oxidación de óxidos menores.

$$4Re + 7O_2 \rightarrow 2Re_2O_7$$
 (a)
 $4ReO_2 + 3O_2 \rightarrow 2Re_2O_7$ (b)

DIÓXIDO DE RENIO (ReO₂)

Existen diversas formas de obtener el compuesto de Dióxido de Renio, la presentada en la reacción (c) ha sido propuesta por la fuente y se obtuvo mediante el calentamiento del Heptaóxido de Renio en conjunto con Renio por un día a una temperatura de 650°C para lograr obtener Dióxido de Renio tal como postula la reacción. Por el contrario este compuesto a una alta temperatura, de 900°C según CRC Handbook of Chemistry (2005), realiza la reacción inversa (d),

es decir, el Dióxido de Renio se descompone y forma los compuestos iniciales tal como se indica en la reacción.

$$3Re + 2Re_2O_7 \rightarrow 7ReO_2$$
 (c)

$$7ReO_2 \rightarrow 3Re + 2Re_2O_7$$
 (d)

TRIÓXIDO DE RENIO (ReO₃)

Dos formas de obtener Trióxido de Renio han sido propuestas hace ya varias décadas, la primera forma de obtener este compuesto es mediante el calentamiento durante un largo periodo de Heptaóxido de Renio y Renio metálico en polvo produciendo el trióxido tal como muestra la reacción (e). También es conocido que la formación de este compuesto se puede lograr de la misma manera, pero reemplazando el Renio metálico en polvo por Dióxido de Renio tal como muestra la reacción (f), cabe destacar que la literatura añade que esta reacción fue lograda al calentar altos montos de ambos compuestos.

$$Re + 3Re_2O_7 \rightarrow 7ReO_3$$
 (e)

$$ReO_2 + Re_2O_7 \rightarrow 3ReO_3$$
 (f)

OTROS ÓXIDOS DE RENIO

Si bien estos compuestos suelen ser las más comunes cuando se trabaja con Renio, existen otros compuestos Oxígeno-Renio menos importantes y poco comunes los cuales se presentan a continuación:

Sesquióxido de Renio (Re₂O₃)

$$2ReCl_3 + 3H_2O (alcalino) \rightarrow Re_2O_3 + 6HCl$$

Pentaóxido de Renio (Re₂O₅)

$$4Re + 5Re_2O_7 \rightarrow 7Re_2O_5$$

Octaóxido de TriRenio (Re₃O₈)

$$3Re_2O_7+5SO_2\;(o\;CO)\rightarrow 2Re_3O_8+5SO_3$$

Sobre este último oxido, si bien existe la reacción química la existencia de este compuesto se encuentra cuestionada por la fuente.

APÉNDICE I

TABLA PERIÓDICA DE ELECTRONEGATIVIDADES

La comprensión de los valores que se entregan en la siguiente tabla se han publicado en el libro de Moeller (1994) y para su comprensión requieren de entender la nomenclatura que en esta tabla periódica se expresa. Para esto se resume el significado de cada uno de estos en el siguiente párrafo:

Los primeros números fuera de paréntesis forman la escala de electronegatividad de Sanderson, los valores entre paréntesis son los equivalentes en la escala de Pauling calculados por la ecuación de la página 58 que relaciona los valores de Sanderson con los de Pauling al igual que los valores entre corchetes.

H (2,31) H (2,31)		0,0	Ç = -	0.0	(O, O, I	(o, o	(2) 3
Sc T1 V Cr Mn Fe Co N1 Cu Zn Ga Ge As Se Br 1,30 1,40 1,35 1,67 1,78 1,91 2,57 2,59 2,57 2,59 3,40 3,59 3,40 3,29 3,40 3,29 3,40 3,29 3,40 3,29 3,40 3,29 3,40 3,29 3,40 3,29 3,40 3,28 3,20 3,40 3,28 3,2		Cs ,28 (69)]					,51 ,31)
B C N O F [2,93 3,79 4,49 5,21 5,75 [2,93 3,79 4,49 5,21 5,75 [2,93 3,79 4,49 5,21 5,75 [2,93 3,79 4,49 5,21 5,75 [2,93 3,79 4,49 5,21 5,75 [2,93 3,79 4,49 5,21 5,75 [2,93 3,79 4,49 5,21 5,75 [2,93 3,79 4,49 5,21 5,75 [2,93 3,79 4,49 5,21 5,75 [2,93 3,79 4,49 5,21 5,75 [2,93 3,79 4,49 5,21 5,75 [2,93 3,79 4,49 5,21] (2,93) [2,24]	LANTÁ	1		Ca 1,22 (1,06)	Mg [1,56 (1,21)]	Be 1,99 (1,42)	
B C N O F [2,93 3,79 4,49 5,21 5,75 [2,93 3,79 4,49 5,21 5,75 [2,93 3,79 4,49 5,21 5,75 [2,93 3,79 4,49 5,21 5,75 [2,93 3,79 4,49 5,21 5,75 [2,93 3,79 4,49 5,21 5,75 [2,93 3,79 4,49 5,21 5,75 [2,93 3,79 4,49 5,21 5,75 [2,93 3,79 4,49 5,21 5,75 [2,93 3,79 4,49 5,21 5,75 [2,93 3,79 4,49 5,21 5,75 [2,93 3,79 4,49 5,21 5,95 [2,93 3,79 4,49 5,21 4,93 [2,92] 2,57] 2,291 2,2	NIDOS		γ 1,05 (098)	Sc 1,30 (1,09)			
B C N O F [2,93 3,79 4,49 5,21 5,75 [2,93 3,79 4,49 5,21 5,75 [2,93 3,79 4,49 5,21 5,75 [2,93 3,79 4,49 5,21 5,75 [2,93 3,79 4,49 5,21 5,75 [2,93 3,79 4,49 5,21 5,75 [2,93 3,79 4,49 5,21 5,75 [2,93 3,79 4,49 5,21 5,75 [2,93 3,79 4,49 5,21 5,75 [2,93 3,79 4,49 5,21 5,75 [2,93 3,79 4,49 5,21 5,75 [2,93 3,79 4,49 5,21 5,95 [2,93 3,79 4,49 5,21 4,93 [2,92] 2,57] 2,291 2,2	Ce 0,90 (0,92)	Hf 1,05 (0,98)	Zr 1,10 (1,00)	Ti 1,40 (1,13)			
	Pr 0,91 (0,90)		Nb 1,36 (1,12)	v 1.60 (1,24)			
	Nd 0,92 (0,93)	W 1,39 (1,13)	Mo 1,62 (1,24)				
	Pm 0,93 (0,94)	Re 1,53 (1,19)	Tc 1,80 (1,33)	Mn 2,07 (1,44)			
	Sm 0,94 (0,94)	Os 1,67 (1,26)	Ru 1,95 (1,40)	Fe 2,10 (1,47)			
	Eu 0,95 (0,94)	1,78 (1,33)	Rh 2,10 (1,47)	Co 2,10 (1,47)			
	Gd 0,96 (0,94)	Pt 1,91 (1,36)	Pd 2,29 (1,57)	Ni 2,10 (1,47)			
	Tb 0,97 (0,94)	Au 2,57 (1,72)	Ag 2,57 (1,72)	Cu 2,60 (1,174)			
	Dy 0,97 (0,94)	Hg 2,93 (1,92)	Cd 2,59 (1,73)	Zn [2,98 (1,96)]			
	но 0,98 (0,96)	3,02 (1,96)	In [2,84 (1.88)]	Ga [3,28 (2,13)]	Al [2,22 (1,54)]	B [2,93 (1,93)]	
	Er 0,98 (0,96)	Pb 3,08 (2,01)	Sn [3,09 (2,02)]	Ge 3,59 (2,31)	Si [2,84 (1,88)]	C 3,79 (2,47)	
	Tm 0,99 (0,96)	Bi 3,16 (2,06)	Sb [3,34 (2,16)]	As [3,90 (2,53)]	P [3,43 (2,22)]	N 4,49 (2,93)	
	γь 0,99 (0,96)	Po	Te [3,59 (2,31)]	Se [4,21 (2,72)]	S [4,12 (2,67)]	0 5,21 (3,46)	
Rn Xe Kr Ar He	Lu 1,00 (0,96)	Ąţ	3,84 (2,50)	Br 4,53 (2,96)	Cl 4,93 (3,28)	F 5,75 (3,92)	
		R	×e	\$	¥	Ne	Ηe

llustración 15: TABLA PERIÓDICA DE ELECTRONEGATIVIDAD

FUENTE: Moeller, T.

APÉNDICE II

DETERMINACIÓN DE RENIO EN MOLIBDENITA

Es relevante dejar abierta la posibilidad de entendimiento para futuros estudios sobre cómo se determina la cantidad de Renio que se contiene en molibdenita basado en una publicación realizada por Cusicanqui y Paredes (1960) en donde se detalla en profundidad la determinación de la cantidad de Renio contenido en tres etapas clave tal como lo citado a continuación:

Se describe un estudio sobre el método espectrofotométrico para determinación de Renio propuesto por Meloche y Martín (1957) y se lo adapta especialmente a la determinación de Renio en concentrados de molibdenita.

El procedimiento descrito se resume en:

- 1. Fusión alcalina de la muestra con NaOH y Na₂O.
- 2. Separación de Molibdeno por extracción, con cloroformo, de su xantogenato: previa una cuidadosa oxidación del Mo.
- Determinacion del Renio por medición espectrofotométrica a 5.320 Å del complejo formado con α-furildioxima en acetona y en medio reductor cloruro estanoso.

(Cusicanqui y Paredes, 1960, p. 135)

Esta cita añade conocimiento al escrito sobre estudios que se realizan para determinar el contenido de Renio que se tiene, en pequeñas partes, en molibdenita, fuente principal según se detalla en el transcurso del escrito, con fines académicos e ilustrativos.

APÉNDICE III

PROPUESTA PARA LA ELECTRONEGATIVIDAD DE SANDERSON

Según se explica en el capítulo 7, el obtener resultados de manera inversa permite obtener valores de los deltas gases noble (ΔGN) para obtener así de manera directa las electronegatividades que propone Sanderson. Bajo esta premisa se proponen dos ecuaciones para obtener valores cercanos a las electronegatividades de Sanderson para elementos que se ven afectados por la contracción de los lantánidos, ecuaciones las cuales han sido modeladas en base a las electronegatividades que comparte Moeller (1994) y que se comparten en el Apéndice I.

La tabla 10 presenta alguno de los valores de gas noble (ΔGN) obtenidos para satisfacer de la mejor manera los cálculos que propone Sanderson, así como también en el mismo tópico resume que existe un comportamiento relativamente lineal de éstos cuando se trabaja con los 32 elementos (exceptuando algunos casos), es decir, al incorporar a los elementos de transición interna. Luego de calcular todos los valores de los deltas gases nobles de los elementos entre el Xenón y el Radón, de la misma manera que en el tópico 7.4.2.1, se obtuvo la siguiente tabla:

Pos. Ele.		N. At.	Elemento	R. cov. (Å)	D (Cal)	RE	ΔGN 32 Ele.	Resultado	Pos- Prop.
0		54	Xe	1,31	5,73	4,06			
1		55	Cs	2,35	1,01	0,28	70,51		
2		56	Ва	1,98	1,72	0,78	12,77		
3		57	La	1,69	2,82	0,88	19,13		
4		58	Се	1,65	3,08	0,9	16,12	17,91	1
5		59	Pr	1,65	3,14	0,91	13,03	13,13	2
6	na	60	Nd	1,64	3,25	0,92	11,31	11,35	3
7	teri	61	Pm	1,63	3,36	0,93	10,08	10,02	4
8	Elementos de transición interna	62	Sm	1,66	3,24	0,94	8,13	8,11	5
9	ició	63	Eu	1,85	2,38	0,95	3,88	8,03	6
10	ans	64	Gd	1,61	3,66	0,96	7,69	7,69	7
11	e tra	65	Tb	1,59	3,86	0,97	7,48	7,46	8
12	s de	66	Dy	1,59	3,92	0,97	7,02	7,09	9
13	nto	67	Но	1,58	4,06	0,98	6,72	6,78	10
14	me	68	Er	1,57	4,20	0,98	6,56	6,52	11
15	Ele	69	Tm	1,56	4,34	0,99	6,34	6,28	12
16		70	Yb	1,70	3,40	0,99	4,05	5,68	13
17		71	Lu	1,56	4,46	1,00	5,75	5,74	14
18		72	Hf	1,44	5,76	1,05	7,24	7,45	1
19		73	Ta	1,34	7,24	1,21	7,71	7,32	2
20		74	W	1,30	8,04	1,39	7,00	7,01	3
21		75	Re	1,28	8,54	1,53	6,35	6,55	4
22		76	Os	1,26	9,07	1,67	5,85	5,92	5
23		77	lr	1,26	9,19	1,78	5,22	5,13	6
24		78	Pt	1,29	8,67	1,91	4,18	4,17	7
25		79	Au	1,34	7,84	2,57	2,10		
26		80	Hg	1,44	6,40	2,93	0,95		
27		81	TI	1,48	5,97	3,02	0,67		
28		82	Pb	1,46	6,29	3,08	0,72		
29		83	Bi	1,46	6,37	3,16	0,67		

Tabla 18: VALORES PARA PROPUESTA DE ECUACIÓN

FUENTE: Elaboración propia.

La tabla 18 presenta columnas las cuales son valores tabulados con anterioridad y resúmenes de cálculos realizados, de igual manera que en el tópico 7.4.2.1, las cuales representan: Posición del elemento (Pos. Ele., lugar del elemento al realizar el cálculo con los 32 elementos entre Xenón y Radón), Número atómico (N. At.), Radio covalente, Densidad electrónica media del átomo (D), Relación de

estabilidad (RE), delta gas noble (Δ GN, calculado según la ecuación 4. pág. 62), Resultado (valor que entrega las ecuaciones propuestas comparables con Δ GN) y posición propuesta (PosProp. posición que se debe asumir para el elemento que tiene dos comienzos: una desde los elementos de transición interna y otra desde los elementos de transición).

Las ecuaciones propuestas en los siguientes párrafos se limitan a ser aplicadas conociendo con anterioridad algunos parámetros restrictivos. Inicialmente, la ecuación propuesta para calcular la electronegatividad de Sanderson a los elementos de transición interna es la siguiente:

$$EcP1 = 17.91 * (PosProp)^{-0.448} + F.C.$$

Esta ecuación solo es aplicable para los 14 elementos que componen la serie de los lantánidos exceptuando Cerio, Europio y Terbio, los cuales cuentan con una posición propuesta (PosProp) de 1, 6 y 13 respectivamente, debido a que los valores calculados en la columna de delta gas noble (Δ GN) se escapan de la linealidad que se busca para la ecuación.

El factor de corrección de esta ecuación (F.C.) es un valor que se aplica según el radio covalente. Los elementos de transición interna con radios covalentes en rangos de 1,56-1,59 y 1,63-1,64 cuentan con un factor de corrección de +0,4. Para radios covalentes entre 1,60 y 1,62 se añade +0,2 a la ecuación. Casos especiales son: Lutecio el cual cuenta con un valor correctivo de 0,25, Samario requiere de un factor de -0,4 y Praseodimio que no requiere de correcciones.

Sobre los elementos de transición, el cálculo de los ΔGN entrega valores aceptables hasta el elemento Platino por lo que, para elementos después de éste, la ecuación no es útil. La ecuación propuesta para el cálculo de las electronegatividades de los elementos de transición es la siguiente:

$$EcP2 = -0.082 * (PosProp)^2 + 0.1092 * (PosProp) + 7.425$$

Debido a la escasa cantidad de elementos con la cual se obtuvo esta ecuación, desde Hafnio hasta Platino, esta no requiere de factores de corrección y resulta ser algo más imprecisa que la primera ecuación propuesta.

Las ecuaciones propuestas requieren de reemplazar, según corresponda, éstas por el ΔGasNoble de la ecuación 3 (pág. 59):

$$Di = GasNobleInferior + Posici\'onElemento * \frac{\Delta GasNoble}{ElementosTotales}$$
 (Ecuaci\'on 3)

Lo cual entrega el siguiente resultado:

Para elementos de transición interna:

$$Di = GNInf + PosEle * \frac{17,91 * (PosProp)^{-0,448} + F.C.}{ElementosTotales}$$

Para elementos de transición:

$$Di = GNInf + PosElem * \frac{-0.082 * (PosProp)^2 + 0.1092 * (PosProp) + 7.425}{ElementosTotales}$$

Con GNInf (Gas noble inferior); PosElem (posición del elemento); Elementos totales (valor de 32 debido a los 32 elementos)

A modo ilustrativo se propone el cálculo de las electronegatividades de los elementos Disprosio (Dy), elemento de transición interna con electronegatividad en la escala de Sanderson de 0,97, e Iridio (Ir), elemento de transición con un valor de electronegatividad de Sanderson de 1,78. Basados en los valores que se reportan en la tabla 18, las densidades atómicas medias (D) son: 3,92 y 9,19 para Disprosio e Iridio respectivamente por lo que se requiere únicamente de calcular los valores de las densidades electrónicas ideales (D_i).

D_i para Disprosio:

$$Di = 1.41 + 12 * \frac{17.91 * (9)^{-0.448} + 0.40}{32} = 4.06$$

D_i para Iridio:

$$Di = 1.41 + 23 * \frac{-0.082 * (6)^2 + 0.1092 * (6) + 7.425}{32} = 5.09$$

Finalmente, para obtener la electronegatividad se requiere en ambos cálculos de D/D_i:

$$RE(Dy) = \frac{3.92}{4.06} = 0.9655 \mid RE(Ir) = \frac{9.19}{5.09} = 1.8055$$

Los valores obtenidos, de manera teórica, de las electronegatividades en base a las ecuaciones propuestas son de 0,9655 y 1,8055 para Disprosio e Iridio respectivamente, valores los cuales se asemejan a los tabulados en la tabla 18 en donde Disprosio aparece con 0,97 e Iridio con 1,78. Es importante destacar que en la obtención de estos valores se realizaron aproximaciones gruesas y los factores de corrección, al igual que las ecuaciones propuestas, requieren de una observación a detalle para lograr mejores resultados.

Finalmente, se hace énfasis en que esta es una propuesta de orden cero que busca dar una respuesta a la formulación que comparte Sanderson pero que se encuentra limitada por el factor lantánidos.