

El Rayo

MITOS, LEYENDAS, CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Horacio Torres-Sánchez



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA
Facultad de Ingeniería

HORACIO TORRES-SÁNCHEZ

Ingeniero Electricista y M.Sc. en Sistemas de Potencia de la Universidad Nacional de Colombia y estudios de Ph. D. de la Universidad Técnica de Darmstadt (Alemania).

Fue Jefe de Diseño de Transformadores de Siemens (1975-1978). Director del Departamento de Ingeniería Eléctrica (1985-1990), Director del Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico, Cindéc (1990-1994), Vicerrector de Recursos Universitarios (1994-1998) y Director del Instituto de Extensión e Investigación, IEI de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia.

Actualmente es Profesor Titular, Profesor Emérito, Coordinador del programa de doctorado en Ingeniería Eléctrica y Director del Programa de Investigación sobre Adquisición y Análisis de Señales, PAAS-UN de la Universidad Nacional de Colombia.

Es miembro activo y responsable del Comité, CIGRE WG 33.01.33 (Lightning in Tropical Regions) con sede en París, Miembro del Institute of Electrical and Electronic Engineering, IEEE y **presidente** del Comité de normalización sobre Compatibilidad Electromagnética del ICONTEC.

Cuenta con siete libros e impresos universitarios y más de 60 publicaciones nacionales e internacionales en el área de Alta Tensión, transitorios electromagnéticos, descargas eléctricas atmosféricas y calidad de la energía eléctrica.

El rayo

MITOS, LEYENDAS, CIENCIA Y TECNOLOGÍA

El rayo

MITOS, LEYENDAS, CIENCIA Y TECNOLOGÍA

HORACIO TORRES-SÁNCHEZ

PROFESOR TITULAR FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA
Facultad de Ingeniería



551.5632

T693r Torres-Sánchez, Horacio

El rayo: mitos, leyendas, ciencias y tecnología / Horacio Torres-Sánchez

-Bogotá: UNIBIBLOS. 2002.

410 p.

ISBN 958-701-213-5

1. Rayos atmosféricos . I. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería.

Universidad Nacional de Colombia

División Bibliotecas

EL RAYO, MITOS, LEYENDAS, CIENCIA Y TECNOLOGÍA

© Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

© Horacio Torres-Sánchez

Segunda edición, 2002

ISBN: 958-701-213-5

Diseño carátula: Paula Iriarte

Diseño y armada: Margarita Isabel Sandoval

Preparación editorial e impresión:

Universidad Nacional de Colombia

UNIBIBLOS

E-mail: unibiblo@dnic.unal.edu.co

Bogotá D.C., 2002

*A Bertha, a Nanda, a mi familia
y a mis dilectos discípulos y amigos*

ÍNDICE

Prólogo	19
Capítulo 1	
MITOS Y LEYENDAS SOBRE EL RAYO	
Introducción	23
Dos lenguajes y una verdad	24
Antiguos mitos sobre el rayo	25
El mito del rayo en las ancestrales culturas indígenas precolombinas	27
El rayo y la religión católica	30
Santa Bárbara en la Nueva Granada	31
El sincretismo religioso en América	32
La princesa indígena Dobaiba	33
El árbol poderoso y el gusano exterminador	34
Referencias	38
Capítulo 2	
LA MODERNA VISIÓN CIENTÍFICA DEL RAYO	
El paradigma de la electricidad	39
LAS BASES TEÓRICAS DE LA ELECTRICIDAD	44
Los rayos y la transmisión de potencia eléctrica sin hilos	51
<i>La telefuerza</i>	53
BASES TEÓRICAS DE LA TEORÍA DE DESCARGA DE GASES	55
Teoría de Townsend para la descarga eléctrica en gases	55
<i>Primer coeficiente de Townsend</i>	55
<i>Segundo coeficiente de Townsend</i>	58
Teoría de canales para la descarga eléctrica en gases	61
<i>Canal dirigido al cátodo</i>	61
<i>Canal dirigido al ánodo</i>	62
DISTRIBUCIÓN DE CARGAS ELÉCTRICAS EN NUBES DE TORMENTA	63
MODELOS DE LA ESTRUCTURA BIPOLAR	65
ESTRUCTURA TRIPOLAR DE LA NUBE DE TORMENTA	67
CATEGORIZACIÓN DEL RAYO	69
Proceso de formación del rayo	69

Encendido de la descarga	71
Líder escalonado	72
Teorías del líder escalonado.....	74
<i>Teoría de Schonland</i>	74
<i>Teoría de Bruce</i>	75
Proceso de enlace	76
Descarga de retorno	76
Líder dardo	78
EL TRUENO	79
RECONSTRUCCIÓN DEL PROCESO DEL RAYO	80
Referencias	81

Capítulo 3

EL ESPACIO Y EL TIEMPO EN LOS PARÁMETROS DEL RAYO

La hipótesis de Wilson - una visión global del fenómeno eléctrico atmosférico	83
Corrientes sobre nubes de tormenta	85
Número de generadores	85
Corriente vertical de buen tiempo	86
Resistencia vertical	87
Potencial ionosférico - PI	87
EL TIEMPO METEOROLÓGICO GLOBAL	90
RELACIÓN ENTRE EL CIRCUITO ELÉCTRICO GLOBAL Y EL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL	93
MODELAMIENTO TEMPORAL DEL FENÓMENO ELÉCTRICO ATMOSFÉRICO - UNA VISIÓN LOCAL DEL FENÓMENO	98
VARIACIÓN LOCAL DIARIA DE LA ELECTRIFICACIÓN DE LAS NUBES	104
Referencias	107

Capítulo 4

LOS PARÁMETROS DEL RAYO

Introducción	111
HIPÓTESIS DE VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LOS PARÁMETROS DEL RAYO	111
LA PRÁCTICA EN INGENIERÍA	115
PARÁMETROS DEL RAYO PARA APLICACIONES EN INGENIERÍA	117
NIVEL CERÁUNEO - NC	118

Variación espacial del NC en Colombia	123
Variación espacial del NC en otras latitudes	125
Variación temporal del NC para Colombia y el mundo	131
Distribución de probabilidad del nivel ceráuneo	133
DENSIDAD DE DESCARGAS A TIERRA - DDT	133
Distribución de probabilidad de la densidad de descargas a tierra	141
AMPLITUD DE LA CORRIENTE DE RETORNO DEL RAYO - CR	141
Modelos matemáticos y ecuaciones experimentales	142
Magnitudes de corriente de retorno del rayo en diferentes latitudes	144
CAMPO ELÉCTRICO ASOCIADO AL RAYO. VARIACIÓN CON RESPECTO A LA LATITUD	150
Medición mundial del campo eléctrico asociado al rayo	150
Análisis de las mediciones del campo eléctrico asociado a una descarga eléctrica atmosférica en el mundo	161
LA POLARIDAD DEL RAYO - VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL	168
Referencias	171

Capítulo 5

MODELOS, MÉTODOS Y DISPOSITIVOS USADOS EN INGENIERÍA PARA PROTECCIÓN CONTRA RAYOS

Introducción	177
El método electrogeométrico	177
El método electrogeométrico aplicado a líneas de transmisión	179
Cálculo de la rata de fallas de apantallamiento	182
El método electrogeométrico aplicado a estructuras delgadas	183
MODELO DE PROGRESIÓN DEL LÍDER, MPL	185
Simulación del líder descendente	186
<i>Carga del líder</i>	187
<i>Velocidad del líder</i>	188
<i>Longitud del penacho</i>	188
<i>Propagación del líder</i>	188
SIMULACIÓN DEL LÍDER ASCENDENTE	189
Inicio del líder	189
Carga del líder	190
Velocidad del líder	190
Longitud del penacho	190
Modelamiento de la nube	191

DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS	192
La discusión	193
Dispositivos no convencionales ESE	193
Posición de la comunidad científica internacional frente a los dispositivos no convencionales ESE	196
Pruebas de laboratorio <i>versus</i> rayos naturales	196
Investigación <i>in situ</i>	198
Recomendaciones y conclusiones	199
DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN INTERNA	201
Una mirada a las normas	201
<i>Corriente pico de rayo</i>	201
<i>Corriente pico tipo rayo en Estados Unidos y zona tropical</i>	202
<i>Corriente pico tipo rayo - IEC 61312</i>	203
<i>Forma de onda de rayo - IEC 10 x 350 μs corriente de impulso</i>	204
Forma de onda	207
Comparación del manejo de carga	208
Comparación de la energía nominal	209
Conclusiones	210
Referencias	211

Capítulo 6

LAS NORMAS TÉCNICAS SOBRE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS Y SUS APLICACIONES

Introducción	215
NORMAS NACIONALES SOBRE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS	215
LA NORMA TÉCNICA COLOMBIANA DE PROTECCIÓN CONTRA RAYOS NTC 4552	217
Objeto de la norma	217
Alcance de la norma	217
Sistema integral de protección contra rayos	217
Metodología para implementar el Sistema integral de protección contra rayos en estructuras	219
Evaluación del factor de riesgo para protección contra rayos	219
PROCEDIMIENTO RECOMENDADO POR LA NORMA IEC 61024-1-1	224
LA NORMA BRITÁNICA BS 6651-1992	225
Número probable de impactos de rayo	225
Densidad de rayos a tierra	225

Área efectiva del conjunto	226
Vulnerabilidad del sistema	226
Cálculo del riesgo total	228
PROTECCIÓN PARA NIVELES DE EXPOSICIÓN	228
EVALUACIÓN DE NORMAS MEDIANTE APLICACIÓN A CASOS REALES	229
CASO 1: CINE DOMO MALOKA	230
Aplicación de la Norma NTC 4552	230
<i>Evaluación de la necesidad de un sistema de protección contra rayos</i>	230
Aplicación de la Norma NFPA 780	232
<i>Determinación del riesgo</i>	232
<i>Aplicación de la Norma NFPA a la estructura en estudio</i>	233
<i>Evaluación del riesgo</i>	233
Aplicación de la Norma IEC 61024-1-1	234
<i>Frecuencia admitida de descargas a la estructura Nc</i>	234
<i>Frecuencia esperada de rayos directos a la estructura Nd</i>	234
<i>Aplicación a la Norma BS-6651-1992</i>	236
<i>Determinación de la probabilidad de impacto P</i>	236
<i>Determinación del riesgo total</i>	237
Clasificación de pérdidas	237
Evaluación de las sobretensiones	238
<i>Sobretensiones debido a descargas eléctricas indirectas</i>	238
<i>Sobretensiones debido a descargas eléctricas directas</i>	239
Evaluación del sistema de protección	239
<i>Protección externa</i>	240
<i>Protección interna</i>	240
CASO 2: HEMEROTECA NACIONAL	243
Aplicación de la NTC 4552	243
Aplicación de la Norma técnica Británica BS 6651-1992	246
Aplicación de la Norma técnica IEC 61024-1-1	249
Aplicación de la Norma NFPA 780	251
Cálculo de sobretensiones inducidas	253
<i>Sobretensiones inducidas por impacto cercano</i>	253
<i>Sobretensiones inducidas por impacto directo</i>	254
CASO 3: IGLESIA COSME Y DAMIÁN	256

Aplicación de la Norma IEC 61024-1-1	257
<i>Cálculo del área efectiva</i>	257
<i>Número de rayos aceptado por año</i>	258
Aplicación de la NTC 4552	259
<i>Riesgo por parámetros eléctricos</i>	259
<i>Riesgo asociado a la estructura</i>	260
Aplicación de la Norma BS 6651-1992	260
<i>Número probable de impactos tipo rayo</i>	260
<i>Tipo de estructura</i>	261
<i>Grado de aislamiento</i>	261
<i>Tipo de terreno</i>	261
Aplicación de la Norma NFPA 780	262
Cálculo de protecciones externas	262
Cálculo de las sobretensiones	264
<i>Protección interna</i>	264
CONCLUSIONES GENERALES	265
APLICACIÓN DE LA PROTECCIÓN CONTRA RAYOS A LA FALLA DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN	267
METODOLOGÍA INTEGRAL	269
Diagnóstico integral	270
<i>Evaluación de estudios y soluciones previas</i>	270
Análisis causa-efecto	270
Descripción del diagrama causa-efecto para falla de transformadores	270
Caracterización del entorno	272
<i>Zonas de compatibilidad electromagnética (riesgo por rayos)</i>	274
<i>Índices para evaluación</i>	275
<i>Alternativas tecnológicas e implementación de las soluciones</i>	276
Modelamiento en el EMPT/ATP	280
Evaluación del pulso transferido	280
Pruebas de laboratorio y campo	285
Control y monitoreo de variables	286
<i>Puestas a tierra</i>	286
<i>Servidumbre</i>	287
<i>Descargas eléctricas atmosféricas en la zona</i>	287

Casos en el circuito piloto experimental de Guachipay durante tres años.....	289
<i>Caso 1</i>	289
<i>Caso 2</i>	292
Evaluación de la relación costo/beneficio	293
<i>Conclusiones, recomendaciones y perspectivas de la investigación</i>	295
GUÍA DE SEGURIDAD PERSONAL DURANTE TORMENTAS ELÉCTRICAS	297
Referencias	300

Capítulo 7

SISTEMAS LOCALIZADORES Y MEDIDORES DE PARÁMETROS DEL RAYO	
Introducción	303
SISTEMAS LOCALIZADORES DE RAYOS (MEDICIÓN INDIRECTA)	303
PRINCIPIO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DF	305
PRINCIPIO DE OPERACIÓN DEL SISTEMA TOA	306
ERRORES EN LOS SISTEMAS DF Y TOA	309
EXACTITUD (<i>ACCURACY</i>) Y EFICIENCIA (<i>EFFICIENCY</i>) DE LOS SISTEMAS DF Y TOA	310
EXACTITUD Y EFICIENCIA DEL SISTEMA DF	311
EXACTITUD Y EFICIENCIA DEL SISTEMA TOA	312
LA RED COLOMBIANA DE MEDICIÓN Y LOCALIZACIÓN DE DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS - RECMA	
SISTEMA LPATS	313
SISTEMAS LLP-EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN Y UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	
DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DIRECTA	317
El canal de descarga	318
La torre de descarga	321
Impedancia de la torre	323
Distribución de la corriente de rayo en el canal de descarga y la torre	325
ELEMENTOS DE MEDICIÓN DIRECTA	327
Instrumento derivador	327
<i>Bobina de Munich</i>	327
<i>Bobina de Rogowski</i>	328
<i>Transformador Pearson</i>	328
<i>Resistencia Shunt</i>	328
INSTRUMENTOS DE REGISTRO	329

Oscilógrafo	329
Osciloscopio	331
ESTACIÓN EXPERIMENTAL DE MEDICIÓN DIRECTA DE RAYOS ILYAPA	333
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA ESTACIÓN ILYAPA	334
Localización de la estación	334
Selección de la estación requerida	335
Determinación de los parámetros de la estructura seleccionada	337
<i>Impedancia al impulso de la torre</i>	337
Sistema de puesta a tierra	338
Comportamiento de la torre cuando es golpeada por una descarga	339
Número esperado de descargas a la torre	340
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDIDA	340
Bobinas de Rogowski	341
Bobina de Rogowski diferenciadora, BRD	342
Bobina de Rogowski integradora, BRI	343
Resistencia Shunt, RS	345
ESTACIONES DE MEDICIÓN DIRECTA EN EL MUNDO	347
Estación de la torre de telecomunicaciones del Monte Hoher Peissenberg (Alemania)	347
Estación de medición en la torre nacional de Toronto CN, Canadá	349
Descargas inducidas por medio de <i>rockers</i> en Alabama y Florida	350
Estación de Pretoria en Suráfrica	352
Estaciones de medición directa de parámetros de rayo en el mundo	356
Referencias	357

Anexo A

GLOSARIO DE TÉRMINOS RELACIONADOS CON EL RAYO

Introducción	361
Sobre términos relacionados con el rayo	361
Sobre términos relacionados con la física de la atmósfera	364
Ionosfera	364
Corriente eléctrica de buen tiempo	364
Campo eléctrico de buen tiempo	365
Inestabilidad condicional	365
Procesos adiabáticos	365

Procesos adiabáticos saturados	365
Convección	365
Convección profunda	366
Clasificación de las nubes	367

Anexo B

CURVAS DE PROBABILIDAD DE NIVEL CERÁUNICO Y DENSIDAD DE DESCARGAS

A TIERRA PARA COLOMBIA

Variación espacial del nivel ceráunico	371
EVALUACIÓN GLOBAL, REGIONAL Y LOCAL DE DDT EN COLOMBIA	372
Relación entre NC y DDT para Colombia, zona tropical	373
Evaluación de la relación	375
CURVAS DE PROBABILIDAD ACUMULADA DE NC Y DDT	376

Prólogo

En el año 1994, el Instituto Colombiano de Normas Técnicas (Icontec) publicó el libro *El rayo*, que actualmente se encuentra agotado. Desde 1994 a la fecha son muchos los avances logrados en materia de investigación y normalización a escala nacional e internacional sobre el tema: nuevos modelos físicos y matemáticos para el cálculo de protecciones y parámetros del rayo, normas como la IEC 61024 y la NTC 4552 sobre protección contra rayos, nuevos equipos de medición y localización de rayos.

El libro que usted tiene en sus manos está basado en referencias académicas internacionales, experiencias de investigación del autor y en el escrito "Espacio y tiempo en los parámetros del rayo", documento inédito de Horacio Torres-Sánchez, presentado, evaluado externamente y aprobado por la Universidad Nacional de Colombia como trabajo de promoción a la categoría de profesor titular.

El rayo es el fenómeno meteorológico más temido, estudiado e interpretado por todas las culturas de la tierra a través de los tiempos. Hoy en día es investigado por geofísicos, meteorólogos e ingenieros, debido a su efecto perturbador en dispositivos, equipos y sistemas eléctricos, electrónicos y de comunicación.

Este libro cubre tres tipos de público de habla hispana:

- Personas interesadas en conocer sobre la interpretación que las diversas culturas le han dado al fenómeno del rayo, las modernas teorías sobre cómo es el fenómeno y aprender a protegerse del rayo en diversas situaciones.

- Profesores y estudiantes universitarios de ingeniería eléctrica, geofísica y meteorología de pre y posgrado, como soporte teórico de asignaturas y temas como aislamiento eléctrico, coordinación de aislamiento, descargas eléctricas atmosféricas, sobretensiones, alta tensión, apantallamiento de líneas de transmisión.

- Ingenieros de diseño y mantenimiento de sistemas eléctricos, electrónicos o de comunicaciones que deben conocer sobre las nuevas teorías y modelos de sistemas de protección contra rayos.

El libro está escrito en un lenguaje sencillo, pero técnico, académicamente riguroso y dirigido al público objetivo.

Se realiza inicialmente un viaje imaginario a través del tiempo desde las interpretaciones mitológicas del rayo dadas por culturas como la babilónica, la china, la griega, la romana, la nórdica, la india, hasta la moda en la Francia del siglo XIX con los pararrayos como atuendos de hombres y mujeres, y las relaciones entre la religión católica con Santa Bárbara y el Changó de la cultura africana y las interpretaciones indígenas con Ilyapa, Tlaloc, etc., en las culturas maya, azteca, inca y las que ocuparon lo que hoy es el territorio colombiano.

Pasamos luego a los resultados de las investigaciones teóricas y experimentales más importantes con base en los cuales se tiene el paradigma más aceptado por la comunidad académica internacional sobre el modelo de la descarga eléctrica atmosférica, compuesto por: encendido de la descarga, líder escalonado, proceso de acople, descarga de retorno y descargas subsecuentes.

A partir de la hipótesis del físico inglés C. T. R. Wilson, propuesta en 1910 sobre el circuito eléctrico global, se presentan los avances de las investigaciones acerca del comportamiento global y local, con énfasis en los resultados de investigación que hemos obtenido en Colombia y que han sido publicados en artículos internacionales, discutidos en foros internacionales y aceptados por la comunidad académica como aporte al entendimiento de las descargas eléctricas atmosféricas en zona tropical.

Esta obra constituye un análisis teórico (fundamentado en la teoría de campos electromagnéticos) y experimental (basado en resultados de campo y laboratorio), de los parámetros del rayo más utilizados en ingeniería: nivel ceráuneo, densidad de descargas a tierra, polaridad, multiplicidad, amplitud, forma de

impulso, con resultados tanto de latitudes templadas como de zona tropical.

Con base en los fundamentos teóricos explicados en los primeros capítulos se describen, comparan y evalúan los métodos más usados en ingeniería para sistemas de protección contra descargas eléctricas atmosféricas: el método electrogeométrico y el modelo de progresión del líder.

Se presentan los criterios fundamentales de la Norma Técnica Colombiana NTC 4552 sobre protección contra rayos y se comparan mediante ejercicios de aplicación a diferentes estructuras, con la norma internacional IEC 61024 y una norma de un país europeo: la británica BS 6651 y una norteamericana: la NFPA 780. Se hace énfasis no solamente en la protección externa, sino en la interna, mediante el cálculo de sobretensiones.

Se describen las metodologías y los equipos desarrollados a escala mundial para localización de rayos, junto con las estaciones experimentales que actualmente existen en el mundo para medición directa de parámetros del rayo.

Se incluyen dos anexos:

Anexo A: Glosario de términos relacionados con la descarga eléctrica atmosférica.

Anexo B: Curvas de probabilidad acumulada de nivel ceráuneo y densidad de descargas a tierra para Colombia.

Los dos anexos son resultado de más de quince años de investigación del Programa de Investigación PAAS de la Universidad Nacional de Colombia sobre el nivel ceráuneo y la densidad de descargas a tierra. Nunca han sido publicados y corresponden a datos probabilísticos, recogidos durante quince años, de más de treinta estaciones de medición sinóptica en Colombia, muy valiosos para los investigadores sobre el tema y para los ingenieros que diseñan sistemas de protección contra rayos.

El editor

Mitos y leyendas sobre el rayo

Introducción

El ser humano ha buscado, a través de los tiempos y en diferentes culturas, transformar la energía disponible en la naturaleza; desde la fricción para obtener fuego, hasta la utilización intrínseca de la materia para obtener energía nuclear o viajar en busca de nuevos mundos.

En esa búsqueda ha tratado de conocer la naturaleza y sus fenómenos, expresando ese conocimiento en diferentes lenguajes como el mítico, la iconografía, hasta el contemporáneo, llamado científico. En cualquier época sus aportes han sido fundamentales para entender el porqué de las cosas de la naturaleza.

Para Aristóteles la energía no era algo tangible, sino parte del estado de la materia. Las manifestaciones de la energía

podían ser interpretadas, entonces, mediante cuatro elementos: agua - aire - fuego y tierra. Sólo a partir del siglo XVIII –mediante los trabajos experimentales de los "electricistas", cuyo miembro más notable fue el estadista y científico bostoniano Benjamín Franklin– se avanza en la visión aristotélica del mundo a través de los cuatro elementos y se proporciona un paradigma común para las investigaciones, cuando sobre

los choques recibidos por el "jarrón de Leyden" se afirma: "...todas las fuerzas de la botella y la potencia que da el choque, están en la botella misma...".

Las manifestaciones del fenómeno eléctrico fueron conocidas desde la cultura acadia y griega con la interpretación del fenómeno del rayo y los escritos de Tales de Mileto sobre la piedra imán, respectivamente. Sin embargo, fueron los trabajos sistemáticos realizados por los "electricistas" del siglo XVIII los que dieron las bases para usos que hoy conocemos.

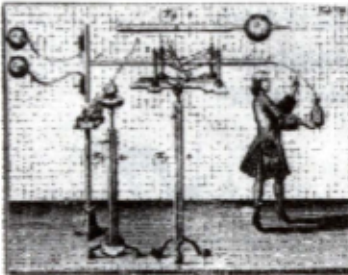


Figura 1. Experimentos con el jarrón de Leyden, siglo XVIII.

Dos lenguajes y una verdad

Si bien la ciencia moderna nos ofrece hoy en día la posibilidad de conocer y entender los fenómenos de la naturaleza, la historia nos proporciona similares interpretaciones en otro lenguaje: el mítico. Un ejemplo de la interpretación de un mismo fenómeno en dos lenguajes diferentes lo encontramos en la creación de la vida en el universo, al comparar la creencia mítica de la ancestral y milenaria cultura maya con el resultado científico llevado a cabo en nuestro tiempo en la Universidad de Cornell, Estados Unidos, según las cuales el rayo es el detonante de la vida en el universo:

...El Rey, la Serpiente y el Corazón del cielo, a quien también se dice Juracán, dispusieron en las tinieblas la creación de la vida.

Caculjá Juracán que quiere decir "Relámpago", Chipi Caculjá, cuyo significado es "Rayo pequeño" y Raza Caculjá, sinónimo de "Trueno", constituyen la trinidad del Corazón del Cielo o Juracán...

...Se hicieron los valles. Y al instante brotaron los cipresales y pinares, para la alegría y beneplácito de Gucumatz, quien dijo:

—¡Qué buena ha sido la presencia del Relámpago, el Rayo pequeño y el Trueno!

Ellos respondieron:

—¡Nuestra creación, nuestra obra será terminada!

En efecto, se dividieron las corrientes de agua, los arroyos fluyeron alegremente entre los cerros. Y las aguas quedaron separadas ante la presencia de las montañas y las cumbres.

De esta manera se perfeccionó la Obra¹.

Los resultados científicos se describen así en el lenguaje científico moderno:

... En mi laboratorio de la Universidad de Cornell mezclamos y sometimos a chispas los gases de la tierra primitiva: hidrógeno, agua, amoníaco, metano, sulfuro de hidrógeno. Las chispas correspondían a los rayos, presentes también en la tierra antigua y en el actual Júpiter. Al cabo de diez minutos de chispas aparece una colección muy rica de moléculas orgánicas complejas, incluyendo a las partes constitutivas de proteínas y ácidos nucleicos...².

1 *Popol Vuh*, Ed. Ariel, 1975, pp. 12-14.

2 C. Sagan, *Cosmos*, Ed. Planeta, 1985, p. 38.

Antiguos mitos sobre el rayo

La descarga eléctrica atmosférica, comúnmente conocida como rayo, ha sido uno de los fenómenos meteorológicos más admirado, temido, interpretado y estudiado por las diferentes culturas a través de los siglos. Su interpretación se remonta a la antigua cultura acadia (2000 a. C.), que representaba el fenómeno mediante una diosa parada sobre los hombros de un guardián alado y tras de ella, sobre un carro de cuatro ruedas, el dios del tiempo lanzando rayos con su fusta.



Figura 2. Interpretación del rayo, cultura babilónica 2000 a. C.

La mitología china representa el rayo con la colorida diosa Tien-Mu. Ella sostiene firmemente dos espejos para dirigir los destellos del rayo. Tien-Mu está rodeada por cinco dignatarios del "Ministerio de las tormentas", existiendo en la imaginación china el jefe de aquellos: Lei Tsu, dios de los truenos, y su ayudante Lei Kung, el tamborilero contador de rayos.



Figura 3. Tien-Mu, diosa de los rayos en la cultura china.



Figura 4. Lei Tsu, ministro de las tormentas en la cultura china.

En la mitología griega, el rayo fue considerado uno de los atributos propios de Zeus, quien era el dios de los fenómenos de la atmósfera. Sus funciones primarias estaban relacionadas con la lluvia y con el retorno del buen tiempo, pero muy particularmente con el rayo y el trueno. Se le representó como un hombre vigoroso y maduro, de pie o sentado, en actitud digna y generalmente vestido de la cintura hacia abajo, llevando en su mano el cetro o el rayo, o ambas cosas a la vez, y asistido por su siervo, el águila.

Dos atributos importantes de Zeus fueron el rayo y la égida. El rayo era representado generalmente como un objeto biconico, a menudo con rayos convencionales unidos a él y a veces incluso con alas. La égida fue descrita a partir de Homero como una armadura o escudo. En las manos de un dios, la égida no era solamente una poderosa defensa, sino un arma mágica que al ser agitada llenaba de terror al enemigo. Al ser llevada por el dios del trueno, no es extraño que se haya interpretado la égida como una nube cargada de rayos.

La égida no es más que un manto de piel de cabra cuyo pelo forma un fleco. Esta prenda es llevada aún actualmente por los campesinos griegos. Como es una piel dura, servía a quien la llevase, no sólo para defenderse del mal tiempo, sino contra los golpes de un enemigo. En la mitología se dice que la égida de Zeus fue hecha de la cabra Amaltea que lo amamantó.

El rayo (del latín *radium*) también es atributo de ciertos dioses de la India, tanto brahmánicos como búdicos. Con el nombre de Vajra, es el arma de Indra (el ardiente) y con el nombre de Trisula (tridente), el arma de Rudra (el que grita).

Thor, hijo de Odin y Yord, tal vez fue el principal y más famoso de los antiguos dioses nórdicos que se relaciona con el rayo. Su castillo era el Bilskirnir (relampagueante); poseía dos cabras, Diente Crujidor y Diente Pulverizador, que tiraban de su carroza mientras él la conducía. Thor, el dios del trueno,



Figura 5. Lei Kung, el contador de rayos en la cultura china.



Figura 6. Zeus, dios de los fenómenos de la atmósfera en la cultura griega.



Figura 7. Buda del Tibet, Vajrasatva.



Figura 8. Thor. 1000 a.C. Bronce. National Museum of Iceland, Reykjavik.

caracterizado por su barba roja, producía rayos a medida que su martillo Myolnir de mango corto golpeaba un yunque o lo lanzaba y volvía a su mano como un bumerán, mientras cabalgaba en su carroza "tronadora" alrededor de las nubes. *Thursday*, el quinto día de la semana en inglés, es dedicado al dios Thor.

En danés moderno, el quinto día de la semana es *Torsday*, en alemán *Donnerstag* (día de truenos), en italiano *Giovedì* (día de Jové) y en español Jueves, derivado de Jové o Júpiter, dios de dioses romano, que usaba rayos no sólo para castigar, sino como una advertencia contra la conducta indeseable.

El águila, emblema del dios Júpiter, se encuentra actualmente en los billetes norteamericanos de un dólar, con rayos agarrados en una de sus patas y en la otra un ramo de olivo como signo de paz.

El mito del rayo en las ancestrales culturas indígenas precolombinas

Para la cultura azteca, el rayo era un fenómeno que dependía del dios de la lluvia Tlaloc ("el que hace brotar"). Era el dios que daba las lluvias, que regaba la tierra, mediante la cual crecían todas las yerbas, árboles y frutas. También era él quien enviaba el granizo, los relámpagos, los rayos, las tempestades y los peligrosos ríos y mareas.

El nombre completo era Tlalocantecuhtli, "Señor del lugar donde brota el vino (lluvia) de la tierra". En ocasiones se representa a Tlaloc con el rayo en una mano y dos mazorcas de maíz en la otra, precipitándose hacia la tierra o en actitud de despeñarse desde lo alto de un templo que simboliza los cerros.

La riqueza mitológica del fenómeno del rayo en las culturas indígenas precolombinas está representada ejemplarmente en el *Popol Vuh*, libro traducido al español de la lengua autóctona de los indios quichés de Guatemala por el padre dominico Francisco Ximénez, a principios del siglo XVIII.



Figura 9. Tlaloc, dios azteca de la lluvia.

El *Popol Vuh* constituye una plena realidad viva, donde se encuentran todas las tradiciones milenarias de los quichés.

Los dioses de la lluvia en la cultura maya eran los Chacs, y se conocían con el nombre de los regadores. Eran ellos quienes producían los relámpagos, los rayos, las tempestades, las tormentas y la lluvia. Cuando iban a llevar las lluvias, los Chacs se reunían en su morada que se llamaba "al pie del cielo", desde donde salían por una puerta llamada "trueno" que empezaba en la capa de las nubes. Con su jefe al frente atravesaban los cielos, cada uno con una calabaza de agua en una mano y en la otra algo parecido a un hacha de piedra bien pulida, la cual, una vez lanzada sobre la tierra, producía los rayos y los truenos; estos últimos, originados por los gritos o los diálogos entre ellos. Los Chacs iban en las cuatro direcciones.



Figura 10. Dios Chac, mitología maya.

Un análisis del significado de las invocaciones mayas para la lluvia muestra el conocimiento que parece ya tenían sobre la diferencia que actualmente se tiene entre rayos de nube a tierra y entre nubes, así como las relaciones no directas que hoy en día conocemos entre número de días con rayos y número de días con lluvia. Había meses y días especiales en que invocaban a los Chacs para la lluvia, y en estas invocaciones utilizaban ciertos términos cuyo significado estaba relacionado con las lluvias. Por ejemplo: *Lelemcaanchaac*, "el dios de la lluvia látigo relampagueante..."; *Mizencaanchaac*, "rayo que barre el cielo...", y *Lelencanil*, "tormenta de muchas nubes y poca agua".

Mediante los códices mayas se puede apreciar la representación de un perro relámpago que lleva dos antorchas encendidas que simbolizan la tempestad. Estas dos antorchas pueden significar los dos tipos de rayos diferentes que ellos alcanzaban a distinguir.

Para la cultura inca, el dios del rayo era Ilyapa. En Cuzco, capital del imperio, existía el Coricancha, el templo del oro, en donde se encontraban los templos de las principales deidades: El sol, Inti; la luna, Quilia, y el rayo, Ilyapa. Cada templo tenía su propio sacerdote. Sus interpretaciones míticas nos muestran hoy en día el conocimiento claro que tenían sobre la diferencia entre la energía lumínica (relámpago) y la energía audible (trueno) producida por el rayo. Ilyapa era un hombre ataviado con reluciente vestido que llevaba en una mano una porra y en la otra una honda. El relámpago era el fulgor que despedía su vestido al moverse; el trueno, la descarga de su honda, y el rayo, el proyectil de piedra.

Para ellos, los dioses vivieron en otros tiempos en la tierra y después subieron al cielo para confundirse con las estrellas. Entre ellas estaban las Pléyades que representaban para los incas una divinidad suprema que se manifestaba mediante el rayo y era capaz de devorar el sol o la luna. Durante la conquista española de América hubo ciertos relatos que hicieron que al rayo se le llamara Santiago. He aquí uno de éstos:

Dicen que lo vieron a vista de ojos, abajo el señor Santiago, con un trueno muy grande, como rayo cayo del cielo a la fortaleza de ynga y como cayo en tierra se espantaron los yndios y digeron que abia caido yllapa, trueno y rayo del cielo y anci bajo el señor Santiago a defender a los cristianos. Desto echo a huir los yndios entonses los yndios al rayo les llama y le dize Santiago porque el sancto cayo en tierra como Rayo yllapa³

Después de la conquista española, algunos indios continuaban haciendo culto a Ilyapa, pero esto era prohibido y castigado por los españoles con cárcel o trabajos forzados. Pero aun así, para los indios, Ilyapa estaba presente en sus vidas y lo expresaban, por ejemplo, en esta bella poesía quechua:

Bella princesa,
tu propio hermano
rompe
el vaso que llevas
entonces
luce un relámpago,
gruñe el trueno,
cae el Rayo.
tú, princesa,
nos das
tu lluvia
también, a veces, el granizo,
y la nieve⁴.

3 F. Guaman, *Nueva crónica y buen gobierno*, Madrid, 1987.

4 A. Arévalo, *Poesía indígena de América*, Bogotá, 1988.

El rayo y la religión católica

La patrona más conocida de la Iglesia católica con respecto al fenómeno del rayo es Santa Bárbara, abogada de las tormentas, las tempestades, los truenos y de la buena muerte, cuya fiesta se celebra el 4 de diciembre.

Santa Bárbara nació en Nicomedia, la capital de Bitinia, hoy día Ismidt en Turquía asiática. Aquí mismo vivió y fue martirizada hacia el año 235 a la edad de 16 años. Su familia era muy acomodada. Su padre Dióscoro, era un ferviente pagano sometido al emperador romano Máximo. Bárbara pudo conocer por sus buenos maestros a los mejores poetas, oradores y filósofos de la época. Entre estos maestros se encontraba un discípulo de Orígenes, quien le transmitió a la dulce joven la fe cristiana.

Al descubrir la verdad de la revelación, Bárbara seguidamente abandonó la religión politeísta de su familia. Sintió gran devoción por la Santísima Trinidad hasta el punto de ordenar abrir una ventanilla en el castillo (en la torre) de su familia, para honrar esta gran verdad de la fe cristiana: Dios es el Padre, Hijo y Espíritu Santo, un solo Dios pero tres personas, tres modos diferentes de relacionarnos con Él. El edificio, que tenía dos ventanas, comenzó a lucir tres en honor del primer misterio de nuestra religión.

Muy pronto se dio cuenta Dióscoro (su padre) del paso que había dado su hija. Al no poder aceptarla en esta forma, comenzó dulcemente a apartarla de estas ideas. Más adelante, viendo que ella no cambiaba, la entregó a los verdugos para ver si ante el temor y el sufrimiento llegaba a renunciar a su fe.

Viendo, finalmente, que ningún tormento lograba cambiar aquel corazón convertido a Jesucristo, Dióscoro reclamó para sí el triste honor de degollarla en su cercana colina.

Bárbara se arrodilló en el suelo, dio gracias al Señor de que al fin le abrían las puertas del Paraíso y de un tajo cayó al suelo su cabeza. Seguidamente, según la tradición, una centella mataba a su padre y verdugo.

Un cristiano llevó su cuerpo a Gelaso donde los fieles veneraron su sepulcro y esparcieron su devoción por los muchos favores que eran concedidos por Dios en nombre de la Santa. La fama de este sepulcro llegó a extenderse mucho más desde el siglo VII. San Pío reconoció y confirmó el culto a Santa Bárbara en el año 1568⁵.

5 J.J. Sosa, "Santa Bárbara en devociones populares", s.p.i., pp. 101-102.

Santa Bárbara en la Nueva Granada

El culto a Santa Bárbara se difundió ampliamente por las colonias españolas en América y llegó a la Nueva Granada según un relato del historiador Ibáñez:

Pocos años habían pasado desde la fundación de Santa Fe, y ya se veía lleno de estancias y haciendas el antiguo Valle de los Alcázares. En las inmediaciones de la ciudad se habían establecido las de los vecinos principales y así, don Lope de Céspedes y su mujer doña Ana de Vásquez tenían su estancia de pan llevar en el mismo sitio que ocupa hoy la parroquia de Santa Bárbara, en las afueras de la ciudad de entonces.

El don Lope y su mujer vivían allí tranquilos y llenos de contento y felicidad, cuando un 27 de agosto de 1565 una gran tempestad de lluvia y truenos se hizo sentir en la incipiente ciudad, y cayó un rayo en las casas mismas de habitación de Céspedes y su familia: la chispa eléctrica recorrió todas las piezas hasta llegar a la despensa, en donde estaba la negra esclava Cornelia, única persona a quien mató.

El espanto que causó tal desgracia fue tanto mayor cuanto era el primer rayo que caía en la ciudad de Quesada: así, se hicieron rogativas públicas, y don Lope hizo construir una capilla en el mismo sitio que ocupaba la casa, que fue consumida por el fuego, y la dedicó a la gloriosa virgen Santa Bárbara, abogada, como es notorio, para evitar el peligro de los rayos, en todos los pueblos católicos, y muy especialmente entre nosotros, en donde no hay una población que así no tenga alguna capilla y oratorio especial bajo la advocación de la Santa.

Céspedes pidió y obtuvo permiso para que en la capilla se pudiera celebrar el Santo Sacrificio de la Misa: y fueron tantas y tales las peregrinaciones que se hicieron, que en 1585 tenía la Santa un templo grande y capaz, según lo dice el decreto de erección de la Parroquia. Hoy en día esta parroquia* se encuentra ubicada en la carrera 7a. con calle 5a. en el barrio Santa Bárbara de la ciudad de Bogotá, a trescientos metros de la Casa de Nariño, sede de la Presidencia de la República de Colombia.

6 P. M. Ibáñez, *Crónicas de Bogotá*, tomo I, Bogotá, pp. 78-79.

El sincretismo religioso en América

La sustitución de mano de obra indígena por población africana en las colonias españolas de América generó un nuevo tipo de cultura que se manifestó, por ejemplo, en la mezcla de los dioses africanos con los santos cristianos. Esto llevó a la aparición de un sincretismo religioso, en el cual las virtudes del uno se trasladaron al otro, y los elementos del culto se trastocaron e intercambiaron.

Es así como en Cuba Santa Bárbara se asoció con Changó, el dios africano del trueno y el rayo. Changó en África era un guerrero poderoso que a veces practicaba cierto tipo de tiranía sin reparo alguno. En Cuba es el santo protector de la artillería y de los mineros. Fuerte, poderoso y fiel con sus amigos y con sus tres esposas: Oyá (relámpago), Obá y Ochún.

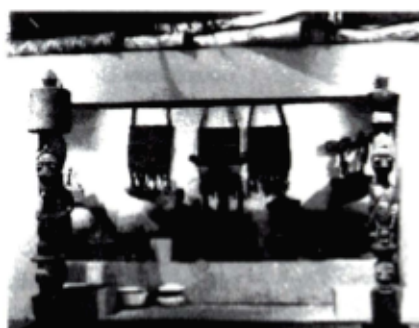


Figura 11. Altar a Changó, dios africano del trueno y el rayo.

El cubano Domínguez ha plasmado en una bella trova cubana este sincretismo, mediante la asociación entre la santa cristiana y el dios africano con la canción mundialmente conocida en la voz de Celia Cruz: "Santa Bárbara bendita":

Santa Bárbara bendita para ti surge mi lira (bis)
y con emoción sentida ante tu imagen bonita
Que viva Changó, Que viva Changó, Que viva Changó, Que viva Changó señores
Con tu alumbrar infinita arrancó del corazón la melodiosa expresión
pidiendo que desde el cielo nos envíe tu consuelo y tu santa bendición
Que viva Changó, Que viva Changó, Que viva Changó señores
Virgen venerada y pura Santa Bárbara bendita (bis)
Nuestra oración favorita llevamos hasta tu altura
Que viva Changó, Que viva Changó, Que viva Changó, Que viva Changó señores
Con alegría y ternura quiero llevar mi trovada
Allá en tu mansión sagrada donde lo bueno ilumina
Junto a tu copa divina y a tu santísima espada.
Que viva Changó, Que viva Changó, Que viva Changó, Que viva Changó señores

En nombre de mi nación Santa Bárbara te pido (bis)
Que riegues con tu fluido tu sagrada bendición
Que viva Changó, Que viva Changó, Que viva Changó, Que viva Changó señores
Yo también de corazón te daré mi murmurio
Con orgullo y poderío Changó yo te felicito
Que en el nombre de tu hostia este saludo te envíe
Que viva Changó, Que viva Changó, Que viva Changó, Que viva Changó señores

La princesa indígena Dobaiba

Según la tradición oral colombiana, existió en la época precolombina una hermosísima princesa indígena adornada de excelsas virtudes. Su sabiduría, sobriedad en el vivir, buen tino en el mandato sobre sus súbditos, le dieron gran fama entre los aborígenes que comenzaron a ver en ella un personaje sobrenatural que había que obedecer y respetar, so pena de violar las leyes divinas. Su nombre era Dobaiba, princesa de los dabaibas, parientes de los cuevas y los chibchas.

Los nativos dabaibas temían a su diosa, pues ella se valía de la naturaleza para sancionar a quienes la irritaban por faltas u omisiones en el cumplimiento con ella en los ritos a su divinidad.

Dobaiba se valía de los huracanes, las tempestades y los rayos para castigar los pecados de sus adoradores. Para aplacar la ira o ganar el favor de esta diosa, los dabaibas le ofrecían riquísimos tributos de oro, platino, conchas y plumas de rara policromía que se apilaban en su templo. Dobaiba, la diosa del látigo de luz y fuego, exigía este tributo, y así fue como se acumularon tesoros incontables que sobrepasaban la imaginación.

No es sorprendente que los aborígenes temiesen a una divinidad que se decía dominaba los huracanes, las tempestades y los rayos, pues hoy en día conocemos que en la región de los dabaibas, en la parte occidental colombiana, las lluvias son frecuentes, generalmente acompañadas de intensas descargas eléctricas atmosféricas. Quien haya visitado esta región puede dar testimonio de la furia de la naturaleza y, por consiguiente, se explica que los dabaibas y otros indígenas buscasen refugio en un dios o diosa suprema que les salvase de esas calamidades y los protegiese de los mortíferos rayos durante ciertas épocas del año.

Y como era natural, pasada la temporada de lluvias inclementes, volvía la calma y las cosechas eran pródigas. Los nativos atribuían este fenómeno a que la diosa Dobaiba se había apaciguado, que estaba contenta con los regalos y que por tanto era benévola y generosa con sus adoradores. De esta manera se repetía la historia año tras año, por siglos y siglos hasta la llegada de los conquistadores españoles.

Estos supieron sobre esos tesoros y su fantasía se inflamó a tal punto que las grandes riquezas de los dabaibas se convirtieron en objetivo de los conquistadores. Esto llevó a Vasco Núñez de Balboa a penetrar las mortíferas y peligrosas selvas en busca de estos tesoros fabulosos. Pero la selva fue superior y derrotó a los conquistadores antes de que lograsen descubrir los fantásticos tesoros de la cacica y diosa Dobaiba.

El árbol poderoso y el gusano exterminador

A continuación se transcribe parte del relato⁷ de un mito de la cultura uitoto, que en su parte correspondiente interpreta de esta manera el poder del rayo:

El Árbol-poderoso –Yarokamena– y el Gusano-poderoso –Yarokaagiro⁸– se originaron en Kitobeni, hijo de Kitobeo, de la gente Kitobeizai. El joven perdió la vida por causa de sus amoríos.

En ese tiempo el padre le ordenó a Kitobeni conseguir mujer.

Tikone era una joven bonita y vanidosa. Allá, donde ella, envió Kitobeo a su hijo diciéndole:

–Bueno hijo: allá está esa mujer. Vive con ella pues ya eres hombre y no debes estar solo.

Al oír estas palabras en boca de su padre, él se fue a pedir la mano de Tikone. Llegó donde el jefe de la tribu de la mujer y le dijo: .

–Bueno, jefe Kanikone, yo vengo a pedir a su hija en matrimonio.

–Está bien. Ahí está la muchacha –respondió Kanikone.

Llamó a la hija y ésta le dijo que bien quisiera ver al hombre que pretendía vivir con ella. Le pidió pararse al frente para observarlo. Cuando lo hizo, la mujer notó que el hombre era muy feo, parecía un

7 El relato completo fue publicado por el profesor Fernando Urbina bajo el título "Un mito de la gente de Murui: de cómo se crió Yarokamena". *Revista Maguaré*, No. 4, 1986, Departamento de Antropología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, pp. 47-65. Véase también al respecto el artículo del profesor Urbina: "Mitos, iniciaciones y misterios: El mito del árbol poderoso y del gusano exterminador", *Hojas universitarias*, Revista de la Universidad Central, No. 49, Bogotá, 2000, pp. 66-81.

8 *Yaroka*: poder mágico, fuerza sobrenatural. K. T. Preuss, *Religión y mitología de los uitotos*, ICAN-Editorial Universidad Nacional -COA, Bogotá, 1994, Segunda parte, p.902.

hijo de cualquiera, un simple huérfano⁹, un individuo común y corriente; por eso era tan feo. Ella lo insultó diciéndole:

–Tú no pareces ser hijo de un jefe. Yo no me casaré con un hombre que no luce bien. Yo no viviré contigo. No he de irme con una persona así.

Desde esa época viene la costumbre, en algunas tribus y familias, de no permitir a los hijos casarse con un cualquiera, sino con gentes de la misma categoría. Se estableció la maña de que las mujeres, cuando no les parece bien un hombre, se ponen a insultarlo, o sacan el pretexto de no querer vivir con nadie.

Luego de sufrir tal desplante, Kitobeni regresó donde su padre y le contó lo sucedido, haciéndole reclamo:

–Papá: la mujer esa me insultó por culpa tuya. Yo no quiero mujer. Eres tú quien me obligas a conseguirla.

El padre le contestó:

–Está bien hijo. Cuéntame cómo fue que te insultaron.

–La mujer me dijo: Hombre, tú no pareces ser hijo de un jefe. ¿Cómo pretendes que vaya a vivir contigo si no eres bello?

Kitobee, entonces, aconsejó a su hijo de la siguiente manera:

–Bueno hijo; está bien. Allá abajo vive la gente de Buina Urukí¹⁰. Ellos son nuestros parientes. Ellos tienen los remedios que dan belleza; ellos los recibieron del poderoso Juziñamui. Allá, donde ellos van los que buscan prepararse, los que quieren embellecerse.

Entonces el papá mandó ambil a la gente de Buina Urukí, pidiéndole que preparara a su hijo y lo volviera hermoso.

El criado de Dueño-del-rayo permanece encima de la casa. Es la cacambra. Él ve desde muy lejos y cuando columbra que alguien se acerca, arma gritería para poner sobreaviso a su amo.

–Basta que ustedes cojan este sueño y se lo muestren desde lejos, sin soltarlo. De esa manera ese pájaro quedará dormido. Después, en la

9 El *jaieniki*, huérfano, esclavo, sirviente, pobre. Es probable que esta palabra tenga en el fondo una conexión de significado con *jainite*: cambiar de lugar, de vivienda; desplazarse (Preuss, *Ibid.*, p. 837), lo cual encajaría bien, por cuanto el asillamado es un "desplazado" que es absorbido por otro clan. Requiere para ser hombre acogerse al amparo ritual de un dueño de *Rafue* y, por tanto, de maloca. Tal personaje es quien posee las palabras creadoras (recreadoras, reactualizadoras, arquetípicas). El contingente de *jaieniki* se nutría en especial con los prisioneros de guerra y con los huérfanos causados por los conflictos armados, como también por causa de desastres tales como epidemias que diezaban la población (Pineda, 1981:340 ss, 1985:40 ss; Urbina, 1992:75).

10 De *urve*, niño. Los niños del agua: los renacuajos. La brujería se busca en los ámbitos propios de los animales. Quien recurre a ella en cierta medida vuelve al plano primordial en el que los hombres y los animales estaban indiferenciados. Por eso la brujería no es generadora de vida; es opuesta a la humanidad.

horqueta del camino se lo pasa la hija, parada, vigilando. A ella han de distraerla dándole este caimo –la fruta madura que vino a comer el pajarito– y han de apuntarle también con este sueño para que se quede bien dormida. Sigán luego hasta la morada de Ameore; allí encontrarán al viejo sentado en la puerta, durmiendo.

Les dio otros consejos e indicaciones, los cuales fueron atendidos por los dos hermanos. Entraron en la casa y, siguiendo las instrucciones recibidas, buscaron las armas del viejo. Las armas se encontraban en el techo, encima de la hamaca donde dormía Ameore. Estaban superpuestas; la que estaba arriba era el macho y la de debajo, por supuesto, la hembra. Debían coger la de encima y reemplazarla por un palo de yarumo (madera muy blanda). Las armas eran rayos, pero tenían formas de mazos. Al lado de las macanas¹¹ se encontraba el espejo¹². Le echaron mano a todo eso y salieron corriendo con precipitación. Cuando encontraron a la hija en la horqueta del camino, el pícaro Fizido le arrebató la pepa de caimo y por esa razón ella se despertó.

Al ver la muchacha que se llevaban el mazo del papá, corrió hacia la casa dando la alarma. Encontró al viejo dormido y le dio mucha brega despertarlo. Ameore, entre sueños, apenas se meneaba un poco y su hija terminó por decirle que se despertara bien porque le estaban robando las armas. Él, todavía adormilado, se levantó y echó mano a la macana de encima, tal como acostumbraba a proceder en caso de peligro. Con eso en la mano los persiguió, pero al lanzarles el golpe el arma no aguantó, por ser un simple palo de yarumo, y se partió por la mitad.

Al ver que no podía alcanzarlos regresó a su maloca y echó mano de la macana hembra y con eso continuó la persecución. Ya casi les daba alcance cuando el espíritu consejero le dijo a Jitoma:

–Tú no vas a vivir. Tú alardeas diciendo que eres muy hombre, que eres muy poderoso. ¡A ver qué haces! Ponte encima una piedra como paraguas.

Así lo hizo y pudieron caminar por debajo, como por entre un túnel, dejando a Dueño-del-rayo detrás.

Luego de burlar a su enemigo se pusieron a probar la fuerza de las armas en un palo llamado keretena, de madera muy dura. Fizido con el espejo en la mano se paró frente a ese palo, en tanto que Jitoma

11 Se denomina macana a los mazos; éstos muchas veces se confeccionan con madera de la palma de macana. Mazo, garrote: *bigi*.

12 El papel del espejo es simular el resplandor del relámpago.

empuñaba el mazo. Fizido manipuló el espejo haciéndolo relampaguear, y Jitoma golpeó con mucha fuerza el mazo contra la tierra. Así se produjo el rayo con el que volaron el palo en mil pedazos. Pero también el golpe alcanzó a Fizido, cuyo cuerpo quedó completamente desperdigado en fragmentos. El espíritu dio su aprobación diciendo que sí estaba bueno y agregó:

–A ver: si eres poderoso reconstruye a tu hermano. Recoge los pedazos en la hoja-de-las-gentes y sóplalos diciendo: "Nace, nace, nace, así como nació nuestro padre".

Así lo hizo Sol y su hermano se paró completo¹³. Luego de esta prueba continuaron su camino rumbo al sitio donde se erguía Yarokamena. Encontraron a Gusano-exterminador echando chispas, sediento de venganza. En la copa del árbol estaba el sirviente de Yaroikaigiro, era el pájaro-ardita que al ver aproximarse a los Jitoma comenzó a revolotear sobre el gusano poniéndolo alerta para que repeliera el ataque.

Los hermanos mostraron el sueño desde lejos y tanto el pájaro como el gusano se quedaron dormidos. En seguida la pareja de héroes tomó sus posiciones respectivas. De nuevo Fizido manipuló el espejo y Jitoma, accionando el mazo, lanzó el rayo contra el palo y el gusano. El animal fue trozado por mitad y el árbol que lo sustentaba quedó en mil pedazos. También en esta oportunidad Fizido desapareció a causa del golpe.

Ahí terminó definitivamente la vida y el poder de Kitobeni, luego de haber tomado venganza por causa de la mujer que lo había insultado. Volviéndose poderoso llevó la destrucción a los hombres, hasta que Jitoma vengó a su vez la muerte de tanta gente¹⁴. Derrotado el enemigo, Jitoma tiró el mazo al agua lanzando una maldición:

–De ahora en adelante, todos los que nazcan conocerán a este animal como temblón, producirá descargas violentas que matarán a las personas que lo agarren dentro del agua. También tiró el espejo al agua convirtiéndolo en raya. La cabeza de la bestia cayó en la selva y se transformó en danta, mientras la parte de la cola cayó al agua y dio origen a la vacamarina¹⁵.

13 Hay versiones en las que Fizido queda incompleto; el fragmento o los fragmentos faltantes se convierten en otros tantos animales pequeños.

14 La venganza, por justa que sea, siempre acarrea desgracia al retaliador, sobre todo cuando actúa individualmente.

15 Animales cargados de poder; de ellos especialmente se sirven los hechiceros. Este poder no siempre corre parejo con su real peligrosidad; les viene de circunstancias míticas coyunturales.

Referencias

- Arévalo, Alberto, *Poesía indígena de América*, Bogotá, 1988.
- Branston, Brian, *Mitología germánica ilustrada*, Barcelona, Ed. Vergara S.A., 1960.
- Bronowski, J., *El ascenso del hombre*, Fondo Educativo Interamericano S.A., 1983.
- Canejo, Silvia, *El universo mítico de los mayas en encuentro de dos mundos*, Panamá, Ed. Oclae, 1989.
- Da Andrade, E. N., *Los primeros imanes*, Endeavour, enero de 1958, pp. 22-30.
- Fajardo, M., "Santa Bárbara: conjuro de las tempestades", Exposición, Museo de arte religioso, Bogotá, diciembre de 1992.
- Fernández, A., *Dioses prehispánicos de México*, México, Ed. Panorama, 1992.
- Gerhard-Mulhaupt, "Biographies of Contributors to the Early Investigation of Electrical Phenomena", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 26, No. 1, Feb. 1991.
- Golde, R.H., *Lightning*, New York, Academic Press, 1977.
- Krickeberg, Walter, *Mitos y leyendas de los aztecas, mayas y muiscas*, México, Fondo de Cultura Económica, 1985.
- Kuhn, T. S., *La estructura de las revoluciones científicas*, México, Fondo de Cultura Económica, 1986.
- Poveda, G., *Ingeniería e historia de las técnicas*, Bogotá, Colciencias, Tercer Mundo Editores, 1993.
- Prinz, Hans, *Gewittwerblitze in Mythologie und Wissenschaft*, Muenchen, F. Bruckmann KG, 1965.
- Rose, H. J., *Mitología griega*, Barcelona, Ed. Labor S.A., 1970.
- Sodi, Demetrio, *La literatura de los mayas*, México, Ed. Joaquín Martí, 1983.
- Torres, H., Castaño, O., *El rayo*, Santa Fe de Bogotá, Ed. Icontec, 1994.
- Urbina, F., "Un mito de la gente de Murui: de cómo se crió Yarokamena", *Revista Maguaré*, No. 4, Departamento de Antropología, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1986.
- Urbina, F., "Mitos, iniciaciones y misterios - El mito del árbol poderoso y del gusano exterminador", *Hojas universitarias*, revista de la Universidad Central, No. 49, Bogotá, 2000.
- Wright, Ch., *The Great AC/DC War*, IEEE Potentials, 1988.

La moderna visión científica del rayo

El paradigma de la electricidad

Hacia el año 600 a. C., ya era conocida la piedra imán (del árabe *imam*: jefe, "el que guía"; piedra que guía). Esta es una variedad de magnetita (Fe_3O_4) que tiene propiedades magnéticas en su estado natural y debe su nombre original, *magnes*, a Magnesia, comarca de la antigua Tesalia. Tales de Mileto conoció de sus propiedades, y varios de los filósofos griegos entre 400 y 200 a. C. mencionan su facultad de atracción. Lucrecio, en el año 1042 escribe en su obra *De natura rerum*: "Ocurre a veces que la materia del hierro es repelida por la piedra, unas veces apartándose súbitamente y siguiéndolo otras".

Los primeros imanes permanentes artificiales eran agujas de hierro que habían estado en contacto directo con una piedra imán. Peter Peregrinus, hacia el año 1269, en su *Epistola ad Sygerum de Foucaucourt militem de magnete*, escribió que un trozo de hierro alargado que hubiera sido frotado con una piedra imán, giraba apuntando hacia el norte si se ponía en una madera flotante.

Robert Norman, en el año 1581, escribía en su libro *The New Attractive* sobre las agujas tocadas por la piedra, pero sin entrar en detalles.

A principios de 1700 se publicó en Inglaterra la primera especulación sobre las descargas eléctricas atmosféricas en la que se planteaba que los relámpagos y los truenos podían estar relacionados con la luz y el sonido, por las características de la chispa o arco eléctrico, especulación ésta que siglos antes ya había sido interpretada por la cultura inca mediante el dios Ilyapa.

Anterior a Franklin, el inglés Stephen Gray descubrió en 1729 que la electricidad podía ser comunicada a grandes distancias, por medio de contacto; es decir, descubrió la conductividad de los materiales y estableció la diferencia entre cuerpos conductores y no conductores.

Hacia finales del siglo XVIII, las mediciones precisas llegaron a ser un objetivo importante en los experimentos físicos. Entonces la expresión "fluidos sutiles" (*subtle fluids*) fue usada para fenómenos que comenzaban a ser remplazados por leyes cuantitativas, las cuales hacían a los fenómenos físicos más predecibles, o más entendibles.

El concepto de fluido sutil fue un paso necesario en el proceso de cuantificación. Un fluido "sutil" o "imponderable" era una sustancia que poseía propiedades físicas pero no era como una materia ordinaria. Los mejores ejemplos de fluidos sutiles fueron el calor y el fuego eléctrico o la electricidad.



Figura 1. Generador de electricidad estática, siglo XVIII.

La investigación sobre la electricidad se debatió a mediados del siglo XVIII entre innumerables teorías como investigadores había, antes de obtener el primer paradigma universalmente aceptado.

Algunas teorías consideraban la atracción y la generación por fricción como el fenómeno eléctrico fundamental, y la repulsión como un efecto secundario de naturaleza mecánica. Otro grupo de electricistas juzgó la atracción y la repulsión como manifestaciones igualmente elementales de la electricidad, pero tuvieron problemas para explicar efectos simples como el de la conducción.

Estos efectos proporcionaron el punto de partida para un tercer grupo que consideraba la electricidad como un "fluido sutil" que podía circular a través de los conductores, en lugar de un "efluvio" que emanaba de los no conductores. Sin embargo, este grupo tenía dificultades para reconciliar su teoría con numerosos efectos de atracción y repulsión.

Solamente con los trabajos de Franklin y de sus seguidores inmediatos surgió una teoría que podía explicar casi todos esos efectos, proporcionando así un paradigma para las investigaciones subsiguientes. La teoría de Franklin suponía que cierta cantidad de un único fluido determinaría el estado neutro; un exceso

o defecto daría electricidad de distinta clase. Conforme a esta suposición, sugirió llamar a la electricidad vítrea "positiva" y a la resinosa, "negativa".

El frotamiento de vidrio con seda o ámbar con piel –afirmó Franklin–, modificaría la distribución del fluido en el cuerpo frotado y en el frotador; uno pierde electricidad y el otro la gana. La teoría de Franklin fue una primera aproximación a la realidad. Si un cuerpo está electrizado, su equilibrio electrónico se encuentra perturbado; esta idea es común a la tesis de Franklin y a la teoría actual.



Figura 2. Experimento de la caja centinela, propuesto por Franklin en 1749.

Franklin propuso en 1749 su experimento de la "caja centinela", en la cual una persona estando en un banquillo aislado, sosteniendo una varilla de acero terminada en punta y extendida verticalmente varios metros, podía atraer un arco de una nube de tormenta que pasara por encima. Éste fue el principio de la hoy conocida "jaula de Faraday", una de cuyas interpretaciones fue diseñada e instalada por el autor en el Centro Interactivo de Ciencia y Tecnología Maloka, en la ciudad de Bogotá.

En mayo de 1752, el francés François D'Alibard realizó el experimento con éxito. Mientras tanto Franklin, un mes más tarde en Filadelfia, Estados Unidos, usó una cometa como conductor para atraer la electricidad con un cordel húmedo, colocándola dentro de una nube tormentosa.

Para atraer corriente a tierra, el cordel tenía en la parte baja una llave metálica colgada. El salto de un arco de la llave a tierra o el cargar un condensador como el "jarrón de Leyden" sería la demostración de su teoría.

Franklin realizó este experimento bajo una nube de tormenta en junio de 1752. Lo más probable es que no hubiese habido una descarga eléctrica atmosférica durante el experimento,



Figura 3. Experimento de D'Alibard, mayo 10 de 1752. Marly, París.

sino que el campo eléctrico presente entre nube y tierra indujo electricidad en la llave. De la llave metálica colgada al final del cordel de la cometa saltaron chispas a los nudillos de su mano. Así había verificado su teoría, sin saber que D'Alibard había obtenido similares resultados un mes antes.

Tanto Franklin como D'Alibard, además de juiciosos investigadores, contaron con una gran suerte, pues en sus experimentos sus vidas corrieron grave peligro, posiblemente sin ellos saberlo. El físico sueco W. Richmann, que trabajaba en San Petersburgo (Rusia), no corrió con la misma suerte de sus colegas y murió en 1753 cuando llevaba a cabo su versión del experimento de la "caja centinela".

Una consecuencia del experimento de Franklin, y la primera aplicación práctica del estudio de la electricidad, fue el pararrayos. Los primeros fueron usados para propósitos de protección en 1752 en Francia, y más tarde en el mismo año en los Estados Unidos.

Es importante señalar una apreciación errónea de Franklin que aún hoy en día la tienen personas o ingenieros que trabajan en el campo de protección de estructuras contra rayos: Franklin originalmente pensó –erróneamente– que el pararrayos tácitamente descargaba la carga eléctrica presente en una nube de tormenta, y por tanto "prevenía" los rayos. En 1755 afirmó: "Yo he mencionado en varios de mis artículos, excepto en uno, que las varillas puntiagudas colocadas verticalmente sobre edificios y conectadas con la tierra húmeda podrían prevenir una descarga, o si no la previenen podrían conducirla para que el edificio no sufra daños"¹.

Las campanas de la época medieval europea frecuentemente llevaban la inscripción latina "*Fulgura Frango*" (disperso los rayos).

Además de demostrar que las nubes contenían electricidad, Franklin, por mediciones del signo de la carga entregada a las varillas en su experimento de la "caja centinela" y el experimento del carillón, cuando la nube de tormenta se encontra-



Figura 4. Muerte del profesor Richmann, agosto 6 de 1753 en San Petersburgo



Figura 5. Franklin y su hijo en el experimento de la cometa, junio 1752



Figura 6. Experimento del carillón de Franklin para determinar la polaridad de la nube.

¹ Traducción libre al español del libro de Benjamin Franklin, *Experiments and Observations on Electricity made at Philadelphia*, E. Cave, ed., London, 1774, referenciado en M. Uman, *The Lightning Discharge*, Academic Press, p. 6.



Figura 7. El paraguas pararrayos de Barbeu-Dubourg, Francia, finales del siglo XVIII



Figura 8. El sombrero pararrayos de las damas de París, 1778.

ba encima, pudo inferir que la parte baja de las nubes de tormenta estaban cargadas por lo general negativamente pero algunas veces se encontraban en estado positivo.

El invento de Franklin recibió amplia aplicación a escala mundial, hasta el extremo de convertirse en el siglo XVIII en mito de la moda francesa, con los *chapeau-paratonnerre des dames* por *défendre du feu du ciel les précieuses têtes des jolies femme* (sombreros pararrayos de damas para defender del fuego del cielo las preciosas cabezas de las lindas damas) y *le parapluie-paratonnerre* (el paraguas pararrayos) de Barbeu-Dubourg de finales del siglo XVIII.

Un hecho anecdótico de la época es que Franklin razonaba que el pararrayos funcionaría mejor con un extremo en punta. Esto fue rebatido por algunos científicos que eran partidarios de un extremo redondeado. La disputa se resolvió a un nivel primitivo y elevado: el Rey Jorge III, encolerizado contra la revolución norteamericana, ordenó instalar extremos redondeados en los pararrayos de los edificios reales de Inglaterra.

Desde la época en que Franklin inventó el pararrayos con varillas terminadas en punta aguda (*sharp rods*), muchos físicos han mostrado que, bajo fuertes intensidades de campos eléctricos, el aire alrededor de la punta se ioniza, creando carga espacial que actúa para debilitar esos campos.

También ha sido descubierto que los esfuerzos (*strengths*) de los fuertes campos alrededor de la punta aguda (*sharp*) decrecen tan rápidamente con la distancia, que ellos llegan a debilitarlos más que con puntas romas (*blunts*) a distancias mayores de 6 mm.

De otro lado, se ha encontrado que el campo eléctrico local tiene que llegar a ser muy fuerte para que un *streamer* ascendente se propague desde una varilla expuesta para interceptar la descarga que se aproxima.

De pruebas de laboratorio y experimentos recientes en campo, se ha establecido que la intensidad del campo crítico para interceptar descargas se desarrolla más temprano alrededor de una varilla con punta roma (*blunt rod*) que alrededor de

una varilla con punta aguda (*sharp rod*), con lo cual los campos son limitados por sus emisiones de carga. En efecto, las varillas con punta aguda (*sharp rods*) tienden a protegerse ellas mismas, por sus emisiones de carga, contra los impactos por rayos.

En una reciente comparación entre varillas con punta roma (*blunt rods*) y varillas con punta aguda (*sharp rods*), para determinar qué tipo era preferencialmente impactado por un rayo, diez varillas con punta roma (*blunt*) fueron impactadas, mientras que ninguna de las varillas con punta aguda (*sharp*) fue alcanzada, aunque estas últimas emitieron copiosas descargas corona. Experimentos recientes² sugieren que el radio óptimo de curvatura para varillas con punta roma para interceptación de rayos es de mínimo 4,8 mm y máximo de 12,7 mm.

Las bases teóricas de la electricidad

A principios de 1820, Ampère produjo una teoría que combinaba la electricidad y el magnetismo, inmediatamente después de escuchar acerca de los resultados del físico danés Hans Christian Oersted. Ampère formuló una ley de fuerza en un circuito eléctrico, y trató el magnetismo postulando pequeños circuitos cerrados dentro de la sustancia magnética. Los trabajos de Oersted fueron reportados a la Academia de París el 4 de septiembre de 1820. Ampère demostró varios efectos eléctricos y magnéticos ante la Academia, unas semanas después. A finales de septiembre de 1820, Ampère había descubierto las fuerzas electrodinámicas en alambres conductores. En 1826 publicó su más importante obra sobre electricidad y magnetismo, *Memorias sobre la teoría matemática del fenómeno electrodinámico*, deducida exclusivamente de experimentos.



Figura 9. Experimento sobre electromagnetismo del danés Oersted.

² Propuesta del físico Charles Moore (Langmuir Laboratory, New Mexico Tech) presentada en el informe técnico para ser incluida en la versión de la NFPA 780 del año 2000.



Figura 10. Michael Faraday, 1791-1867.

En 1821, poco después de que el danés Oersted descubriera el fenómeno del electromagnetismo, el físico y químico inglés Michael Faraday construyó dos aparatos para producir lo que él llamó rotación electromagnética: un movimiento circular de una fuerza magnética circular alrededor de un alambre. En 1831, él comenzó su gran serie de experimentos con los cuales descubrió la inducción electromagnética. Estos experimentos son la base de la tecnología electromagnética moderna.

El 29 de agosto de 1831, usando su "anillo de inducción", Faraday hizo uno de sus grandes descubrimientos sobre la inducción electromagnética: la "inducción" o generación de electricidad en un alambre por medio del efecto electromagnético de una corriente en otro alambre. El anillo de inducción fue el primer transformador eléctrico. En una segunda serie de experimentos, en septiembre, descubrió la inducción magneto-eléctrica: la producción de una corriente eléctrica. Para hacer esto, Faraday unió dos alambres a través de un contacto deslizante a un disco de cobre. Por rotación del disco entre los polos de un magneto en forma de herradura, él obtuvo una corriente directa (DC) continua. Éste constituyó el primer generador.

Aunque ninguno de los aparatos de Faraday son de uso práctico hoy en día, ellos mejoraron inmensamente el entendimiento teórico de la electricidad y el magnetismo. Faraday describió estos experimentos en dos artículos presentados a la Royal Society de Inglaterra el 24 de noviembre de 1831 y el 12 de enero de 1832. Correspondieron a la primera y segunda parte de sus "Investigaciones experimentales sobre electricidad" (*Experimental researches into electricity*) en las cuales él presentó su "ley que gobierna la evolución de la electricidad por inducción magneto-eléctrica".

Después de leer los artículos, un joven francés, Hyppolyte Pixii, construyó un generador eléctrico utilizando el movimiento rotacional entre el magneto y la bobina, no como el de Faraday, logrando un movimiento de aquí para allá en una línea recta. Todos los generadores que se utilizan hoy en día en las centrales generadoras de energía son descendientes directos de la máquina desarrollada por Pixii a partir de los principios de Faraday.

La teoría de Ampère fue fundamental para los desarrollos de electricidad y magnetismo del siglo XIX. Faraday descubrió la inducción electromagnética en 1831 y, después de que inicialmente creyera que él mismo había descubierto el efecto en 1822, Ampère estuvo de acuerdo en que el crédito total por el descubrimiento debería dársele a Faraday.

En 1873, el científico inglés James Clerk Maxwell presentó en forma matemática, ante la comunidad científica mundial, las cuatro ecuaciones diferenciales parciales, las cuales conforman el paradigma de la actual teoría electromagnética.

Estas cuatro ecuaciones se presentan en forma diferencial e integral y en función del tiempo en la tabla 1.



Figura 11. James Clerk Maxwell, 1831-1879.

Tabla 1.
Ecuaciones de Maxwell en forma diferencial e integral y en función del tiempo.

Forma diferencial	Unidades	Forma integral
$\nabla(\epsilon_0 \mathbf{E}) = \rho_v$	[Coul/m ³]	$\oint_S \epsilon_0 \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = \int_V \rho_v \cdot dV$
$\nabla \mathbf{B} = 0$	[tesla]	$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0$
$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	[V/m ²]	$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$
$\nabla \times \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} = \mathbf{J} + \frac{\partial(\epsilon_0 \mathbf{E})}{\partial t}$	[A/m ²]	$\oint_S \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} + \frac{d}{dt} \int_S \epsilon_0 \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}$

El vector de intensidad de campo eléctrico E tiene como unidades la fuerza por unidad de carga (newtons por culombios), mientras que el vector de densidad de flujo magnético B tiene como unidad el weber por metro cuadrado o tesla.

De acuerdo con el cálculo vectorial, el operador nabla (por su parecido con cierta lira antigua de Oriente Medio) expresa cómo varían los campos eléctrico (E) y magnético (B) en el espacio tridimensional.

Matemáticamente, el gradiente (escrito grad) de un campo escalar f es expresado en coordenadas rectangulares como:

$$\text{grad } f = \mathbf{a}_x \frac{\partial f}{\partial x} + \mathbf{a}_y \frac{\partial f}{\partial y} + \mathbf{a}_z \frac{\partial f}{\partial z} \quad (1)$$

La presencia de una función común f en cada término de la ecuación (1) permite separar de esta expresión un operador vectorial de derivadas parciales, el cual se conoce como ∇ :

$$\nabla = \mathbf{a}_x \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{a}_y \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{a}_z \frac{\partial}{\partial z} \quad (2)$$

Por tanto:

$$\text{grad} \equiv \nabla f \quad (3)$$

El "producto punto: ." y el "producto cruz: x", después de ∇ denotan dos tipos diferentes de variación espacial. El primero es una variación escalar y el segundo una vectorial. J representa una corriente eléctrica, mientras que ρ representa la densidad de las cargas eléctricas. ϵ_0 y μ_0 no son variables, sino propiedades del medio en que se miden E y B , y determinadas mediante experimentación. En el espacio libre estas constantes de la naturaleza son:

$$\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \text{ F/m}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

Las cuatro ecuaciones de Maxwell se conocen en la literatura con otros nombres en honor a aquellos científicos que hicieron posible el entendimiento del fenómeno electromagnético.

La primera de las cuatro ecuaciones de Maxwell expresa cómo un campo eléctrico, debido a cargas eléctricas (electrones, por ejemplo) varía con la distancia, es decir, se debilita cuanto más se aleja de su punto de medición. Pero, cuanto mayor es la densidad de carga, más fuerte es el campo. Esta ecuación también se conoce como Ley de Gauss para campo eléctrico en espacio libre, y se interpreta que la integral de la cantidad $(\epsilon_0 E) \cdot ds$ sobre una superficie cerrada s es una medida de la cantidad de carga eléctrica $\int \rho \cdot dv = q$ que está contenida solamente dentro del volumen V que rodea la superficie s .

La segunda ecuación de Maxwell expresa que no se puede hacer una afirmación comparable a la anterior para magnetismo, porque las "cargas" magnéticas, que suponía Mesmer, no existen. Por ejemplo, si se corta un imán por la mitad, no existirá un polo norte aislado y un polo sur aislado; cada parte de las cortadas tendrá sus polos norte y sur.

Esta segunda ecuación de Maxwell también se conoce como Ley de Gauss para campos magnéticos, y especifica que la densidad de campo magnético neto (positivo o negativo) que emana de cualquier superficie cerrada s en el espacio será siempre cero. Es decir, ley de conservación de la energía: lo que entra es igual a lo que sale.

La tercera ecuación de Maxwell describe cómo un campo magnético variable induce un campo eléctrico. Esta ecuación también se conoce como Ley de Faraday o Ley de la fuerza electromotriz inducida (EMF por sus siglas en inglés), en honor a los trabajos experimentales del físico inglés. La Ley de Faraday establece que la rata de tiempo de decrecimiento del flujo magnético neto que atraviesa cualquier superficie arbitraria s es igual a la integral del campo E alrededor de la línea cerrada que rodea s . Esto es equivalente a decir que un campo E es generado por un flujo magnético variable con el tiempo. El campo E también tiene que variar con el tiempo para satisfacer la ecuación en cada instante. Para campos eléctricos estrictamente estáticos en el tiempo, la Ley de Faraday será igual a cero.

La cuarta ecuación de Maxwell describe lo contrario a la tercera: cómo un campo eléctrico variable con el tiempo (o una corriente eléctrica) induce un campo magnético.

Frecuentemente a esta ecuación se le llama Ley de Ampère circuital en espacio libre. Esta ecuación indica que la integral de línea del campo B (modificado por la permeabilidad del medio) alrededor de cualquier camino arbitrario cerrado l tiene que, en cualquier tiempo t , ser igual a la suma de la corriente eléctrica neta i más la rata de tiempo de cambio del flujo eléctrico neto, que pasa a través de la superficie s limitada por l .

Para el espacio vacío, Maxwell sugirió que la forma correcta de sus ecuaciones era:

$$\begin{aligned}\nabla(\epsilon_0 E) &= 0 \\ \nabla B &= 0 \\ \nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times \frac{B}{\mu_0} &= \frac{\partial(\epsilon_0 E)}{\partial t}\end{aligned}\tag{4}$$

Maxwell consideró que en el espacio vacío no existen ni cargas ni corrientes eléctricas, mientras que sí existe una débil corriente de desplazamiento, $\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$ en dieléctricos, de acuerdo con la cuarta ecuación. Maxwell mantuvo la simetría entre los campos eléctrico y magnético; un campo magnético variable genera un campo eléctrico y viceversa.

Con estas consideraciones Maxwell demostró que E y B se propagaban por el espacio vacío como si fueran ondas con una velocidad c que calculó como:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}\tag{5}$$

Asombrosamente, Maxwell encontró que las ondas electromagnéticas se propagaban en vacío a la velocidad de la luz; el vacío parecía actuar como dieléctrico. Maxwell vivía en una sociedad mecanicista y propuso un modelo mecánico para la propagación de una onda electromagnética a través de un vacío perfecto. Así, se imaginó el espacio lleno de una sustancia gelatinosa, invisible, incorpórea, a la que llamó éter. Las vibraciones del éter eran la razón por la que la luz viajaba a través de él, igual que las ondas de agua se propagan por el agua y las ondas de sonido por el aire.

La teoría del éter llevaría cuarenta años más tarde a la teoría especial de la relatividad de Einstein, quien demostró de manera concluyente que no hay un éter que sostenga la propagación de ondas electromagnéticas. La onda avanza por sí sola. El campo eléctrico variable genera un campo magnético, y el campo magnético variable genera un campo eléctrico.

Las ecuaciones de Maxwell muestran que un campo eléctrico rápidamente variable debería generar ondas electromagnéticas. En 1888, el físico alemán Heinrich Hertz realizó el experimento y encontró que había generado una nueva especie de radiación, ondas de radio. A principios de siglo, el ingeniero croata Nikola Tesla patentó en Estados Unidos la utilización de ondas de radio para la comunicación sin hilos, aunque los aplausos de este hallazgo se los llevó injustamente el italiano Marconi.

De esta manera el hombre comenzaba a pasar de una visión del mundo en la que la transformación de la energía estaba concentrada en cuatro elementos: agua - aire - fuego y tierra, a una visión intrínseca de estos elementos. Este paso se concreta hacia finales del siglo XIX, con el descubrimiento del electrón y el inicio de la investigación sobre las partículas fundamentales. Así, la ciencia moderna proporciona paradigmas para el entendimiento de la composición de la materia, tales que hoy en día es posible entender lo que hace cientos de años se explicaba en el lenguaje del mito.

El ingeniero electricista croata-norteamericano Nikola Tesla fue el científico que más importantes aportes hizo para el desarrollo de la ciencia y la tecnología de la electricidad en los últimos cien años. Durante sus 87 años de vida (1856-1943), la mayoría con

residencia en los Estados Unidos, desde 1884 hasta su muerte, los dedicó a la investigación sobre diferentes temas de la física: electricidad, electromagnetismo, descargas eléctricas atmosféricas, altas y bajas frecuencias, adelantándose en muchas décadas a la física de su tiempo y abriendo fronteras para dar paso al nacimiento, hoy en día, de grandes programas de investigación sobre la atmósfera terrestre.



Figura 12. Nikola Tesla (1856-1943).

Por diferentes razones, una de ellas política, sólo se le reconoce vagamente por la unidad de medida física de la densidad del campo magnético que lleva su apellido: el tesla. Sin embargo, sus inventos y descubrimientos como la corriente alterna (AC), el motor de AC, el transformador, la radio, el control remoto, la luz fluorescente, la radio imagen (precursor del radar), el velocímetro del automóvil, entre muchos otros, han contribuido, como pocos, al desarrollo de la sociedad moderna, hasta llegar a ser bautizado como "el inventor del siglo XX".

La guerra de las galaxias, los rayos y la transmisión de potencia eléctrica sin hilos y la telefuerza son apenas tres grandes temas de sus investigaciones que se pueden tomar como ejemplo para mostrar sus aportes a la ciencia y la tecnología.

Se conoce de la física moderna que las bolas de fuego³ son zonas de plasma causadas por flujos de corriente eléctrica. Ellas son hechas de un fuerte campo electromagnético que mantiene ionizado el aire dentro de él. Las bolas de fuego son causadas por un efecto resonante con el campo electromagnético de la Tierra. Para crear una bola de fuego se necesita una gran cantidad de energía; por ejemplo, para formar una de 35 centímetros de diámetro, se necesitan al menos 5 Kw. Una vez el plasma es accionado, éste resonará con los campos eléctricos y magnéticos de la Tierra y se mantendrá por varios segundos.

De los comentarios en sus notas de los experimentos llevados a cabo en Colorado Springs, Estados Unidos, es claro el entendimiento que Tesla tenía para crear plasmas electromagnéticos, setenta años antes de que el término fuera acuñado por la ciencia moderna. Sus patentes fueron llamadas como la fuente de la idea de un arma de coraza de plasma para derribar satélites espías. Esta arma fue construida, probada y mostrada en los Estados Unidos, varias décadas después de la muerte de Tesla, como parte del proyecto "Guerra de las galaxias" (*Star Wars*).

³ Fireballs en inglés.

Los rayos y la transmisión de potencia eléctrica sin hilos



Figura 13. Laboratorio de alta tensión de Tesla en Colorado Springs.

A finales de 1800, Tesla construyó, en Colorado Springs, Estados Unidos, un gran laboratorio para experimentos con alta tensión y equipos sensibles para medición de campo eléctrico. Con estos equipos le fue posible medir los efectos de los rayos cuando las tormentas se movían lejos de su laboratorio. Tesla observó con sus instrumentos que la forma de onda de las descargas crecía hasta un pico y luego decrecía antes de repetir el ciclo total.

Hoy en día conocemos este tipo de ondas como pulsos tipo rayo, y son medidas con antenas de campo electromagnético y osciloscopios.

Tesla se dio cuenta de que este efecto se debía a que la Tierra y su atmósfera estaban cargadas con electricidad, y planteó entonces que la transmisión de energía sin hilos no sólo era posible sino práctica, con las siguientes anotaciones tomadas de su libro de notas⁴:

Imposible como parece, este planeta, a pesar de su vasta extensión, se comporta como un conductor de dimensiones limitadas. La formidable importancia de este hecho en la transmisión de energía para mi sistema ha quedado clara para mí. No sólo lo práctico para enviar mensajes telegráficos sin hilos a cualquier distancia, sino también para grabar en todo el globo la tenue modulación de la voz humana; más lejos aún, para transmitir potencia eléctrica, en cantidades ilimitadas a cualquier distancia terrestre y casi sin pérdidas.

Las observaciones hechas la última noche no son fáciles de olvidar... un maravilloso e interesante resultado desde el punto de vista científico. Esto muestra claramente la existencia de ondas estacionarias. Esto es de importancia inmensa.

Ahora Tesla estaba seguro de que podía usar sus conocimientos de resonancia para transmitir potencia eléctrica sin hilos. Él ya había descubierto que podía hacer un anillo alrededor de la Tierra como una campana, con descargas cada dos horas, y también podía hacerlo resonar eléctricamente.

4 Traducción libre del libro de R. Lomas, *The Man who Invented the Twentieth Century*, London, Ed. Headline Book Publishing, 1999.

Tesla encontró que la frecuencia de resonancia eléctrica de la Tierra era alrededor de 10 ciclos por segundos. Este resultado fue realmente exacto, pues el valor que hoy en día se conoce es alrededor de 8 ciclos por segundo.

La Tierra conductiva y la ionosfera conductiva forman juntas una guía de onda que contiene ondas electromagnéticas naturales de extremada baja frecuencia (ELF, por sus siglas en inglés). Estas ondas son generadas por la actividad global de rayos y el fenómeno se conoce hoy en día como resonancia Schumann.

Varios años después de que Tesla descubriera cómo crear ondas eléctricas permanentes para transmitir potencia alrededor del mundo, el científico alemán W. O. Schumann postuló, en 1952, que la superficie de la Tierra y la ionosfera forman las fronteras de una guía de onda esférica. Frecuencias extremadamente bajas (ELF) pueden viajar alrededor de la Tierra dentro de esta cavidad, y su radiación puede ser medida. Los cálculos iniciales de Schumann sugerían una muy baja frecuencia de resonancia de 10 Hz y una cavidad Q de aproximadamente 12. Avances posteriores⁵ dieron valores para las cinco primeras frecuencias de resonancia de 8, 14.1, 20.3, 26.4 y 32.5 Hz, y una Q de alrededor de 4.

La principal fuente de esta resonancia Schumann es la actividad global de rayos. El rayo es un radiador de energía electromagnética de banda ancha. Una fracción de esta energía cae dentro de una banda estrecha de 5 a 45 Hz, y resuena dentro de la guía esférica formada por la Tierra y la ionosfera. Estos campos se propagan dentro de la cavidad, y pueden ser medidos a grandes distancias de la fuente. De hecho, entre 1995 y 1996, mediante un trabajo de cooperación entre el grupo de investigación PAAS de la Universidad Nacional de Colombia con el Massachusetts Institute of Technology - MIT de los Estados Unidos, se hicieron mediciones de resonancia Schumann en *Rod Island*⁶ y se compararon con tres sistemas localizadores de rayos: dos en Estados Unidos (NLDS⁷ y el Atlántico) y el otro localizado en Colombia (Recma⁸).

Los trabajos de Tesla en radio fueron más avanzados que los de Hertz y Marconi, los otros pioneros de la transmisión sin hilos. Ellos usaron muchas más altas frecuencias que no resonaban con la Tierra. Tesla usó longitudes de onda muy largas para sus ondas de radio. Ellas viajan fácilmente alrededor del planeta y en la actualidad se conocen como ondas tipo muy baja frecuencia (VLF, por sus siglas en inglés) y son estudiadas por diferentes centros de investigación del mundo. Las

5 Balsler y Wagner, 1960.

6 K. Morrison, "Schumann Resonance Q-Burst", BSc. Thesis MIT, septiembre 1996.

7 National Lightning Detection System.

8 La Red colombiana de medición y localización de rayos se compone de tres sistemas, uno de los cuales es el Sistema de información de descargas de ISA.

ondas de radio VLF tienen la ventaja de que pueden ser recibidas en cualquier sitio de la Tierra o en las profundidades del mar para mantener contacto de radio entre naves de superficie y submarinos.

El uso de los trabajos de Tesla, sin embargo, no fue explotado sino muchos años después de su muerte, y aún falta por desarrollar su idea de la transmisión de potencia eléctrica sin hilos, a partir de la resonancia eléctrica en la cavidad Schumann.

La telefuerza

En 1940, unos meses después de cumplir 84 años, Tesla dio una entrevista al periódico *New York Times*, que fue publicada el 22 de septiembre:

Nikola Tesla, uno de los más grandes inventores, quien celebró su octogésimo cuarto aniversario el 10 de julio, dijo a los periodistas que se encontraba listo a divulgar al Gobierno de los Estados Unidos el secreto de su "telefuerza", con la cual, dijo, los motores de los aeroplanos podrían ser fundidos desde distancias de 250 millas, tal que una Muralla China de defensa podría ser construida alrededor del país.

Los periodistas le dieron el nombre de "rayo de la muerte" a su "telefuerza". En 1941, los Estados Unidos entraron de lleno a la Segunda Guerra Mundial, y el 5 de enero de 1943 Tesla habló con el coronel Erskine, del Departamento de Defensa, ofreciéndole los secretos de su arma "telefuerza". Erskine no relacionó quién era Tesla, asumió que era un loco y se olvidó de él. Ese mismo día Tesla murió solitario en una pieza de un hotel de Nueva York, aunque su cuerpo fue encontrado sin vida por una mucama del hotel, el viernes 8 de enero.

Esa misma noche, el coronel Erskine reconoció al hombre que días antes había estado en su oficina, y llamó al FBI diciéndoles que Tesla había muerto. El FBI consultó al consejero de asuntos científicos del vicepresidente Wallace, quien dio la orden de no perder tiempo en hacer lo necesario para preservar todas las pertenencias de Tesla, pues éste había completado y perfeccionado sus experimentos en relación con la transmisión de potencia eléctrica sin hilos y un nuevo torpedo. Los planos y un modelo que había costado US\$10.000 construirlo estaban en la caja de seguridad del Hotel Grosvener Clinton, que Tesla había guardado allí en 1932. El modelo era la "telefuerza" de Tesla.

Un memorando enviado por el director del FBI, Edgar J. Hoover, instruía: "Todo lo concerniente con Nikola Tesla debe ser manejado dentro del mayor secreto para evitar cualquier publicidad respecto a los inventos de Tesla y tomar las

precauciones para preservar los secretos de estas invenciones". De esta manera la vida de Tesla fue declarada *top secret*, y su nombre llevado al olvido.

Irónicamente, la "telefuerza" de Tesla fue real y, recientemente, científicos de los Estados Unidos la están aplicando. El 18 de octubre de 1993, el Departamento de Defensa de los Estados Unidos anunció el inicio de la construcción de una estación experimental de investigación ionosférica en Gakona, Alaska. Esta estación, conocida como programa HAARP (*High Frequency Active Auroral Research Program*) involucra a las universidades de Alaska, Massachusetts, Stanford, Penn State, Tulsa, Clemson, Maryland, Cornell, UCLA y MIT en sus programas de experimentos para estudiar las propiedades resonantes de la Tierra y su atmósfera. La unión con el trabajo de Tesla es evidente. HAARP está estudiando exactamente los mismos fenómenos que Tesla consideró hace más de 100 años en Colorado Springs.

HAARP está basado en las ideas del científico Bernard Eastlund, quien tiene tres patentes norteamericanas (4,686,605-4,712,158-5,038,664) que han sido publicadas como mejoras hechas a las patentes de Tesla luego de sus pruebas en Colorado. Los títulos de las patentes son:

1. Métodos y aparatos para alterar una región en la atmósfera de la Tierra.
2. Ionosfera y magnetosfera, métodos y aparatos para crear un ciclotrón artificial calentando una región de plasma.
3. Método para producir una coraza de partículas a una altitud sobre la superficie de la Tierra.

Esta última patente, que describe un apantallamiento antimisiles que puede destruir la electrónica de misiles hostiles o satélites, es la realización de la "telefuerza" de Tesla. Este trabajo se hace creando un paquete de plasma de partículas de alta energía como las bolas de rayo que generó Tesla en Colorado, pero a gran escala.

Hay otro hecho significativo sobre uno de los trabajos de Tesla: haber ganado una batalla jurídica contra Marconi por su patente cuando, seis meses después de su muerte, la Alta Corte de los Estados Unidos confirmó que Nikola Tesla era quien realmente había inventado la radio. Éste fue sólo un justo reconocimiento póstumo, pues ambas patentes habían expirado y los dos inventores ya habían muerto.

Nikola Tesla murió según fue su vida: solitario y trabajando. Fue muy individualista y nunca formó una relación cercana con hombre o mujer alguno, a pesar de su amplia cultura y el dominio de varios idiomas. Fue el arquetipo del científico del siglo XIX.

Su memoria fue confinada a años de oscuridad por su último alarmante ofrecimiento que produjo pánico en el Gobierno norteamericano en tiempos de guerra. Fue un ingeniero y científico brillante que iba más allá de la teoría, un profeta que

realmente vio el futuro, pero que, injustamente, no fue reconocido en su tiempo y aún hoy muchos intentan desconocerlo.

Bases teóricas de la teoría de descarga en gases

Para comprender mejor la teoría de la descarga eléctrica atmosférica es necesario hacer una breve introducción a las dos teorías de descarga en gases actualmente reconocidas por la comunidad académica internacional: la teoría de Townsend y la teoría de canales.

Teoría de Townsend para la descarga eléctrica en gases

La investigación que realizó Townsend para formular su teoría de descarga en gases se basó en el planteamiento de dos coeficientes que modelan tanto el comportamiento de las moléculas del gas, como la influencia de los electrodos en el proceso de la descarga eléctrica en gases.

Primer coeficiente de Townsend

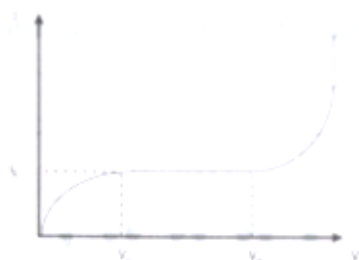


Gráfico 1.
Relación tensión-corriente
antes de la descarga.

Townsend estudió el comportamiento dieléctrico de los gases mediante el análisis de la variación de la corriente medida entre dos electrodos paralelos en función de la tensión aplicada⁹, encontrando que esta corriente se incrementa proporcionalmente con la tensión, hasta un valor a partir del cual se satura, como se aprecia en el gráfico 1.

El valor de saturación de corriente puede ser superado incrementando el voltaje, con lo cual la corriente presentará un comportamiento exponencial, el cual fue explicado en términos del número de pares de electrones disociados producidos por un electrón que se desplaza un centímetro dentro y en la dirección del campo eléctrico. A este concepto Townsend le llamó el "primer coeficiente de ionización".

⁹ J. S. Townsend, *Electricity in gases*, Ed. Oxford, 1914.

Para una distancia x_0 se tienen n_0 electrones libres. Al asumir que n es el número total de electrones a una distancia x del cátodo, el incremento de electrones n a una distancia x está dado por:

$$\begin{aligned} \Delta_n &= n\alpha\Delta_x \\ \lim \frac{\Delta_n}{\Delta_x} &= \frac{dn}{dx} = n\alpha \\ \int_{n_0}^n \frac{dn}{n} &= \int_{x_0}^x \alpha dx \\ \ln \frac{n}{n_0} &= \int_{x_0}^x \alpha dx \\ \frac{n}{n_0} &= e^{\int_{x_0}^x \alpha dx} \end{aligned} \tag{6}$$

La ecuación (6) puede ser empleada en términos de corriente

$$\frac{I}{I_0} = e^{\int_{x_0}^x \alpha dx} \tag{7}$$

El término $e^{\int_{x_0}^x \alpha dx}$ en la ecuación (6) es llamado "Ley de avalancha de electrones" y representa el número de electrones producidos por un electrón en su viaje desde el cátodo hasta el ánodo.

La multiplicación de electrones dentro de la avalancha se muestra esquemáticamente en el gráfico 2.

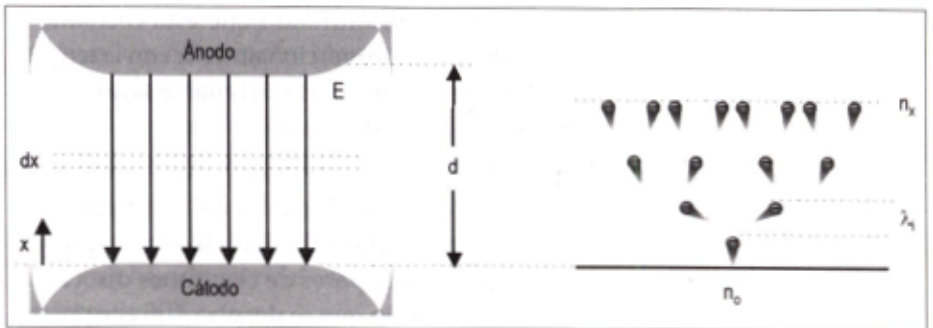


Gráfico2. Representación esquemática de la multiplicación de electrones dentro de la avalancha de electrones.

La probabilidad de ionización dependerá de la intensidad del campo eléctrico E aplicado y de la densidad o presión p del gas; por tanto:

$$\alpha = p f(E/p), \text{ o } \alpha/p \tag{8}$$

$$\alpha/p = f(E/p)$$

En la ecuación (8) se plantea la dependencia de α/p en función de E/p , la cual, por métodos experimentales, conduce a:

$$\alpha/p = \frac{\sigma_i}{kT} e^{-(\sigma_i/kT)(V_i/(E/p))} = A e^{-B/(E/p)} \tag{8 a}$$

$$A = \frac{\sigma_i}{kT}; B = \frac{V_i \sigma_i}{kT}$$

Donde k es la constante universal de Boltzmann y T la temperatura del gas. Las constantes A y B caracterizan el proceso de ionización para determinados rangos de E/p y se pueden determinar experimentalmente¹⁰. La tabla 2 muestra los valores de A y B para algunos de los gases más comunes dentro de los rangos especificados de E/p .

Tabla 2.
Constantes A y B para algunos gases. ($T = 20^\circ\text{C}$)

Gas	A [Torr cm] ⁻¹	B [Torr] ⁻¹	Rango E/p [V/Torr cm]
Aire	15	365	100 - 800
H ₂	5	130	150 - 600
N ₂	12	342	100 - 600
CO ₂	20	466	500 - 1000
He	3	34	20 - 150
Hg	20	370	200 - 600

Debido a la ionización por choque, la avalancha de electrones entrega moléculas de gas cargadas positivamente que viajan hacia el cátodo. En razón de que el camino libre medio de las partículas positivas es solamente un cuarto del camino libre medio de las partículas negativas, los iones positivos prácticamente no tienen acción en la ionización por choque. Sin embargo, los iones positivos al golpear con la superficie metálica del electrodo sacan nuevos electrones que se conocen como "electrones de sucesión", pues la energía de salida necesaria es sólo una

¹⁰ A. Von Angel, *Ionised Gases*, 2nd edition, Clarendon Press, 1965.

cuarta parte de la energía de ionización, y la masa de los iones positivos es 1.840 veces mayor que la de los electrones.

Segundo coeficiente de Townsend

De acuerdo con la ecuación (7), una curva de $\log I$ vs. d , debe mostrar una línea recta de pendiente a , si para una presión p dada, E se mantiene constante. Sin embargo, Townsend comprobó experimentalmente¹¹ que, a partir de cierto valor de d , se presenta no linealidad en la curva, tal como lo muestra el gráfico 3.

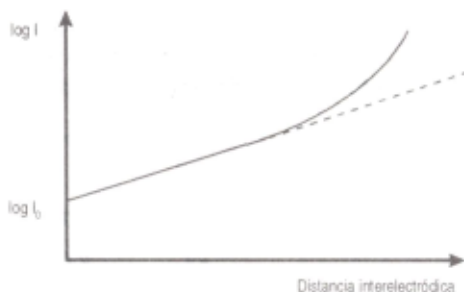


Gráfico 3.
Variación de la corriente en función de la distancia interelectródica.

Para explicar esta no linealidad, Townsend planteó un segundo coeficiente que debía afectar el comportamiento de dicha corriente. Primero consideró la liberación de electrones en el gas ocasionada por la colisión de iones positivos, y posteriormente la liberación de electrones del cátodo por la incidencia de los mismos, de acuerdo con el mecanismo explicado anteriormente. Este segundo coeficiente de Townsend es el número de "electrones de sucesión" que son sacados por los iones positivos al golpear con la superficie metálica del electrodo.

Siguiendo el planteamiento de Townsend, se puede representar el proceso completo teniendo en cuenta ambos coeficientes, α y γ . Tomando n_0 como el número de electrones por segundo procedentes del cátodo debido a la radiación externa, n como el número de electrones por segundo procedentes de todas las fuentes que llegan al ánodo y n_+ como el número de electrones por segundo procedentes del cátodo por emisión secundaria, entonces se tiene que el número total de electrones por segundo que proceden del cátodo es $n_0 + n_+$. La multiplicación de electrones debe cumplir:

$$n = (n_0 + n_+)e^{\int_0^d \alpha x}$$

La diferencia entre el número de electrones que llegan al ánodo y el número de los que abandonan el cátodo es igual al número de iones que llegan al cátodo; por consiguiente:

¹¹ J. S. Townsend, *op. cit.*

eliminando n_+ de las dos ecuaciones anteriores e integrando para una distancia s :

$$\gamma(n - (n_0 + n_+)) = n_+ \quad (9)$$

o en términos de corriente:

$$n = \frac{n_0 e^{\alpha s}}{1 - \gamma(e^{\alpha s} - 1)}$$

Igualmente, recordando la ecuación (6), se puede plantear la siguiente relación:

$$\frac{n}{n_0} = \frac{1 + \gamma}{\gamma} = e^{\alpha s} = e^K \quad (10)$$

$$K = \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)$$

Los valores experimentales de n pueden ser determinados de la ecuación (9) por medio de mediciones de la corriente en el espacio interelectrónico para varias presiones, intensidades de campo eléctrico y longitudes de espacio, usando los correspondientes valores de α . Como es de esperarse de las consideraciones sobre los procesos de emisión de electrones, el valor n es fuertemente afectado por la naturaleza de la superficie del cátodo.

Materiales con energías de trabajo bajas, en las mismas condiciones experimentales, producirán mayores emisiones. El valor n es relativamente pequeño para valores bajos de E/p y se incrementa con el aumento del valor E/p . Esto se debe a que a mayores valores de E/p habrá un mayor número de iones positivos y fotones de suficiente alta energía para sacar electrones cuando impactan sobre la superficie del cátodo.

Llewellyn Jones y Davies¹² han estudiado la influencia de la superficie del cátodo sobre las características del aire y los correspondientes valores de γ , los cuales se presentan en la tabla 3 junto con valores obtenidos de Hilgarth¹³, para algunas combinaciones metal-gas.

12 F. Llewellyn Jones and D. E. Davies, *Proc. Phys. Soc.* B64, 1951.

13 G. Hilgarth, *Hochspannungstechnik*, B. G. Teubner, Stuttgart, 1981.

Tabla 3.
Valores del segundo coeficiente de Townsend para diferentes combinaciones metal-gas.

Gas	Cátodo	V _m [Voltios]	E/p [V/cm.Torr]	γ
Aire contaminado con vapor de Hg	Amalgama de cobre	460	720	0.004
	Película de Hg sobre aluminio	390	885	0.014
	Película de Hg sobre níquel	390	885	0.014
	Película de Hg sobre acero staybrite	390	585	0.006
Aire	Aluminio oxidizado	416	905	0.010
	Níquel oxidizado	421	957	0.010
	Aluminio	-	-	0.035
	Cobre	-	-	0.025
	Hierro	-	-	0.010
Hidrógeno	Aluminio	243	200	0.100
	Aluminio depositado sobre níquel	212	200	0.150
	Níquel	289	180	0.075
	Níquel depositado sobre aluminio	390	245	0.015
	Aluminio comercial	225	200	0.125
	Aluminio sobre acero staybrite	205	210	0.150
	Acero staybrite	274	190	0.075
	Acero depositado sobre aluminio	282	190	0.075
	Cobre	-	-	0.050
	Hierro	-	-	0.060
Nitrógeno	Aluminio	-	-	0.100
	Cobre	-	-	0.065
	Hierro	-	-	0.060

Teoría de canales para la descarga eléctrica en gases

Esta teoría surge de la necesidad de explicar algunos fenómenos de la ruptura dieléctrica, que bajo ciertas condiciones de presión, la teoría de Townsend no aclara satisfactoriamente. Según Townsend, la ruptura debe producirse después del tiempo de tránsito del electrón t_1 , o por lo menos en ese tiempo. Sin embargo, resultados experimentales¹⁴ demostraron que en algunas ocasiones la ruptura ocurría en un tiempo menor a t_1 sin presentarse efectos secundarios o de emisión catódica. Es así como Raether, Meek y Loeb describen el proceso de la ruptura dieléctrica en gases mediante la teoría de canales, dirigidos al cátodo o al ánodo.

Canal dirigido al cátodo

Fue desarrollado por Meek y Loeb para campo uniforme y se puede describir de la siguiente forma: cuando la avalancha electrónica cruza la región interelectródica los portadores de carga negativa son absorbidos por el ánodo, dejando un volumen de cargas positivas de forma cónica, como se aprecia en la figura 14 a).

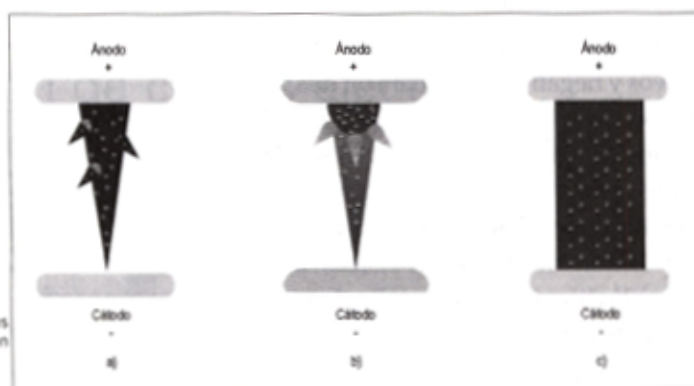


Figura 14. Teoría de canales para la descarga eléctrica en gases. Canal dirigido al cátodo.

Esta región de cargas positivas no es suficiente para producir la descarga, puesto que su densidad es muy baja. No obstante, en el gas que se encuentra alrededor de la avalancha, se producen procesos de fotoionización, generando electrones que sí tienen alta densidad.

Las avalanchas auxiliares, producidas por estos electrones, se generan alrededor de la avalancha principal, intensificando la carga espacial en dirección al

¹⁴ H. Raether, *Electron avalanches and breakdown in gases*, London, Butterworth, 1964; J. M. Meek, and J. D. Craggs, *Electrical breakdown of gases*, Oxford, Clarendon Press, 1953, y L. B. Loeb, *Basic processes of gaseous electronics*, Berkeley, University of California Press, 1955.

cátodo, figura 14 b). Este proceso es, a su vez, ayudado por el refuerzo de campo que produce la carga espacial. El proceso continúa hasta generarse un canal de ionización que se extiende desde el ánodo hasta el cátodo, figura 14 c).

Canal dirigido al ánodo

El desarrollo de esta teoría se debe a Raether. Se basa en el desplazamiento de portadores de carga dentro de la avalancha, los iones positivos hacia el cátodo y los electrones hacia el ánodo, generando una concentración de carga en el espacio interelectródico. La "carga espacial" produce un campo eléctrico que es capaz de distorsionar el campo eléctrico externo, aumentándolo en los extremos de las dos nubes de portadores y debilitándolo en medio de ellas. Dicha distorsión se manifiesta en la transformación de la avalancha en canales de ionización o flameos, que permiten el proceso de la descarga. En la figura 15 se representa la distorsión del campo eléctrico debido a la carga espacial en una avalancha de electrones. La hipótesis del mecanismo de canales de este tipo se fundamenta en la existencia de una primera ionización por impacto, de acuerdo con el segundo coeficiente de Townsend γ , y la fuerte ionización en la cabeza de la carga espacial, debida al efecto fotoeléctrico.

La carga espacial de portadores, positivos y negativos, se separa en dos "esferas", como se aprecia en la figura 15, estando, por su movilidad, más adelante la carga espacial negativa. El tamaño y la forma de las cargas espaciales dependen de variables físicas tales como la difusión en el medio, la velocidad de arrastre de las cargas, la densidad del gas y la temperatura.

Algunas de las principales diferencias entre la teoría de Townsend y la teoría de canales son mencionadas a continuación:

- Para que la avalancha electrónica planteada por Townsend se transforme en canales de ionización, debe alcanzarse una cantidad crítica del número de portadores de carga N_c . Este va-

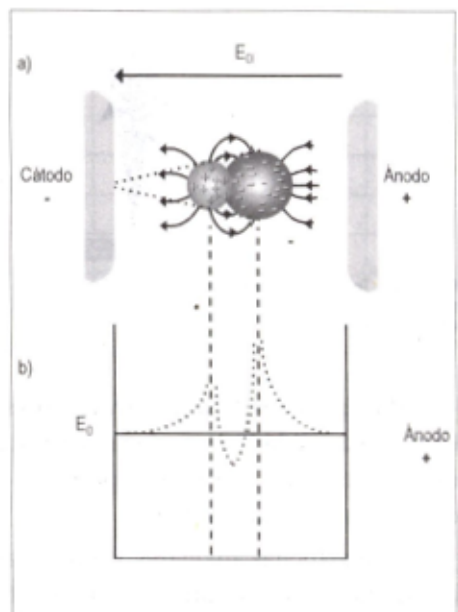


Figura 15. a) Formación de la carga espacial debida a la avalancha de electrones. b) Distorsión del campo eléctrico E_0 debido al campo eléctrico asociado a la carga espacial.

lor corresponde para un campo homogéneo en el aire a un $(pd) = 1500$ [Torr cm].

- El tiempo de formación de la descarga por el mecanismo de canales se estima en un valor cercano a 10^{-7} segundos, mientras que para el mecanismo de Townsend es aproximadamente igual a 10^{-5} segundos, en una separación de un centímetro y bajo condiciones normales de presión.
- El mecanismo de canales tiene su fundamento en la consideración de la carga espacial.
- El mecanismo de ruptura por canales se presenta cuando los efectos en el gas, ionización por iones positivos, fotoionización, etc., predominan sobre los secundarios en los electrodos, incidencia de iones, fotoemisión, etc.
- Sin embargo, si los efectos electródicos que prevalecen son los del gas, se tendría descarga eléctrica según la teoría de Townsend.

Es necesario mencionar que, en los últimos años, se han encontrado algunas inconsistencias en la formulación de la teoría planteada por Meek en 1940, sobre la formación de la descarga eléctrica; sin embargo, la generalización de sus resultados obligan a su actual utilización mientras se realizan estudios más profundos al respecto.

Distribución de cargas eléctricas en nubes de tormenta

Además de demostrar que las nubes contenían electricidad, Franklin, por mediciones del signo de la carga entregada a las varillas en su experimento de la "caja centinela" cuando la nube se encontraba encima, pudo inferir que la parte baja de las nubes de tormenta por lo general estaban cargadas negativamente, pero algunas veces se encontraban en estado positivo.

Pasaron casi dos siglos para que esta ambigüedad provocara la controversia entre los investigadores ingleses C. T. R. Wilson y George C. Simpson sobre la estructura de la distribución de cargas en una nube tormentosa.

Si bien en el siglo XIX personajes del mundo científico como Faraday, Maxwell, Oersted, Herz y muchos otros hicieron importantes aportes científicos al entendimiento de los campos electromagnéticos, hacia 1920 era muy poco el conocimiento que se tenía sobre los campos eléctricos, las corrientes debajo de las nubes de tormenta, el incremento de la conductividad del aire con la altura respecto a Tierra y, en general, sobre la física relacionada con los rayos. Este escaso conocimiento

estaba muy relacionado con el poco desarrollo de la técnica y de los equipos de medición que se tenía para aquella época.

Sin embargo, con estos escasos conocimientos y equipos, el físico inglés C. T. R. Wilson¹⁵ fue el primero en efectuar mediciones de campo eléctrico y, tras realizar observaciones de numerosas tormentas a cierta distancia, concluyó que la estructura básica de una nube de tormenta era la de un dipolo positivo¹⁶. Simpson, por aquella misma época, midiendo la carga de la lluvia producida por nubes de tormenta llegó, sin embargo, a la conclusión opuesta: la región inferior de una nube de tormenta estaba cargada positivamente y la superior negativamente, formando así un dipolo negativo.

Sólo en las últimas décadas del siglo XX, los investigadores en física de la atmósfera pudieron explicar esos resultados incompatibles a primera vista. Tanto Wilson como Simpson realizaron mediciones desde un solo lugar, lo que no bastaba para inferir correctamente la distribución de cargas en la nube de tormenta.

La discrepancia entre el dipolo positivo o negativo obedece a que rara vez se mide la carga en una nube de tormenta; en general, se infiere de las mediciones del campo eléctrico de la nube. Un campo eléctrico que rodee un cuerpo cargado es similar al campo gravitatorio que rodea a un cuerpo de gran masa. Ambos campos hacen que otros objetos situados en el interior de los mismos se muevan; la gravedad atrae los objetos con masa, mientras que el campo eléctrico atrae o repele los objetos cargados. La fuerza gravitatoria o eléctrica que actúa sobre tales "partículas de prueba" es función del cuadrado de la distancia entre ésta y el cuerpo central. Ambos campos están caracterizados por una intensidad¹⁷ y una dirección¹⁸; por tanto, los campos definidos por una intensidad y una dirección se conocen como campos vectoriales.

Cuando hay más de un cuerpo cargado, el campo eléctrico resulta muy complicado. Además, cualquier número de configuraciones de carga puede producir la misma intensidad y dirección del campo en un punto dado. Por tanto, una medida única del campo eléctrico no puede determinar la distribución de cargas. Se necesitan muchas medidas; en principio, debería medirse el campo eléctrico en todas partes para deducir la verdadera distribución de cargas. Wilson y Simpson realizaron mediciones desde un solo punto, lo que no basta para inferir correctamente la distribución de cargas.

15 Ganador del Premio Nobel de Física en 1927 (compartido con A. H. Compton) por su invención de la cámara de niebla para rastrear partículas de alta energía.

16 Cargas positivas en la parte superior y cargas negativas en la parte inferior de la nube.

17 Determinada por la distancia al cuerpo que atrae o repele.

18 Atractiva o repulsiva.

Modelos de la estructura bipolar

Para explicar la supuesta estructura bipolar de las nubes de tormenta los investigadores de finales del siglo XIX y mediados del siglo XX propusieron dos modelos diferentes: el de precipitación y el de convección.

El modelo de precipitación¹⁹ se basa en el funcionamiento de cualquier aspersor de jardín: las gotas de agua grandes se apartan del chorro y caen rápidamente, mientras que la neblina de pequeñas gotitas permanece suspendida en el aire y es arrastrada por el viento. Análogamente, el modelo de precipitación supone que las gotas de lluvia y las partículas de granizo en una tormenta son atraídas hacia abajo por la gravedad a través del aire, dejando en suspensión gotas de agua menores y cristales de hielo.

Las colisiones entre las grandes partículas de precipitación y la neblina de gotitas de agua y cristales de hielo parece que cargan negativamente las partículas de precipitación²⁰; por conservación de la carga total, la neblina se carga negativamente y las partículas de precipitación positivamente. De este análisis se concluye que la parte más baja de la nube acumula carga negativa y la parte superior, carga positiva, es decir un dipolo positivo.

El modelo de convección²¹ es algo más complejo. Se basa en el principio de funcionamiento del generador de Van der Graff. En este aparato se "rocía" una carga eléctrica positiva o negativa, por medio de un transformador de alta tensión, sobre una cinta móvil sin fin de goma, que transporta las cargas o iones.

El modelo de convección supone que las cargas eléctricas de la nube proceden, inicialmente, de dos fuentes externas: de los rayos cósmicos y de un fuerte campo eléctrico. Los rayos cósmicos inciden sobre las moléculas de aire por encima de la nube y lo ionizan²². La segunda fuente es el intenso campo eléctrico que se presenta sobre objetos puntiagudos de la superficie de la Tierra; este campo produce lo que se conoce en la literatura de la alta tensión como "descarga de corona" de iones positivos.

El aire caliente los transporta hacia arriba por convección, y actúa como la cinta del generador de Van der Graff. Una vez han alcanzado las regiones superiores de la nube, esos iones positivos atraen a los negativos que los rayos cósmicos habían

19 Propuesto por los físicos alemanes Julius Elster y Hans F. Geitel en 1885.

20 Similar a como las cargas eléctricas pasan de la alfombra a los zapatos cuando se camina sobre ella.

21 Propuesto por Gastón Grenet de la Universidad de París, en 1947, y luego por Bernard Vonnegut, de la Universidad Estatal de Nueva York en Albany, en 1953.

22 Disociación o separación de cargas positivas y negativas.

formado por encima de la nube de tormenta. Los iones negativos penetran en la nube y se unen rápidamente a gotitas de agua o cristales de hielo, creando una "capa pantalla" cargada negativamente. Por hipótesis, las corrientes de aire descendentes en la periferia de la nube transportan, entonces, las partículas cargadas negativamente de la capa protectora hacia abajo; el resultado vuelve a ser la formación de una estructura de dipolo positivo.

Mediciones hechas a finales del siglo XX sobre la magnitud de la corriente que podía generar la "descarga corona" por intensos campos eléctricos mostraron valores muy pequeños para dar cuenta de la carga de la nube. Las observaciones eléctricas realizadas desde un avión demostraban que la carga liberada por la "descarga corona" de un conductor ubicado sobre la superficie de la tierra, se transportaba hacia arriba, a través de la nube, debido a los movimientos convectivos del aire. Cuando se liberaba carga positiva, la parte superior de la nube quedaba cargada positivamente y, la inferior, negativamente, formando un dipolo positivo.

Estos resultados indicaban que la convección transportaba la carga a la parte superior de las nubes. El campo eléctrico medido en estos experimentos resultaba unas mil veces menor que el necesario para iniciar una descarga eléctrica atmosférica. Por consiguiente, estos experimentos no demostraron directamente el papel de la convección en tormentas eléctricamente activas, y no se podía afirmar que los experimentos corroboraban la hipótesis de la convección. Por esta razón, el modelo de convección perdió crédito y había que modificar el modelo de precipitación.

Aunque en todas las nubes tormentosas que producen rayos se observan los dos fenómenos de precipitación y convección, puede verse que la hipótesis elemental de la precipitación no requiere la convección, ni viceversa. La diferencia entre los dos modelos llevó a otros investigadores a la comprensión de los respectivos papeles de la precipitación y la convección en la electrificación de las nubes.

Estructura tripolar de la nube de tormenta

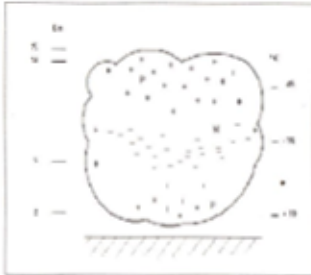


Figura 16. Estructura tripolar de una nube de tormenta.

Transcurridas más de cuatro décadas de observaciones y mediciones desde la controversia Wilson-Simpson, investigadores como Malan y Schonland (1947) y Kasemir (1965) establecieron que la estructura básica de las nubes de tormentas no es bipolar, sino tripolar: hay una región de carga negativa N en el centro, con una región de carga positiva P encima de ella y una segunda región, menor, de carga positiva p debajo de aquella.

Esta estructura tripolar ayuda a comprender los resultados de Wilson y Simpson. Wilson midió el campo eléctrico a una distancia considerable de la nube; el efecto de la pequeña región positiva p de la base de la nube, quedaba anulado por la región negativa N principal. Por tanto, Wilson vio la carga positiva superior P y una carga negativa N debajo de ella, es decir, un dipolo positivo.

Simpson, por su parte, midió debajo de la nube. Sus instrumentos detectaron la región positiva inferior p por encima mismo del investigador. Como la carga negativa central N , más arriba, apantallaba la región positiva superior P , Simpson concluyó que la carga negativa estaba en la parte alta y que la estructura de la nube era un dipolo negativo.

La característica más notable de la capa principal, cargada negativamente, es su forma de torta: su espesor vertical, aunque inferior a un kilómetro, puede extenderse horizontalmente varios kilómetros o más. Se halla a unos 6 kilómetros de altura, donde la temperatura se aproxima a -15° Celsius. En las condiciones allí dominantes, las tres fases del agua –hielo, líquido y vapor– pueden coexistir. Los campos eléctricos más intensos de la nube de tormenta se encuentran en las fronteras superior e inferior de la capa principal de carga negativa.

Por estudios realizados en cascadas, se sabe que las gotas mayores adquieren selectivamente una carga positiva al romperse²³. Los estudios de laboratorio realizados más recientemente por muchos investigadores han mostrado que, cuando las partículas de granizo blando chocan con los cristales de hielo, la polaridad de la carga depende notablemente de la temperatura. Por debajo de una temperatura

²³ Esto se puede comprobar llevando consigo un amperímetro a bordo de una de las embarcaciones del Maid of the Mist que se acercan a la neblina que forman las cataratas del Niágara.

crítica, llamada temperatura de inversión de carga, las partículas se cargan negativamente; a temperaturas más altas²⁴ se cargan positivamente. El valor de la temperatura de inversión de carga está, según los estudios de laboratorio, entre -20 y -10 grados Celsius.

La hipótesis de la inversión de carga explica por qué las cargas negativas se encuentran con menos frecuencia por debajo de una altura, donde la temperatura es de unos -150° Celsius: las partículas de granizo blando se cargan positivamente al caer a través de los cristales de hielo suspendidos y al colisionar con ellos. Estas cargas positivas que caen forman la región inferior positiva del tripolo.

Tal vez el avance más reciente sobre la teoría de la electricidad de las tormentas es el haber establecido el concepto de temperatura de inversión de carga y un valor de ésta, concordante, tanto en los experimentos de laboratorio como con las observaciones de nubes de tormenta. Sin embargo, la falta de una descripción microfísica de la electrificación estática es el mayor vacío que queda en el conocimiento de la electricidad de las tormentas.

Presumiblemente, los investigadores sobre física y microfísica de las tormentas eléctricas combinarán los mejores aspectos de ambos modelos en una futura teoría general sobre electrificación de las nubes de tormenta.

Recientemente, en un foro internacional llevado a cabo en 1997 en Saint Jean de Luz, Francia, algunos investigadores liderados por el físico norteamericano Thomas C. Marshall de la Universidad de Mississippi, propusieron un modelo de distribución de carga en la nube de estructura más compleja. Consideran cuatro regiones de carga en la corriente ascendente convectiva y al menos seis regiones de carga fuera de la corriente ascendente. Sin embargo, hasta ahora el modelo tripolar de la nube sigue siendo aceptado por la mayoría de los investigadores en la física del rayo.

24 Que corresponde a menores alturas de la nube de tormenta.

Categorización del rayo

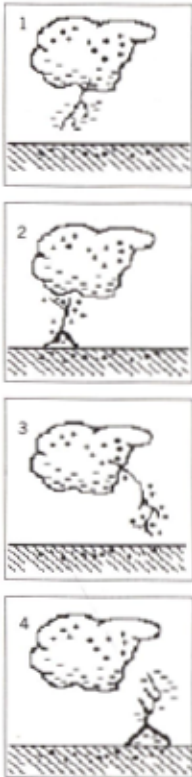


Figura 17. Categorías del rayo según Berger.

Berger (1978) fue el primero en plantear cuatro tipos de rayos en términos de la dirección del movimiento entre nube y tierra: ascendente o descendente y en términos del signo de la carga del líder que inicia la descarga: positivo o negativo.

La categoría 1 (rayos negativos nube-tierra) es aparentemente la más común. De acuerdo con estadísticas disponibles a nivel mundial, más del 90% de las descargas son de esta categoría. Sin embargo, en la investigación sobre caracterización espacio-temporal de rayos en Colombia, un análisis espacial (zona central colombiana) y temporal (1992-1993) en el mes de octubre, se ha encontrado que los rayos pueden ser en un 100% de categoría 3 (rayos positivos nube-tierra). La investigación a este nivel aún continúa, y ya hay resultados similares de otros investigadores en otras latitudes de la tierra.

Los tipos de descarga 1 y 3 son los que más se han estudiado en el mundo, debido a su interés práctico: son causa de daños en bienes y equipos electrónicos, muertes, perturbaciones en los sistemas de potencia eléctrica y comunicaciones e incendios forestales.

Proceso de formación del rayo

La mayoría de los rayos nube-tierra se inician por el fuerte campo eléctrico que existe en la carga positiva p situada debajo de la nube y la carga negativa N de la base de la nube. Una vez que la nube de tormenta se ha cargado hasta el punto en que el campo eléctrico excede la rigidez dieléctrica local de la atmósfera —es decir, la capacidad de la atmósfera de mantener una separación de cargas eléctricas—, el resultado es la iniciación de una descarga eléctrica atmosférica o rayo.

En ese instante, el campo eléctrico es del orden de un millón de voltios por metro; en menos de un segundo, el rayo transportará la carga correspondiente a 1020 electrones y proporcionará una potencia eléctrica equivalente a 100 millones de bombillas de alumbrado residencial. Durante esa fracción de segundo, la ener-

gía electrostática de la carga acumulada pasa a energía electromagnética²⁵, energía acústica²⁶ y, finalmente, calor.

No se conoce exactamente el proceso físico mediante el cual la carga almacenada en la nube de tormenta se transfiere a la tierra en forma de rayo. Existen varias teorías que tratan de explicar con algún detalle las diferentes etapas de una descarga, pero hasta ahora no existe una teoría única y comprobada con la que estén de acuerdo todos los investigadores.

A pesar de las diferencias teóricas y experimentales, la mayoría está de acuerdo en que una descarga eléctrica atmosférica se compone de las siguientes cinco etapas:

1. Encendido de la descarga (*Preliminary breakdown*)
2. Líder escalonado (*Stepped leader*)
3. Proceso de enlace (*Attachment process*)
4. Descarga de retorno (*Return stroke*)
5. Líder dardo (*Dart leader*)

Estas cinco etapas se describen a continuación, tratando de dar una idea lo más clara posible sobre el fenómeno.

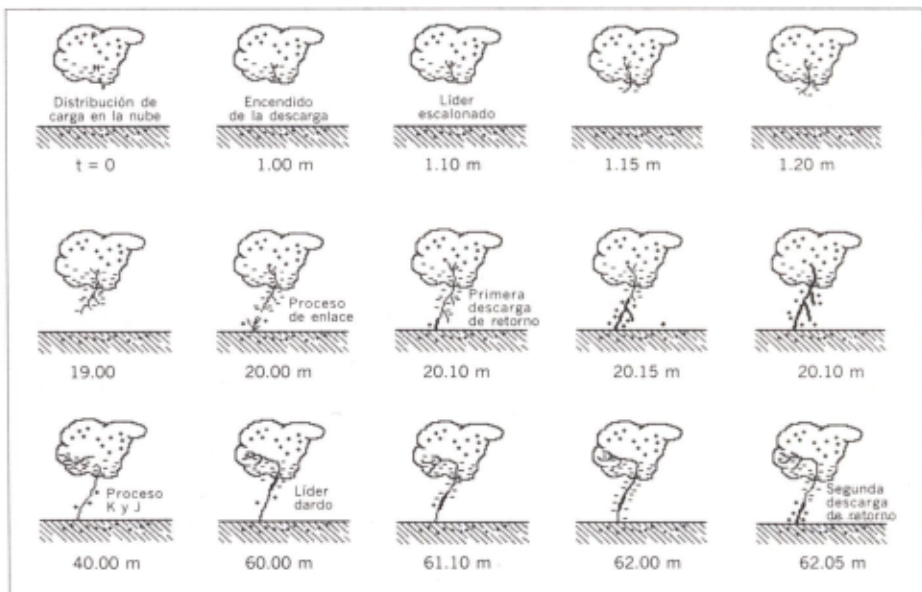


Figura 18. Proceso de formación de un rayo, adaptado de Uman, *Lightning Discharge*, 1987.

25 El relámpago visible.

26 El trueno audible.

Encendido de la descarga



Figura 19. Concentración de campo eléctrico en la región p.



Figura 20. Avance de los penachos al cabo de 50 μ s y forma cónica del proceso.



Figura 21. Ley del embudo para el inicio de la descarga.

Loeb, en 1968, consideró que las pequeñas gotas de lluvia que forman la carga positiva p están ubicadas en una región de algunos cientos de metros cuadrados de sección transversal, en cuya parte superior, debido a la presencia de cargas negativas N , se produce un campo eléctrico E_i ²⁷ del orden de 7 a 10 kV/cm en una región de 10 metros de radio.

Esta intensidad de campo eléctrico produce que las gotas de esta región se alarguen en la dirección del campo, dando inicio a unas formas de penachos²⁸, en las puntas de las mismas y dirigidos hacia la base negativa de la nube. La velocidad de crecimiento de estos penachos está entre 10⁸ cm/seg al inicio y 5 x 10⁶ cm/seg, en la región de más bajo campo. Loeb asume un valor de 2 x 10⁷ cm/seg, que corresponde a campos más uniformes.

La mayoría de la carga del penacho está dirigida hacia arriba, dentro de un cono que forma un ángulo de 37° con el eje del campo. Al cabo de un tiempo de 50 μ s, el penacho habrá penetrado aproximadamente 10 metros en la región N de la nube.

Los desplazamientos de carga producidos por este campo originan nuevos penachos en forma de corona²⁹ en las gotas de agua localizadas un poco más debajo de la región p . El efecto de estos penachos inferiores es hacer que la región ionizada se extienda hacia abajo.

Debido al área restringida de la región inicial de la descarga, la contracción del flujo descendente será más lenta que la expansión del flujo ascendente, fenómeno que se denomina "Ley del embudo" para las descargas.

A medida que crece el embudo, el flujo ascendente neutraliza un volumen de carga negativa y, aunque este canal no tiene mucha conductividad, conduce carga negativa a áreas significativamente más pequeñas con una considerable intensificación del campo en las regiones más bajas.

27 Campo eléctrico de inicio de la descarga.

28 Conocidos en la literatura técnica de habla inglesa como *Streamers*.

29 *Streamers Corona*, en el lenguaje técnico de habla inglesa.

Al cabo de unos 150 μs o más, el embudo habrá penetrado 40 metros en la nube, con un área de expansión en la base del cono de unos 30 metros de radio, y habrá descendido otros 40 metros desde su punto de inicio con una contracción adicional en su base.

Al final del proceso habrá una recombinación de cargas en la base de la nube, un canal de cargas negativas y aire libre de cargas. En este momento comienza a desarrollarse el líder escalonado.

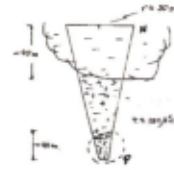


Figura 22. Expansión del embudo y neutralización de la carga p .

Líder escalonado

El líder escalonado inicia la primera descarga de retorno al propagarse el rayo de nube a Tierra en una serie de pasos discretos. El líder escalonado es iniciado por el encendido de la descarga dentro de la nube. En la figura del proceso de formación de un rayo, el encendido de la descarga se muestra en la parte baja de la nube entre la región N y p .



Figura 23. Penacho piloto e inicio del líder escalonado.

Fotográficamente se ha observado que los pasos del líder son típicamente de 1 μs . de duración y decenas de metros de longitud, con una pausa entre pasos de cerca de 50 μs . El líder escalonado baja hasta diez o más culombios de carga negativa de la nube en milisegundos, con una velocidad promedio de bajada de 2×10^5 m/s.

La corriente promedio del líder está en el rango de 100 a 1000 amperios. Los pasos tienen pulsos de corriente de al menos 1 kiloamperio. Asociado con estas corrientes hay pulsos de campos eléctricos y magnéticos con anchos de cerca de 1 μs o menos y tiempos de ascenso (*risetimes*) de 0.1 μs o menos.

Al final del proceso del encendido de la descarga se tiene una columna de cargas negativas con un gradiente de potencial que excede en por lo menos un 10% el umbral de ruptura para esas condiciones atmosféricas, propiciando así la ionización.

Esta avalancha avanza hacia la Tierra y su contenido de cargas crece exponencialmente de acuerdo con la Ley de avalancha de electrones:

$$n_e = e^{\int_0^x (\alpha - \eta) dx}$$

Siendo α y η los coeficientes de ionización y recombinación respectivamente, y $(\alpha - \eta)$ el coeficiente de ionización efectiva, n_{ex} es el número de electrones en la

cabeza de la avalancha y depende fundamentalmente de la presión y del campo eléctrico. Cuando la cabeza de la avalancha alcanza el tamaño crítico de 10^{18} portadores, se inician los penachos autopropagantes negativos hacia la Tierra y positivos en sentido contrario.

Aunque existen diferentes teorías que tratan de explicar el mecanismo de ionización del espacio entre nube y tierra, la mayoría de los autores concuerdan en que existe un penacho en la punta de la columna negativa, llamado líder, que es el encargado de iniciar el camino, dándole una característica escalonada al avance del líder. Aunque sólo se han mencionado los líderes descendentes negativos, también se presentan líderes escalonados ascendentes, de polaridad positiva o negativa, siendo los primeros los de mayor ocurrencia. El líder escalonado se caracteriza, según Uman, porque:

- La velocidad promedio mínima para líderes negativos descendentes es de aproximadamente 1×10^5 m/s.
- El intervalo de tiempo entre cada paso es relativamente constante, y tiempos de pausa más prolongados producen pasos de mayor longitud.
- La longitud de los pasos para líderes está entre 10 y 200 metros con un valor promedio de 50 metros. Esta longitud varía de acuerdo con el grado de evolución del líder escalonado.
- El tiempo de pausa entre pasos es del orden de $50 \mu\text{s}$. Durante este tiempo el canal del líder escalonado no es suficientemente luminoso para ser registrado mediante técnicas fotográficas como la cámara de Boys.
- El tiempo promedio de avance de un paso es de alrededor de $300 \mu\text{s}$, pero su luminosidad apenas dura $1 \mu\text{s}$ o menos.
- Durante el descenso se produce un cambio de campo electrostático relativamente suave, lo que indica que el mecanismo de escalonamiento no baja, por sí mismo, una cantidad apreciable de carga.
- Cuando un líder escalonado típico se acerca a tierra tiene una carga de alrededor de 5 culombios distribuida en su longitud.
- Para líderes escalonados ascendentes las corrientes están entre 20 y cientos de amperios.
- Los líderes positivos son de naturaleza más continua que los cargados negativamente, los cuales son marcadamente escalonados.

Teorías del líder escalonado

Existen muchas teorías que intentan explicar el proceso del líder escalonado. Las teorías propuestas originalmente son las de Schonland y Bruce, a partir de las cuales se han desarrollado algunas de las otras teorías; por ello se describirán brevemente estas dos.

Teoría de Schonland

Esta teoría parte de la existencia de procesos de ionización por choque que tienen lugar en la punta del líder principal, que cuando alcanza un cierto valor de campo eléctrico, E_c , avanza a través del aire no ionizado a una velocidad promedio de 2×10^7 cm/s. Schonland llamó a este fenómeno de propagación de la ionización el "penacho piloto"³⁰.

En la punta del líder principal, que se supone semiesférica con un radio promedio de 2.5 metros, debe existir un campo eléctrico crítico de 30 kV/cm para que se inicie un penacho piloto. El campo eléctrico promedio en el cuerpo del penacho piloto debe ser mayor a 5 kV/cm para que éste pueda propagarse, lo que corresponde a una diferencia de potencial de unos 400 kV entre los puntos A y B de la figura siguiente.

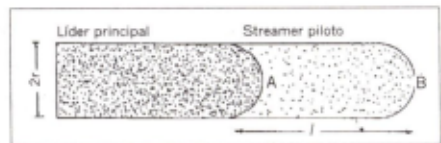


Figura 24. Modelo de Schonland para la propagación del líder escalonado.

Puesto que el piloto está cargado negativamente, a medida que éste avanza, el campo eléctrico en el punto A se hace menor hasta alcanzar el campo eléctrico crítico de 5 kV/cm en el cuerpo del piloto. Como resultado de esto, se acumula carga espacial positiva en frente de la punta del líder principal, y cuando se alcanzan los 30 kV/cm, el líder avanza por el canal preionizado del penacho piloto, hasta alcanzarlo.

La longitud alcanzada por el penacho piloto, antes del avance del líder principal, determina la longitud de cada paso del líder escalonado. Este proceso se repite a intervalos característicos de cada descarga hasta el inicio de la siguiente etapa del rayo.

³⁰ Streamer Pilot, en inglés.

Teoría de Bruce

Bruce asume que el campo eléctrico en la superficie del canal del penacho piloto es suficientemente alto para producir corrientes corona en el espacio circundante. La corriente que alimenta el penacho piloto desde la punta del líder detenido momentáneamente (punto A de la figura del mecanismo), aumenta a medida que avanza el penacho piloto, debido a que debe mantener la corriente propia del canal y de la envoltura corona.

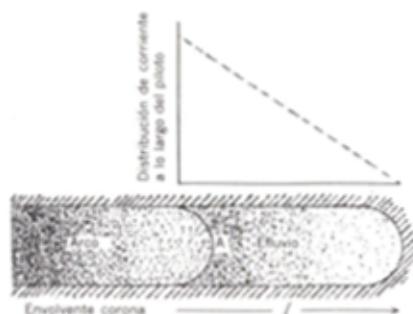


Figura 25. Mecanismo del líder escalonado propuesto por Bruce.

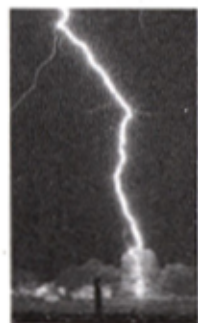


Figura 26. Ramificaciones del líder escalonado, durante su viaje a tierra. Cortesía LLP Inc. Tucson, Az. USA, 1989, W.Wantland.

De acuerdo con Loeb, la forma característica de propagación del líder escalonado puede atribuirse a uno o varios de los siguientes factores:

- El campo eléctrico, debido a las cargas locales en la base de la nube, no está alineado con el campo principal del dipolo (de acuerdo con el modelo de la nube) y, en casos extremos, este campo puede deflectar el líder cerca de la base de la nube.
- Las cargas positivas o negativas, llevadas hacia arriba por el viento, pueden apartar el canal descendente de una trayectoria recta.
- El encuentro con gotas de agua flotando en el aire puede facilitar el avance tortuoso mediante la formación de penachos en tales gotas.
- Debido a que el movimiento del penacho depende de la relación E/P , el movimiento turbulento del viento del viento puede producir pequeñas heterogeneidades en la presión (P) y en la densidad del aire, desviando así la trayectoria de la descarga.
- Cambios considerables en la humedad del aire pueden afectar la propagación del penacho piloto.
- El viento puede desplazar secciones cargadas de la nube en sentido horizontal; de esta forma se modifica el campo con respecto a la tierra, influyendo en la trayectoria del líder.

Durante su viaje a tierra, el líder escalonado se ramifica en dirección hacia abajo, produciendo estructuras geométricas de ramificaciones bajantes.

Proceso de enlace

La diferencia de potencial eléctrico entre la base del líder cargado negativamente y la tierra, tiene una magnitud superior a 10^7 voltios. Cuando el líder está cerca de tierra, el campo eléctrico en objetos puntiagudos (pararrayos, árboles, torres de transmisión, antenas, aristas de edificios, etc.) o en irregularidades propias de la misma tierra, supera el valor de tensión disruptiva del aire y se presentan una o más descargas (rayos) que ascienden desde estos objetos al encuentro del líder descendente. Se inicia así el llamado proceso de enlace.

La distancia disruptiva de un rayo es quizás el factor más importante por tener en cuenta en las discusiones sobre el efecto del apantallamiento de cables en líneas de transmisión o protección de estructuras contra rayos. El trabajo realizado por Horn y Sukarno define la distancia disruptiva (r_{sc}) como la distancia media desde la punta del líder escalonado hasta el punto de impacto sobre cualquier objeto aterrizado. Esta distancia disruptiva, o también conocida como radio de acción, es la distancia a la cual el líder "siente" la influencia del objeto o de la tierra misma.

La distancia disruptiva determinada por Horn y Sukarno para 45 rayos producidos artificialmente mediante cohetes, estuvo comprendida entre 10 y 60 metros, y es una función de la corriente de descarga del rayo. Una vez que el líder escalonado "siente" la presencia del punto de impacto, se inicia en éste un penacho o descarga inducida ascendente³¹ que sale al encuentro del líder descendente, y el instante de contacto marca el inicio de la llamada descarga de retorno.

El concepto de la distancia disruptiva o radio de acción fue el que permitió desarrollar los métodos y modelos de sistemas de protección contra rayos como el método electrogeométrico y el modelo de progresión del líder, los cuales se explican en más detalle en el capítulo 5 de este libro.

Descarga de retorno

La descarga de retorno fue definida por Loeb como una onda de campo eléctrico que asciende por el canal del líder escalonado, alcanzando, en la mayoría de los casos, a penetrar en la base de la nube. Esta onda ionizante "baja" de la nube de 2 a 10 culombios de carga eléctrica con corrientes de hasta 10^5 amperios y es la fase más energética del rayo.

31 Este tipo de descarga se conoce en el idioma técnico inglés como *Induced upward lightning discharge*.

Cuando a unas decenas de metros sobre la tierra, una de las descargas ascendentes de la tierra hace contacto con el líder escalonado que desciende, el líder queda al potencial de tierra, y se presenta lo que se conoce como la primera descarga de retorno, quedando el camino nube-tierra totalmente ionizado. La primera descarga de retorno produce una corriente pico cerca a tierra de un valor típico de más 30 kiloamperios, dependiendo de la latitud en donde impacte el rayo, con un tiempo de cero a pico de unos pocos microsegundos.

Las corrientes a tierra medidas caen a la mitad del valor pico en cerca de 50 μ s, y corrientes del orden de cientos de amperios pueden fluir por tiempos de unos cuantos hasta varios cientos de milisegundos.

Después de que la corriente de retorno ha dejado de fluir, el rayo, incluido el movimiento de carga en la nube, finaliza. El rayo es llamado entonces una descarga simple.

Una descarga inducida ascendente ocurre, entonces, cuando un rayo impacta cerca de una instalación. Se sabe que tales eventos causan lo que se conoce como el "fuego de San Telmo"³² en objetos puntiagudos, por ejemplo, los mástiles de los barcos o la punta del asta de las banderas. Estos fenómenos causan severos daños, sobre todo en estructuras altas como las torres de comunicación. La razón es que la combinación de su geometría y la altura de sus picos causan los penachos ascendentes, que pueden alcanzar la base de la nube, transportando, así, descargas subsecuentes de la nube hacia la torre.

La solución a este problema consiste en modificar la geometría "ofensiva" de la torre. Arreglos en forma de sombrilla o paraguas parecen ser casi la forma perfecta de solución. Otras formas de arreglo, por ejemplo, de tipo esférico, ayudan, pero no son tan efectivas como el de la sombrilla. El alivio o mejora no se logra debido a las púas o los puntos agudos, sino por la geometría misma. Como ejemplo, se puede tener el mismo efecto instalando el marco de las varillas de la sombrilla sin los puntos agudos o púas. En subestaciones de alta tensión se usa esta técnica de modificación de la geometría para suprimir el efecto corona; estos dispositivos se conocen como "anillos corona"³³ o "apantallamiento corona"³⁴.

En el caso de torres de comunicación, muchas descargas de rayo son del tipo descargas inducidas ascendentes.

32 *St. Elmo's fire*, en inglés.

33 *Corona rings*, en idioma técnico inglés.

34 *Corona shields*, en idioma técnico inglés.

Líder dardo

Después de que la descarga de retorno alcanza la base de la nube y se expande lateralmente, ésta alcanza el límite de la región de descarga de la nube, aumentando el campo eléctrico y produciendo así un nuevo drenaje de carga mediante penachos que penetran alrededor de 300 metros de nube, todavía cargada. Este período está caracterizado por una intensa descarga corona de las gotas de agua, debido a la propagación de la onda ionizante dentro de la nube.

Este corona drena la carga desde una gran área a una más pequeña dejada por el líder escalonado y su descarga de retorno, emergiendo de la base de la nube como un canal luminoso llamado líder dardo. La velocidad de estos líderes está entre 4×10^8 cm/s y 1.9×10^9 cm/s, dependiendo del tiempo que ha permanecido el canal dejado por la descarga de retorno.

Los líderes dardo usualmente se propagan en forma continua, sin escalonamientos, desde la nube hasta la tierra, siguiendo el canal preionizado. Sin embargo, cuando el intervalo de tiempo desde la descarga de retorno es excepcionalmente largo, el líder dardo presenta tortuosidades a medida que se aproxima a tierra.

En esta etapa, el rayo puede drenar a tierra alrededor de $\frac{1}{4}$ de coulombio, como se ha demostrado en investigaciones llevadas a cabo en Nuevo México y Sudáfrica, pero este valor varía de acuerdo con la estructura de la nube. Los líderes dardo, a su vez, pueden producir una descarga de retorno dando origen a los rayos de carácter múltiple. El líder dardo inicializa así la segunda y otras descargas subsecuentes, presentándose así más de una descarga por rayo (*stroke/flash*), definido como multiplicidad.

Durante el tiempo entre la finalización de la primera descarga de retorno y la inicialización del líder dardo ocurren procesos que se manifiestan en rápidas variaciones de campo eléctrico, conocidos como procesos J y K.

El trueno

La transformación de la energía almacenada en un rayo en energía audible se conoce como trueno. La descarga de retorno deposita rápidamente una gran cantidad de energía a lo largo del canal del líder. Este canal es calentado por la entrada de energía por encima de los 28.000°C. El calentamiento de una sección corta, por ejemplo 10 metros del canal, toma alrededor de una millonésima de segundo; entonces, la sección del canal no tiene tiempo para expandirse mientras está siendo calentada.

El aire calentado de una temperatura ambiente o de una temperatura del líder, de pocos grados centígrados a más de 28.000°C, sin tener tiempo para expandirse, lleva a un aumento considerable de la presión, por encima de la presión atmosférica³⁵. La presión inicial del canal de la descarga de retorno queda, entonces, por encima de las 10 atmósferas y puede llegar hasta las 100 atmósferas o más. La alta presión del canal expande rápidamente el aire circundante (inicialmente a la presión atmosférica) y lo comprime. Esta perturbación del aire (expansión - compresión) se propaga en todas las direcciones. Aproximadamente en los primeros 10 metros esta perturbación se propaga como una onda de choque³⁶ y luego como una onda de sonido ordinaria³⁷.

El sonido del pulso de una pequeña sección del canal del rayo viaja a una velocidad cercana a los 340 metros por segundo a condiciones de nivel del mar. El trueno que nosotros oímos es, entonces, variaciones de presión inducidas en el aire por la expansión de cada parte del canal del rayo³⁸, debido a su alta presión inicial.

Como el sonido en el aire viaja a 340 metros por segundo, y la descarga de retorno calienta el canal del rayo en menos de una milésima de segundo, para todos los propósitos prácticos cada punto del canal del rayo puede ser considerado como un emisor de un pulso de sonido (u onda de choque) al mismo tiempo. Puesto que la luz emitida por el canal de la descarga de retorno viaja a 300.000.000 metros por segundo, el ojo humano ve la luz simultáneamente con la formación del canal, pero el sonido del trueno toma varios segundos para llegar a nuestros oídos. Por ello es posible estimar en metros la distancia a que impactó un rayo, multiplicando por 340 el tiempo, en segundos, que transcurre entre el relámpago que vemos y el trueno que oímos.

35 1 atmósfera.

36 Una perturbación del aire que viaja a mayor velocidad que la del sonido.

37 Pequeñas compresiones y expansiones de la densidad del aire.

38 El canal principal y sus ramificaciones.

Reconstrucción del proceso del rayo

Mediante el estudio de los cambios en el campo eléctrico medido a nivel del piso, se ha podido reconstruir el proceso de la descarga aun antes de ser visible.

Al iniciarse la interrupción entre la carga negativa N y la positiva P se presentan cambios significativos del campo eléctrico entre 2 y 10 milisegundos, representados por B en la figura siguiente.

Después de este cambio se presenta el cambio I despaciado e irregular con duración entre 1 y 400 milisegundos, debido a cargas negativas que buscan caminos ramificados diferentes al canal principal de la descarga.

Luego se presenta el cambio L debido al descenso del líder. Este cambio ocurre después de que se ha empezado a formar un canal de descarga definido con duración entre 4 y 30 milisegundos, hasta que el líder llega a inmediaciones de un objeto sobresaliente sobre la tierra, del cual comienzan a desprenderse flujos ascendentes de carga de signo contrario.

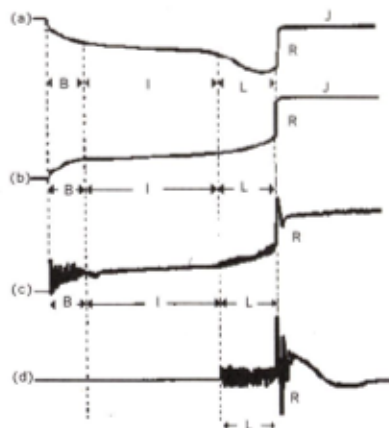


Figura 27. Cambios en el campo eléctrico, medidos a nivel de piso: (a) a 2 km, (b) a 5 km, (c) a 50 km (d) a 500 km. (Adaptado de Clarence y Malan, 1957).

Al encontrarse este flujo ascendente con la cabeza del líder, se presenta una súbita transferencia de carga que causa el abrupto cambio R en el campo eléctrico, asociado con la corriente de retorno.

Posteriormente se presenta el cambio J en el campo eléctrico, generado por el movimiento de carga dentro de la nube, debido a la descomposición causada en la nube como resultado del súbito descenso de toda la carga negativa. Este movimiento puede ser de carga negativa hacia abajo o de carga positiva hacia arriba.

Una vez que la descarga de retorno ha llegado a la nube, se sigue presentando una pequeña corriente que fluye por el canal y que lo mantiene ionizado, permitiendo la eventual formación de líderes dardos que serán seguidos de corrientes de retorno, llamadas descargas subsecuentes.

El canal de la descarga, en cuyo interior existe un hilo conductor de plasma, puede llegar a temperaturas de 30.000°C y la presión del aire subir hasta 100 atmósferas.

Referencias

- Gerhard-Multhaupt, "Biographies of Contributors to the Early Investigation of Electrical Phenomena", *IEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 26, No.1, Feb. 1991.
- Golde, R. H., *Lightning*, New Cork, Academic Press, 1977.
- Loeb, L. B. "The mechanism of steeped and dart leaders in cloud to ground lightning strokes", *Jour. Geoph. Res.*, Vol. 71, Oct. 1966, pp. 4711-4721.
- Lomas, R., *The man who invented the twentieth century*, London, Ed. Headline Book Publishing, 1999.
- Malan, D. J., Schonland, B. F. J., "Progressive Lightning: Directly correlation photography and electrical studies of Lightning near from thunderstorms", *Proc. Royal Society*, Vol. A 191, London, 1947, pp. 513-523.
- McEachron, K. B., "Multiple Lightning Strokes", *AIEE Trans.*, Vol. G 53, Dec. 1934, pp. 1633-1637.
- McEachron, K. B., "Multiple Lightning Stroke II", *AIEE Trans.*, Vol. 57, Sep. 1938, pp. 510-512.
- Meek, J. M., "The mechanism of the lightning discharge", *Phys. Rev.*, Vol. 55, May 1939, pp. 972-977.
- Nasser, E. et al., "Field criterion for sustained streamer propagation", *Jour. Geoph. Res.*, Vol. 39, July 1968, pp. 3707-3713.
- Peek, F. W., "Lightning progress in lightning research in the field and in the laboratory". *AIEE Trans.*, Vol. 2, 1929, pp. 436-448.
- Schonland, B. F. J., "The lightning discharges", *Handbuch der Physik*, Springer Verlag, Vol. XXII, Berlín, 1956, pp. 576-628.
- Torres, H., "Espacio y tiempo en los parámetros del rayo", trabajo de promoción a profesor titular, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1998.
- Torres, H., "Nikola Tesla: el hombre que inventó el siglo XX", *Revista Innovación y Ciencia*, Vol. IX, No. 1, 2000, pp 64-71.
- Torres, H., "Aislamientos eléctricos", notas de clase, Universidad Nacional de Colombia, 2002.
- Torres, H. y Castaño, O., *El rayo*, Santa Fe de Bogotá, Ed. Icontec, 1994.
- Uman, M. A., *Lightning*. New York, McGraw-Hill, 1969.
- Uman, M. A., *All about Lightning*, New York, Dover Publications, Inc., 1986.

Uman, M. A., *Lightning Discharge*, New York, Academic Press, 1987.

Uman, M. A., and McLine, D. K., "Radiation field and current of the lightning steeped leader", *Jour. Geoph. Res.*, Vol. 75, Feb. 1970, pp. 1058-1066.

Wagner, C. F. *et al.*, "The Lightning Strokes II", *AIEE Trans.*, Vol. 80, Oct. 1961, pp. 62-642.

Wang, C. P., "Lightning discharges in the tropics. Component Ground Strokes and Cloud dart streamer discharges", *Jour. Geoph. Res.*, Vol. 68, April 1963, pp. 1951-1957.

Wang, C. P., "Lightning discharges in the tropics. Whole discharges", *Jour. Geoph. Res.*, Vol. 68, April 1963, pp. 1943-1948.

BIBLIOTECA
UNIVERSITAT DE VALÈNCIA