UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MANIZALES

TESIS DOCTORAL

APLICACIÓN DE LA ENTROPÍA Y ESFERA DEBYE AL ESTUDIO DE PRECURSORES SÍSMICOS Y CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Autor:

Jorge Hernán Estrada Estrada

Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación
Manizales, Colombia
2013

APLICACIÓN DE LA ENTROPÍA Y ESFERA DEBYE AL ESTUDIO DE PRECURSORES SÍSMICOS Y CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Autor:

Jorge Hernán Estrada Estrada

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Ph.D. en Ingeniería Automática

Director:
Ph.D. Eduardo Antonio Cano Plata, UN
Codirector:
Ph.D. Camilo Younes Velosa, UN

Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación
Manizales, Colombia

2013

APPLICATION OF ENTROPY AND DEBYE´S SPHERE DYNAMICS TO IONOSPHERIC SEISMIC ACTIVITY PRECURSORS AND ELECTRIC POWER QUALITY ASSESSMENT

Author:

Jorge Hernán Estrada Estrada

Thesis Presented as partial requirement for the degree of:

Ph.D. in Automatic Engineering

Director:
Ph.D. Eduardo Antonio Cano Plata, UN
Codirector:
Ph.D. Camilo Younes Velosa, UN

Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales
Faculty of Engineering and Architecture
Department of Electrical, Electronic and Computer Engineering
Manizales, Colombia

2013

A Dios.

A mi esposa Claudia e hijos Omar, Paula y Juan Martín.

A mi madre Atala.

AGRADECIMIENTOS

Mis sentimientos de agradecimiento por la ayuda recibida durante el tiempo dedicado a la realización de esta tesis difícilmente pueden ser suficientemente expresados en estas pocas líneas.

Gracias: Al Dr. Eduardo Antonio Cano plata y al Dr. Camilo Younes Velosa, mi director y codirector respectivamente, César Arango Lemoine mi jefe inmediato y a los estudiantes Sebastián Valencia y Claudia Lucía Cortés. Iguales agradecimientos para la Administradora de Sistema Informáticos Diana Patricia Londoño y para Michel Parrot, científico del Grupo Demeter de Orleans en Francia. A la Universidad Nacional de Colombia por su apoyo en todos los sentidos. No podría acabar estos agradecimientos sin citar a mi esposa Claudia y a mis hijos Omar, Paula y Juan Martín. Quienes me animaron todo el tiempo. Así mismo gracias a mi madre quien me ha inculcado desde niño el amor al estudio.

J. H. Estrada Estrada, 2013

RESUMEN

Precursores ionosféricos y calidad de la energía, están interconectadas en el sistema compuesto por el sol, ionosfera, magnetosfera, litosfera y océanos. Corrientes eléctricas en la ionosfera, inducen voltajes secundarios y corrientes asociadas (corrientes inducidas geomagnéticamente, GIC) a nivel del suelo. Los GIC pueden tener efectos al dañar las estructuras conductoras, tales como las torres de alta tensión y las redes eléctricas interconectadas.

La aplicación de la teoría de la entropía al estudio de los circuitos eléctricos puede abrir una nueva ventana para su análisis y diseño. La presente tesis explora la posibilidad de evaluar posibles precursores ionosféricos de terremotos y erupciones volcánicas presentando la esfera Debye como un circuito fundamental de la ionosfera. El circuito eléctrico global puede ser modulado por la emanación de radón y otros gases desde las fallas tectónicas y volcanes en actividad. El efecto, es la generación de una sobretensión eléctrica que penetra a la ionosfera. Una esfera Debye responde ensanchándose o deprimiéndose. Las ecuaciones de Maxwell son empleadas para crear una ecuación que ligue la distancia Debye con el campo eléctrico de penetración.

Además, circuitos de potencia de energía eléctrica industriales y comerciales también son analizados a la luz de la entropía para proponer un nuevo procedimiento de evaluación de la calidad de la energía eléctrica. Precursores ionosféricos y calidad de la energía, están interconectadas en el sistema compuesto por el sol, ionosfera, magnetosfera, litosfera y océanos

Se describen varios experimentos para analizar la entropía de escala múltiple y espectro de frecuencia de las ondas magnéticas radiadas por un transformador para varias condiciones. Los conceptos de entropía podrían llevar a desarrollar una teoría de envejecimiento del transformador. Entonces, si se conoce la historia de la entropía, es posible predecir la vida útil del dispositivo. Al final se propone un nuevo procedimiento para medir THD y factor de potencia en una forma inalámbrica.

Palabras clave: Ionosfera, Precursores de terremotos y erupciones, Calidad de la energía, Entropía, Esfera Debye.

ABSTRACT

Ionospheric precursors and power quality are interconnected in the system composed of the sun, ionosphere, magnetosphere, lithosphere and oceans. Electric currents in the ionosphere, induce secondary voltages and currents associated (geomagnetically induced currents , GIC) at ground level . The GIC can have damaging effects to conductive structures such as pylons and interconnected grids.

The application of entropy theory to the study of electrical circuits can open a new window for analysis and design. This thesis explores the possibility of assessing possible ionospheric precursors of earthquakes and volcanic eruptions presenting the Debye sphere as a fundamental circuit of the ionosphere . The global electric circuit can be modulated by the emanation of radon and other gases from tectonic faults and volcanoes. The effect is the generation of an electrical surge which penetrates the ionosphere. A Debye sphere responds widening or becoming depressed. Maxwell 's equations are used to create an equation that links the Debye distance with the electric field penetration.

In addition, industrial power circuits and commercial power are also analyzed in light of entropy to propose a new procedure for evaluating the electric power quality. ionospheric precursors and power quality are interconnected in the system composed of the sun, ionosphere, magnetosphere, lithosphere and oceans.

The thesis describes several experiments to analyze the entropy of multi-scale and frequency spectrum of the magnetic waves radiated from a transformer for various conditions. The concepts of entropy could lead to developing a theory of aging transformer. Then, if the history of entropy is known, it is possible to predict the lifetime of the device . At the end we propose a new method for measuring THD and power factor in a wireless way.

Key words: Ionosphere, precursors of earthquakes and eruptions, quality of energy, entropy, Debye spher.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1 ..... **1**

1. INTRODUCCIÓN **3**

1.1. ÁREAS DE DESARROLLO DE LA TESIS 3
1.2. MOTIVACIONES 3
1.2.1 Eventos sísmicos *3*
1.2.2 Calidad de la energía *4*
1.3. DEFINICIÓN DE LOS PROBLEMAS A TRATAR 5
1.3.1 Amenaza de volcanes y fallas tectónicas. *5*
1.3.2 Preocupación por la calidad de la energía *7*
1.4. OBJETIVOS 8
1.4.1 Objetivo general *8*
1.4.2 Objetivos específicos *8*
1.5. METODOLOGÍA 9
1.5.1 Observación *9*
1.5.2 Medición en la ionosfera *10*
1.5.3 Procesamiento de la información *11*
1.5.4 Medición no invasiva de circuitos de alta tensión *13*
1.6. EXPERIMENTACIÓN EN CAMPO 13
1.7. HIPÓTESIS 14
1.8. HERRAMIENTAS DE COMPUTACIÓN 14
1.9. ELEMENTOS DE INNOVACIÓN 15
1.10. CONTRIBUCIONES 16
1.11. ESTRUCTURA DE LA TESIS 18

CAPÍTULO 2 ..... **23**

2. DINÁMICA DE LA ESFERA DEBYE EN LA IONOSFERA **22**

2.1. CONDUCTIVIDAD DE LA IONOSFERA Y EL CAMPO ELÉCTRICO VERTICAL 24
2.2. CONDUCTIVIDAD PARALELA 24
2.3. CAMPO ELÉCTRICO VERTICAL 25
2.4. CINEMÁTICA DE LA IONOSFERA EN LA PRESENCIA DE UN PULSO ELÉCTRICO ASOCIADO CON ACTIVIDAD SÍSMICA 26
2.5. RELACIÓN ENTRE LA FRECUENCIA DE COLISIÓN Y LA DISTANCIA DEBYE 29
2.6. ÁNGULO DE LOS ELECTRONES DE LA ESFERA DEBYE CON EL EJE Z 31

2.7. CONDUCTIVIDAD EN PRESENCIA DE UN CAMPO MAGNÉTICO: CONDUCTIVIDAD PEDERSEN [15] 32
2.8. CONDUCTIVIDAD HALL 33
2.9. TENSOR DE CONDUCTIVIDAD 33
2.10. CAMPO ELÉCTRICO VERTICAL Y LA DISTANCIA DEBYE 34
2.11. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 40

CAPÍTULO 3 42

3. CONEXIÓN ELECTROMAGNÉTICA ENTRE LA LITOSFERA Y LA IONOSFERA 44

3.1. ESFERA DEBYE 44
3.2. IONOSFERA Y LA CAPA F2 45
3.3. CAMPO ELÉCTRICO VERTICAL 45
3.4. GAS RADÓN: DISPARO DEL TERREMOTO 47
3.5. EL RADÓN MODULA EL CAMPO ELÉCTRICO VERTICAL 48
3.6. CIRCUITO ELÉCTRICO GLOBAL 49
3.7. RESPUESTA DE LA CONDUCTANCIA ELÉCTRICA DE LA ESFERA DEBYE AL CAMPO ELÉCTRICO VERTICAL 51
3.8. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 53

CAPÍTULO 4 76

4. EXPERIMENTOS A BORDO DEL SATÉLITE DEMETER 56

4.1. DESCRIPCIÓN DE LA CARGA ÚTIL CIENTÍFICA 60
4.2. EXPERIMENTOS TÍPICOS A REALIZAR 60
4.2.1 Experimento IMSC 61
4.2.2 Experimento ICE 63
4.2.3 Experimento (IAP) 66
4.2.4 Experimento con el espectro de energía de las partículas: (IDP) 69
4.2.5 Experimento ISL: mediciones de las características térmicas de la esfera Debye 71
4.3. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 73

CAPÍTULO 5 4

5 ENTROPÍA DE SEÑALES ELECTROMAGNÉTICAS 77

5.1 ENTROPÍA DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS 78
5.2 EMPLEO DE LA ENTROPÍA DE MÚLTIPLE ESCALA MSE PARA DECODIFICAR SERIES DE TIEMPO 80
5.3 LA PROPUESTA DE SHANNON 81
5.4 ENTROPÍA MUTUA 82
5.5 BASES TEÓRICAS DE ENTROPÍA CLÁSICA 83
5.6 ENTROPÍA TERMODINÁMICA 87

5.7 ENERGÍA DE ENSAMBLE Y EL TEOREMA DE HELLMAN-FEYMAN 90
5.8 ENTROPÍA MUTUA EN LA ESFERA DEBYE 91
5.9 COMPLEJIDAD DE UNA ESFERA DEBYE 92
5.10 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 92

CAPÍTULO 6 78

6 DATOS, GRÁFICAS Y RESULTADOS DE LA EXPLORACIÓN DE LA IONOSFERA 96

6.1 ENTROPÍA ELECTROMAGNÉTICA REFERENCIADA A UNA ZONA NO SÍSMICA 96
6.2 COMENTARIOS SOBRE EL TERREMOTO DE WENCHUAN DEL 12 DE MAYO DEL 2008 ... 99
6.3 NOTAS SOBRE EL TERREMOTO DE HAITÍ 102
6.4 OBSERVACIONES SOBRE EL TERREMOTO DE SAMOA 103
6.5 ACTIVIDAD SÍSMICA DEL VOLCÁN GALERAS 105
6.6 ERUPCIÓN DEL VOLCÁN DEL HUILA 107
6.7 ENJAMBRE DE SISMOS EN CERRO MACHÍN EL 25 DE DICIEMBRE DE 2009 110
6.8 EL VOLCÁN PAGAN TAMBIÉN MOSTRÓ UN PATRÓN ELECTROMAGNÉTICO SIMILAR ... 111
6.9 VOLCÁN RUIZ Y LA RESPUESTA DE LA IONOSFERA 113
6.10 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 115

CAPÍTULO 7 113

7 EXPERIMENTO DE SIMULACIÓN EN LABORATORIO PARA PREDECIR FALLAS EN TRANSFORMADORES CON BASE EN LA ENTROPÍA DEL FLUJO MAGNÉTICO RADIADO 119

7.1 EXPERIMENTOS 121
7.1.1 Sobrecarga de un transformador cargado resistivamente 121
7.1.2 Medición del THD a partir de la entropía multiescala. 122
7.1.3 Medición del envejecimiento del transformador 123
7.2 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 124

CAPÍTULO 8 120

8 ENTROPIA MUTUA DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA 127

8.1 EXPERIMENTO DEBAJO DE LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN 127
8.2 RESULTADOS 128
8.2.1 Caso 1: Espectro de las ondas magnéticas tomado en un circuito que alimenta los hogares y oficinas 128
8.2.2 Caso 2: Espectro magnético del circuito Industrial 129
8.2.3 Caso 3: Comparación de la entropía electromagnética entre circuitos Industriales y Viviendas / comerciales 130
8.3 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 133

CAPÍTULO 9 144

9 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO 136

9.1 PRECURSORES IONOSFÉRICOS DE TERREMOTOS Y ERUPCIONES 136
9.2 HALLAZGOS INTERESANTES 137
9.3 REVISIÓN DEL CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS E HIPÓTESIS 138
9.3.1 En relación con las hipótesis 138
9.3.2 En relación con los objetivos 141
9.4 APLICACIONES SOBRE CALIDAD DE LA ENERGÍA 144
9.5 TRABAJOS FUTUROS 145

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 147

APÉNDICE A 152

A.1 EXPERIMENTOS DE COMPARACIÓN EN LABORATORIO DEL MÉTODO TRADICIONAL Y EL MÉTODO PROPUESTO 152

A.1.1COMPARACIÓN ENTRE MÉTODOS 152
A.1.1.1 Método de conducción. 152
A.1.1.2 Método de radiación. 152
A.1.2 CIRCUITO RESISTIVO 153
A.1.3. CIRCUITO RL 154
A.1.4. CIRCUITO RLC 155
A.1.5. ENTROPÍA DE MÚLTIPLE ESCALA DEL CAMPO MAGNÉTICO RADIADO POR LOS CIRCUITOS R, RL Y RLC EXCITADOS POR UNA ONDA SINUSOIDAL DE 60 HERCIOS. 156
A.1.5.1. Circuito rectificado R 158
A.1.5.2. Circuito rectificado RL 159
A.1.5.3. Circuito rectificado RLC 160
A.1.6. COMPARACIÓN ENTRE EL THD MEDIDO SOBRE LOS MISMOS CIRCUITOS PARA AMBOS MÉTODOS 162
A.1.7. THD PARA AMBOS MÉTODOS EN CIRCUITOS R, RL Y RLC CON RECTIFICACIÓN 163
A.1.8. COMPARACIÓN ENTRE VALORES MEDIDOS PARA THD EN AMBOS MÉTODOS 164
A.1.9. MEDICIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA TOTAL EN LOS CIRCUITOS SIN RECTIFICACIÓN 165
A.1.10. MEDICIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA EN LOS CIRCUITOS CON RECTIFICACIÓN 166
A.1.11. PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR LOS EXPERIMENTOS 167
A.1.11.1. Circuitos medidos 167
A.1.11.2. Equipo utilizado 167
A.1.11.3. Procedimiento de medición 167
A.1.11.4. Imágenes de los equipos 169

A.2 EXPERIMENTOS DE SIMULACIÓN EN LABORATORIO: RESPUESTA DEL PLASMA AL CAMPO ELÉCTRICO EN UN TUBO DE ENSAYO 171

A.2.1 LA ECUACIÓN DE POISSON Y LA DISTANCIA DEBYE 171

A.2.2 EXPERIMENTO DE SIMULACIÓN 174
A.2.2.1 Fuerza eléctrica sobre electrones del plasma en el tubo de ensayo.....174
CONCLUSIONES APÉNDICE 184

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

FIGURA 1.1: MAPA DE COLOMBIA MOSTRANDO LA POSICIÓN DE CERRO MACHÍN. 4
FIGURA 1.2: DIAGRAMA DE FLUJO PARA EVALUAR LA RUTA QUE PUEDE ESTAR TOMANDO EL VOLCÁN. 12

CAPÍTULO 2

FIGURA 2.1: REGISTRO DE LA APARICIÓN DE UN PULSO DE CAMPO ELÉCTRICO VERTICAL ATMOSFÉRICO, POR EL SATÉLITE DEMÉTER. 23
FIGURA 2.2: MODELO DEL PULSO CORRESPONDIENTE A LA PENETRACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO VERTICAL. 25
FIGURA 2.3: GRÁFICA QUE MUESTRA LA RELACIÓN ENTRE DISTANCIA DEBYE Y LA FRECUENCIA DE COLISIÓN ENTRE ELECTRONES. 31
FIGURA 2.4: SISTEMA DE REFERENCIA EN COORDENADAS CILÍNDRICAS. 36
FIGURA 2.5: RELACIÓN ENTRE CAMPO ELÉCTRICO ATMOSFÉRICO VERTICAL Y LA DISTANCIA DE UNA ESFERA DEBYE. 40

CAPÍTULO 3

FIGURA 3. 1: EJEMPLOS DE CAMPO ELÉCTRICO ANÓMALO ANTES DE VARIOS TERREMOTOS (NIKIFOROVA AND MICHNOWSKI 1995; VERSHININ ET AL. 1999; HAO ET AL.2000). 47
FIGURA 3. 2: EXHALACIÓN DE RADÓN EN KOBE ANTES DEL TERREMOTO. 48
FIGURA 3.3: MODELO GLOBAL ELÉCTRICO. 49
FIGURA 3.4: ESCALÓN EN EL CIRCUITO ELÉCTRICO GLOBAL. 50
FIGURA 3.5: CIRCUITO MOSTRANDO EL CAMPO ELÉCTRICO APLICADO SOBRE EL MODELO RLC DE LA ESFERA DEBYE. 50
FIGURA 3.6: RESPUESTA DE LA CONDUCTANCIA DE LA ESFERA DEBYE AL TERREMOTO. 51
FIGURA 3.7: RESPUESTA SUB-AMORTIGUADA DE UNA ESFERA DEBYE EN LA IONOSFERA. 52
FIGURA 3.8: GRÁFICA DEL CAMPO ELÉCTRICO MOSTRANDO SINGULARIDAD A T=0. 53

CAPÍTULO 4

FIGURA 4.1: EL DEMETER ORBITANDO ALREDEDOR DE LA TIERRA. 58
FIGURA 4. 2: DIAGRAMA DE LA CARGA CIENTÍFICA DEL DEMETER. 60
FIGURA 4. 3: ESPECTRO MAGNÉTICO EN RESPUESTA A UN TERREMOTO. 61
FIGURA 4.4: MAGNETÓMETRO IMSC. 62
FIGURA 4.5: MEDICIÓN DEL ESPECTRO VLF EN CORRELACIÓN CON LA PENETRACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO DE LA COMPONENTE "Z": ACTIVIDAD ELÉCTRICA EN TIEMPO Y

FRECUENCIA PREVIA A LOS TERREMOTOS MARCADOS CON LOS TRIÁNGULOS ROJOS INTENSOS. 64
FIGURA 4. 6: MEDICIÓN DE LAS TRES COMPONENTES DEL CAMPO ELÉCTRICO COMO PRECURSORES DE UN TERREMOTO, INDICADO CON EL TRIÁNGULO DE COLOR ROJO INTENSO. 65
FIGURA 4.7: INSTRUMENTO PARA MEDICIÓN DE CAMPO ELÉCTRICO ICE. 66
FIGURA 4.8: IMAGEN DEL ANALIZADOR DE PLASMA IAP. 66
FIGURA 4. 9: REGISTRO DE ALGUNOS PARÁMETROS DEL PLASMA EN RESPUESTA A LA PENETRACIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO VERTICAL ANTES DE UN TERREMOTO. 68
FIGURA 4.10: CORRELACIÓN ENTRE FLUJO DE ENERGÍA DE LAS PARTÍCULAS Y LA ACTIVIDAD SÍSMICA.....70
FIGURA 4. 11: ANOMALÍAS DE LA TEMPERATURA DEL PLASMA DE LA ESFERA DEBYE. OBSERVAR PICOS EN LAS ONDAS MOSTRADAS Y REGISTRADAS.....72
FIGURA 4.12: INSTRUMENTO BASADO EN LA SONDA LANGMUIR (ISL). 73

CAPÍTULO 6

FIGURA 6.1: ALGUNOS PARÁMETROS DE LA IONOSFERA ANTES DE LOS TERREMOTOS. 97
FIGURA 6.2: VARIABILIDAD DE ALGUNOS PARÁMETROS DE LA IONOSFERA ANTES DE LOS EVENTOS SÍSMICOS. LAS PARTÍCULAS REGISTRADAS SON ELECTRONES. 98
FIGURA 6. 3: VARIABILIDAD SIMILAR DE LOS PARÁMETROS DE LA IONOSFERA, TENIENDO EN CUENTA LOS IONES. 99
FIGURA 6.4: VARIACIÓN DE LA LONGITUD DE DEBYE EN LA IONOSFERA SOBRE EL TERREMOTO DE WENCHUAN EN EL DOMINIO ESPACIAL.....100
FIGURA 6.5: HISTORIA DE LA COMPLEJIDAD DE LA IONOSFERA EN UN PERÍODO DE DOS AÑOS SOBRE UN ÁREA ENCIMA DE LA FALLA TECTÓNICA RESPONSABLE DEL TERREMOTO EN WENCHUAN ANTES DESCRITO.....101
FIGURA 6.6: MÍNIMOS DE COMPLEJIDAD CORRESPONDIENTES A LAS RÉPLICAS.....101
FIGURA 6.7: DENSIDAD DE ELECTRONES DE UNA ESFERA DEBYE SOBRE EL EPICENTRO DE SICHUAN. 102
FIGURA 6.8: VARIACIÓN DE LA LONGITUD DEBYE EN EL TERREMOTO DE HAITÍ, EN EL DOMINIO DEL TIEMPO.....103
FIGURA 6.9: LONGITUD DE DEBYE PARA EL CASO DEL TERREMOTO DE SAMOA.....104
FIGURA 6.10: GRÁFICO DERIVADO DE LA VARIANZA DE LA ESTIMACIÓN DEL ESPECTRO DE POTENCIA EN 26/09/2009. FUENTE: NOAA / AVHRR, AQUA / AIRS OLR. 105
FIGURA 6. 11: DINÁMICA DE LA ESFERA DEBYE SOBRE EL VOLCÁN GALERAS, 1 DÍA ANTES DE LA ERUPCIÓN DEL 17 DE ENERO DEL 2008.....106
FIGURA 6.12: COMPARACIÓN ENTRE ENTROPÍAS MUTUAS EN ESTADO DE PRE-ERUPCIÓN CONTRA ENTROPÍAS MUTUAS EN ESTADO DE REPOSO. 106

FIGURA 6.13: SE REPITE LA SITUACIÓN DE MAYOR ENTROPÍA MUTUA DURANTE LA PRE-ERUPCIÓN. 107
FIGURA 6.14: DISTANCIA DEBYE EN RELACIÓN CON EL NEVADO DEL HUILA..... 108
FIGURA 6.15: VOLCÁN NEVADO DEL HUILA: AUTO-COMPARACIÓN 06 DE NOVIEMBRE DE 2007 Y 15 DE ABRIL DE 2008. 109
FIGURA 6.16: COMPARACIÓN DE LA COMPLEJIDAD DE UNA ESFERA DEBYE PARA EL 06 DE NOVIEMBRE DE 2007 Y 15 DE ABRIL DE 2008; CASO NEVADO DEL HUILA. 109
FIGURA 6.17: ENTROPÍA MUTUA DEL CERRO MACHÍN. 110
FIGURA 6.18: VARIACIÓN DE LA DISTANCIA DEBYE EN FUNCIÓN DEL RECORRIDO DEL DEMETER: CASO CERRO MACHÍN. 111
FIGURA 6.19: LONGITUD DEBYE: CASO PAGÁN..... 112
FIGURA 6.20: COMPONENTE Z DEL CAMPO ELÉCTRICO VERTICAL QUE MODULA LA DENSIDAD Y TEMPERATURA DE ELECTRONES. VOLCÁN PAGAN. 113
FIGURA 6.21: VARIACIÓN DE LA DISTANCIA DEBYE EN FUNCIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO PARA EL CASO DEL NEVADO DEL RUIZ. 114
FIGURA 6.22: CASO VOLCÁN RUIZ: MODULACIÓN DE ALGUNAS VARIABLES POR EL CAMPO ELÉCTRICO VERTICAL. 115

CAPÍTULO 7

FIGURA 7.1: ESPECTRO MOSTRANDO ARMÓNICOS CAUSADOS POR SOBRECARGA DE UN TRANSFORMADOR EN UN CORTOCIRCUITO CARGADO RESISTIVAMENTE. 121
FIGURA 7.2: AUMENTO DE LA ENTROPÍA, VINCULADA A LA SOBRECARGA. 122
FIGURA 7.3: POSIBILIDAD DE OBTENER EL ÍNDICE DE THD ARMÓNICO MEDIANTE LA MEDICIÓN DE LAS ONDAS DE ENTROPÍA MAGNÉTICA RADIADA. 122
FIGURA 7.4: COMPARACIÓN ENTRE VARIOS TRANSFORMADORES. EL TRANSFORMADOR MÁS VIEJO PRESENTA EL MENOR VALOR DE ENTROPÍA. 123

CAPÍTULO 8

FIGURA 8.1: ESPECTRO MAGNÉTICO PARA VIVIENDAS Y RED DE ESTABLECIMIENTOS COMERCIALES. 128
FIGURA 8.2: ESPECTRO MAGNÉTICO DE LA RED INDUSTRIAL.....129
FIGURA 8.3: COMPARACIÓN DE LA ENTROPÍA DE LAS ONDAS MAGNÉTICAS RADIADAS ENTRE AMBAS REDES: INDUSTRIAL Y EL HOGAR / OFICINA. 131
FIGURA 8. 4: COMPARACIÓN DE LAS ENTROPÍAS DE ESCALA MÚLTIPLE DE AMBAS REDES DE LAS ONDAS ELÉCTRICAS, TAL COMO SE DETECTA CON EL SENSOR INALÁMBRICO DEBAJO DE LA TORRE DE TRANSMISIÓN DE ALTA TENSIÓN. 132

CAPÍTULO 9

FIGURA 9.1: ZHOU ET AL. GEOCHEMICAL TRANSACTIONS, 2010.....138

FIGURA 9. 2: COMPARACIÓN ENTRE VARIOS TRANSFORMADORES. EL TRANSFORMADOR MÁS VIEJO PRESENTA EL MENOR VALOR DE ENTROPÍA.....139
FIGURA 9. 3: POSIBILIDAD DE OBTENER EL ÍNDICE DE THD ARMÓNICO MEDIANTE LA MEDICIÓN DE LAS ONDAS DE ENTROPÍA MAGNÉTICA RADIADA. 140
FIGURA 9. 4: INSTRUMENTACIÓN INALÁMBRICA DE UN TRASFORMADOR DE POTENCIA.....141
FIGURA 9.5: AUMENTO DE ENTROPÍA DEL CAMPO MAGNÉTICO DEBIDO A LA GENERACIÓN DE ARMÓNICOS QUE SE AGREGAN A LA ONDA FUNDAMENTAL DE 60 HZ.....145

APÉNDICE A

FIGURA A.1: ESPECTRO DE LA CORRIENTE FLUYENDO A TRAVÉS DE UN RESISTOR.....154
FIGURA A.2: ESPECTRO DE LA ONDA MAGNÉTICA RADIADA POR UN CIRCUITO R. CONTIENE LA FUNDAMENTAL DE 60 HERCIOS. 154
FIGURA A.3: CIRCUITO RL CON SU ESPECTRO DE CORRIENTE ASOCIADO. 154
FIGURA A.4: ESPECTRO DEL CAMPO MAGNÉTICO RADIADO POR EL CIRCUITO RL. 155
FIGURA A.5: CIRCUITO RLC CON SU ESPECTRO DE CORRIENTE CORRESPONDIENTE. 155
FIGURA A.6: ESPECTRO DE LA ONDA MAGNÉTICA GENERADA POR EL CIRCUITO RLC.....156
FIGURA A.7: ENTROPÍA DE CORRIENTE DE MÚLTIPLE ESCALAS PARA LOS CIRCUITOS R. RL Y RLC EXCITADOS POR UNA ONDA DE 60 HERCIOS. 158
FIGURA A.8: CIRCUITO R CON RECTIFICACIÓN DE LA ONDA DE ENTRADA Y SU ESPECTRO ASOCIADO DE CORRIENTE.....158
FIGURA A.9: CIRCUITO R CON RECTIFICACIÓN DE LA ONDA COMPLETA Y SU ESPECTRO ASOCIADO DE CAMPO MAGNÉTICO RADIADO. 159
FIGURA A.10: CIRCUITO RL CON RECTIFICACIÓN DE ONDA COMPLETA Y SU ESPECTRO ASOCIADO DE CORRIENTE.....159
FIGURA A.11: CIRCUITO RL CON RECTIFICACIÓN DE ONDA COMPLETA Y SU ESPECTRO ASOCIADO DE CAMPO MAGNÉTICO RADIADO. 160
FIGURA A.12: CIRCUITO RLC CON RECTIFICACIÓN DE ONDA COMPLETA Y SU ESPECTRO ASOCIADO DE CORRIENTE.....160
FIGURA A.13: CIRCUITO RL CON RECTIFICACIÓN DE ONDA COMPLETA Y SU ESPECTRO ASOCIADO DE CAMPO MAGNÉTICO RADIADO. 160
FIGURA A.14: ENTROPÍA DEL CAMPO MAGNÉTICO RADIADO DE MÚLTIPLE ESCALA PARA LOS CIRCUITOS R. RL Y RLC EXCITADOS POR UNA ONDA DE 60 HERCIOS.....161
FIGURA A.15: THD MEDIDO CON EL MÉTODO DE CONDUCCIÓN.....162
FIGURA A.16: THD DEL CAMPO MAGNÉTICO RADIADO POR LOS TRES CIRCUITOS.....162
FIGURA A.17: THD DE CORRIENTE PARA LOS CIRCUITOS R, RL, RLC RECTIFICADOS.....163
FIGURA A.18: THD DEL CAMPO MAGNÉTICO RADIADO EN CIRCUITOS R,RL Y RLC RECTIFICADOS.....164
FIGURA A.19: MEDIDAS DEL FACTOR DE POTENCIA CON EL MÉTODO TRADICIONAL. 165

FIGURA A.20: MEDIDAS DEL FACTOR DE POTENCIA CON EL MÉTODO PROPUESTO 165
FIGURA A.21: FACTOR DE POTENCIA EN TÉRMINOS DEL VOLTAJE Y CORRIENTE MEDIDAS EN FORMA DIRECTA EN LOS CIRCUITOS CON EL MÉTODO TRADICIONAL..... 166
FIGURA A.22: MEDIDAS DEL FACTOR DE POTENCIA CON EL MÉTODO TRADICIONAL. 166
FIGURA A.23: BANCO DE PRUEBAS MOSTRANDO EQUIPOS..... 169
FIGURA A.24: SE MUESTRA EL CONDENSADOR FORMADO POR 2 PLACAS PARALELAS. ENCIMA SE APRECIA EL AMPLIFICADOR DE AUDIO EMPLEADO. 169
FIGURA A.25: BOBINA PARA CAPTACIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO..... 170
FIGURA A.26: EXPERIMENTO EN LABORATORIO CON UN TUBO DE ENSAYO: UN PENTODO (VÁLVULA AL VACÍO) CONTIENE PLASMA EN LA FORMA DE ELECTRONES E IONES POSITIVOS Y NEGATIVOS. LOS ELECTRONES ESTÁN SIMBOLIZADOS POR RAYAS CORTAS HORIZONTALES. . 175
FIGURA A.27: TRAYECTORIA PARABÓLICA DE UN ELECTRÓN EN LA PRESENCIA DE UN CAMPO ELÉCTRICO..... 176
FIGURA A.28: FORMACIÓN DE UNA NUBE DE CARGA ESPACIAL EN EL TUBO DE ENSAYO..... 178
FIGURA A.29: FOTO DEL CIRCUITO EMPLEADO PARA EVALUAR LA RESPUESTA DEL PLASMA A LA APLICACIÓN DE UN CAMPO ELÉCTRICO. 179
FIGURA A. 30: RELACIÓN ENTRE LA SEGUNDA DERIVADA DEL POTENCIAL Y LA DISTANCIA DEBYE: OBSERVAR LA FORMACIÓN DE UNA SINGULARIDAD PARA Z=0..... 180
FIGURA A.31: DISTANCIA DEBYE EN FUNCIÓN DE LA TENSIÓN: LA ESFERA DEBYE SE CONTRAE EN PROPORCIÓN AL CAMPO ELÉCTRICO APLICADO EN REJILLA..... 183
FIGURA A. 32: GRÁFICA DE LA DISTANCIA DEBYE EN FUNCIÓN DEL CAMPO APLICADO, OBTENIDA TEÓRICAMENTE. OBSERVAR LA SIMILITUD CON LA PRODUCIDA EN LABORATORIO DENTRO DEL TUBO DE ENSAYO. COMPARAR CON FIGURA 5.6. 185

LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO 1
TABLA 1.1: HERRAMIENTAS USADAS EN ESTA TESIS. 15
TABLA 1.2: SOCIALIZACIÓN DE PUBLICACIONES Y PONENCIAS EN CONGRESOS INTERNACIONALES 17

CAPÍTULO 8
TABLA 8.1: THD DE SEÑALES ELECTROMAGNÉTICAS EN LA CIUDAD DE MANIZALES 130
TABLA 8.2: VALORES DE ENTROPÍA MUTUA DE CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN LA CIUDAD DE MANIZALES. 132

APÉDICE A
TABLA A. 1: VALORES MEDIDOS DE THD EN CIRCUITOS R, RL Y RLC. VI SIGNIFICA VOLTAJE Y CORRIENTE. EB INDICA ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS 164
TABLA A. 2: VALORES MEDIDOS DE FACTOR DE POTENCIA EN CIRCUITOS R, RL Y RLC. VI SIGNIFICA VOLTAJE Y CORRIENTE. EB INDICA ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS 167

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La aplicación de la teoría de la entropía al estudio de los circuitos eléctricos puede abrir una nueva ventana para su análisis y diseño. El presente trabajo explora la posibilidad de evaluar posibles precursores ionosféricos de terremotos presentando la esfera Debye como un circuito fundamental de la ionosfera. Además, circuitos de potencia de energía eléctrica industriales y comerciales también son analizados a la luz de la entropía para proponer un nuevo procedimiento de evaluación de la calidad de la energía eléctrica. Precursores ionosféricos y calidad de la energía, están interconectadas en el sistema compuesto por el sol, ionosfera, magnetosfera, litosfera y océanos. Corrientes eléctricas en la ionosfera, inducen voltajes secundarios y corrientes asociadas (corrientes inducidas geomagnéticamente, GIC) a nivel del suelo. Los GIC pueden tener efectos al dañar las estructuras conductoras, tales como las torres de alta tensión, las redes eléctricas interconectadas, oleoductos y gasoductos, cables submarinos de comunicación , redes telefónicas y telegráficas y circuitos electrónicos de los ferrocarriles. Las mayores variaciones de corriente magnetosfera-ionosfera, se producen durante las tormentas geomagnéticas y es entonces cuando se produce la mayor GIC.

Los efectos son particularmente fuertes en el norte de Europa y Canadá. El campo geomagnético horizontal observado durante grandes tormentas ha causado interrupciones y otros efectos adversos sobre las redes de energía, afectando su calidad.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Áreas de desarrollo de la tesis

La aplicación de la teoría de la entropía al estudio de los campos electromagnéticos en la ionosfera y en su relación con la actividad sísmica y actividad volcánica, puede facilitar la caracterización de los precursores ionosféricos conduciendo a una eventual clasificación, selección e identificación que lleve a la futura predicción de terremotos.

Las teorías de entropía multi-escala MSE y entropía mutua, también sirven para evaluar la calidad de la energía suministrada a través de líneas de alta tensión y de transformadores. Esta aplicación propone un procedimiento para calificar dicha calidad, recibiendo y procesando las ondas magnéticas radiadas por los aparatos mencionados.

1.2. Motivaciones

1.2.1 Eventos sísmicos

La motivación para realizar este estudio, se debe a la amenaza del complejo volcánico formado por varios volcanes: Nevado del Ruiz, Cerro Machín, Cerro Bravo, Huila y Galeras sobre varias ciudades y poblaciones de Colombia. El cráter Arenas situado en el nevado del Ruiz, es un volcán de la cordillera central de los Andes en Colombia y hace parte de un complejo con más de 24 volcanes, algunos de ellos en actividad. Su erupción en 1595, es recordada por que produjo daños en un área considerable. La erupción del 13 de Noviembre de 1985, ha sido la más relevante en la historia de Colombia, ya que estuvo precedida por el ascenso de magma que ocasionó varias explosiones, derritiendo la nieve y creando flujos de lodo que descendieron por

los ríos Azufrado y Lagunilla, lo que provocó que la ciudad de Armero fuera sepultada dejando un saldo de más de 24.000 personas muertas, tragedia que incentivó a Ingeominas a realizar monitoreo desde 1987.

El Cerro Machín ubicado cerca de Ibagué, también en Colombia, ha mostrado actividad sísmica desde el año 1992 hasta hoy, razón por la cual es considerado como uno de los volcanes más peligrosos del mundo; su ubicación geográfica se detalla en la Figura 1.1.

Figura 1.1: Mapa de Colombia mostrando la posición de cerro Machín.

Cerro Bravo, Galeras y Huila están actualmente en actividad y monitoreados por Ingeominas.

1.2.2 Calidad de la energía

La aplicación de la teoría de la entropía al estudio de las ondas electromagnéticas radiadas por circuitos eléctricos, podría conducir a nuevos procedimientos que faciliten la producción de nuevos indicadores para evaluar la evolución y respuesta a agentes externos. En este trabajo se proponen dos aplicaciones a dos circuitos que pueden estar conectados entre sí, la esfera Debye en la ionosfera y el transformador eléctrico; ambos circuitos pueden ser analizados a la luz de la teoría de la entropía.

Aparentemente, son dos ideas apartadas; sin embargo, ambos circuitos responden al mismo agente externo, el campo eléctrico atmosférico vertical ligado con las tormentas atmosféricas. Así, se puede pensar en forma integral en un sistema interconectado y

compuesto además por las estructuras físicas construidas por el hombre. Se ha considerado entonces enfrentar este problema desde ambas áreas, teniendo en cuenta que otros trabajos paralelos en el tema de las tormentas y destrucción de transformadores por descargas eléctricas se están desarrollando en la Universidad Nacional de Colombia. Trabajos futuros abordarán el análisis integral de litosfera, atmósfera e ionosfera como el escenario de terremotos, erupciones volcánicas, tormentas eléctricas, tormentas solares, sistemas eléctricos de alta potencia, construcciones y por supuesto, el océano. En una tesis de Maestría actual se estudia la respuesta de la esfera Debye en la ionosfera a las tormentas eléctricas y relación entre daños de transformadores y la entropía mutua de campos electromagnéticos en la ionosfera.

1.3. Definición de los problemas a tratar

1.3.1 Amenaza de volcanes y fallas tectónicas.

Es un área científica e interdisciplinaria que puede conducir a nuevos y más completos procedimientos para la predicción de erupciones volcánicas. De acuerdo con este estudio, hay elementos prometedores que pueden enriquecer y ampliar el procedimiento actual de seguimiento de la dinámica de los volcanes en su ruta hacia la erupción, situación importante si se considera que actualmente existen más de 200 millones de personas que viven cerca de volcanes, sólo en América.

La predicción de la actividad volcánica todavía no es perfecta, aunque se han logrado avances fundamentales en los últimos años. En Colombia, Ingeominas está monitoreando la mayoría de los volcanes activos; en particular, el observatorio vulcanológico de Manizales ha invertido grandes recursos para el seguimiento del volcán Arenas del nevado del Ruiz, Machín y Cerro Bravo.

La actividad sísmica (temblores y tremores) está presente antes de la erupción; sin embargo, un volcán puede estar años con ese síndrome sin presentar erupción, lo cual lleva desafortunadamente a falsas alarmas que cuestan mucho a la comunidad. Estas manifestaciones están relacionadas con la fractura de rocas causada por el ascenso del magma por la chimenea del volcán; otros sismos de menor frecuencia son creados por la presión de gases. Estas oscilaciones son equivalentes a vibraciones acústicas en la cámara magmática; diversidad de estaciones receptoras de sonido de infra baja frecuencia, menor a 20 hertzios, se están empleando para complementar el diagnóstico.

Los tremores son el resultado del empuje del magma sobre las rocas por debajo de la superficie. Los patrones de las oscilaciones resultantes son difíciles de decodificar y por esto es necesario acudir en forma complementaria a otras técnicas de instrumentación para realizar un diagnóstico más preciso, tal como las que se proponen en este estudio.

La presencia de dióxido de azufre es un buen indicador de posible erupción y es un componente importante de los gases volcánicos. Su presencia está relacionada con el afloramiento de magma hacia la superficie; un ejemplo es el volcán Galeras en Colombia, que lo mostró en su emisión durante las erupciones de ceniza; otro gas de importancia para la predicción es el radón, el cual está involucrado en la conexión electromagnética del volcán con la ionosfera, pues modula la resistencia interna del generador de campo eléctrico vertical. Esto se discutirá en el segundo capítulo.

La medición de la deformación de la ladera del volcán mediante medidores de inclinación, puede ser monitoreada y es otro componente básico de la predicción; si se combina con la aparición de tremores y el aumento del dióxido de azufre muestra una alta probabilidad de erupción. Por otro lado, la superficie del volcán aumenta su temperatura debido a la presencia del magma; esto se está registrando con radiometría de luz infra-roja mediante satélites. También la entalpía de las aguas termales se usa para indicar proximidad de erupción. La hidrología también aporta información valiosa, a través de la detección de flujo de lodos, sedimentos, medición de la profundidad y anchura de los ríos cercanos al volcán.

La instrumentación remota mediante satélites científicos puede medir la energía que es absorbida, reflejada, radiada o dispersada por la superficie del volcán. Los satélites emplean sensores capaces de mostrar cambio inusual en las nubes; las nubes asociadas con la erupción son más frías. Sensores a bordo del Demeter (satélite Francés) pueden detectar oxígeno y ozono en cantidades anómalas que se relacionan con la emisión de dióxido de azufre. Sensores infra-rojos detectan sólidos calientes tales como piroclastos. Mediante radar, los satélites miden además, cambios en la deformación del volcán y en los bosques. Sin embargo y pese al progreso en la tecnología de la instrumentación, muchas erupciones toman por sorpresa a los científicos y a la comunidad en general [1].

La conexión de un volcán con la ionosfera se realiza a través de dos canales separados de transferencia de energía:

a) Un canal acústico a través del cual fluyen ondas desde la atmósfera neutra hacia la ionosfera [2]. La conexión a través del canal acústico es bastante efectiva. La forma de manifestarse este canal es complejo, aumenta la transparencia para ondas de radio, crea perturbaciones lineales y no lineales de origen magnético, así como transformación del espectro de ondas en la ionosfera (Kotsarenko et al., 1997), [3].

b) El otro canal, electrodinámico, encausa las variaciones de conductividad de la atmósfera y el campo eléctrico vertical. Ambos efectos se pueden presentar durante la preparación de la erupción, generación de ondas de gravitación acústicas creadas por descargas de gases y campos eléctricos de gran magnitud, hasta kilovoltios por metro: Pulinetz, [4].

1.3.2 Preocupación por la calidad de la energía

Los usuarios de la energía eléctrica están preocupados por su calidad. Mala calidad causa daños y fallos de funcionamiento en diferentes tipos de carga [5]. Algunas industrias son muy sensibles y muchas pérdidas ocurren por inestabilidades, distorsión armónica, alteraciones en las líneas, impulsos, interrupciones, sobretensiones, bajo voltaje, bloqueos del equipo de cómputo, "flicker", recalentamiento de la línea del cableado del neutro, problemas con las líneas largas y disparos intempestivos, y en general, múltiples daños a los equipos [5]. Hay por lo tanto un gran interés en mejorar la calidad de la energía eléctrica para reducir el costo de la protección de los equipos; para ello es necesario que las fuentes de tales alteraciones, sean identificadas. Además, se debe considerar que existe una diversidad de aparatos de protección, tales como circuitos contra sobretensiones, UPS, recableado total del pasivo, filtro de tierra de mallas, y acondicionador activo, que pueden ayudar considerablemente a mejorar este problema.

Adicionalmente, transformadores de corriente y voltaje que bajan los altos voltajes y corrientes del sistema de energía eléctrica a niveles convenientes para los relés de protección y que protegen contra desbalances causados por cortos a tierra en sistemas trifásicos. Equipos electrónicos de monitoreo y protección para detectar fallas e iniciar la desconexión. Interruptores para abrir / cerrar circuitos. Baterías para proporcionar energía en caso de desconexión de potencia en el sistema. Canales de comunicación que permiten el análisis de la corriente y la tensión en los terminales remotos de una línea y permitir disparo remoto del equipo. Fusibles de detección y protección contra fallas.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Aplicar la teoría de la entropía para explicar el comportamiento y evolución de circuitos eléctricos, tales como la esfera Debye en la ionosfera y el transformador de potencia en el sistema de distribución de energía eléctrica.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Desarrollar un modelo matemático que explique la interacción entre campo eléctrico atmosférico vertical y la esfera Debye. Crear ecuaciones que permitan predecir teóricamente la distancia Debye; esto, en el contexto de la caracterización de los precursores ionosféricos de terremotos y erupciones volcánicas.
2. Determinar un modelo instrumental para medición no invasiva del contenido de armónicos de una onda eléctrica en función de su entropía, en el contexto de la evaluación de la calidad de la potencia eléctrica.
3. Proponer un nuevo método para medir el envejecimiento de los transformadores eléctricos en función de sus entropías.

Para cumplir con los objetivos planteados, se han realizado una serie de pasos que se listan a continuación:

Etapa 1: Revisión de la bibliografía para conocer el estado del arte al inicio de la tesis.

Etapa 2: Desarrollo de una plataforma matemática que permita la caracterización de precursores ionosféricos de terremotos y erupciones volcánicas.

Etapa 3: Creación de ecuaciones empíricas nacidas en experimentos de laboratorio para la evaluación de la calidad de la energía.

Etapa 4: Experimentos de simulación en laboratorio para ambos circuitos: esfera Debye y transformador eléctrico.

Etapa 5: Experimentos en campo para los circuitos mencionados.

1.5. Metodología

En el contexto del método científico, los siguientes pasos fueron seguidos durante el presente estudio.

1.5.1 Observación

Los siguientes elementos son básicos en la mirada científica de los volcanes y terremotos:

a) La coincidencia de los diferentes cambios de las variables puede mostrar inestabilidad y variabilidad conducente a una erupción. Si además de la presencia de radón, dióxido de azufre, sismicidad, deformación del cono, descargas eléctricas atmosféricas y otras, se le añaden los cambios en la ionosfera de la densidad de electrones, distancia Debye, anomalías de campos electromagnéticos, temperatura de electrones e iones y otros, se puede confiar en una mayor precisión de la predicción. La complejidad del fenómeno definida como la suma de las entropías mutuas de las variables mencionadas, es una categoría suprema de cambio e inestabilidad que puede llevar a crear instrumentos para selección y clasificación de precursores.

b) Conocer la historia del comportamiento del volcán es un elemento adicional para afinar la precisión. La analogía volcán-paciente médico, enriquece la mirada de observación y surge en forma obvia la importancia de la medición o instrumentación de las variables y parámetros del complejo volcánico. El entender el complejo como una red interconectada también facilita el conocimiento de la dinámica.

c) La prudencia en la predicción, es forzada por la característica impredecible del complejo que usualmente se presenta en forma aleatoria. Esto indudablemente restringe la precisión del pronóstico.

d) El valor extremo de la complejidad, entendida como máxima inestabilidad de un suceso pasado conocido e instrumentado, podría proponer un umbral por encima del cual, la erupción está inevitablemente cerca.

1.5.2 Medición en la ionosfera

Se ha mirado la historia desde el 2004 hasta el 2010, siguiendo la órbita del satélite Demeter sobre zonas de actividad sísmica en el mundo y se han utilizado sus sensores para medir los pequeños campos electromagnéticos que se generan antes de los terremotos, además de otros parámetros de la ionosfera. Las observaciones mediante satélites son actualmente la forma más adecuada. Se pueden cubrir casi todas las áreas sísmicas del mundo en forma rápida.

Algunas variables electromagnéticas de la ionosfera medidas por el Demeter, se listan a continuación:

- Densidad de Electrones
- Densidad de Iones
- Densidad de H+
- Densidad de He+
- Densidad O+
- Temperatura del Electrón
- Temperatura de Iones
- Velocidad de Iones
- Potencial del plasma
- Angulo (V, Oz): ángulo de los electrones con el eje z
- Angulo: (Vxy, Ox): ángulo entre la velocidad de partículas y el eje x
- Otras mediciones indirectas aplicando fórmulas:
- Temperatura cinética
- Frecuencia del plasma
- Periodo del plasma
- Distancia Debye
- Distancia entre partículas
- Distancia de máximo acercamiento
- Partículas contenidas en la esfera Debye
- Recorrido medio de colisiones
- Frecuencia de colisión
- Conductividad
- Conductividad Pedersen
- Conductividad de Hall

- Tensor de conductividad

1.5.3 Procesamiento de la información

El propósito, es el de obtener información nueva a partir de la información medida por el satélite.

Los siguientes procedimientos matemáticos fueron utilizados en el procesamiento de los datos:

a) Entropía en múltiple escala.

Las series de tiempo fueron usadas para evaluar la complejidad informática de los campos electromagnéticos detectados por el Demeter. Entonces, la medida de la complejidad es comparada con una referencia o umbral, para determinar la ruta que está tomando el volcán. Mayor complejidad indica ruta hacia la erupción, menor, ruta hacia el reposo.

Se propone la tendencia como [6]:

$$F(n) = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}[y(k) - y_n(k)]^2} \tag{1.1}$$

Entonces, $F(n)$ es computada en diferentes escalas de tiempo. Así, $F(n)$ es un indicador de la complejidad del campo magnético medido en la ionosfera como respuesta a la actividad del volcán. El algoritmo de clasificación propuesto, se muestra en la Figura 1.2.

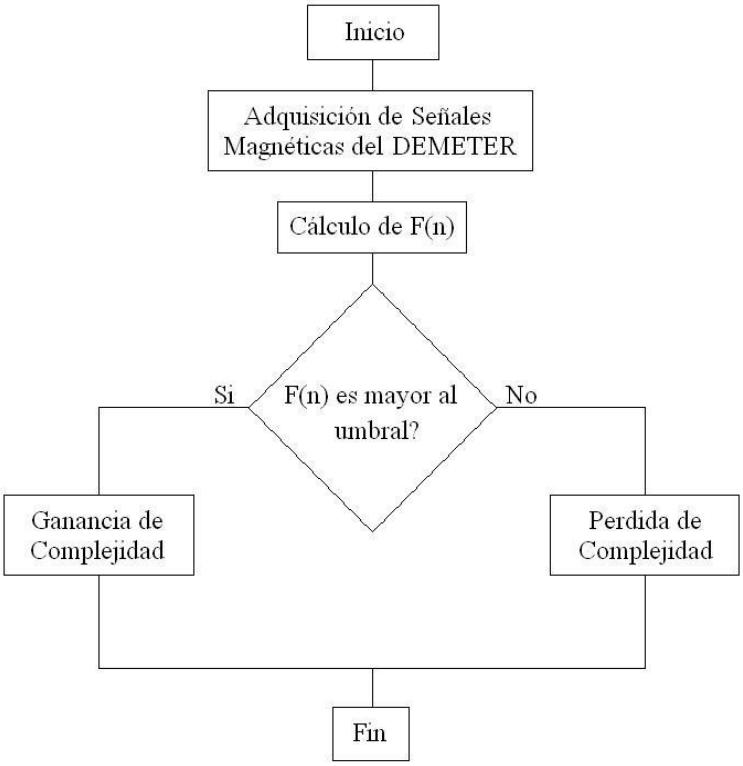


Figura 1.2: Diagrama de flujo para evaluar la ruta que puede estar tomando el volcán.

b) Entropía mutua entre algunas variables.

La entropía mutua entre los campos E y B, se define así:

$$M(E,B) = h(E) + h[B] - h(E,B) \tag{1.2}$$

O,

$$M(E,B) = -\frac{1}{2}\log_2\left[\left(1-\rho^2\right)\right] \tag{1.3}$$

Con ρ como el coeficiente de correlación.

De acuerdo con las anteriores definiciones, una expresión para la complejidad de la ionosfera sobre el área sísmica se ha propuesto como:

$$CX_{eq} = \sum M(E_z, n_e) + M(n_e, T_e) + M(v_e, E_z) + M(v_e, n_e) \tag{1.4}$$

Donde los términos corresponden a las entropías mutuas de:

Ez: penetración del campo eléctrico vertical.
Ne: densidad de electrones.
Te: temperatura de electrones.
ve: velocidad de electrones.

1.5.4 Medición no invasiva de circuitos de alta tensión

Un producto del presente estudio es el diseño, construcción, calibración y operación de un instrumento electrónico basado en dos sensores, el sensor de campo magnético, y el de campo eléctrico: un condensador formado por dos placas paralelas. Las señales de ambos sensores son amplificadas y acondicionadas por circuitos estándares. Las señales acondicionadas, se conectan a través de una interfaz análoga-digital a un computador portátil. Posteriormente, mediante software adecuado [7], se procesan los datos para conseguir nueva información que sirva para crear y proponer nuevos indicadores para evaluar la calidad de la potencia eléctrica suministrada a la carga.

1.6. Experimentación en campo

Se realizaron los siguientes experimentos utilizando el equipo científico del satélite Demeter [7]:

- IMSC: 3 sensores magnéticos
- ICE: un sistema de 4 sensores eléctricos
- IAP: un conjunto de analizadores para medir la composición de los iones.
- IDP: un detector de partículas de alta energía
- ISL: una sonda de Langmuir
- Medición inalámbrica de la entropía de las ondas electromagnéticas generadas por líneas de alta tensión y por transformadores eléctricos.

Los experimentos diseñados estuvieron orientados a:

1. Detectar anomalías electromagnéticas asociadas con la actividad en los volcanes, Cerro Machín, Galeras, Huila y Ruiz. Adicionalmente, se estudiaron algunos terremotos, Wenchuan, Samoa y Haití.
2. Explorar la variabilidad de la esfera de Debye en sus parámetros distancia, número de partículas, distancia mínima entre partículas, frecuencia de colisión y frecuencia del plasma, comparando una zona no sísmica en Brasil con el terremoto de Wenchuan y la actividad sísmica del complejo volcánico.
3. Medición inalámbrica de entropía de las ondas generadas por los circuitos de potencia eléctrica de Peralonso (Red doméstica y comercial), y de la red industrial de La Enea en Manizales.
4. Envejecimiento de transformadores mediante la medición de la entropía de las ondas electromagnéticas.

1.7. Hipótesis

Este estudio propone el desarrollo de componentes adicionales para ampliar, enriquecer y lograr mayor precisión en la predicción de erupciones volcánicas y la evaluación de calidad de la energía eléctrica. De esta manera, surgen dos hipótesis principales:

a) La distancia Debye es un nuevo posible indicador de erupciones y terremotos

b) Es viable evaluar mediante el análisis de la entropía de las ondas electromagnéticas radiadas por el circuito de alta potencia, las siguientes variables:

- Porcentaje de armónicos THD.
- Sobrecarga de transformadores.
- envejecimiento de transformadores.

1.8. Herramientas de computación

Las siguientes herramientas fueron usadas para mapear, adquirir y procesar información registrada por el Deméter. Ver

Tabla 1.1.

Tabla 1.1: Herramientas usadas en esta tesis.

	HERRAMIENTA COMPUTACIONAL
Mapas	Google Earth, Internet Explorer
Adquisición	IDL - rd_dmt_n1_V1.5:software del Demeter
Formato	Microsoft Office Word
Proceso	MSE (Multi-scale entropy), Microsoft Office Excel. Programa de multi -resolución de onditas bajo plataforma MATLAB Excel
Configuración Del MSE	La aplicación del MSE usó los siguientes parámetros: r = 0.15 and m = 2.

1.9. Elementos de innovación

a) En teoría.

Se ha partido de las ecuaciones de Maxwell para calcular la respuesta de un componente de la ionosfera: la esfera Debye, operando como oscilador armónico no lineal, al estímulo del campo eléctrico vertical. La respuesta es compleja y fue analizada en el contexto de las ecuaciones de Bessel, hallando singularidades espacio- temporales. La ocurrencia de singularidades es una característica nueva de los posibles precursores electromagnéticos de terremotos y erupciones. El hallazgo de tales singularidades electromagnéticas se origina por la modulación que realiza el campo eléctrico vertical sobre la conductancia de la ionosfera.

b) Procesamiento de los datos.

La introducción del operador entropía mutua entre diferentes actores electromagnéticos conduce al descubrimiento siguiente: la relación entropía mutua versus tiempo forma una onda posiblemente exponencial que crece antes del evento y cae el día del terremoto. Esto permitiría diseñar algoritmos de selección de precursores con el objetivo, en un futuro, de predecir los eventos sísmicos causados por fallas tectónicas o actividad volcánica.

c) Experimental.

El diseño y realización de varios experimentos modelando la ionosfera como una red de esferas de Debye, condujo a este descubrimiento, la distancia Debye podría ser un posible precursor.

d) Creación de un nuevo instrumento no invasivo para evaluar la calidad de la energía eléctrica.

Este instrumento consiste en un sistema de adquisición de datos de dos canales para medir la entropía de los campos eléctrico y magnético radiados por transformadores y líneas de alta tensión. Están basados en un condensador y una bobina. Permite evaluar el THD de:

- Campo eléctrico.
- Campo magnético.
- Potencia electro-magnética.
- Adicionalmente se puede determinar el factor de potencia.

1.10. Contribuciones

Los hallazgos obtenidos podrían ser útiles para el diseño de técnicas de selección, procesamiento y calificación final de los precursores con el fin de precisar la predicción de las erupciones volcánicas.

Las nuevas técnicas empleadas pueden ser utilizadas en forma novedosa en:

1. Calidad de la energía eléctrica en circuitos industriales y domiciliarios: midiendo la entropía mutua de las ondas electromagnéticas radiadas. También en forma no invasiva.
2. Sobrecarga de los transformadores: midiendo la entropía mutua entre los campos eléctrico y magnético de las ondas radiadas en forma no invasiva puede predecirse el fallo próximo de tales aparatos.
3. Detectores de mentiras, midiendo la entropía mutua entre voz y frecuencia cardíaca.
4. Determinación de la edad biológica de una persona midiendo la entropía mutua entre variabilidad de la frecuencia cardíaca y rata respiratoria en un contexto de métodos para retrasar el envejecimiento
5. Cardiología, fonoaudiología, urología,etc.

Algunas de las contribuciones han sido socializadas a través de las siguientes publicaciones y ponencias en congresos internacionales:

Tabla 1.2: Socialización de publicaciones y ponencias en congresos internacionales

EVENTO	ARTÍCULO	FECHA
IX Latin American Workshop On Magnetism, Magnetic Materials and their Applications (LAW3M 2010).	Preseismic Magnetic Signals.	Manizales 26/07/2010
VI Simposio Internacional sobre Calidad de la Energía Eléctrica SICEL 2011	Entropy and Coefficient of Variation (CV) as tools to Power Quality Assessment (Parte I).	Bogotá 01/11/2011
2ND International Demeter Workshop	Revealing singularities, holes and multiscale entropy maximums of the electromagnetic activity over Machin, Huila, Ruiz volcanoes And romerales fault, geological complex network in colombia as detected by Demeter.	París 10/10/2011
VI Simposio Internacional sobre Calidad de la Energía Eléctrica. SICEL 2011.	Entropy and Coefficient of Variation (CV) as tools to Power Quality Assessment (Parte II).	Asunción – Paraguay 1 al 7 de Noviembre de 2011
Latin American Workshop on Magnetism, Magnetic Materials and their Applications (LAW3M 2013)	Magnetic flux entropy as a tool to predict transformers failures.	Buenos Aires, Argentina 6 a 13 de Abril de 2013
Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications	Harmonics detection in transformers by Entropy of electromagnetic signals radiated (Parte I).	Bogotá 6 y 7 de Julio de 2013
IAS 2013 Industrial Application Society Annual Meeting.	Harmonics detection in transformers by Entropy of electromagnetic signals radiated (Parte II).	Miami Florida USA 6 al 11 de Octubre de 2013

EVENTO	ARTÍCULO	FECHA
VII Simposio Internacional sobre Calidad de la Energía Eléctrica. SICEL 2013	Evaluating Power Quality through electromagnetic fields radiated from Electrical Systems.	Medellin 27 a 29 de Noviembre de 2013
Publicación en revista Ingeniería e Investigación	Variation (Cv) as tools for Assessing Power Quality.	26/10/2011
Publicación en IEEEXplore	Harmonics detection in transformers by entropy of electromagnetic signals radiated.	07/07/2013
Publicación en revista IEEE Transaction on Magnetics	Magnetic Flux Entropy As A Tool To Predict Transformers Failures.	02/08/2013
Earth Sciences Research Journal	"IONOSPHERE DEBYE LENGTH RELATED TO SEISMIC ACTIVITY".	En revisión
Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (Premio).	Best Paper Award in the industry Applications Category (Harmonics detection in transformers by Entropy of electromagnetic signals radiated).	Bogotá 6 y 7 de Julio de 2013

1.11. Estructura de la tesis

El capítulo 2° inicia con una mirada clásica de la ionosfera, considerándola como un plasma formado por iones, electrones y neutros. Se asume que por ser una distribución de cargas, cumple las leyes de Maxwell. La pregunta del capítulo es: ¿cuál es la respuesta de la conductividad de la ionosfera al ser excitada por el campo eléctrico vertical?. A continuación se plantea la solución de las ecuaciones básicas, por ejemplo, la ley de Ohm, en un contexto ya conocido pero necesario para darle una base teórica a las predicciones planteadas en las hipótesis. Se sigue el hilo conductor formado por la cadena: generación de gas radón, modulación del campo eléctrico vertical, excitación de la conductividad de la ionosfera, respuesta de la ionosfera mediante la generación de

campos electromagnéticos en diferentes bandas de frecuencia, cambios en la densidad y temperatura de los electrones-iones.

El capítulo 3°, modela la ionosfera como una esfera de Debye [8] y se plantean las ecuaciones básicas que permitirán realizar un procesamiento de los datos recolectados. Este soporte teórico permite evaluar la variabilidad de la esfera de Debye ante la acción de campo eléctrico vertical y someter luego a prueba la hipótesis de que la distancia Debye puede ser un precursor de terremotos y erupciones volcánicas. Aquí, se modela la esfera Debye como un circuito LCR no lineal y se procede a evaluar la entropía del circuito en función de la conductividad, lo cual ayuda también al propósito de validar una de las hipótesis.

Experimentos de ensayo e introducción a bordo del Demeter se describen en el capítulo 4°.Adicionalmente, se introducen componentes de instrumentación del satélite.

El capítulo 5° pretende mirar a la ionosfera desde el punto de vista cuántico. La pregunta es: ¿en qué forma se puede describir la respuesta térmica del electrón o del ion bajo la acción del campo eléctrico vertical?. Se introducen algunas definiciones sobre entropía y se propone una ecuación de complejidad como la suma de entropías mutuas.

Los resultados finales se muestran en el capítulo 6° para la respuesta de la ionosfera ante la actividad sísmica.

El capítulo 7°, describe un experimento de laboratorio que permite simular el comportamiento de un transformador prototipo sometido a sobrecarga y envejecimiento, en el contexto de la evaluación de la calidad de la energía.

Experimentos de campo debajo de una línea de alta tensión se relatan en el capítulo 8°.

El capítulo 9° describe las conclusiones y trabajo futuro.

Finalmente, se presenta el apéndice A, en donde se explica como primera medida, el proceso realizado para validar un método alternativo para determinar el THD y factor de potencia en forma no invasiva y con base en la entropía. Posteriormente se describe los experimentos hechos en laboratorio que simulan en escala los fenómenos registrados en la ionosfera por el Demeter.

CAPÍTULO 2

DINÁMICA DE LA ESFERA DEBYE EN LA IONOSFERA

Se presentan en este capítulo, bases matemáticas para desarrollar la tesis. Se parte de las ecuaciones de Maxwell para conseguir expresiones matemáticas propias y ser utilizadas en el resto de la tesis. También se muestran ideas físicas paralelas que justifican el uso de las ecuaciones obtenidas.

El circuito eléctrico global puede ser modulado por la emanación de radón y otros gases desde las fallas tectónicas y volcanes en actividad. El efecto, es la generación de una sobretensión eléctrica que penetra a la ionosfera. Una esfera Debye responde ensanchándose o deprimiéndose. Las ecuaciones de Maxwell son empleadas para crear una ecuación que ligue la distancia Debye con el campo eléctrico de penetración.

2. DINÁMICA DE LA ESFERA DEBYE EN LA IONOSFERA

Las ecuaciones convencionales de Maxwell [9], se pueden aplicar a la electrodinámica de la ionosfera para analizar y predecir su comportamiento en asociación con la actividad sísmica.

Las cargas eléctricas que constituyen parte de la ionosfera, electrones e iones positivos y negativos, forman arreglos y se distribuyen formando esferas Debye [10]. Una esfera Debye puede construirse con un ion positivo como núcleo, rodeado por electrones. El radio de la esfera o distancia Debye puede ser un indicador de actividad sísmica respondiendo a la presencia de la penetración de un campo atmosférico vertical [11]. Un objetivo de este capítulo, es obtener una ecuación que conecte al campo eléctrico vertical con la distancia Debye de una esfera tomada como prototipo.

Así, este capítulo inicia con la discusión de la conductividad eléctrica de una esfera Debye de la ionosfera. Ecuaciones básicas y bien conocidas se usan para expresar la conductividad de la esfera en tres niveles, conductividad paralela, conductividad Pedersen y conductividad Hall. Luego, se discute la respuesta de la conductividad a la presencia del campo eléctrico; se acepta que el campo eléctrico vertical tiene forma de pulso, de acuerdo con información tomada de la base de datos del satélite Deméter. La Figura 2.1 muestra un ejemplo de un pulso generado 2 días antes de un terremoto. Estas gráficas son la evidencia de la conexión electromagnética entre la litosfera y la ionosfera y son la base física para la discusión matemática presentada en este capítulo. El satélite Deméter [12], registró la aparición de un pulso de campo eléctrico vertical atmosférico (ICE ULF waveform Ez), dos días antes del terremoto señalado con el triángulo rojo. Para el mismo tiempo aparece ensanchamiento en la energía (IDP electron flux) y depresión en la densidad de los iones de oxígeno (IAP ion density).

La siguiente sección, describe las ecuaciones que conducen a la creación de una fórmula que permite predecir la magnitud de la distancia o radio Debye en función del campo eléctrico.

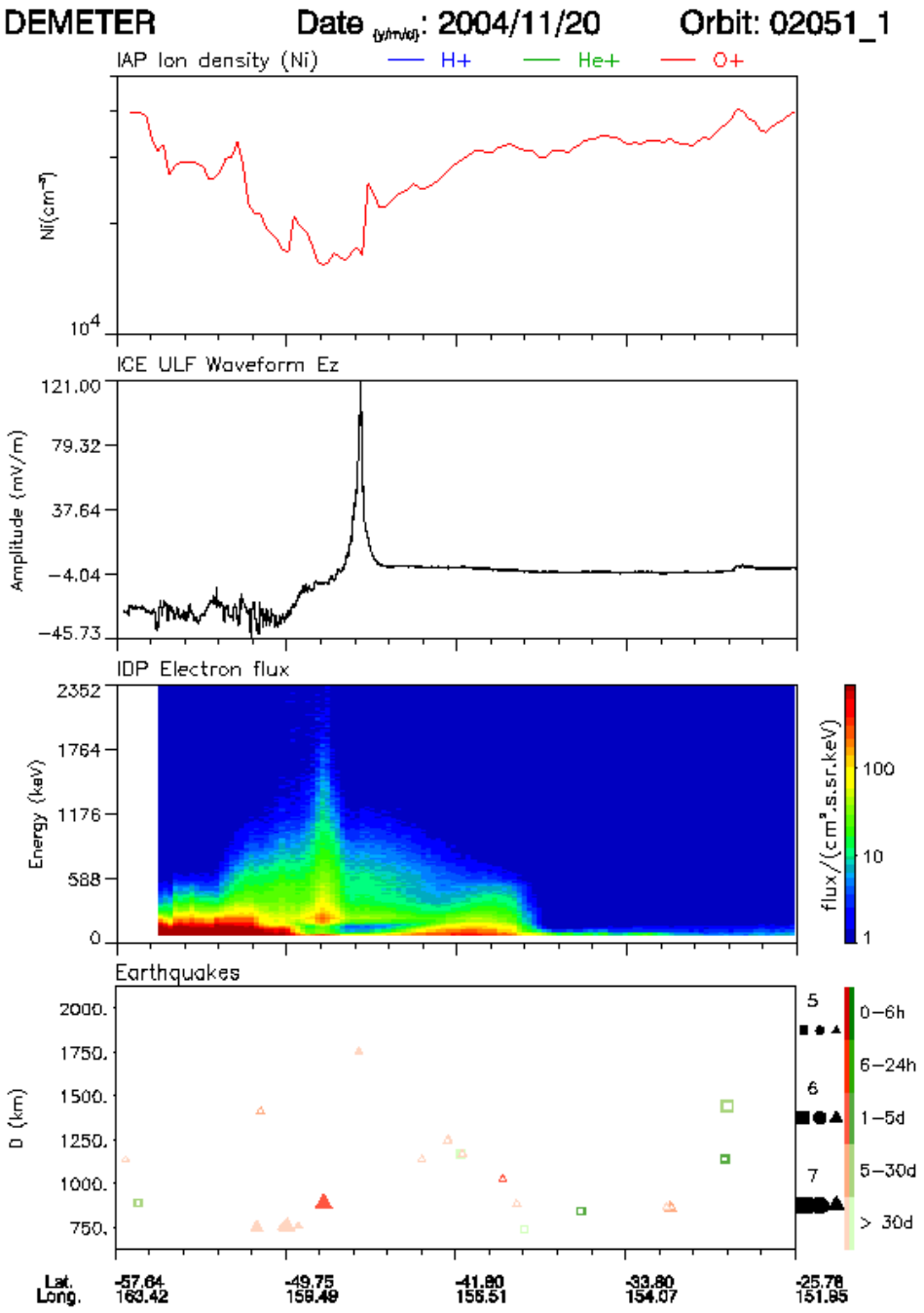


Figura 2.1: Registro de la aparición de un pulso de campo eléctrico vertical atmosférico, por el satélite Deméter.

2.1. Conductividad de la ionosfera y el campo eléctrico vertical

El objetivo es analizar la respuesta de la ionosfera a la penetración del campo eléctrico vertical y su acción sobre una esfera Debye individual prototipo. Como resultado, se espera que la esfera entre en oscilación y responda generando campos electromagnéticos. Al final, se espera encontrar varias ecuaciones de campo magnético y eléctrico en función de la distancia Debye, las cuales permiten realizar cálculos, obtener gráficas y comparar con resultados experimentales obtenidos por el Deméter.

El interés, es conocer la forma en que la ionosfera responde al campo eléctrico vertical, aplicando la ecuación:

$$J = \sigma(t)E(t) \tag{2.1}$$

donde,
J : Densidad de corriente
$\sigma(t)$: Conductividad de la esfera Debye
$E(t)$: Campo eléctrico vertical aplicado sobre la esfera Debye

2.2. Conductividad paralela

La conductividad paralela [13], se define así:

$$\sigma_0(t) = (6.91)^2 \frac{T_e e v_-}{E_0 \lambda_D{}^2} \tag{2.2}$$

Siendo:
T_e : Temperatura de los electrones
e : Carga del electrón
v_- : Velocidad de los electrones
E_0 : Campo eléctrico en reposo generado por la esfera Debye
$\lambda_D{}^2$: Radio de la esfera Debye

2.3. Campo eléctrico vertical

El campo vertical se modela mediante la siguiente ecuación que corresponde a un pulso [14] y de acuerdo con datos extraídos del Deméter (ver Figura 2.1):

$$E(t) = \int_0^\infty A(\omega)\sin\omega t d\omega + \int_0^\infty B(\omega)\cos\omega t d\omega \tag{2.3}$$

Las siguientes definiciones se aplican a la anterior ecuación:

$A(\omega) = 0$, para todo ω.

$B(\omega) = 0$, para valores de ω por fuera del intervalo $(\omega_2 - \omega_1)$.

$B(\omega) = \dfrac{A(0)}{\Delta\omega}$, para ω comprendido en el intervalo $(\omega_2 - \omega_1)$.

Ver Figura 2.2.

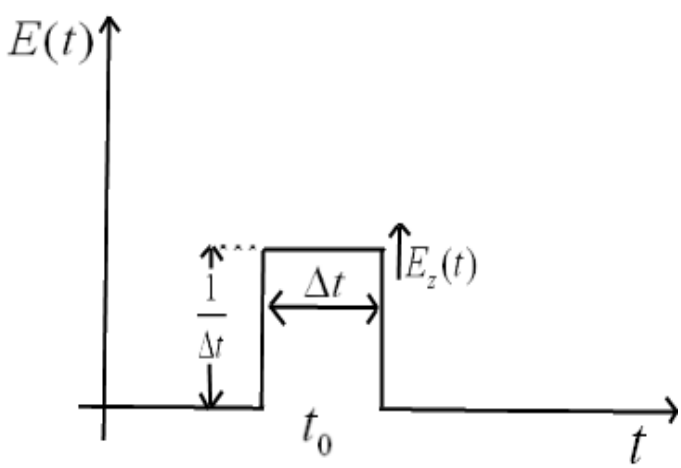


Figura 2.2: Modelo del pulso correspondiente a la penetración del campo eléctrico vertical.

La ecuación (2.1) se convierte en:

$$J = (6.91)^2 \frac{T_e e v}{E_0 \lambda_D{}^2} E \tag{2.4}$$

Combinando con la ecuación (2.3), se presenta la expresión para la respuesta de la densidad de corriente de la esfera Debye a un pulso:

$$J.(t) = \left((6.91)^2 \frac{T_e e v}{E_0 \lambda_D{}^2} \right) \left[\int_0^\infty A(\omega) \sin \omega t d\omega + \int_0^\infty B(\omega) \cos \omega t d\omega \right] \tag{2.5}$$

2.4. Cinemática de la ionosfera en la presencia de un pulso eléctrico asociado con actividad sísmica

Es posible crear una ecuación diferencial que permita conocer la relación entre la distancia Debye y el campo eléctrico, pero antes es necesario caracterizar a la conductividad, la cual corresponde a un tensor. Es de anotar que la discusión se limita a la conductividad paralela σ_0 por razones teóricas. La altura del satélite, es la dominante sobre la conductividad Pedersen y la conductividad Hall; sin embargo, se quiere mostrar la conductividad integral para futuros trabajos.

Para llegar a una expresión de σ(t), es necesario discutir la cinemática de la ionosfera y hallar el valor de la densidad de corriente J. Para esto, se aplican las leyes básicas de la mecánica, comenzando con la relación entre aceleración de la partícula (electrón -ion) y la fuerza correspondiente al campo eléctrico:

$$\vec{a} = \frac{e \left[\int_0^\infty A(\omega) \sin \omega t d\omega + \int_0^\infty B(\omega) \cos \omega t d\omega \right]}{m_-} \tag{2.6}$$

a: simboliza la aceleración que adquiere la esfera Debye como respuesta a la penetración del campo vertical.
e y m_- : son carga eléctrica y masa del electrón.

El momentum promedio de los iones positivos se define así:

$$m_+ \overline{v_+} = \sum_j \left(m_+ v_j + q \int_0^\infty A(\omega) \sin \omega t_j d\omega + \int_0^\infty B(\omega) \cos \omega t_j d\omega \right) \tag{2.7}$$

$m_+ \overline{v_+}$: Momentum promedio de los iones positivos
$\overline{v_+}$: Velocidad promedio de los iones positivos

Entonces, la velocidad promedio de un ion positivo en la presencia de un campo E es:

$$\overline{v_+} = \frac{\int_0^\infty A(\omega)\sin\omega t d\omega + \int_0^\infty B(\omega)\cos\omega t d\omega q\bar{t}}{m_+} \tag{2.8}$$

En forma similar, se pueden escribir ecuaciones similares para el electrón. Por otro lado, la velocidad promedio en términos de la aceleración lo describe la siguiente ecuación:

$$\overline{v_-} = \frac{1}{\tau}\int_0^{\tau_1} atdt = \frac{1}{2}a\tau_1 = \frac{1}{2}\frac{q\int_0^\infty A(\omega)\sin\omega t d\omega + \int_0^\infty B(\omega)\cos\omega t d\omega\tau_1}{m_-} \tag{2.9}$$

$$= \frac{1}{2}\frac{e\int_0^\infty A(\omega)\sin\omega t d\omega + \int_0^\infty B(\omega)\cos\omega t d\omega\tau_1}{m_-} \tag{2.10}$$

Donde v_- es la velocidad del electrón, e es la carga del electrón, τ_1 es el intervalo de tiempo entre la primera y segunda colisión.

El promedio de tiempo de un conjunto de colisiones en un período, se puede proponer como:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_j \tau_j}{j} \tag{2.11}$$

Así, la velocidad promedio de un electrón luego de sucesivas colisiones queda:

$$\overline{v_-} = \frac{e\left[\int_0^\infty A(\omega)\sin\omega t d\omega + \int_0^\infty B(\omega)\cos\omega t d\omega\right]}{m_-}\bar{\tau} \tag{2.12}$$

y para un ion positivo:

$$\overline{v_+} = \frac{e\left[\int_0^\infty A(\omega)\sin\omega t d\omega + \int_0^\infty B(\omega)\cos\omega t d\omega\right]}{m_+}\overline{\tau} \tag{2.13}$$

Es de anotar que la velocidad de los electrones es mayor que la de los iones por la diferencia de masas.

La densidad de corriente J se puede escribir en función de la densidad de iones n_i y la densidad de electrones n_e:

$$\vec{J} = e\frac{e\left[\int_0^\infty A(\omega)\sin\omega t d\omega + \int_0^\infty B(\omega)\cos\omega t d\omega\right]}{m_+}\overline{\tau} + n_e e\frac{e\left[\int_0^\infty A(\omega)\sin\omega t d\omega + \int_0^\infty B(\omega)\cos\omega t d\omega\right]}{m_-}\overline{\tau} \tag{2.14}$$

Factorizando y agrupando se consigue:

$$\vec{J} = n_e e^2\left[\frac{\overline{\tau_1}}{m_+} + \frac{\overline{\tau_e}}{m_-}\right]\left[\int_0^\infty A(\omega)\sin\omega t d\omega + \int_0^\infty B(\omega)\cos\omega t d\omega\right] \tag{2.15}$$

Las frecuencias de colisión, f_i y f_e son inversamente proporcionales al tiempo:

$$f_i = \frac{1}{\tau_1} \tag{2.16}$$

$$f_e = \frac{1}{\tau_e} \tag{2.17}$$

La ecuación (2.15) se convierte en:

$$\vec{J} = n_e e^2\left[\frac{1}{m_+ f_i} + \frac{1}{m_- f_e}\right]\left[\int_0^\infty A(\omega)\sin\omega t d\omega + \int_0^\infty B(\omega)\cos\omega t d\omega\right] \tag{2.18}$$

$$= n_e e^2 \left[\int_0^\infty A(\omega) \sin \omega t d\omega + \int_0^\infty B(\omega) \cos \omega t d\omega \sigma_0 \right] \tag{2.19}$$

La anterior ecuación expresa la relación entre densidad de corriente de la esfera Debye y la penetración del campo eléctrico vertical, mostrado como el segundo término dentro de corchetes.

Entonces, la conductividad σ_0 es definida como:

$$\sigma_0 = n_e e^2 \left(\frac{1}{m_+ f_i} + \frac{1}{m_- f_e} \right) \tag{2.20}$$

2.5. Relación entre la frecuencia de colisión y la distancia Debye

Retomando la expresión para la conductividad:

$$\sigma_0(t) = (6.91)^2 \frac{T_e ev}{E_0 \lambda_D{}^2} \tag{2.21}$$

Reemplazando (2.20) en (2.21):

$$(6.91)^2 \frac{T_e ev}{E_0 \lambda_D{}^2} = n_e e^2 \left(\frac{1}{m_+ f_i} + \frac{1}{m_- f_e} \right) \tag{2.22}$$

$$\lambda_D{}^2 = \frac{(6.91)^2 T_e ev}{E_0 n_e e^2 \left(\frac{1}{m_+ f_i} + \frac{1}{m_- f_e} \right)} \tag{2.23}$$

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{(6.91)^2 T_e ev}{E_0 n_e e^2 \left(\frac{1}{m_+ f_i} + \frac{1}{m_- f_e} \right)}} \tag{2.24}$$

$$\lambda_{De} = \sqrt{\frac{(6.91)^2 T_e evm_- f_e}{E_0 ne^2}} \tag{2.25}$$

Asumiendo constante a $E_0, ne^2, T_e, e, v, m_-$, se consigue:

$$\lambda_{De} = \sqrt{\frac{(6.91)^2 T_e evm_- f_e}{E_0 n_e e^2}} \tag{2.26}$$

$$K_{11} = \frac{(6.91)^2 T_e evm_-}{E_0 n_e e^2} \tag{2.27}$$

$$\lambda_{De} = \sqrt{K_{11} f_e} \tag{2.28}$$

La Figura 2.3 ilustra la anterior ecuación:

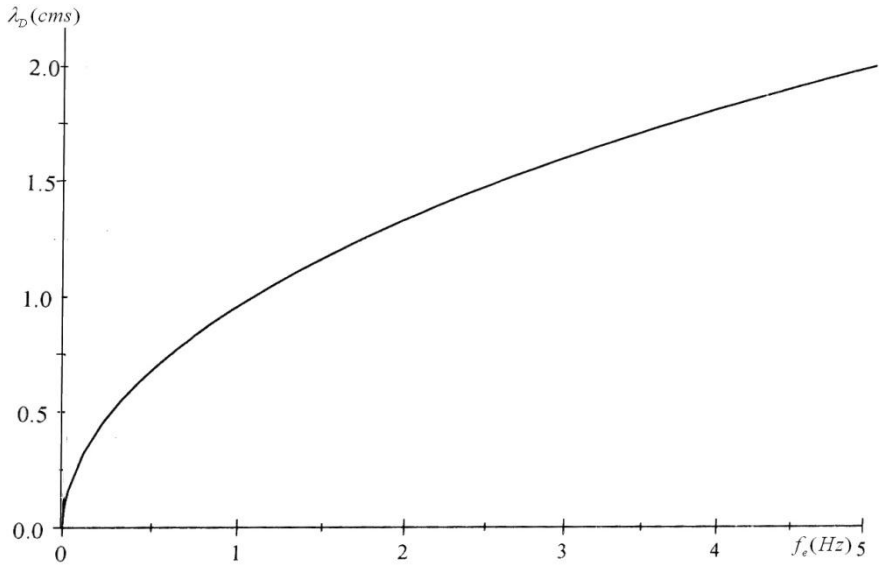


Figura 2.3: Gráfica que muestra la relación entre distancia Debye y la frecuencia de colisión entre electrones.

Considerando que $m_1 >> m_e$ y reemplazando la ecuación anterior se aproxima a:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{(6.91)^2 T_e e \dfrac{e\left[\int_0^\infty A(\omega)\sin\omega t d\omega + \int_0^\infty B(\omega)\cos\omega t d\omega\right]}{m_-}\bar{\tau}}{E_0 n e^2 \left(\dfrac{1}{m_- f_e}\right)}} \tag{2.29}$$

Simplificando,

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{(6.91)^2 T_e \dfrac{e\left[\int_0^\infty A(\omega)\sin\omega t d\omega + \int_0^\infty B(\omega)\cos\omega t d\omega\right]}{m_-}\bar{\tau} v m_- f_e}{E_0 n e^2}} \tag{2.30}$$

2.6. Ángulo de los electrones de la esfera Debye con el eje z

Por otro lado, el ángulo que hacen los electrones con el eje z se consigue a partir de la siguiente ecuación:

$$\sigma_0 = A \tan \alpha_e \tag{2.31}$$

α_e es el ángulo que forman los electrones con el eje z.

$$A \tan \alpha_e = \frac{(6.91)^2 T_e e v}{E_0 \lambda_D{}^2} \tag{2.32}$$

$$\tan \alpha_e = \frac{(6.91)^2 T_e e v}{E_0 \lambda_D{}^2 A} \tag{2.33}$$

2.7. Conductividad en presencia de un campo magnético: Conductividad Pedersen [15]

Las siguientes definiciones preparan la discusión de la conductividad de la esfera Debye en presencia de un campo magnético:

$$\omega_e = \frac{B_e}{m_-} \tag{2.34}$$

$$\tan \alpha = \frac{\omega_e}{f_e} \tag{2.35}$$

$$A = \frac{n_e}{B} \tag{2.36}$$

Para calcular la conductividad en la cual el campo eléctrico es perpendicular, llamada también conductividad Pedersen, en honor a él quien fue el primero en darla a conocer, se adiciona una segunda fuerza sobre la partícula causada por un campo magnético B.

$$\bar{a} = \frac{e\int_0^\infty A(\omega)\sin\omega t d\omega + \int_0^\infty B(\omega)\cos\omega t d\omega}{m_-} + \frac{e}{m_-}\left(\vec{v}\times\vec{B}\right) \tag{2.37}$$

Pedersen siguió un procedimiento similar, y encontró:

$$\sigma_p = ne^2 \frac{f_e}{m_-\left(\omega_e^2 + f_e^2\right)}\left[\int_0^\infty A(\omega)\sin\omega t d\omega + \int_0^\infty B(\omega)\cos\omega t d\omega\right] \tag{2.38}$$

2.8. Conductividad Hall

La conductividad de efecto Hall [13] se determina así:

$$\sigma_H = ne^2\left(\frac{\omega_e}{m_+\left(f_e^2 + \omega_e^2\right)} - \frac{\omega_i}{m_+\left(f_i^2 + \omega_i^2\right)}\right) \tag{2.39}$$

2.9. Tensor de conductividad

La conductividad resultante constituye un tensor anisotrópico en 3D, que se expresa como:

$$\sigma(t) = \begin{pmatrix} \sigma_p & -\sigma_H & 0 \\ \sigma_H & \sigma_p & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_0 \end{pmatrix} \tag{2.40}$$

$$\sigma(t) = \begin{pmatrix} ne^2 \frac{f_e}{m_-\left(\omega_e^2 + f_e^2\right)}\left[\int_0^\infty A(\omega)\sin\omega t d\omega + \int_0^\infty B(\omega)\cos\omega t d\omega\right] & -ne^2\left(\frac{\omega_e}{m_+\left(f_e^2 + \omega_e^2\right)} - \frac{\omega_i}{m_+\left(f_i^2 + \omega_i^2\right)}\right) & 0 \\ ne^2\left(\frac{\omega_e}{m_+\left(f_e^2 + \omega_e^2\right)} - \frac{\omega_i}{m_+\left(f_i^2 + \omega_i^2\right)}\right) & ne^2 \frac{f_e}{m_-\left(\omega_e^2 + f_e^2\right)}\left[\int_0^\infty A(\omega)\sin\omega t d\omega + \int_0^\infty B(\omega)\cos\omega t d\omega\right] & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_0 \end{pmatrix} \tag{2.41}$$

2.10. Campo eléctrico vertical y la distancia Debye

Las ecuaciones para los modos TE y TM en los cuales opera una esfera Debye son tomadas de las ecuaciones de Maxwell:

$$\overrightarrow{\nabla \times E} = -j\omega\mu\overrightarrow{H} \tag{2.42}$$

$$\overrightarrow{\nabla \times H} = \begin{pmatrix} \sigma_p & -\sigma_H & 0 \\ \sigma_H & \sigma_p & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_0 \end{pmatrix} \overrightarrow{E} \tag{2.43}$$

donde:

μ : Permeabilidad magnética de la esfera Debye

H : Intensidad del campo magnético

E : Intensidad del campo eléctrico

ω : Frecuencia angular

σ_p : Conductividad Pedersen

σ_H : Conductividad hall

σ_0 : Conductividad paralela

$$\sigma_H = ne^2 \left(\frac{\omega_e}{m_+(f^2{}_e + \omega^2{}_e)} - \frac{\omega_i}{m_-(f^2{}_i + \omega^2{}_i)} \right) \tag{2.44}$$

$$\sigma_0 = (6.91)^2 \frac{T_e ev}{E_0 \lambda_{De}{}^2} \tag{2.45}$$

$$\sigma_p = ne^2 \left(\frac{f_e}{m_-(\omega^2{}_e + f^2{}_e)} \right) \tag{2.46}$$

n : Densidad de cargas eléctricas

m_+ : Masa del ion

m_-: Masa del electrón
f_e: Frecuencia de colisión de electrones
ω_e: Frecuencia angular de colisión de los electrones
f_i: Frecuencia de colisión de los iones
ω_i: Frecuencia angular de colisión de los iones
T_e: Temperatura de los electrones
e: Carga eléctrica del electrón
λ_{De}: Radio de la esfera Debye para electrones

Además:

$$\overrightarrow{\nabla \times E} = \left[\frac{\partial E_z}{r\partial\theta} - \frac{\partial E_\theta}{\partial Z}\right]\hat{r} + \left[\frac{\partial E_r}{\partial Z} - \frac{\partial E_z}{\partial r}\right]\hat{u\theta} + \frac{1}{r}\left[\frac{\partial E_\theta r}{\partial r} - \frac{\partial E_r}{\partial \theta}\right]\hat{Z} \tag{2.47}$$

$$\overrightarrow{\nabla \times H} = \left[\frac{\partial H_z}{r\partial\theta} - \frac{\partial H_\theta}{\partial Z}\right]\hat{r} + \left[\frac{\partial H_r}{\partial Z} - \frac{\partial H_z}{\partial r}\right]\hat{u\theta} + \frac{1}{r}\left[\frac{\partial H_\theta r}{\partial r} - \frac{\partial H_r}{\partial \theta}\right]\hat{Z} \tag{2.48}$$

Combinando las seis ecuaciones anteriores en el marco de coordenadas cilíndricas (Figura 2.4), se llega a:

$$\frac{\partial Ez}{r\partial\theta} = -j\omega\mu H_r \tag{2.49}$$

$$\frac{\partial Ez}{\partial r} = j\omega\mu H_\theta \tag{2.50}$$

$$\frac{\partial E_\theta}{\partial r} - \frac{1}{r}\frac{\partial E_r}{\partial \theta} = -j\omega\mu H_z \tag{2.51}$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial r} = -n_e e^2\left(\frac{f_e}{m_-(\omega^2{}_e + f^2{}_e)}\right)E_\theta - n_e e^2\left(\frac{\omega_e}{m_+(f^2{}_e + \omega^2{}_e)}\right)E_r \tag{2.52}$$

$$\frac{\partial H_z}{r\partial\theta} = n_e e^2 \left(\frac{f_e}{m_-(\omega^2{}_e + f^2{}_e)} \right) E_r + n_e e^2 \left(\frac{\omega_e}{m_+(f^2{}_e + \omega^2{}_e)} \right) E_\theta \tag{2.53}$$

$$\frac{\partial H_\theta}{\partial r} - \frac{1}{r}\frac{\partial H_r}{\partial\theta} = (6.91)^2 \frac{T_e ev}{E_0 \lambda_{De}{}^2} E_z \tag{2.54}$$

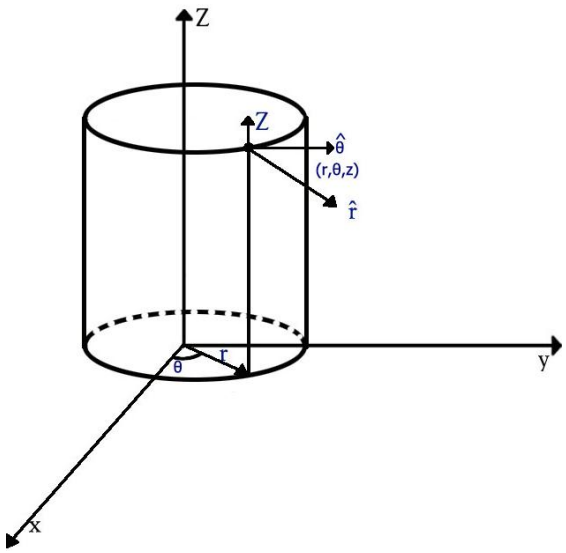


Figura 2.4: Sistema de referencia en coordenadas cilíndricas.

En las cuales se asume $\frac{\partial}{\partial Z} = 0$. La variación de interés es la radial por la geometría de la esfera.

Combinando las anteriores ecuaciones (2.49) hasta (2.54), se llega a:

$$\alpha \frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{\alpha}{r^2}\frac{\partial^2 E_z}{\partial\theta^2} + (6.91)^2 \frac{T_e ev}{E_0 \lambda_{De}{}^2} E_z = 0 \tag{2.55}$$

$$\frac{1}{\beta\sigma_H}\frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{\sigma_p r^2}\frac{\partial^2 H_z}{\partial\theta^2} + \beta H_z = 0 \tag{2.56}$$

donde:

$$\alpha = \frac{1}{j\omega\xi\mu} \tag{2.57}$$

ξ: Susceptibilidad magnética

$$\beta = \frac{ne^2\left(\frac{\omega_e}{m_+(f^2{}_e + \omega^2{}_e)}\right)}{ne^2\left(\frac{f_e}{m_-(\omega^2{}_e + f^2{}_e)}\right)} + \frac{ne^2\left(\frac{f_e}{m_-(\omega^2{}_e + f^2{}_e)}\right)}{ne^2\left(\frac{\omega_e}{m_+(f^2{}_e + \omega^2{}_e)}\right)} \tag{2.58}$$

Las ecuaciones (2.54) y (2.55), se pueden convertir en ecuaciones de Bessel para facilitar expresiones para E_z y H_z. Lo anterior se logra haciendo separación de variables:

$$E_z(r,\theta) = U(r)V(\theta) \tag{2.59}$$

Siguiendo el método de separación de variables se arriba a:

$$\frac{\alpha r^2}{U}\frac{d^2U}{dr^2} + \alpha\frac{1}{V}\frac{d^2V}{d\theta^2} + (6.91)^2\frac{T_e ev}{E_0\lambda_{De}{}^2}r^2 = 0 \tag{2.60}$$

El término $\alpha\frac{1}{V}\frac{d^2V}{d\theta^2}$, no depende de r y por lo tanto es una constante:

$$\alpha\frac{1}{V}\frac{d^2V}{d\theta^2} = -m^2 \tag{2.61}$$

La solución es de la forma:

$$V = c\cos(m\theta) \tag{2.62}$$

La simplificación algebraica conduce a:

$$\frac{r^2}{U}\frac{d^2U}{dr^2} - m^2 + \frac{(6.91)^2 \frac{T_e ev}{E_0 \lambda_{De}{}^2}}{\alpha} r^2 = 0 \tag{2.63}$$

Dividiendo por r^2 y multiplicando por U, la ecuación (2.60) evoluciona a:

$$\frac{d^2U}{dr^2} + \left(\frac{(6.91)^2 \frac{T_e ev}{E_0 \lambda_{De}{}^2}}{\alpha} - \frac{m^2}{r^2} \right) U(r) = 0 \tag{2.63}$$

Esta es una ecuación tipo Bessel que ofrece una solución para U(r) de la forma:

$$U(r) = K_1 J_n \left(\frac{(6.91)^2 \frac{T_e ev}{E_0 \lambda_{De}{}^2}}{\alpha} r \right) + K_2 Y_n \left(\frac{(6.91)^2 \frac{T_e ev}{E_0 \lambda_{De}{}^2}}{\alpha} r \right) \tag{2.65}$$

Así, la solución queda determinada por las funciones Bessel de primer grado: J_n y Neuman Y_n. Finalmente, se arriba a la solución para los campos así:

$$E_z(r,\theta) = U(r)V(\theta) \tag{2.66}$$

$$E_z(r,\theta) = U(r)V(\theta) = U(r) \tag{2.67}$$

$$V(\theta) = 1 \text{ para } \theta = 0 \tag{2.68}$$

$$E_z(r) = \left[K_1 J_n \left(\frac{(6.91)^2 \frac{T_e ev}{E_0 \lambda_{De}{}^2}}{\alpha} r \right) + K_2 Y_n \left(\frac{(6.91)^2 \frac{T_e ev}{E_0 \lambda_{De}{}^2}}{\alpha} r \right) \right] \tag{2.69}$$

$$H_z(r) = \left[K_3 J_n(\beta r) + K_4 Y_n(\beta r) \right] \tag{2.70}$$

Se repiten algunas ecuaciones de distancia Debye y son reemplazadas:

$$\lambda_{De} = 6.91 \sqrt{\frac{T_e}{n_e}} \tag{2.71}$$

$$\lambda_{De} = 6.91 \sqrt{\frac{T_e}{\frac{E_0 \sigma_0}{ev}}} \tag{2.72}$$

$$\lambda^2{}_{D_e} = (6.91)^2 \frac{T_e ev}{E_0 \sigma_0} \tag{2.73}$$

Una expresión para la conductividad de la esfera Debye es:

$$\sigma_0 = (6.91)^2 \frac{T_e ev}{E_0 \lambda^2{}_{D_e}} = \frac{A}{\lambda^2{}_{D_e}} \tag{2.74}$$

La solución está determinada por los polinomios de Bessel J_n and Neuman Y_n:

$$E_z(r) = \left[K_1 J_n \left(\frac{\sigma_0}{\frac{1}{j\omega\xi\mu}} r \right) + K_2 Y_n \left(\frac{\sigma_0}{\frac{1}{j\omega\xi\mu}} r \right) \right] c \tag{2.75}$$

Otra simplificación conduce a:

$$E_z(r) = -K_3\left(0.25A\frac{r}{\lambda^2_{D_e}} - 1\right) \tag{2.76}$$

La ecuación de arriba considera solo el término Bessel. La constante K3 contiene todas las demás constantes.

La Simulación gráfica de la ecuación anterior, produce la Figura 2.5.

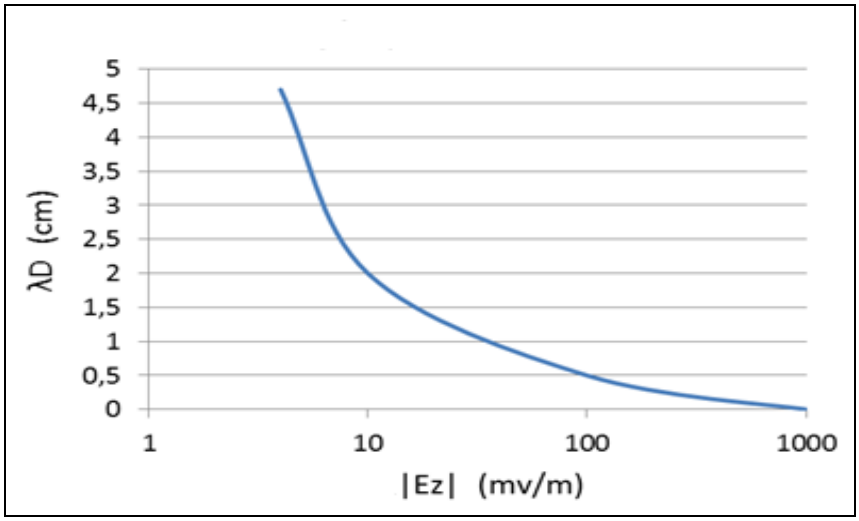


Figura 2.5: Relación entre campo eléctrico atmosférico vertical y la distancia de una esfera Debye.

2.11. Conclusiones del capítulo

Se obtuvieron ecuaciones que van a ser usadas para validar las hipótesis planteadas en el capítulo 1:

$$\mathrm{J}(t) = \left(K\frac{T_e ev}{E_0\lambda_D{}^2}\right)\left[\int_0^\infty A(\omega)\sin\omega t d\omega + \int_0^\infty B(\omega)\cos\omega t d\omega\right] \tag{2.77}$$

$$E_z(r) = -K_3\left(0.25A\frac{r}{\lambda^2{}_{D_e}} - 1.0\right) \tag{2.78}$$

$$\tan\alpha_e = \frac{KT_e ev}{E_0\lambda_D{}^2 A} \tag{2.79}$$

Las expresiones anteriores facilitan la caracterización de la respuesta de la esfera Debye a la presencia de la penetración del campo eléctrico vertical.

CAPÍTULO 3

CONEXIÓN ELECTROMAGNÉTICA ENTRE LA LITOSFERA Y LA IONOSFERA

En este capítulo se describen algunos fenómenos básicos que sirven de plataforma para abordar la lectura fluida de los subsiguientes capítulos. Se muestra primero cómo un conjunto de propiedades y características, hacen el centro de la tesis y luego, cómo se alcanza un grado de jerarquía. Se pone énfasis en que las propiedades y características deben provenir de los parámetros conservativos del sistema, para poder definir a partir de ellos, el grado, nivel o curva de excelencia.

El componente teórico fundamental predice que una esfera Debye localizada en la ionosfera, es sensible a la penetración del campo eléctrico global. La esfera Debye se deprime y se ensancha dependiendo de la polaridad del campo. Es posible además, modelarla como un circuito LRC, pues está formada por un arreglo de cargas eléctricas. De esta manera, las ecuaciones básicas de los circuitos eléctricos pueden aplicarse para conocer la respuesta de la esfera ante la acción del campo eléctrico.

3. CONEXIÓN ELECTROMAGNÉTICA ENTRE LA LITOSFERA Y LA IONOSFERA

La primera mirada a la ionosfera (órbita baja: 700 km) tiene un fundamento clásico y por lo tanto macro.

Se inicia con las observaciones que se han realizado en los últimos años utilizando diferentes instrumentos, y se enfoca en la conductividad de la ionosfera determinada por electrones libres, iones y neutros, formando un tejido plasmático. Una pregunta importante surge, ¿cómo y cuánto es el cambio de la conductividad en el dominio del tiempo en un área determinada por la esfera de Debye [16] durante el evento sísmico?. La discusión matemática está dirigida a plantear un modelo de acuerdo a las observaciones y mediciones que se obtiene con los datos del Demeter, y basado en la gráfica que ilustra la forma en que evoluciona la conductividad durante el evento sísmico. El análisis presenta además variables y parámetros: campos electromagnéticos, campo eléctrico vertical, gas radón y conductancia eléctrica de la atmósfera.

3.1. Esfera Debye

En el estudio de la ionosfera, el radio de Debye determina el volumen de la esfera Debye. Este arreglo de cargas puede presentarse en dos configuraciones, un ion positivo luciendo como núcleo o centro de la distribución rodeado de una nube de electrones, o un ion negativo rodeado de iones positivos. Los electrones rodeando al ion positivo generan un blindaje o apantallamiento en el plasma. Entonces, la longitud de Debye es la distancia sobre la cual puede ocurrir una separación significativa de carga. La longitud de Debye recibe su nombre en honor del físico y físico-químico Holandés Peter Debye.

3.2. Ionosfera y la capa F2

La ionosfera es la parte de la atmósfera terrestre ionizada permanentemente debido a la fotoionización que provoca la radiación solar. Está localizada entre la mesosfera y la exosfera, y se extiende aproximadamente entre los 80 km y los 800 km de altitud. Por otra parte, algunos consideran que la alta ionosfera está sujeta a elevadas temperaturas por la ionización de los gases, los cuales están formados por electrones libres, iones positivos, neutros y también, aunque en cantidades más pequeñas, iones negativos. Demeter estuvo orbitando en la capa F2 a una altura de 700 km.

3.3. Campo eléctrico vertical

La historia de la relación entre sismos y campos electromagnéticos, se inicia en el año de 1924. Durante una expedición a kirguizia (Rusia), el profesor Chernyavsky [17] (1924-1955), observó que la aguja de su medidor de campo eléctrico para el estudio de las tormentas eléctricas, se movió al máximo de la escala (el día estaba quieto y tibio) y unas 4 horas después se disparó el terremoto. A partir de ese momento, se introdujo el término campo eléctrico anómalo constante con dirección vertical y con la flecha apuntando hacia la tierra, como actor principal en el escenario de la pareja sísmica vs campos electromagnéticos. Usualmente en clima suave, el campo eléctrico atmosférico varía poco y es del orden de 100v/m, pero 1 día antes del terremoto en las montañas de los Cárpatos, con una intensidad del terremoto de M=6.9, el campo eléctrico medido por Nikiforova se elevó a 770 voltio/m. ver Figura 3. 1.

Otros científicos han observado también lo mismo durante clima tranquilo y libre de tormentas, encontrando picos antes de algunos terremotos estudiados. Bonchkovsky (1954) [18] y Kondo (1968), mencionaron la aparición de fenómenos electromagnéticos en varias bandas de frecuencia, desde DC hasta VHF y detectables por radio situados lejos del epicentro. Mediciones más recientes han sido hechas por Hao [19] (1988); Nikiforova y Michnovski en 1995. Posteriormente, Vershinin [20], utilizando equipos modernos y con técnicas más precisas, confirmó los hallazgos pioneros. El terremoto de Alaska [21] en Marzo 27 de 1964, con magnitud M=9.2, ha sido uno de los más fuertes en la historia de las observaciones sísmicas. George Moore reportó por primera vez señales magnéticas a las que llamó precursores, las cuales aparecieron dos horas antes de este terremoto. Recientemente, científicos de la Academia Rusa de Ciencias, iniciaron observaciones sistemáticas en la banda ULF correlacionando algunas variables

asociadas con la actividad sísmica, y por lo tanto actualmente hay un interés marcado en la instrumentación de señales ULF que parecen promisorias para avisar sobre los terremotos.

Un concepto que enriqueció esta área es el de "preparación de la zona del terremoto", introducida por (Dobrovolsky et al. 1979 [22]; Keilis-Borok and Kossobokov 1990; Bowman et al. 1998). La zona del epicentro presenta deformaciones en su corteza fácilmente medibles, con instrumentos tales como medidores de estiramiento basados en galgas extensiométricas (strain gages), inclinómetros y deformímetros. La formación de fracturas ocurre en la zona de preparación y se acompaña de cambios en la velocidad de las ondas sísmicas, resistividad eléctrica del suelo, nivel de agua en el terreno y precursores geoquímicos. Los cambios mencionados forman el contexto para la predicción de los terremotos. Luego del terremoto mencionado en Alaska, se comenzó a mencionar la conexión entre litosfera e ionosfera y así el terreno estaba preparado por el conocimiento que ya se tenía de la ionosfera a partir de su papel en las comunicaciones, muchas de las cuales eran vía propagación ionosférica. Se disponía de radio sondas para estudiar algunos parámetros y variables de la ionosfera. La primera publicación fue hecha por Antselevich [23] (1971), quien estudió las variaciones de la frecuencia de corte de la ionosfera antes del terremoto de Tashkent en 1966. Además, cambios en la densidad de electrones del área de la ionosfera encima del epicentro del terremoto se revelaron. Para estos estudios se utilizaban radio sondas ubicadas en tierra, los que operan como transmisores tipo radar y todavía empleados para estudiar las características de la ionosfera.

Actualmente, hay aceptación evidente de la existencia de pequeños campos magnéticos asociados con terremotos y actividad volcánica. Las observaciones continúan con equipos en tierra, en la ionosfera y en la magnetosfera con sensores eléctricos y magnéticos operando en un gran número de rangos de frecuencia, los cuales detectan cambios en los parámetros de la ionosfera en relación directa con la actividad sísmica.

Las siguientes gráficas muestran casos de picos del campo eléctrico vertical para 2 terremotos:

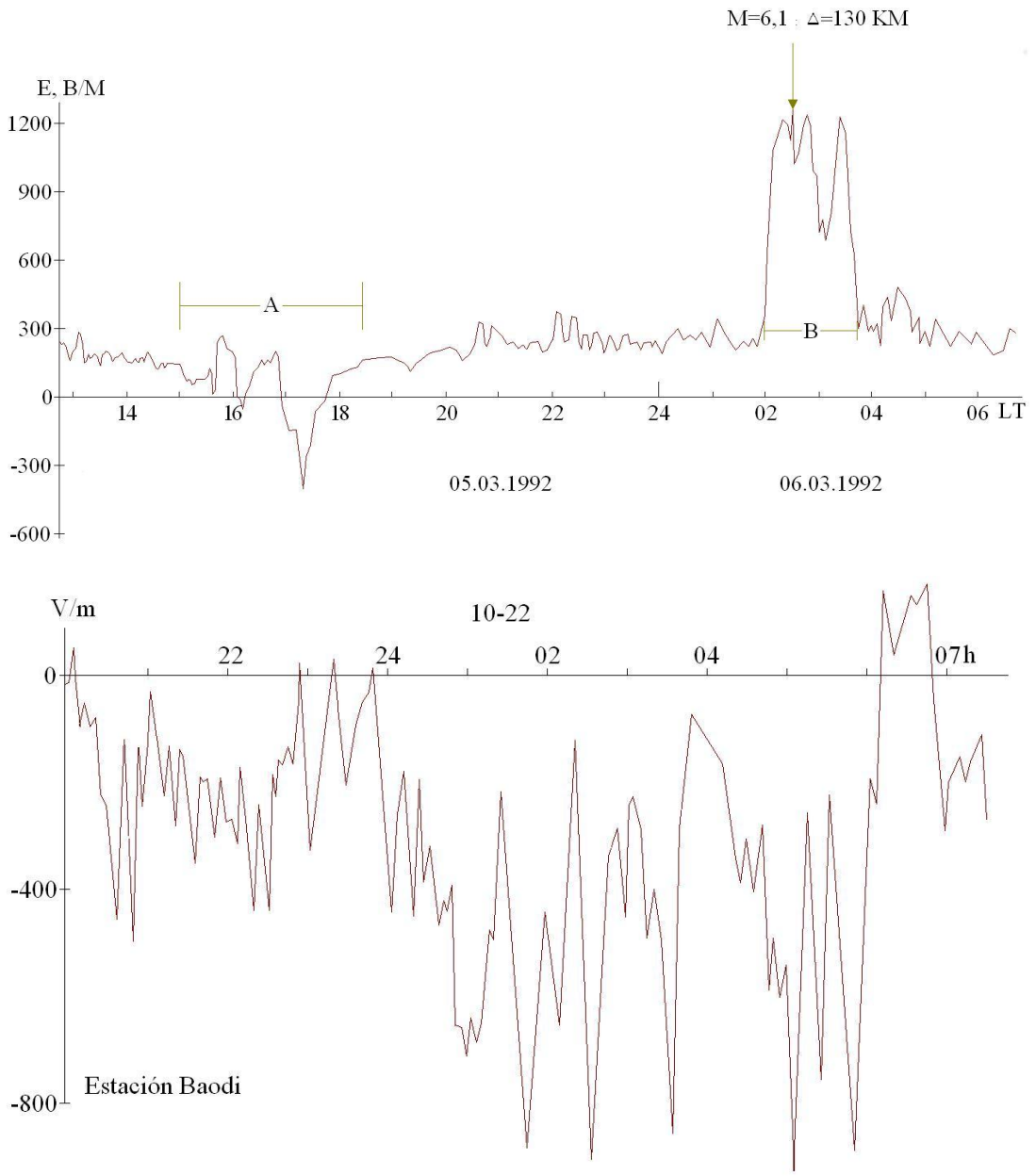


Figura 3. 1: Ejemplos de campo eléctrico anómalo antes de varios terremotos (Nikiforova and Michnowski 1995; Vershinin et al. 1999; Hao et al.2000).

3.4. Gas radón: disparo del terremoto

Antes del terremoto en Kobe (1995) se registró un inusual registro de gas radón. Desde el interior de la tierra fluyó gas a través de grietas, microfallas, junturas y por la porosidad del terreno. Este hallazgo ha llevado a considerar el aumento anómalo de

radón como un precursor de terremotos y erupciones volcánicas. Se sabe que la concentración de este gas, está relacionado con la presión atmosférica, humedad y temperatura; pero no sólo en Kobe sino también en otros eventos, la concentración excedió los valores normales.

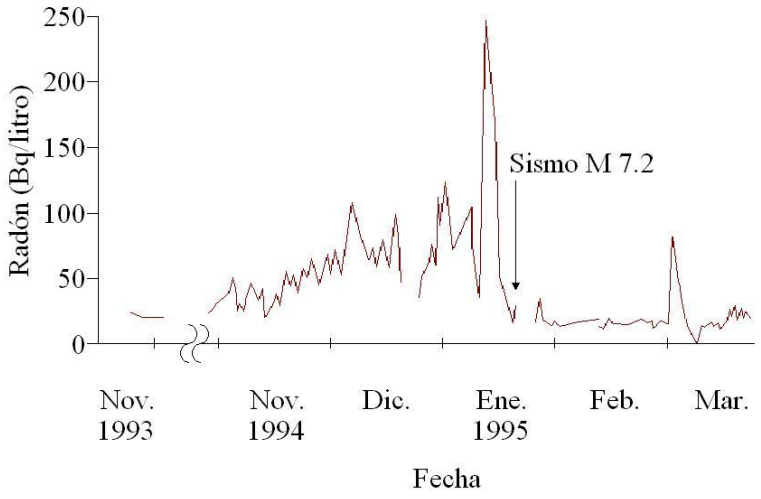


Figura 3. 2: Exhalación de radón en Kobe antes del terremoto.

Se ha encontrado también que en estructuras de ingeniería tal como un túnel entre dos lagos generó radón, lo cual se puede explicar por el aumento sustancial del estiramiento y estrés del terreno. Los derivados del radón son también gases ionizantes que en contacto con la atmósfera producen un aumento de su conductividad eléctrica σ.

3.5. El radón modula el campo eléctrico vertical

El circuito eléctrico global ha ganado información gracias a cálculos hechos por satélites y estaciones de tierra. El circuito eléctrico global enlaza al campo eléctrico y al flujo de corriente en las diferentes áreas de la atmósfera, la ionosfera y la magnetosfera, formando un gigantesco condensador; el condensador es cargado por las descargas eléctricas atmosféricas a potenciales del orden de centenas de miles de voltios. La corriente eléctrica desde la superficie de la tierra hacia la nube de tormenta está compuesta por corriente dependiente del campo, corriente de convección, corriente de la descarga eléctrica, corriente de precipitación y corriente de desplazamiento. La

presencia anómala de radón produce una perturbación en la conductividad de la atmósfera y de ahí, un cambio tipo escalón en la magnitud del campo eléctrico vertical. El disparo de la descarga eléctrica nube-ionosfera puede verse afectada por condiciones geomagnéticas, viento solar, llamaradas solares, rayos cósmicos, aurora boreal, etc. El clima de la tierra también afecta al circuito eléctrico global.

3.6. Circuito eléctrico global

Un esquema para ilustrar al circuito eléctrico global [24] se ofrece en la Figura 3.3.

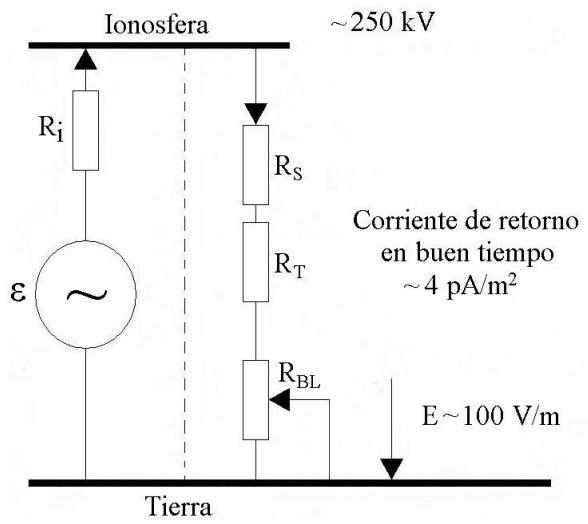


Figura 3.3: Modelo global eléctrico.

Se puede concluir del esquema anterior:

$$V_{io} = \frac{\varepsilon(R_T + R_S + R_{BL})}{R_i + (R_T + R_S + R_{BL})} = \varepsilon \frac{R_L}{R_i + R_L} \tag{4.2}$$

Siendo $R_L = R_T + R_S + R_{BL}$

La resistencia R_i puede disminuir con la presencia de radón, modulando el campo eléctrico aplicado sobre la ionosfera y creando un aumento sustancial en el valor pico aplicado.

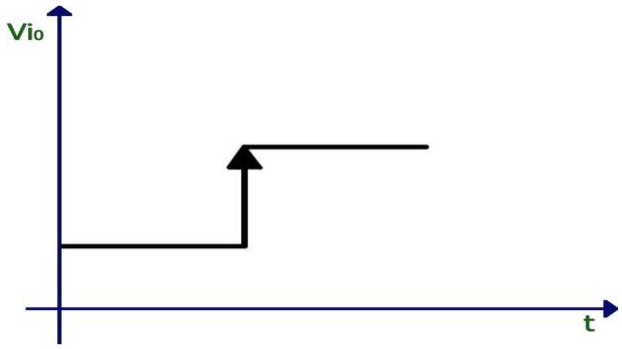


Figura 3.4: Escalón en el circuito eléctrico global.

$$V_{io} = t\left(\frac{R_L}{R_i} + 1\right) \tag{4.3}$$

Dibujo del campo eléctrico vertical actuando sobre la conductancia de la ionosfera

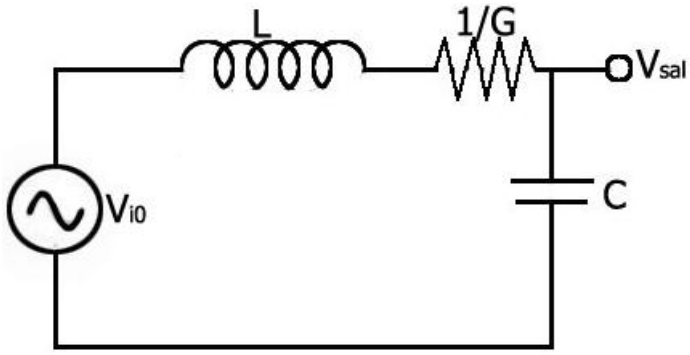


Figura 3.5: Circuito mostrando el campo eléctrico aplicado sobre el modelo RLC de la esfera Debye.

Donde los siguientes parámetros modelan la esfera Debye:

- G=Conductancia
- L=inductancia

- C=capacitancia

3.7. Respuesta de la conductancia eléctrica de la esfera Debye al campo eléctrico vertical

Con base en datos del Demeter y luego de varios experimentos, se ha encontrado que la forma en que evoluciona la conductividad eléctrica de la ionosfera sobre el área de un evento sísmico, se puede observar en la siguiente figura:

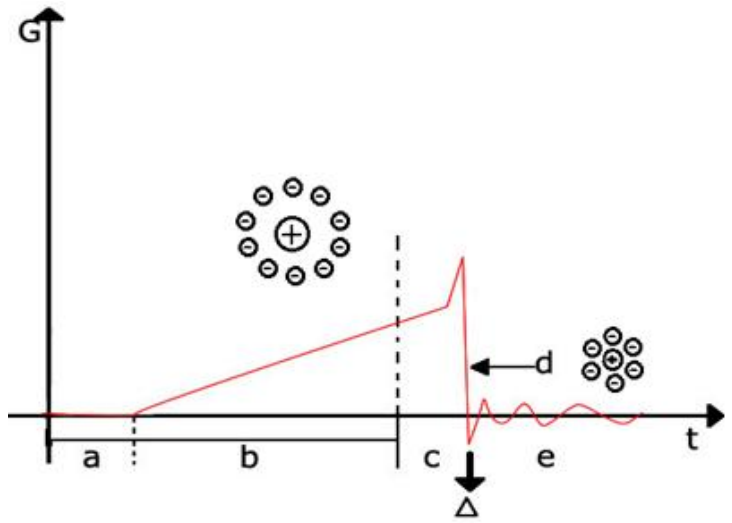


Figura 3.6: Respuesta de la conductancia de la esfera Debye al terremoto.

La onda presenta 5 fases:

a) constante: en estado de reposo de la falla tectónica y durante la noche con baja actividad geomagnética.

b) Ascendente, siguiendo la ecuación y=t.

c) Pico repentino configurando una singularidad.

d) Caída del valor siguiendo la forma de un escalón.

e) Vuelta al reposo son perturbaciones adicionales oscilatorias.

Si se acepta que la ionosfera se puede modelar como una red de osciladores RLC acoplados, se puede preguntar cómo es su respuesta ante el campo eléctrico vertical. Así, la ecuación diferencial de un oscilador RLC se escribe como:

$$\frac{d^2 i(t)}{dt^2} + \frac{1}{\sigma L}\frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{LC} i(t) = 0 \tag{4.4}$$

La conductividad σ aumenta al incrementarse la densidad de electrones, en proporción al campo eléctrico vertical.

La Figura 3.7 muestra la respuesta simulada de una esfera Debye a la penetración del campo eléctrico vertical.

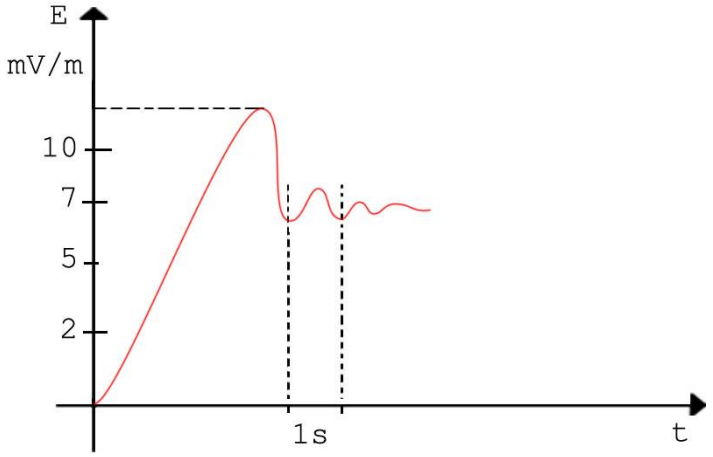


Figura 3.7: Respuesta sub-amortiguada de una esfera Debye en la ionosfera.

La ecuación (4.3) se convierte en (aceptando que la conductancia en función del tiempo se puede representar como $\sigma(t) = \sigma_0 t$).

$$\frac{d^2 i(t)}{dt^2} + \frac{1}{L\,\sigma_o t}\frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{LC} i(t) = 0 \tag{4.5}$$

$$t\frac{d^2 i(t)}{dt^2}+\frac{1}{L\,\sigma_o}\frac{di(t)}{dt}+t\frac{1}{LC}i(t)=0 \tag{4.6}$$

Esta es una ecuación de Bessel de segundo tipo de orden cero. La solución es llamada función Neumann de orden cero y es denotada como:

$$Y_0(t)=\frac{2}{\pi}\left[J_0(t)\left(\ln\frac{t}{2}+\gamma\right)+\sum_{m=1}^{\infty}\frac{(-1)^{m-1}h_m}{2^{2m}(m)^2}\right] \tag{4.7}$$

La gráfica de la respuesta del circuito se muestra en la Figura 3.8:

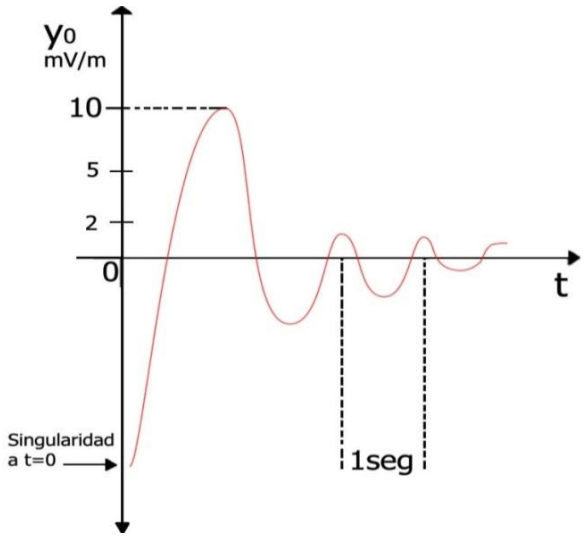


Figura 3.8: Gráfica del campo eléctrico mostrando singularidad a t=0.

3.8. Conclusiones del capítulo

- La ionosfera se puede modelar como una red de esferas Debye.
- Una esfera Debye muestra el comportamiento de un circuito RLC.
- La conductancia de una esfera Debye sigue el patrón mostrado en la figura (4.6).
- La respuesta de una esfera Debye contiene singularidades en el tiempo.

CAPÍTULO 4

EXPERIMENTOS A BORDO DEL SATÉLITE DEMETER

La validación de las hipótesis sobre la aplicación de la electrodinámica de la esfera Debye para la identificación de precursores de terremotos se ha logrado mediante el equipo de instrumentación a bordo del satélite Demeter compuesta por:

MSC: 3 sensores magnéticos.

ICE: un sistema de 4 sensores eléctricos.

IAP: un conjunto de analizadores para medir la composición de iones.

IDP: un detector de partículas de alta energía.

ISL: una sonda de Langmuir.

4. EXPERIMENTOS A BORDO DEL SATÉLITE DEMETER

De acuerdo con el equipo científico de la misión del satélite Francés Demeter, la existencia de anomalías electro- magnéticos de baja intensidad en la atmósfera e ionosfera y asociadas a terremotos o erupciones volcánicas, se ha conocido desde hace más de 60 años [25]. Las observaciones correspondientes son llevadas a cabo en estaciones terrestres, en la ionosfera y la magnetosfera con sensores eléctricos y / o magnéticos que operan en una diversidad de gamas de frecuencias, [26]. Detectan cambios en la magnitud de señales correspondientes a campos electromagnéticos, densidad y temperatura de electrones e iones, velocidad, ángulo y otros en el dominio del tiempo y de la frecuencia. Esto puede suceder antes de un terremoto configurándose como posibles precursores, [27].

Por lo tanto, observaciones en la ionosfera, por medio de satélites [28] y en forma paralela en la tierra, han revelado la existencia de alteraciones significativas no sólo después, sino también antes de los terremotos. Sin embargo, las observaciones publicadas en la actualidad sólo se refieren a un número limitado de casos y todavía hacen falta más mediciones durante un tiempo largo con el fin de poder generalizar.

Se requieren observaciones continuas durante meses, o incluso años, de todos los parámetros asociados con terremotos y erupciones volcánicas. Adicionalmente, se requieren estudios teóricos y experimentales para analizar los procesos físicos responsables del sismo o erupciones.

Comprender todos estos fenómenos requiere el desarrollo simultáneo de experimentos en el suelo y mediciones a bordo de satélites. Campañas de instrumentación electrónica en tierra y cerca de los epicentros, son en teoría más fáciles de llevar a cabo y pueden combinar un número grande de experimentos complementarios. Por otra parte, tienen la desventaja de los problemas que suponen la ubicación geográfica, el posicionamiento de los diferentes sensores y el tiempo de observación.

Las observaciones por satélite, todavía imperfectas y limitadas, pueden ser, actualmente las más adecuadas para la fase preliminar de la demostración y la caracterización de los fenómenos electromagnéticos en la ionosfera, [29]. Permiten mejorar la calidad de las observaciones ampliando las zonas de ubicación y utilizando equipamiento científico de alta tecnología .Además, tienen la gran ventaja de que abarcan casi todos los ámbitos de la actividad sísmica en todo el mundo y rápidamente; pero estas observaciones sólo son útiles si se puede demostrar su origen sismo tectónico, y definir todas sus características y su variabilidad según la condiciones de la ruptura. Pese a lo anterior, sufren las siguientes debilidades:

- Discontinuas en el tiempo.
- Bandas de frecuencia estrechas.

Las mediciones realizadas por el experimento DEMETER, fueron destinadas a estudiar las emisiones de ondas electromagnéticas observadas durante los terremotos y las erupciones volcánicas, las alteraciones en la ionosfera y la atmósfera superior, y las precipitaciones correspondientes de partículas, de forma sistemática.

Este experimento se inició con observaciones realizadas en la década de 1980; fue realizado inicialmente por accidente y no de manera sistemática, por científicos Rusos y Japoneses, y luego por científicos Franceses.

Otro objetivo científico del Demeter es la vigilancia mundial del electromagnetismo alrededor de la Tierra, ya que desde Auréol-3 en 1981, ningún satélite científico en órbita baja había realizado mediciones en regiones de latitudes medias. También fue capaz de estudiar la influencia de las tormentas en las relaciones entre el Sol y la Tierra, y de evaluar el impacto de las actividades humanas en la ionosfera.

Figura 4.1: El Demeter orbitando alrededor de la tierra.

DEMETER, el satélite francés lanzado en 2004, estuvo registrando datos hasta diciembre de 2010. Se utilizaron instrumentos como el ICE para el campo eléctrico, IMSC para la medición del campo magnético, IAP como un analizador de plasma, IDP como detector de partículas, e ISL, compuesto de un conjunto de dos sondas de Langmuir. Se analizaron los campos electromagnéticos, la temperatura de los iones, la densidad de cargas eléctricas, velocidad, ángulo, voltaje de plasma, composición de iones y otros.

Para describir estos fenómenos, algunos investigadores mencionan la influencia de las ondas de gravedad acústica generadas por el terremoto y los campos eléctricos verticales que penetran en la zona del terremoto en la ionosfera. Se mencionan los cambios de conductividad en el aire, y la generación de ondas de gravedad causadas por los gases que emanan a través de las fallas en la corteza terrestre. Registro TEC, [4] (contenido de electrones) ha sido utilizado para medir las variaciones de densidad de electrones y la temperatura en la ionosfera sobre la base de los datos del ISL del Demeter.

Estos resultados experimentales son compatibles con las estimaciones teóricas de Davies y Archambeau, [30]. Ellos estudiaron las perturbaciones ionosféricas causadas por ondas de gravedad acústicas generadas por terremotos, y, que miden el cambio relativo en la concentración de electrones, hallando un cambio significativo. Por lo tanto, es posible considerar un modelo de acoplamiento sísmica-ionosférica, [31]:

transformaciones mecánicas, procesos geoquímicas activos, emanación de radón, preparan el inicio de precursores ionosféricos.

Después de la formación de grupos neutros, se inicia la generación del campo eléctrico anómalo. Emisiones de gases se producen a partir de la corteza (principalmente CO2) en la zona de preparación de terremoto, [32]. La atmósfera cerca de la zona se convierte rica en iones. El proceso de separación de carga descrito por Pulinets conduce a la generación de un, anormalmente, fuerte campo eléctrico vertical. Por lo tanto, la capa de tierra cerca de la atmósfera se convierte en plasma real con la concentración de partículas comparables con algunas regiones de la ionosfera de la Tierra.

Los investigadores en Tayikistán (1970-1980) encontraron que los cambios en la corteza terrestre en forma de deformaciones, las variaciones en la velocidad de las ondas sísmicas, emanación de gases procedentes de la corteza de la tierra, cambios en la conductividad eléctrica de la corteza, etc., se observan no sólo en el origen del terremoto, sino también en la zona inferior o igual a la fuente. Entonces, debido a la variabilidad de plasma, generación de señales de ULF-ELF-VLF son posibles. Los efectos combinados de los procesos en la atmósfera, la ionosfera y la magnetosfera, producen partículas que causan la ionización de la ionosfera baja; por lo tanto, muchos experimentos han demostrado indicadores de preparación del terremoto tales como deformación mecánica, emanaciones geoquímicas de la corteza y fenómenos ionosféricos, y la formación de una falla principal en la llamada zona de preparación de terremoto.

De esta manera, se puede considerar a los precursores ionosféricos como un miembro de la familia de los precursores geofísicos habituales descrito en muchas publicaciones y mencionado por Pulinets. El satélite Demeter y otros, gracias a órbitas consecutivas pueden hacer un mapa de la ionosfera sobre la zona de preparación de terremoto. Con esta técnica se consigue obtener una instantánea de la ionosfera que muestra la distribución real de la densidad de electrones en una hora local determinada; los datos de satélites de órbita baja tal como el Demeter, han sido empleados para presentar una correlación entre la actividad sísmica y las emisiones electromagnéticas.

4.1. Descripción de la carga útil científica

Las perturbaciones electromagnéticas en la ionosfera las midió el Demeter utilizando varios tipos de sensores:

- MSC: 3 sensores magnéticos.
- ICE: un sistema de 4 sensores eléctricos.
- IAP: un conjunto de analizadores para medir la composición de iones.
- IDP: un detector de partículas de alta energía.
- ISL: una sonda de Langmuir.

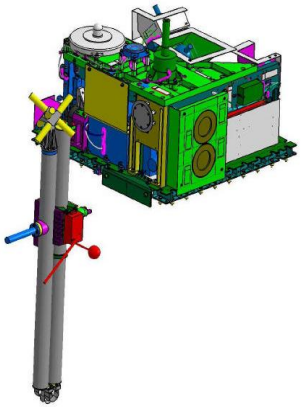


Figura 4. 2: Diagrama de la carga científica del Demeter.

4.2. Experimentos típicos a realizar

a) Experimento IMSC

b) Experimento ICE

c) Experimento (IAP)

d) Experimento IDP

e) Experimento ISL

4.2.1 Experimento IMSC

4.2.1.1 Medición de espectros de campo magnético en la ionosfera

Dos días antes del terremoto mostrado con el triángulo rojo intenso se adquirió con el magnetómetro del Demeter el espectro VLF, tal como se muestra en la Figura 4. 3.

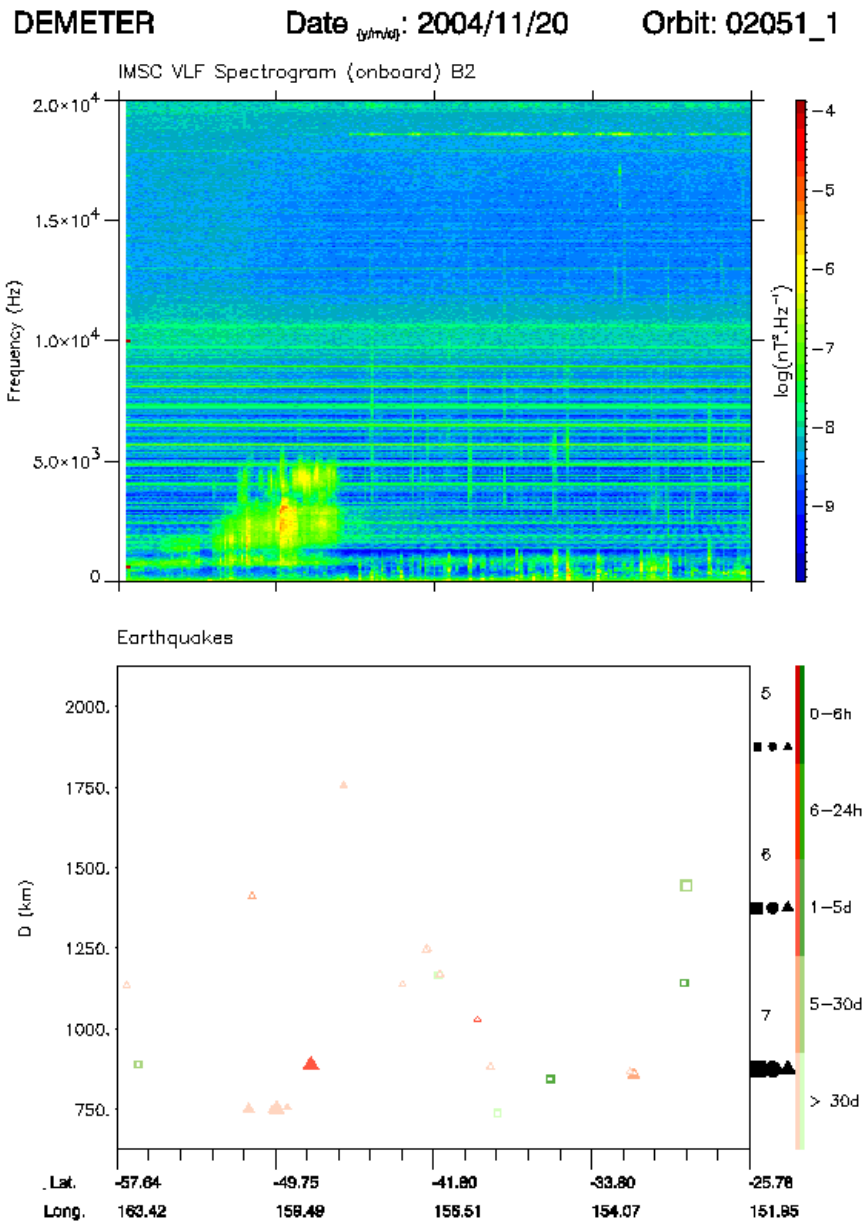


Figura 4. 3: Espectro magnético en respuesta a un terremoto.

Tal como se mencionó antes, la medición de la componente VLF magnética, se realizó con el magnetómetro. Este dispositivo es un instrumento de bobina diseñado para medir el campo magnético de 3 componentes en una amplia gama de frecuencias. El valor del campo magnético viene dado por la corriente que fluye a través de una bobina enrollada alrededor de una barra de μ-metal. Las 3 antenas para medir las componentes del campo magnético están montados a lo largo de 3 ejes ortogonales en el extremo de un brazo de 1,9 metros de largo. Este instrumento fue desarrollado por el Laboratorio de Física y de Chimie de l'Environnement (LPCE). Ver Figura 4.4.

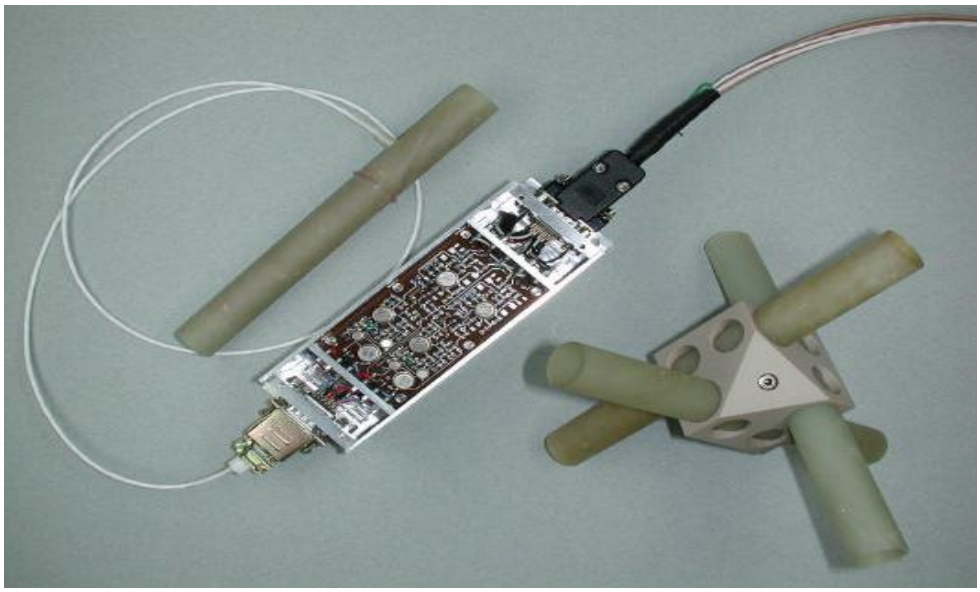


Figura 4.4: Magnetómetro IMSC.

4.2.1.2 Características instrumentales

Se registran las formas de onda de las 3 componentes ELF (10Hz-1kHz) y una componente VLF. El espectro de potencia para la componente VLF se calcula sistemáticamente por el método de ventanas y FFT, y se guarda como copia de seguridad. La operación de pre-procesamiento del espectro se lleva a cabo a bordo con una red neuronal.

4.2.2 Experimento ICE

4.2.2.1 Medición de campos eléctricos en la ionosfera

El instrumento de campo eléctrico (ICE) mide las 3 componentes del campo eléctrico, en un amplio rango de frecuencias (CC - 3 MHz), gracias a un sistema de antenas compuesto de cuatro sensores cada una. Este instrumento fue elaborado por el Centre d'études des Environnements Terrestre y Planétaires (CETP).

4.2.2.2 Objetivos del experimento

- Medir las variaciones relativas a lo largo de la órbita con una precisión del orden de 1 mV / m para el campo eléctrico.
  Detectar alteraciones debidas a la actividad sísmica en la zona de los epicentros de los eventos estudiados.
- Detección, en la ionosfera, de señales eléctricas ULF asociados con la actividad sísmica de los eventos seleccionados.
- Perturbaciones del campo eléctrico continuo en la ionosfera causado por ondas atmosféricas de gravedad y acústicas.
- Turbulencia electrostática generada por la interacción de la gravedad o las ondas acústicas en la región dínamo y a lo largo de las líneas de fuerza del campo magnético de la Tierra hasta la órbita del satélite (< 1000 Hz).
- Medición de señales: ELF, VLF y HF en la proximidad de los epicentros antes y después de los terremotos.
- Detectar la turbulencia electrostática y electromagnética para niveles mayores que el nivel de ruido.
  Intensidad esperada de señales: <100 μV.m-1.Hz-1/2

- Características instrumentales
- Rango de frecuencia: 10 Hz a 3 MHz.
- Sensibilidad: 10 mV m-1 Hz-1/2 a 100 Hz.
- 1 mV m-1 Hz-1/2 a 10 kHz, 0,2 mV m-1 Hz-1/2 a 500 kHz.
- Rango dinámico de las mediciones: 96 dB a 17 kHz y 70 dB a 500 kHz.

Las formas de onda de los tres componentes ELF y una componente VLF se guardan de forma continua en la memoria sobre las áreas pre-determinadas de la actividad sísmica. Espectros de potencia de VLF y HF se calculan sistemáticamente

utilizando el método de ventanas, FFT y tiempo promedio. La acumulación de espectros de VLF y HF es transmitido por telemetría.

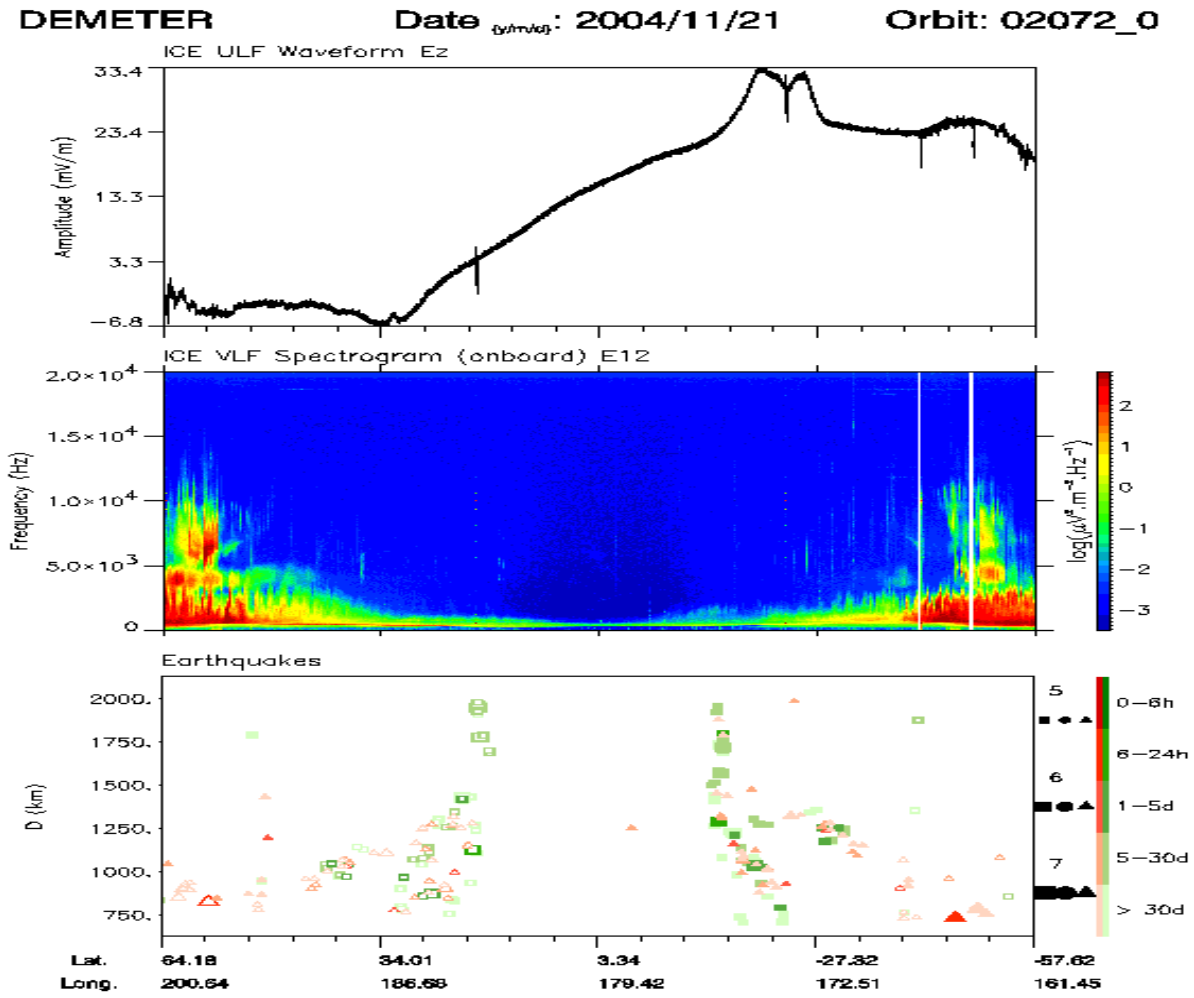


Figura 4.5: Medición del espectro VLF en correlación con la penetración del campo eléctrico de la componente "z": actividad eléctrica en tiempo y frecuencia previa a los terremotos marcados con los triángulos rojos intensos.

Dos terremotos indicados por triángulos rojos en los extremos del eje de coordenadas producen una perturbación en la potencia del espectro: observar la baja potencia del espectro en relación con el área media en la cual no se registra actividad sísmica. En la parte superior se muestra la componente z del campo eléctrico como resultado de la penetración del campo eléctrico atmosférico.

La Figura 4. 6 ilustra el caso de un terremoto para el cual hubo una penetración previa del campo eléctrico vertical sobre la zona del evento:

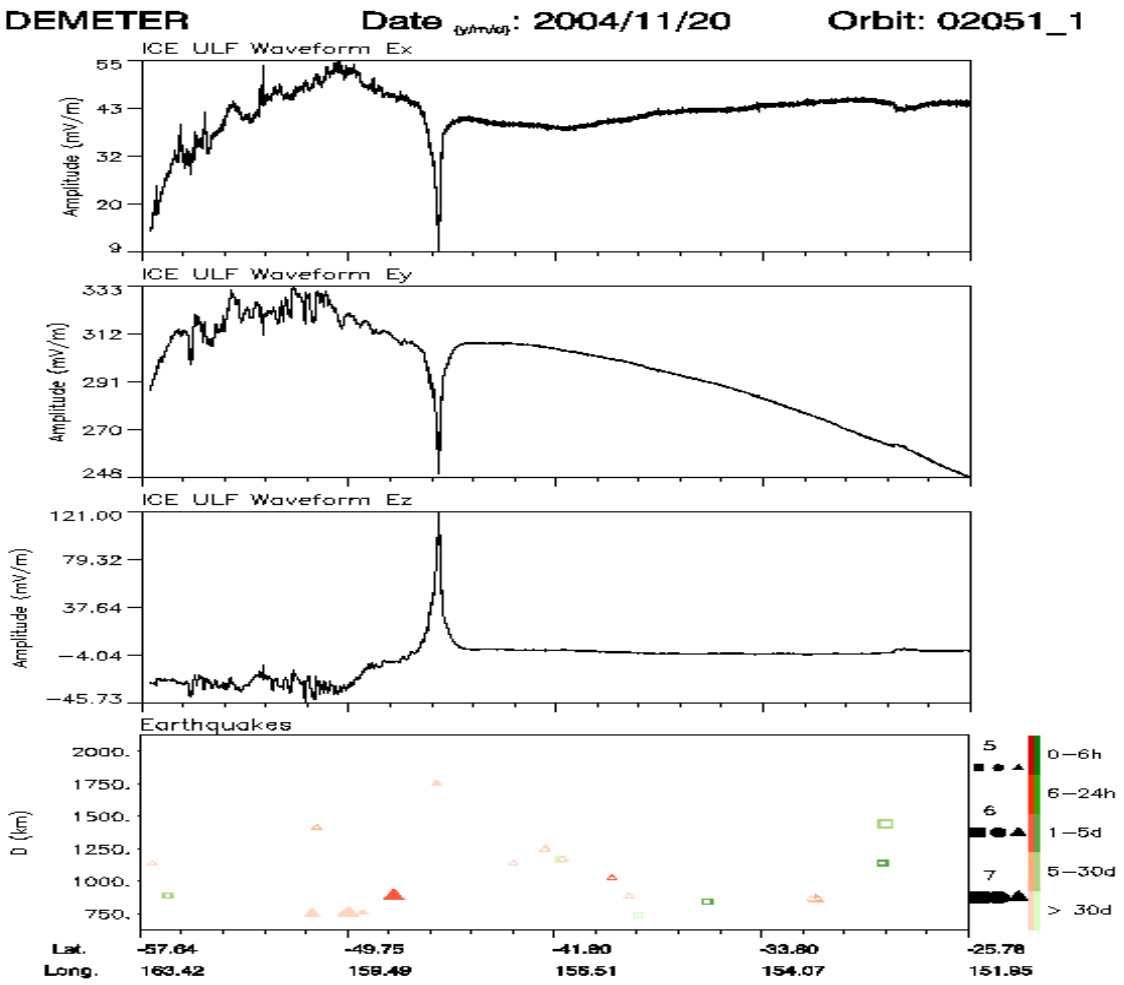


Figura 4. 6: Medición de las tres componentes del campo eléctrico como precursores de un terremoto, indicado con el triángulo de color rojo intenso.

La Figura 4. 6 muestra la aparición de precursores eléctricos 2 días antes de un terremoto indicado por un triángulo de color rojo brillante. Las posiciones de los terremotos a lo largo de la órbita se muestran en la figura inferior. Las tres componentes del campo eléctrico muestran picos pronunciados antes del evento sísmico.

La Figura 4.7 corresponde a la foto del sensor de campo eléctrico ICE.

Figura 4.7: Instrumento para medición de campo eléctrico ICE.

4.2.3 Experimento (IAP)

El instrumento de análisis de plasma (IAP) está diseñado para medir los principales parámetros del plasma en la ionosfera. Ellos son la densidad electrónica y iónica, composición de iones, temperatura (gama 1000 K - 5000 K) de las cargas eléctricas y la velocidad de los iones H + dominantes, He +, O + de menos de 2 kilómetros / s). La medición se realiza por dos analizadores que miden respectivamente la energía de los iones a lo largo de la línea de visión del instrumento en paralelo con la velocidad orbital. Este instrumento es producido por la Centre d'études des Environments Terrestre et Planétaires (CETP). La Figura 4.8 permite visualizar el IAP.

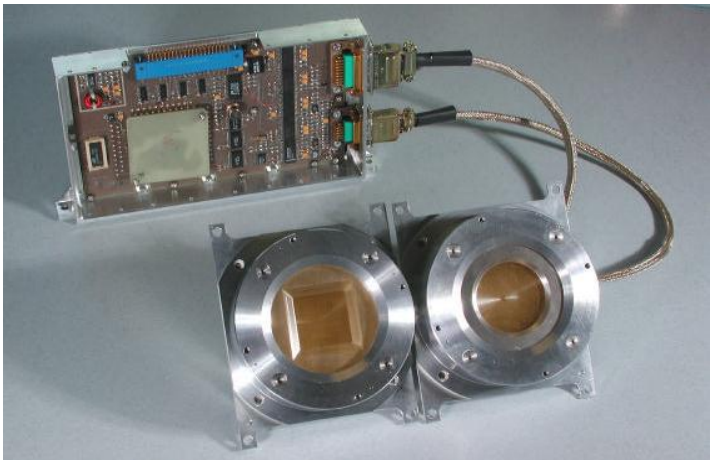


Figura 4.8: Imagen del analizador de plasma IAP.

4.2.3.1 Ejemplo típico

El experimento consiste en medir el total de Contenido Electrónico (o TEC) en particular. Estos parámetros son: Ni (densidad total de iones), composición iónica H +, He +, O +, iones moleculares, temperaturas de los iones dominantes (H +, O +) y velocidades paralelas y perpendicular al campo magnético de la Tierra.

En la Figura 4. 9, se muestran de arriba hacia abajo los siguientes parámetros de la esfera Debye:

- Densidad de electrones por centímetro cúbico
- Velocidad de los iones en metro por segundo
- Temperatura de los iones en grados Kelvin
- Ángulos de las partículas con respecto al eje z
- Zonas sísmicas

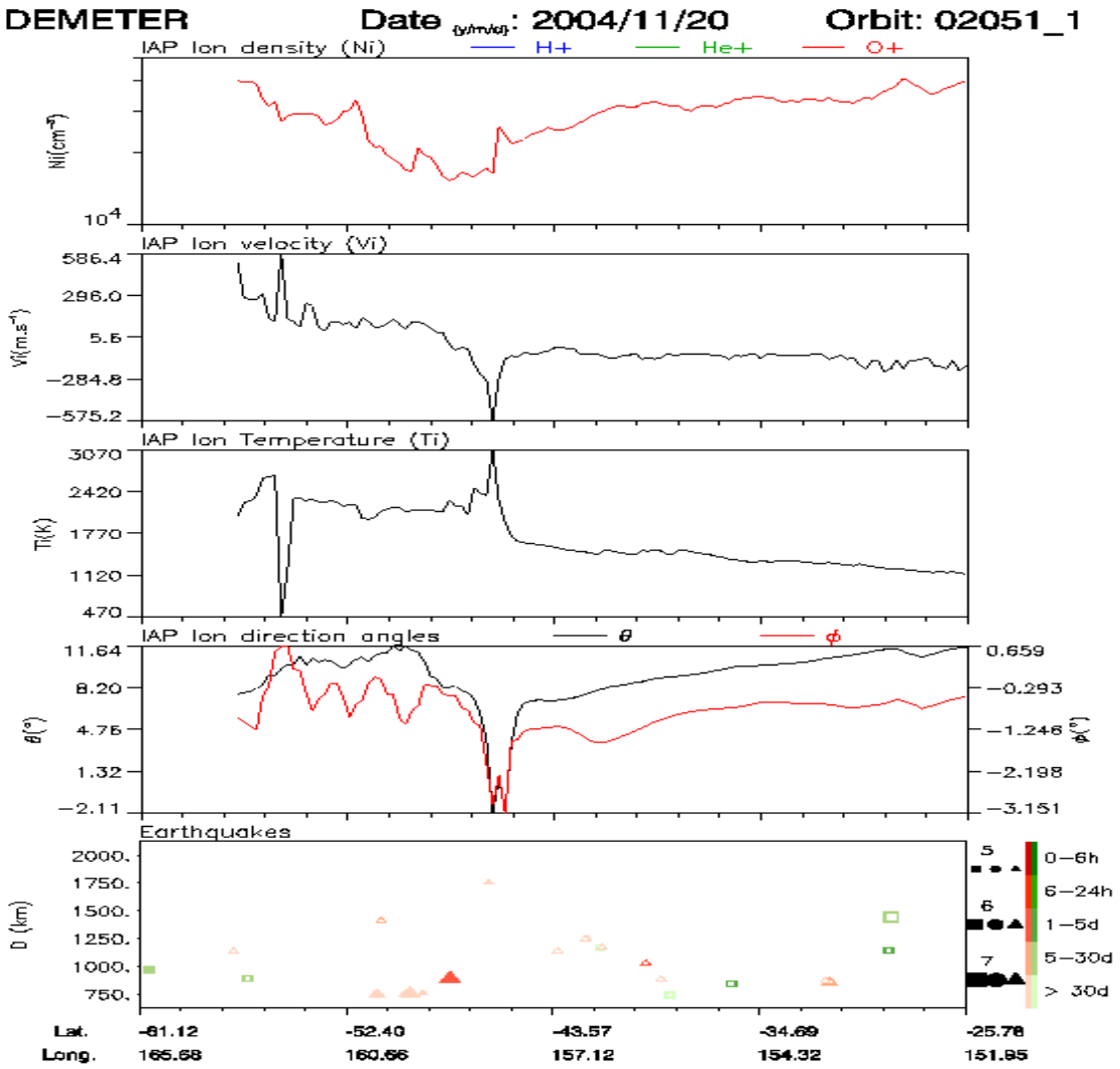


Figura 4. 9: Registro de algunos parámetros del plasma en respuesta a la penetración del campo eléctrico vertical antes de un terremoto.

En la Figura 4. 9 se observan, algunas anomalías: disminución de los ángulos de los iones, aumento de la temperatura de los iones, disminución de la velocidad y depresión de la densidad de iones dominantes O+.

4.2.3.2 Algunos valores de precisión

- Densidades de iones ~ ± 5% de sensibilidad ~ 1%
- Temperatura Ti ~ ± 5% o 100K sensibilidad ~ 30 K

- Velocidad Vi ~ ± 50 m / s sensibilidad ~ 15 m / s
- Velocidad direccional de todos los iones en el sistema de referencia por satélite. Este instrumento es producido por la Centre d'études des Environnements Terrestre y Planétaires (CETP).

4.2.4 Experimento con el espectro de energía de las partículas: (IDP)

El Instrumento Detector de plasma (IDP) está diseñado para medir el espectro de energía de los electrones perpendiculares al campo magnético (en el rango de 30 keV - a 2 MeV) para medir las perturbaciones en los cinturones de radiación inducida por los terremotos. Este instrumento ha sido desarrollado por el Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements (CESR).

4.2.4.1 Objetivos del experimento

Observar los siguientes fenómenos

- Diferencial de flujo (espectro de energía) de electrones de 30 keV a aproximadamente 2 MeV en direcciones perpendiculares al campo magnético de la Tierra.
- Medir las perturbaciones en los cinturones de radiación inducida por los terremotos y sus precursores.
- Detectar alteraciones relacionadas con la actividad sísmica en la zona de los epicentros.

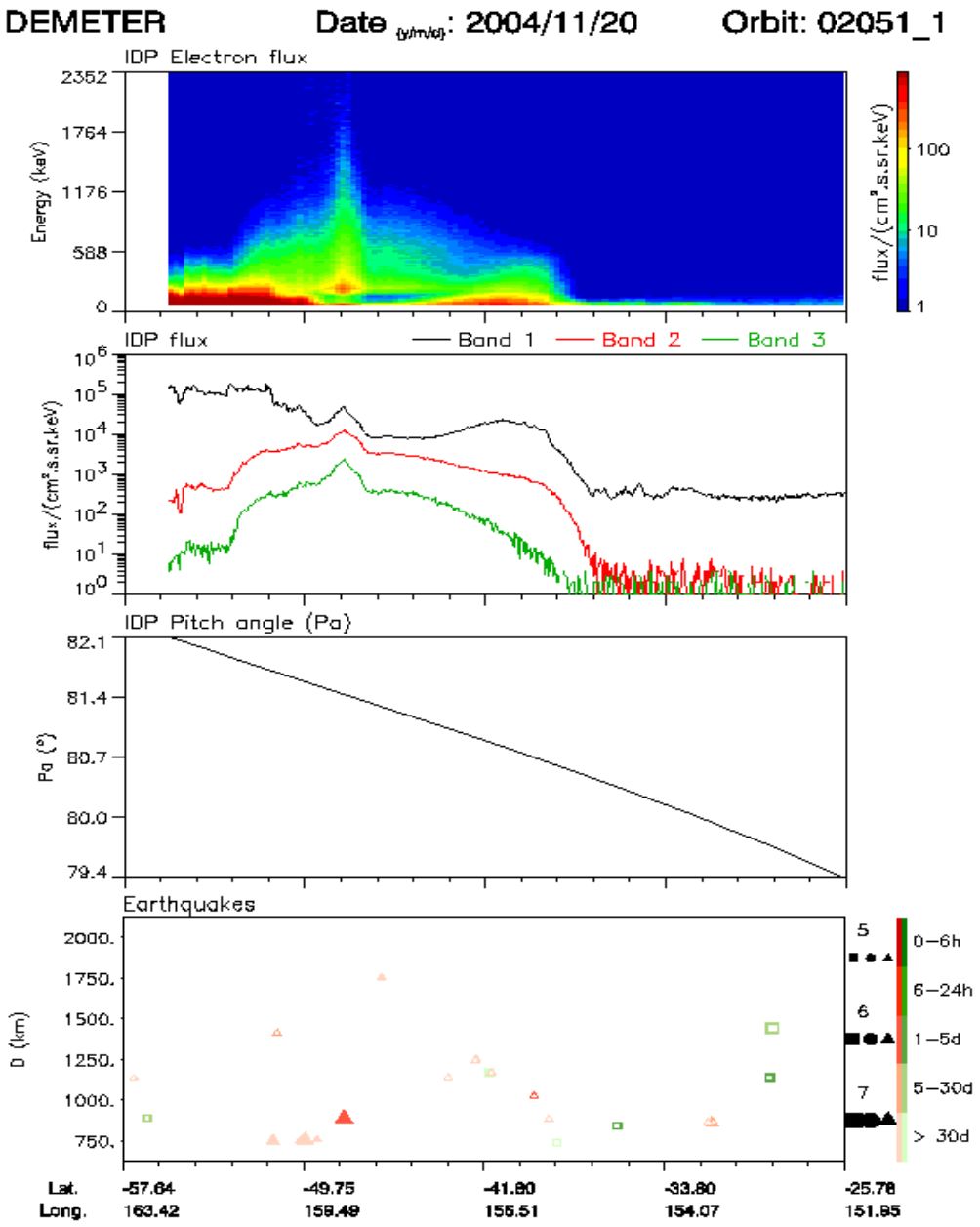


Figura 4.10: [1]Correlación entre flujo de energía de las partículas y la actividad sísmica.

[1] Igual que en los experimentos anteriores, se observan perturbaciones dos días antes del terremoto. De arriba hacia abajo se muestra la energía de los electrones, flujo de electrones en diferentes bandas de frecuencia, el ángulo de lanzamiento, y la distribución de sismos en relación con el evento estudiado.

4.2.5 Experimento ISL: mediciones de las características térmicas de la esfera Debye

El instrumento ISL, basado en una sonda de Langmuir (ISL) está diseñado para medir la densidad de electrones del plasma en el rango de (102 a 5,10ex 106 partículas/cm3), temperatura de los electrones (en el rango de 500 K - 3000 K), y el potencial del satélite (en el rango de + / - 5 V). El ISL se compone de dos sondas de Langmuir construida por una sonda cilíndrica y una sonda esférica segmentada de 4 cm de diámetro. Los parámetros térmicos fundamentales del plasma térmico (densidad y temperatura) se determinan principalmente de la respuesta de corriente-voltaje de la curva de la sonda Langmuir. La sonda de Langmuir segmentada se compone de 6 colectores aislados de 1 cm de diámetro colocados en la superficie de la esfera. Esta configuración permite estimar la dirección del flujo de iones.

4.2.5.1 Objetivos del experimento

Medición de los parámetros del plasma de una esfera Debye correlacionada con la medición de los siguientes parámetros:

- La densidad total del plasma (electrones e iones).
- Temperatura de electrones.
- Medición del potencial del satélite.
- Medición de la dirección del flujo de iones.

Rango de los parámetros:

- Densidad: 102 - 5x106 cm-3.
- Temperatura: 500-3000 K.
- Potencial del satélite: ± 5 V.

Este último experimento también observó la presencia de precursores electromagnéticos 2 días antes del terremoto que se ha venido mostrando. Es de notar la disminución previa de la densidad de electrones y las anomalías registradas como picos de las temperaturas de los electrones, iones y potencial del plasma fuertemente correlacionados con los componentes del campo eléctrico mostrados en la Figura 4. 11.

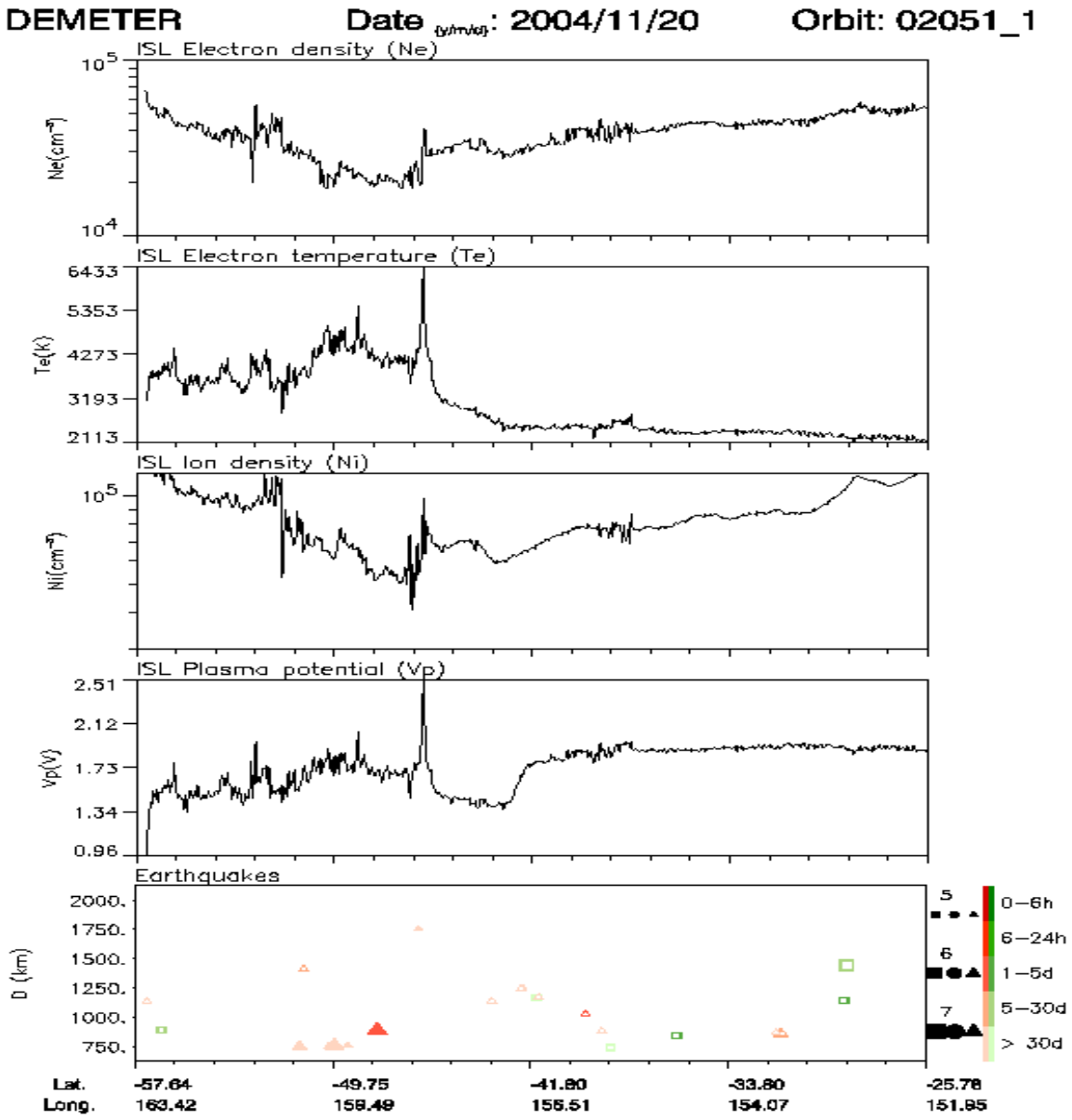


Figura 4. 11: Anomalías de la temperatura del plasma de la esfera Debye. Observar picos en las ondas mostradas y registradas.

La siguiente figura muestra el instrumento construido por SSD de la ESA (Espacial Ciencias Departamento de la Agencia Espacial Europea) en jESTEC (European Tecnología Espacial y de Investigación Centre, Noordwijk, Holanda).

Figura 4.12: Instrumento basado en la sonda Langmuir (ISL).

4.3. Conclusiones del capítulo

- Los experimentos que se realizaron a modo de prueba usando los instrumentos a bordo del Demeter, demostraron que pueden facilitar una exploración sobre las características de los precursores ionosféricos de terremotos.

- Las técnicas mencionadas pueden ayudar para la investigación de los fenómenos ionosféricos asociados con actividad sísmica: adquisición de nuevos conocimientos, así como la corrección e integración de conocimientos previos.

- De esta manera, reuniendo la información adquirida por el satélite Demetepuede llevar a evidencia observable; esta evidencia suministrada por la base de datos del Demeter puede generar nuevo conocimiento utilizando procedimientos matemáticos tales como la entropía de múltiple escala, entropía mutua, distancia Debye y la derivación de otras variables tales como frecuencia de colisión, frecuencia de corte de la capa F2, cantidad de electrones en la esfera Debye, distancia de máximo acercamiento en la esfera Debye y otros.

- Entonces, gracias a los experimentos observados, a la evidencia recogida, empírica y medible y a la formulación y comprobación de hipótesis, esta tesis está en capacidad de proponer nuevos modelos de clasificación y evaluación de precursores electromagnéticos de terremotos. Por lo tanto, se puede aceptar que

el plasma de la ionosfera y en particular la esfera Debye, es un ente ordenado que puede ser explicado por las leyes generales de la física.

- Esta tesis busca además descubrir nuevos comportamientos de la esfera Debye utilizando como plataforma los experimentos sugeridos y apoyados en la observación, las hipótesis y la experimentación.

- Los experimentos sugeridos deben poner a prueba las hipótesis delineadas en el primer capítulo. Alrededor de los experimentos realizados se espera que nuevos y posteriores estudios puedan replicar los resultados y eventualmente la creación de nuevas hipótesis. En un capítulo posterior se demostrará que experimentos repetidos incluso sobre erupciones volcánicas corroboran los resultados de este capítulo. Sin embargo, es obvio que se requiera un proceso gradual de múltiples experimentos repetidos para poder llegar a una generalización y la obtención de la regla de oro para la identificación confiable de los precursores.

Por lo tanto, experimentos futuros pueden acercar a los investigadores de este tema a un consenso sobre alguna de las hipótesis formuladas. El autor acepta que estos hallazgos son todavía provisionales y que la teoría esbozada necesita de pruebas adicionales. Para terminar este capítulo se pide al lector paciencia mientras la teoría propuesta crece y la confianza en las hipótesis se fortalece.

CAPÍTULO 5

ENTROPÍA DE SEÑALES ELECTROMAGNÉTICAS

La presentación de las ecuaciones básicas de la teoría de la entropía, se utiliza en este capítulo para crear nuevas ecuaciones que permitan procesar la información obtenida experimentalmente.

Los circuitos eléctricos disipan energía y manipulan inteligencia. Se propone en esta tesis analizarlos desde el punto de vista de la entropía. Las señales electromagnéticas generadas por circuitos tales como la esfera Debye en la ionosfera y los transformadores de alta potencia pueden ser desmoduladas para ganar información útil. Precursores ionosféricos de terremotos y distorsión armónica de los transformadores pueden ser medidos en una instrumentación inalámbrica no invasiva. La tesis también presenta la teoría de la entropía aplicada al análisis de circuitos eléctricos, con el fin de determinar la calidad de la energía eléctrica que suministran a cargas domiciliarias e industriales.

Posteriormente, las ecuaciones básicas de la teoría de la entropía se combinan con otros desarrollos llevados a cabo por diferentes autores y se obtienen varias expresiones útiles para calcular las entropías térmica e informática de un electrón de la esfera Debye. Se define también la entropía mutua de dos variables o parámetros que lleva a la expresión de complejidad de una esfera Debye.

Las ecuaciones propuestas pretenden mostrar anomalías en los circuitos eléctricos que ayuden a su mantenimiento correctivo. Entropía multi-escala (MSE) y entropía mutua se aplican a los datos adquiridos por los instrumentos con el fin de cuantificar la complejidad de series de tiempo generadas por los circuitos eléctricos. Para terminar se propone la figura matemática de la complejidad como la suma de entropías mutuas del circuito.

5 ENTROPÍA DE SEÑALES ELECTROMAGNÉTICAS

Innovación en los métodos de análisis de circuitos eléctricos y electrónicos puede facilitar el procesamiento de sus señales generadas y llegar a plantear nuevos procedimientos que pueden enriquecer la percepción que se tiene de los fenómenos físicos. Para la mentalidad del Ingeniero y del científico la mirada a la complejidad del circuito significa cambiar y ampliar el enfoque tradicional acercándose más a su esencia.

La nueva mirada se inició con el trabajo de Clausius y Boltzman hace más de 100 años con la teoría de la entropía termodinámica y se completó con la propuesta de Shannon sobre la entropía informática que revolucionó las comunicaciones electrónicas. La entropía es un concepto puramente matemático, es un hecho matemático innegable. Sabemos que la Ingeniería eléctrica se basa en las matemáticas, y que se aplican las leyes básicas de la Física. Con esta tesis se busca proponer nuevos métodos para analizar y diseñar los circuitos que manejan energía e información [33].

En el presente capítulo se pone en un marco comparativo las ecuaciones de Maxwell con los conceptos de carga eléctrica y flujo magnético bajo la analogía sistémica de la ecuación básica de entropía termodinámica. En este contexto se define el concepto de evaluación de entropía a través de los campos electromagnéticos radiados. Es así como en el numeral 5.2 se utiliza la formulación numérica de entropía multi- escala derivando así los algoritmos de Shannon y la propuesta de entropía mutua como un aporte al estado del arte se deduce la ecuación (5.65) a través de la deducción de la teoría termodinámica estadística cuántica para reducir en un concepto unificado las características típicas del fenómeno electrónico en la esfera Debye. Pretende esta formulación simplificar el fenómeno termo cuántico de la esfera Debye para con él dar una explicación que permita demostrar las hipótesis formuladas en esta tesis.

5.1 Entropía de ondas electromagnéticas

Ondas electromagnéticas variables en el tiempo se generan por debajo de los transformadores de alta tensión. El campo eléctrico está siempre vinculado a la presencia de cargas, y el campo magnético se crea cuando la corriente eléctrica fluye. Para describir los campos electromagnéticos de transformadores de potencia, la intensidad, la frecuencia, y la orientación, deben ser estimadas. El campo eléctrico tiene su principal componente orientado verticalmente, mientras que el principal componente del campo magnético es horizontal. En el transformador, el campo eléctrico E y el campo magnético H están en el orden de unos pocos miles de voltios por metro (V / m) y unos pocos cientos miligauss (mg), respectivamente.

Las ecuaciones de Maxwell siendo ecuaciones diferenciales parciales, relacionan los campos eléctricos y magnéticos con las cargas eléctricas y corrientes. Las soluciones de estas ecuaciones cubren todos los diversos fenómenos en todo el campo de electromagnetismo clásico.

De acuerdo con Maxwell:

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{t^2}\right)\vec{E} = 0 \tag{5.1}$$

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{t^2}\right)\vec{B} = 0 \tag{5.2}$$

La solución general de tales ecuaciones, son un conjunto de ondas de la forma:

$$B = (r,t) = g(wt - k.r) \tag{5.3}$$

$$E = (r,t) = g(wt - k.r) \tag{5.4}$$

Cargas y flujo eléctrico producen ondas magnéticas cuyos cambios de entropía pueden ser medidos en el transformador eléctrico que se mencionó, el transformador de distribución de energía eléctrica. Es posible expresar las cargas eléctricas y el flujo

magnético en términos de cambios de entropía y sus correspondientes potenciales como una analogía al calor expreso, como el producto de los cambios de temperatura y la entropía. Así, existe una conexión íntima entre energía y entropía en dos categorías: disipación térmica explicada por la entropía termodinámica y el equilibrio entre cargas eléctricas, corrientes eléctricas, flujo magnético, campos electromagnéticos y sus correspondientes ondas radiadas explicado por la entropía informática. Es de esperar que un transformador en buenas condiciones de salud operativa, debe presentar baja entropía térmica, pero alta entropía informática. Esta última es una consideración de la actual tesis con base en los resultados obtenidos.

Esta consideración conduce a las siguientes ecuaciones [34].

$$Q_{thermal} = \int T dS_{thermal} \tag{5.5}$$

$$Q_{elec} = \int E dS_{electric} \tag{5.6}$$

$$Q_{mag} = \int B dS_{mag} \qquad 5.7)$$

$Q_{thermal}$, Q_{elec} and Q_{mag} son flujos suministrados al transformador. E es la intensidad de campo eléctrico y $dS_{thermal}$; $dS_{electric}$ and dS_{mag} son las entropías asociadas con la energía transferida.

$$\phi_{mag} = \int H dS_{mag} \tag{5.8}$$

Donde ϕ_{mag} es el flujo del transformador y H es la intensidad de campo magnético. B simboliza la densidad de flujo magnético la cual es proporcional a la intensidad de campo magnético H.

$$B = \mu_0 H \tag{5.9}$$

Donde μ_0 es la permeabilidad del espacio libre.

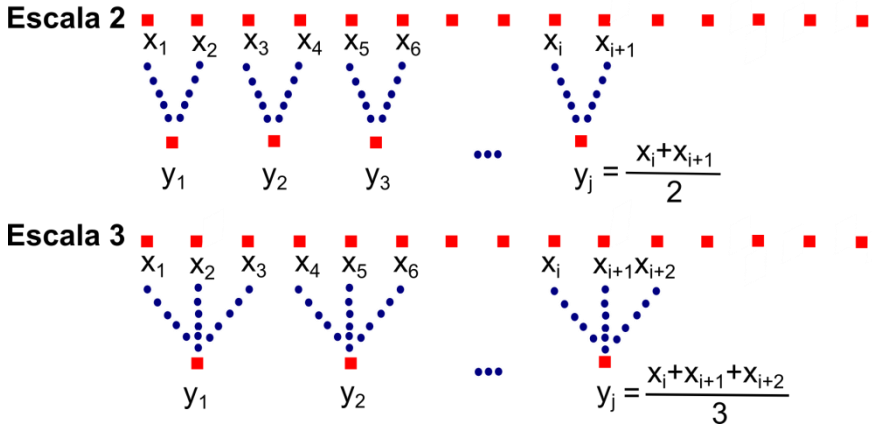
Para el análisis de circuitos eléctricos tales como la ionosfera o un transformador, se quieren crear y adaptar ecuaciones que involucren la entropía de múltiple escala y la entropía mutua de señales electromagnéticas. Las señales pueden ser transmitidas de regiones con actividad sísmica tales como el volcán Galeras, fallas tectónicas o líneas de alta tensión. Se busca que las matemáticas de entropía más la instrumentación electrónica, permitan predecir eventos como terremotos, erupciones o daños en la calidad de la energía que suministran las máquinas; además, se crean ecuaciones para determinar las entropías térmica e informática de un electrón de la esfera Debye en su relación con terremotos y erupciones volcánicas.

5.2 Empleo de la entropía de múltiple escala MSE para decodificar series de tiempo.

La adquisición de las señales electromagnéticas generadas por los circuitos eléctricos crea series de tiempo que pueden ser cuantificadas para obtener nueva información y conocimiento. Medir la regularidad de una serie de tiempo conduce a una mejor comprensión del circuito. Una de las medidas de regularidad más populares para una serie de tiempo es la entropía muestreada (SampEn). El SampEn caracteriza la complejidad del circuito en una escala de tiempo definida por el procedimiento de muestreo que se utiliza para obtener la serie de tiempo bajo evaluación. Costa propuso el algoritmo (MSE) de entropía multiescala [35], que utiliza la entropía muestreada (SampEn) de una serie de tiempo en múltiples escalas, lo cual introdujo mayor precisión. El MSE ha sido aplicado con éxito en diferentes campos de investigación en las últimas décadas. Estas aplicaciones incluyen la medición de la entropía de series de tiempo fisiológicas, tal como la entropía del intervalo del pulso cardíaco. El algoritmo MSE convencional utiliza un procedimiento.

La entropía multi-escala [36] se calcula en series de tiempo discretas usando granulado grueso. La serie de tiempo original se divide en ventanas no solapadas de longitud η. A continuación, en cada ventana se promedian los datos los puntos contenidos en el mismo. Por medio de este procedimiento se obtiene una nueva serie de tiempo y_k^{η} con un factor de escala η.

$$\{x_1,...,x_i,...,x_N\} \quad \text{Serie de tiempo discreta} \tag{5.10}$$



$$y_k^{\eta} = \frac{1}{\eta} \sum_{i=(k-1)\eta+1}^{k\eta} x_i, \qquad 1 \le k \le N/\eta \tag{5.11}$$

Cada nueva serie de tiempo (nueva escala) se utiliza para calcular la entropía. El procedimiento descrito anteriormente se denomina entropía multi-escala (MSE), y los resultados son usados para comparar la relativa complejidad de las series de tiempo normalizadas.

5.3 La propuesta de Shannon

Shannon [37] propuso la entropía de una variable aleatoria, con valores múltiples valores $\{x_1, ..., x_n\}$ como:

$$H(X) = E(I(X)) \tag{5.12}$$

La entropía de Shannon se mide en bits.

E es el valor que se espera, e I es la cantidad de información de X. I(X) se define como una variable aleatoria, p indica la función de probabilidad de X. Así, la entropía puede escribirse como,[38]:

$$H(X) = \sum_{i=1}^{n} p(x_i) I(x_i) = \sum_{i=1}^{n} p(x_i) \log_b p(x_i) \tag{5.13}$$

5.4 Entropía Mutua

La entropía diferencial es la entropía de una variable aleatoria continua X. Se define por:

$$h(X) = -\int_S f(x) \log f(x) dx \tag{5.14}$$

La medición de la entropía diferencial se calcula a través de la información mutua entre dos señales [40]. Información mutua entre las señales B y E, correspondientes a los campos magnético y eléctrico respectivamente, puede expresarse como:

$$h(B) = \frac{1}{2} \log_2 \left[2\pi e \sigma_B^2 \right] \tag{5.15}$$

$$h(E) = \frac{1}{2} \log_2 \left[2\pi e \sigma_E^2 \right] \tag{5.16}$$

$$M(B,E) = \frac{1}{2} \log_2 \left[(2\pi e)^2 \left| K \right| \right] \tag{5.17}$$

$\left| K \right|$ es la matriz de covariancia.

$$M(B,E) = h(B) + h(E) - h(B,Y) \tag{5.18}$$

$$M(B,E) = -\frac{1}{2} \log_2 [(1-\rho^2)] \tag{5.19}$$

Siendo ρ el coeficiente de correlación.

5.5 Bases teóricas de entropía clásica

Clausius [41] fue el primero en hablar de entropía alrededor del año 1865. La propuso como un indicador de la transformación de un sistema físico en el cual interrelacionan variables como la temperatura, presión, volumen y otras. Propuso que:

$$dS = \frac{dQ}{dT} \tag{5.20}$$

Donde dQ representa la variación de calor en el proceso en el cual se involucran las variables mencionadas, S entropía y T temperatura.

La entropía ha sido considerada como el desorden del sistema, pero en este estudio, la pensamos como el indicador de equilibrio.

Wien [42], propuso en 1896 una ecuación para describir la relación entre la frecuencia y la temperatura de un oscilador armónico (electrón vibrando) en una cavidad radiante como:

$$f\left(\frac{\nu}{T}\right) = \alpha e^{-\frac{\beta_\nu}{T}} \tag{5.21}$$

Donde α, β son constantes que se ajustan durante el famoso experimento de radiación del cuerpo negro. ν es la frecuencia del oscilador.

Plank [35][35], en 1900 ajustó la anterior ecuación de Wien y propuso otra que en definitiva sería la correcta:

$$\rho(\nu,T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} E(\nu,T) \tag{5.22}$$

Donde E(ν,T) es la energía promedio de las esferas Debye actuando como osciladores armónicos y generando campos electromagnéticos. ρ(ν,T) es la densidad espectral de la onda generada por el oscilador.

Plank halló una expresión para la entropía en bajas y altas frecuencias de los osciladores en una cavidad resonante:

$$\frac{d^2S}{dE^2} \infty \frac{1}{E} \tag{5.23}$$

$$\frac{d^2S}{dE^2} \infty \frac{1}{E^2} \tag{5.24}$$

Se observa en las ecuaciones (5.23) y (5.24) que los términos de la izquierda son inversamente proporcionales al inverso de la energía y también al cuadrado inverso de la energía.

También logró una sola ecuación que cobijara a (5.23) y (5.24):

$$\frac{d^2S}{dE^2} = -\frac{1}{E(a+E)} \tag{5.25}$$

Siendo "a" una constante dependiente de la frecuencia pero independiente de la temperatura, finalmente llegó a:

$$E = \frac{a}{e^{\frac{a}{T}} - 1} \tag{5.26}$$

La conocida ecuación para la densidad espectral es:

$$\rho(v,T) = \frac{8\pi v^2}{c^3} \frac{av^2}{e^{aT} - 1} \tag{5.27}$$

Si la ionosfera contiene N esferas oscilantes, con energía y entropía promedio E y S, entonces en este caso, la energía y entropía totales E_T, S_T pueden escribirse como:

$$E_T = NE \tag{5.28}$$

$$S_T = NS \tag{5.29}$$

Boltzman [43], propuso por primera vez una ecuación para la entropía que se genera en sistemas físicos en los cuales hay disipación de calor:

$$S = -k_B \sum p_i \ln p_i \tag{5.30}$$

La que también se escribe como:

$$S_T = K_B \ln \Omega \tag{5.31}$$

Donde Ω es la probabilidad con que la energía total se distribuye entre las diferentes esferas, K_B simboliza la constante de Boltzman y p_i la probabilidad de encontrar el microestado ith del ensamble estadístico.

Ya que la energía total está cuantizada, puede mostrarse como:

$$\mathrm{E}_T = n\delta \tag{5.32}$$

Siendo δ la energía individual de un oscilador armónico [44].

La entropía promedio de la esfera Debye se puede expresar así:

$$S = K_B \left[\left(1 + \frac{E}{\delta}\right) \ln\left(1 + \frac{E}{\delta}\right) - \left(\frac{E}{\delta}\right) \ln\left(\frac{E}{\delta}\right) \right] \tag{5.33}$$

Por otro lado, una ecuación fundamental de la termodinámica es la siguiente:

$$\frac{dS}{dE} = \frac{1}{T} \tag{5.34}$$

Derivando la ecuación (5.25) y despejando el valor promedio de energía E, se llega a la bien conocida expresión:

$$E(v,T) = \frac{\delta}{e^{\frac{\delta}{K_B T}} - 1} \tag{5.35}$$

Por otro lado, una relación fundamental de la física se ha propuesto como:

$$\delta \propto v \tag{5.36}$$

Ecuación fundamental empírica y conduce a establecer que la energía de un oscilador armónico cuántico depende de su frecuencia.

El signo de proporcionalidad desaparece al introducir una constante llamada constante de Plank:

$$\delta = hv \tag{5.37}$$

Con esta ecuación se propone que la energía del oscilador es discreta y cuantizada.

Cada oscilador puede tener un número n de cuantos y como mínimo cero; es decir:

$$\mathrm{n}h\nu \qquad \mathrm{n} = 0,1,2,3,..... \tag{5.38}$$

Retomando (5.35) y reemplazando se obtiene:

$$E(v,T) = \frac{hv}{e^{\frac{hv}{K_B T}} - 1} \tag{5.39}$$

Tomando $v = \frac{\omega}{2\pi}$ y $h = 2\pi\hbar$, se arriba a:

$$E = \frac{\hbar\omega}{e^{\frac{\hbar\omega}{K_B T}} - 1} \tag{5.40}$$

Al introducir $\beta = \frac{1}{K_B T}$, entonces (5.39) cambia a:

$$E = \frac{\hbar\omega}{e^{\hbar\omega\beta} - 1} \tag{5.41}$$

La que permite calcular la energía promedio de la red de esferas Debye osciladoras armónicas. La energía de la red puede ser modulada por el campo eléctrico vertical. La

penetración del campo calienta las esferas Debye, lo cual lleva a un aumento de la energía de la red oscilante.

5.6 Entropía termodinámica

El interés es obtener una expresión para la entropía termodinámica en función de las pérdidas causadas por fricción.

Se inicia con la función de partición Z:

$$Z = \sum_s e^{-\beta E_s} \tag{5.42}$$

Donde:

$p = \frac{1}{z} e^{-\beta H}$ y $\beta = \frac{1}{K_B T}$

E_s es la energía del i-ésimo microestado de la red de esferas acopladas.

Las siguientes son bien conocidas ecuaciones.

$$\frac{d\beta}{dT} = -\frac{1}{K_B T^2} \tag{5.43}$$

$$\frac{\partial Z}{\partial \beta} = \sum -E_s e^{-\beta E_s} \tag{5.44}$$

Entonces, se obtiene una expresión adicional que servirá para más adelante:

$$\sum E_s e^{-\beta E_s} = -\frac{\partial Z}{\partial \beta} \tag{5.45}$$

La probabilidad que el oscilador alcance una energía de estados es:

$$p_s = \frac{1}{Z} e^{-\beta E_s} \tag{5.46}$$

Para obtener la energía de la red de osciladores, se suman los productos de las probabilidades individuales por la energía de cada uno de los osciladores.

$$\langle H \rangle_e = \sum E_s p_s \tag{5.47}$$

Reemplazando p_s se obtiene:

$$\langle H \rangle_e = \frac{1}{Z} \sum E_s e^{-\beta E_s} \tag{5.48}$$

Retomando la entropía:

$$S = -K_B \sum p_s \ln p_s \tag{5.49}$$

Combinando ecuaciones, se obtiene:

$$S = -K_B \sum \frac{1}{Z} e^{-\beta E_s} \ln\left(\frac{1}{Z} e^{-\beta E_s}\right) \tag{5.50}$$

Simplificando términos:

$$\ln\left(\frac{1}{Z} e^{-\beta E_s}\right) = \ln\frac{1}{Z} + \ln e^{-\beta E_s} = -\ln Z - \beta E_s \tag{5.51}$$

$$S = -K_B \sum \frac{1}{Z} e^{-\beta E_s} \left(-\ln Z - \beta E_s\right) = -K_B \sum \left(-\frac{1}{Z} e^{-\beta E_s} \left(\ln Z + \beta E_s\right)\right)$$

$$S = K_B \sum \left(\frac{1}{Z} e^{-\beta E_s} \left(\ln Z + \beta E_s\right)\right) = K_B \left(\sum \frac{1}{Z} e^{-\beta E_s} \ln Z + \sum \frac{1}{Z} e^{-\beta E_s} \beta E_s\right)$$

$$\sum \frac{1}{Z} e^{-\beta E_s} \beta E_s = \frac{\beta}{Z} \sum e^{-\beta E_s} \beta E_s = \sum \frac{1}{Z} e^{-\beta E_s} \ln Z$$

$$\ln Z \sum \frac{1}{Z} e^{-\beta E_s} = \frac{\ln Z}{Z} \sum e^{-\beta E_s} = \ln Z$$

$$S = K_B(\beta \langle H \rangle_e + \ln Z) \tag{5.52}$$

Plank también demostró que la energía en general se puede describir como:

$$E_n = nhv \tag{5.53}$$

Así, se ha llegado a la expresión general de energía para el oscilador armónico:

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega \tag{5.54}$$

Una igualdad que resalta de las anteriores ecuaciones es:

$$Z = \sum e^{-\beta E_n} = \sum e^{-\beta \left(n + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega} \tag{5.55}$$

Al descomponer términos se llega a:

$$Z = \sum e^{-\beta n \hbar \omega} e^{\frac{-\beta \hbar \omega}{2}} \tag{5.56}$$

Despejando términos:

$$Z = e^{-\frac{\beta \hbar \omega}{2}} \sum e^{-\beta n \hbar \omega} \tag{5.57}$$

Calculando por computador:

$$\sum_0^n e^{-n} = \frac{e^{-n-1} - 1}{e^{-1} - 1} = \frac{\frac{1}{e^{-n-1}} - 1}{e^{-1} - 1} = \frac{-1}{e^{-1} - 1} = \frac{1}{1 - e^{-1}} \quad \text{para} \quad n \longrightarrow \infty$$

Se puede concluir que:

$$\sum_0^n e^{-\beta n\hbar\omega} = \frac{1}{1-e^{-\beta\hbar\omega}}$$

Entonces, se obtiene para Z, la bien conocida ecuación para la función de partición:

$$Z = \frac{e^{\frac{-\beta\hbar\omega}{2}}}{1-e^{-\beta\hbar\omega}} \tag{5.58}$$

Mirando la ecuación (5.52), se ve la necesidad de obtener lnZ:

$$\ln Z = \ln \frac{e^{\frac{-\beta\hbar\omega}{2}}}{1-e^{-\beta\hbar\omega}} = \ln e^{\frac{-\beta\hbar\omega}{2}} - \ln(1-e^{-\beta\hbar\omega}) \tag{5.59}$$

$$\ln Z = \frac{-\beta\hbar\omega}{2} - \ln(1-e^{-\beta\hbar\omega}) \tag{5.60}$$

Es necesario conocer la energía de ensamble $\langle H \rangle_e$ para llegar a la ecuación final que permita calcular la entropía de la esfera Debye disipativa.

5.7 Energía de ensamble y el teorema de Hellman-Feyman

Fang Hong-Yi [45], calcularon la energía de ensamble del circuito a partir del teorema de Hellman-Feyman [46] que establece:

$$\frac{\partial E_n}{\partial x} = \left\langle \psi_n \left| \frac{\partial H}{\partial x} \right| \psi_n \right\rangle \tag{5.61}$$

Aplicando el teorema de Hellman-Feyman, obtuvo:

$$\langle H \rangle_e = \frac{h\omega}{2} \coth \frac{h\omega\beta}{2} \tag{5.62}$$

Ahora, reemplazando (5.60) y (5.62) en (5.52) se consigue la fórmula de entropía para un electrón fluyendo por el circuito de distribución:

$$S = k_B \left(\frac{\hbar\omega}{2} \coth \frac{\hbar\omega\beta}{2} - \frac{\beta\hbar\omega}{2} - \ln\left(1 - e^{-\beta\hbar\omega}\right) \right) \tag{5.63}$$

La presente tesis centra su atención en el resultado que se obtiene de la ecuación (5.61). Permite calcular la entropía termodinámica de la esfera Debye. Sugiere pensar en una interrelación frente al concepto de distancia Debye que puede entregar una luz a la demostración de la hipótesis planteada, intento que se abordara en los apartados subsiguientes.

5.8 Entropía mutua en la esfera Debye

Para el caso de precursores sísmicos y en forma similar, se puede obtener la entropía mutua entre los diferentes actores de la ionosfera que se han mencionado antes. Por ejemplo:

$$M(n_e, T_E) \tag{5.64}$$

Es la entropía mutua entre densidad de electrones y temperatura de los electrones.

En general, se pueden caracterizar algunas interrelaciones como:

$M(E,B)$: entropía mutua entre campos eléctrico y magnético.
$M(E_x, B_y)$: entropía mutua entre las componentes x y y de los campos eléctrico y magnético, respectivamente.
$M(v_e, B_z)$: entropía mutua entre la velocidad de electrones y la componente z del campo magnético.

Esta presentación intuitiva es el preámbulo de los elementos de la complejidad de la esfera Debye.

5.9 Complejidad de una esfera Debye

Para este estudio se calculará la complejidad de una esfera Debye de la ionosfera encima de los epicentros de algunos eventos sísmicos y de actividad volcánica.

$$CX_{eq} = \sum M(E_z, n_e) + M(n_e, T_e) + M(v_e, E_z) + M(v_e, n_e) \tag{5.65}$$

CX_{eq} es la complejidad.

Esta última ecuación permite cuantificar la complejidad en nats de una esfera Debye y correlacionarlo con la actividad sísmica. Es un nuevo indicador que puede facilitar la clasificación de posibles precursores ionosféricos.

5.10 Conclusiones del capítulo

Los elementos abordados en este capítulo han mostrado el desarrollo de ecuaciones de tipo semi-empírico, partiendo de la teoría clásica de Shannon y llevándolos a los resultados cuánticos de Feyman. Esto permitió observar el concepto de oscilación presente en la esfera Debye, con él, se pudo deducir una formulación que asocie la entropía y la complejidad como un todo unificado en la ecuación (5.65). Al conceptuar la ecuación (5.63) que se ha deducido frente al estado de una esfera Debye como circuito eléctrico y la (5.65) se concluye que la singularidad en la esfera Debye es un candidato para detección de fenómenos termo-cuánticos y también es un candidato para detección pre-sísmica.

La entropía aproximada A_E es una cuantificación de la regularidad y la complejidad estadística, que tiene muchas aplicaciones potenciales para una amplia variedad de áreas con series de longitud relativamente corta (de más de 100 puntos). El cálculo de A_E se aplica en este trabajo a las ondas magnéticas radiada por transformadores y permite analizar gran cantidad de datos de potencia. La teoría de los sistemas complejos no está

todavía completamente descrita. En la medida en que los ingenieros eléctricos comiencen a trabajar en sistemas complejos, obtendrán una mejor comprensión de sus propiedades y la forma de utilizarlos para analizar los sistemas de energía. Hasta ahora, los complejos sistemas estudiados son los biológicos y sistemas relacionados con las personas, los grupos, la cultura, internet, redes de energía eléctrica, etc.

CAPÍTULO 6

CARACTERIZACIÓN DE LOS PRECURSORES IONOSFÉRICOS DE TERREMOTOS: DATOS Y RESULTADOS

Los resultados que se presentan se obtuvieron a partir de las técnicas propuestas: entropía mutua de parámetros electromagnéticos, variabilidad de la electrodinámica y termodinámica de la esfera Debye, mediante una serie de montajes experimentales de fácil reproducción por otros investigadores.

Los desarrollos de las experiencias se pueden dividir en tres partes: Primero, se presenta la evaluación del parámetro preponderante. Segundo, se presenta la evaluación sobre un sistema claramente reconocido. Finalmente, utilizando los resultados se verifica que los sistemas pueden ser evaluados en su conjunto con esta técnica.

Este capítulo inicia con una comparación entre zonas sísmicas y una zona de referencia no sísmica, situada en Brasil. La electrodinámica de la ionosfera sobre las áreas de Sichuan en Wenchuan es comparada con la referencia mencionada en Rio do grande en Brasil. El objetivo es proporcionar un argumento para proponer, que las áreas de la ionosfera sobre zonas sísmicas presentan una electrodinámica distinta. Esto se evalúa mediante mediciones registradas por el Demeter.

6 DATOS, GRÁFICAS Y RESULTADOS DE LA EXPLORACIÓN DE LA IONOSFERA

6.1 Entropía electromagnética referenciada a una zona no sísmica

Las siguientes figuras (Figura 6.1, Figura 6.2 y Figura 6. 3), muestran la respuesta de las esferas Debye de la ionosfera a la actividad sísmica. Demeter leyó los datos el día anterior al terremoto del 12 de mayo del 2008 en Wenchuan y durante el 25 de diciembre del 2009 correspondientes a un enjambre de sismos generados por el volcán Cerro Machín. En forma paralela, el satélite francés adquirió datos sobre una zona de baja actividad sísmica; Rio grande Do norte, Brasil.

Las gráficas pretenden comparar la entropía de la ionosfera entre dos zonas, una de baja sismicidad y otras de alta sismicidad, en el contexto de la conexión electromagnética entre litosfera e ionosfera.

La variabilidad de los iones positivos de oxígeno sobre cerro Machin es la mayor. Es posible que el dióxido de azufre emitido por el volcán produzca tan enorme variabilidad mostrada en la Figura 6.1

De la misma figura se observa que las esferas Debye en ionosfera estuvieron más calientes en Wenchuan y Machin que sobre Brasil. Otros estudios obtuvieron resultados similares[33].

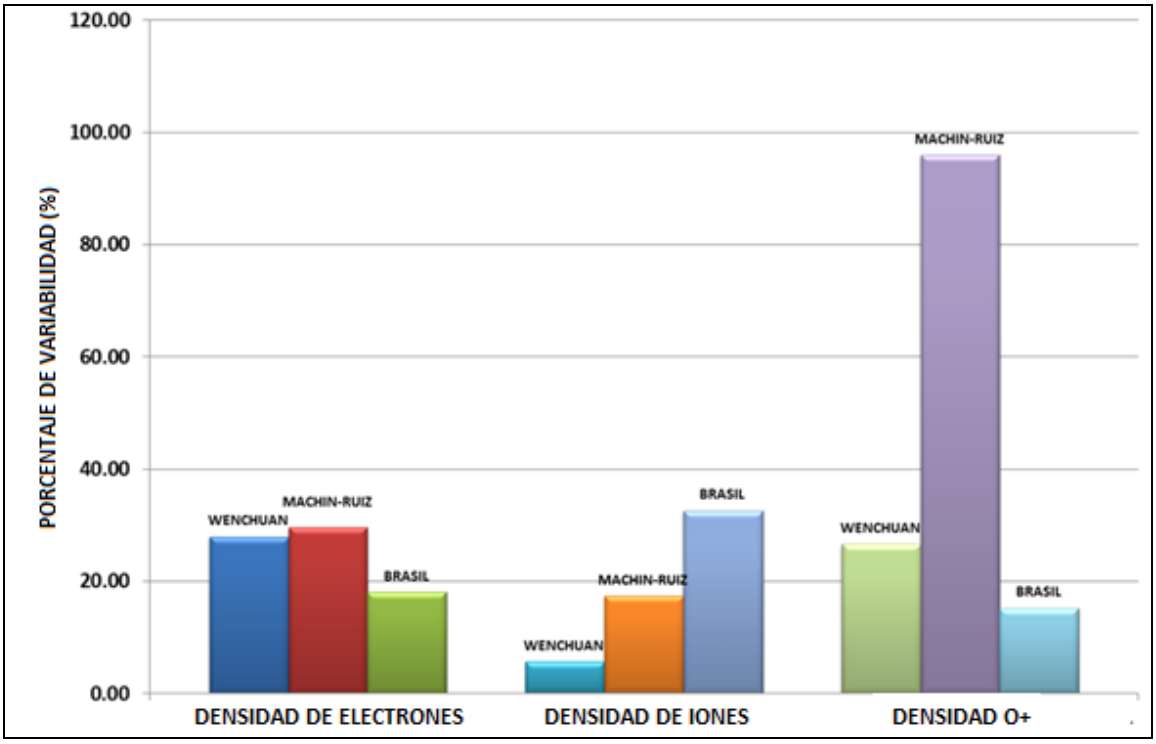


Figura 6.1: Algunos parámetros de la ionosfera antes de los terremotos.

Se puede observar que en el caso Λ «1, en el que la esfera de Debye está escasamente poblada, corresponde a un plasma fuertemente acoplado. Del mismo modo, el caso Λ »1, en el que la esfera de Debye está densamente poblada, corresponde a un plasma débilmente acoplado. El plasma con acoplamiento fuerte tiende a ser frío y denso, mientras que el plasma débilmente acoplado es difuso y caliente. Parece que la esfera Debye se hizo más débilmente acoplada antes de los terremotos; esta podría ser otra de las características de los precursores. Mediciones basadas en los instrumentos ISL e IAP, conducen al cálculo de los parámetros ionosféricos que se analizan durante 1 día antes de los eventos.

Ocurren variaciones anómalas de la longitud de Debye, frecuencia de colisión entre electrones e iones, temperatura de electrones, distancia entre las partículas de oxígeno, frecuencia de plasma y otros parámetros indicados en forma de ensanchamientos y depresiones.

Reportes de Ingeominas sobre la actividad de Cerro Machin (25/12/2009) apoya los datos registrados por Demeter. Más adelante, en este capítulo se muestran anomalías 2

a 13 días antes de la ocurrencia del terremoto el 12 de mayo 2008 en Sichuan (Wenchuan).

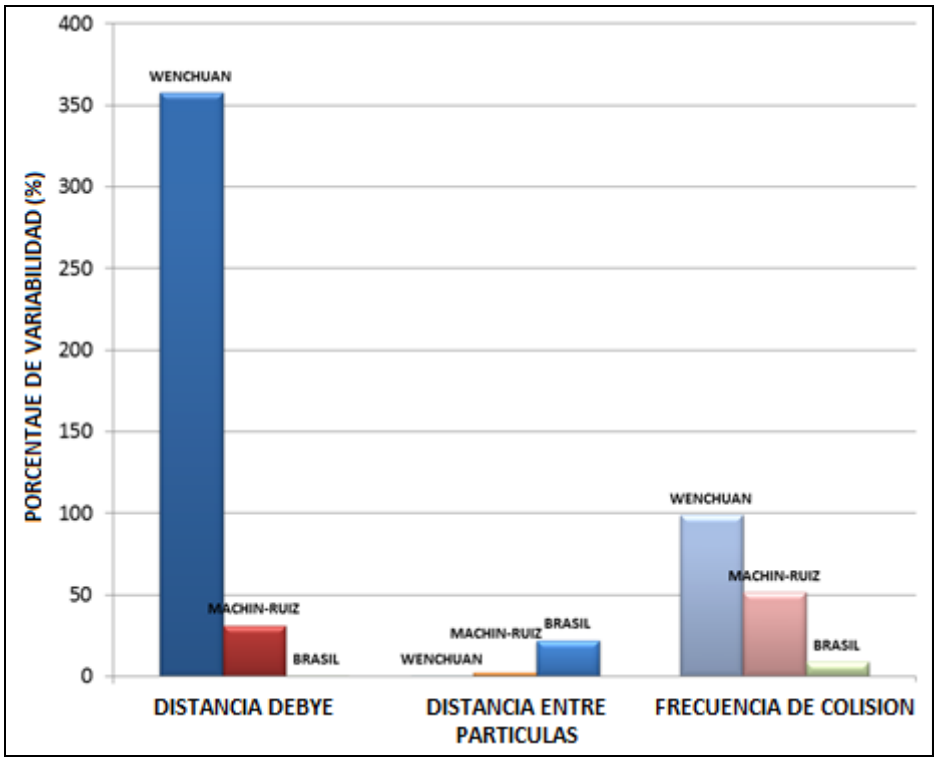


Figura 6.2: Variabilidad de algunos parámetros de la Ionosfera antes de los eventos sísmicos. Las partículas registradas son electrones.

La Figura 6. 3 muestra un patrón similar para iones. Se observa que la variabilidad de la frecuencia de plasma sobre Brasil es la más alta. Además, la distancia entre las partículas es también mayor, lo que corresponde a una menor variabilidad de los parámetros ionosféricos.

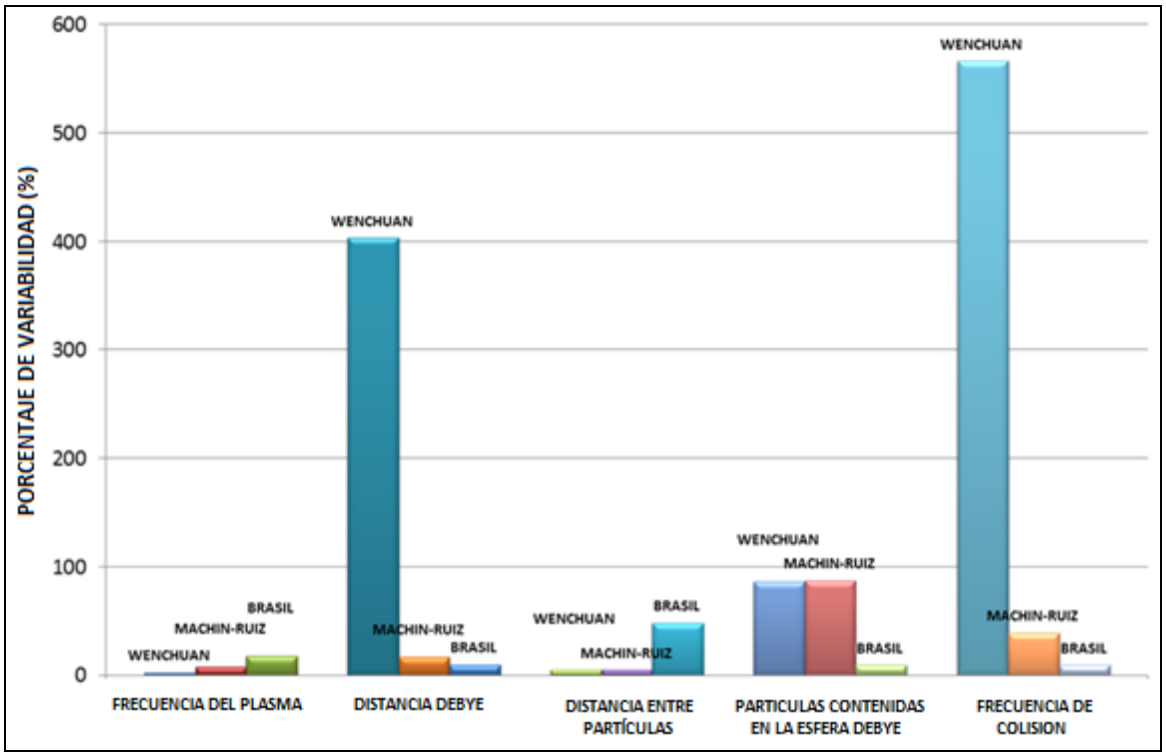


Figura 6. 3: Variabilidad similar de los parámetros de la ionosfera, teniendo en cuenta los iones.

6.2 Comentarios sobre el terremoto de Wenchuan del 12 de mayo del 2008

"El terremoto de Sichuan del 12 de mayo de 2008 sacudió al condado de Wenchuan en la provincia de Sichuan, en China, a las 14:28:04 (hora local) y 06:28:04 (UTC). Sus sacudidas se dejaron sentir incluso en Pekín, Shanghái, a lo largo de la República de China y en la capital de Vietnam, Hanói. Cinco colegios fueron aplastados por los derrumbes, con los niños dentro. Se dice que entre estos escombros y los de otras partes de la República Popular China es casi seguro que hayan quedado personas; aún no se sabe si hay sobrevivientes entre éstas".

El terremoto de Sichuan fue el segundo terremoto más desastroso de la historia de China tras el terremoto de Tangshan de 1976, que provocó la muerte de unas 250.000 personas.

El epicentro se situó en el condado de Wenchuan, Ngawa Tibetana y Qiang, a 90 km al norte-oeste de Chengdu. Los primeros reportes del terremoto reflejaron una magnitud de 8.0 en la escala de magnitud de momento, registrando cuarenta y seis réplicas principales, que se extendieron del 3,9 a 5 en la escala [48] Los modelos de rotura preliminares del terremoto muestran que las dimensiones de la falla que lo produjo son de aproximadamente 240 km x 20 km [49]; se generaron además deformaciones en la superficie de más de 3 metros, aumentando la probabilidad de ocurrencia de futuros eventos hacia el noreste y el suroeste del país [50]

Se ha propuesto en los capítulos anteriores que las anomalías ionosféricas relacionadas con los eventos sísmicos se pueden expresar mediante la dinámica de longitud de esfera Debye. La densidad de la ionosfera y la temperatura de los electrones sobre el área de Wenchuan se registraron en los dos dominios: el espacio y el tiempo. La penetración eléctrica vertical hasta la capa F2 induce la variabilidad de la densidad de electrones de la parte de la ionosfera sobre la zona sísmica de Wenchuan. Por lo tanto, la distancia de Debye está deprimida sobre la zona del terremoto. Esto se muestra en la Figura 6.4.

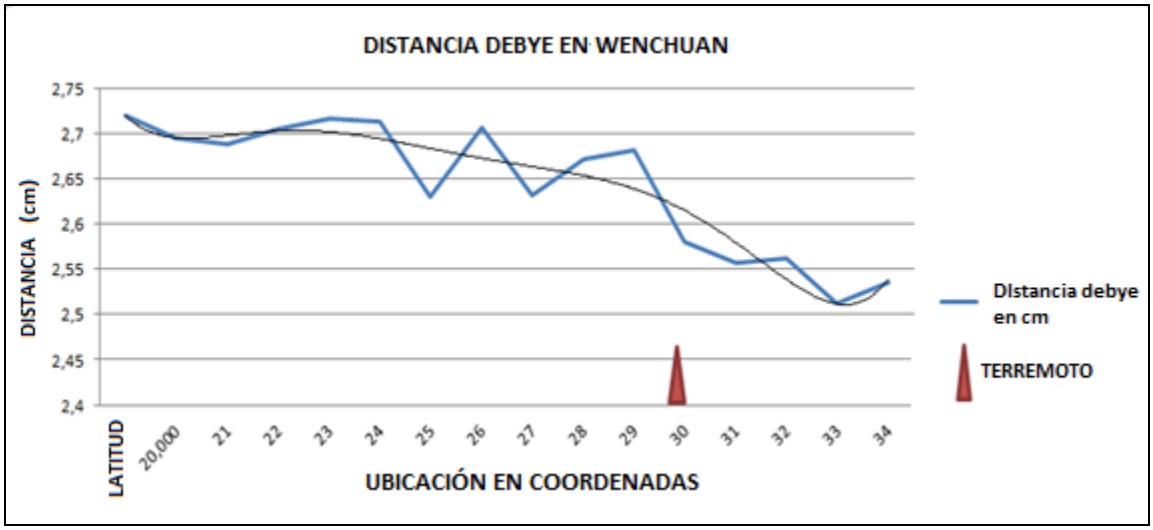


Figura 6.4: Variación de la longitud de Debye en la ionosfera sobre el terremoto de Wenchuan en el dominio espacial.

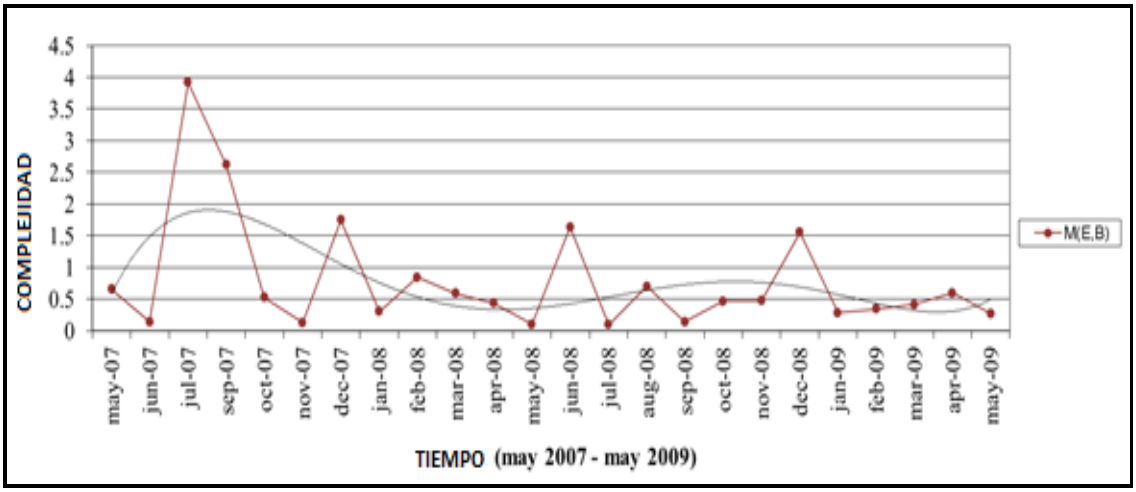


Figura 6.5: Historia de la complejidad de la ionosfera en un período de dos años sobre un área encima de la falla tectónica responsable del terremoto en Wenchuan antes descrito.

Se registraron más de 100 réplicas principales, variando en magnitud desde 4,0 hasta 6,1, después del sismo principal. De acuerdo con cifras oficiales, antes del 6 de Noviembre del 2008 había alrededor de 40.000 réplicas totales. La réplica más fuerte superior a M6 se produjo el 5 de agosto de 2008. El gráfico muestra mínimos de complejidad correspondientes a las réplicas: sismos en junio 07 y 07 de noviembre se presentan como precursores.

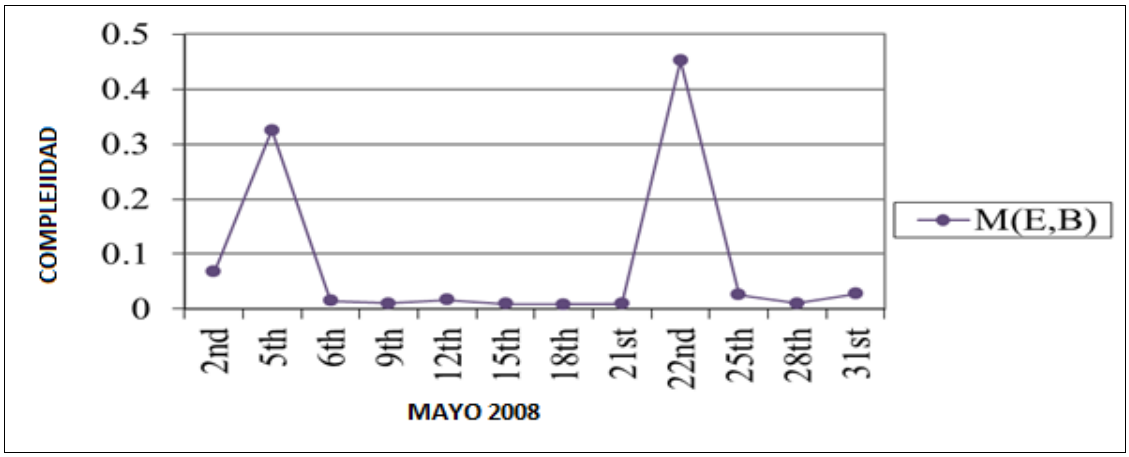


Figura 6.6: Mínimos de complejidad correspondientes a las réplicas.

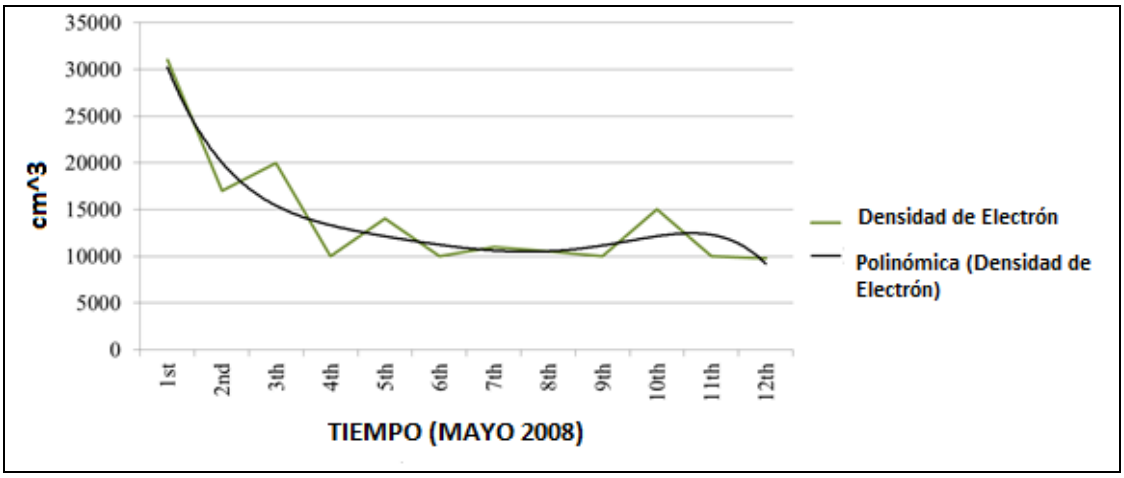


Figura 6.7: Densidad de electrones de una esfera Debye sobre el epicentro de Sichuan.

La Figura 6.6 revela una depresión de la complejidad de los campos electromagnéticos antes y después del terremoto del 12 de Mayo sobre el área de Sichuan.

Se puede observar en la Figura 6.7, un decaimiento a medida que se aproxima el día del terremoto el 12 de Mayo del 2008.

6.3 Notas sobre el terremoto de Haití

El terremoto de Haití de 2010 fue un terremoto de magnitud catastrófica 7,0 Mw, con epicentro cerca de la ciudad de Léogâne (departamento Ouest), a unos 25 km (16 millas) al oeste de Port-au-Prince, la capital de Haití. El terremoto ocurrió a las 16:53 hora local (21:53 GMT) el martes 12 de enero de 2010. [50]

Se ha encontrado que la longitud media de electrones Debye también está deprimida antes de la ocurrencia del terremoto.

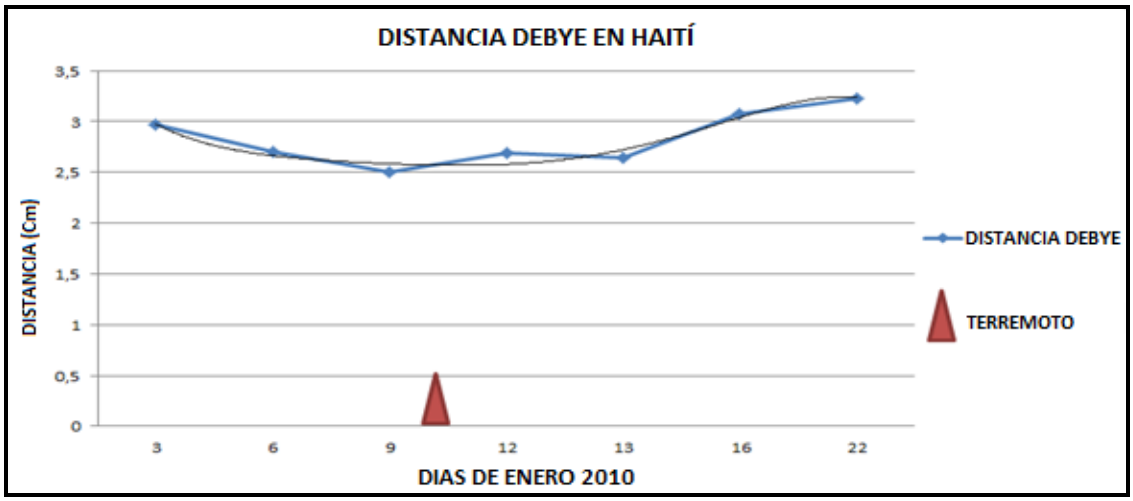


Figura 6.8: Variación de la longitud Debye en el terremoto de Haití, en el dominio del tiempo.

De nuevo, el área sobre la zona del epicentro del EQ muestra una depresión un día antes del evento.

6.4 Observaciones sobre el terremoto de Samoa

"El terremoto de Samoa de 2009 fue un terremoto de magnitud 8,3 en la escala Richter que afectó el Archipiélago de Samoa a las 06:48:11, hora local, el 29 de septiembre de 2009 (17:48:11 UTC)".

El temblor generó tres tsunamis separados y el más grande se elevó 1,6 metros sobre nivel del mar, con una altura de 76 m en el punto del epicentro. El epicentro estaba cerca de la Zona de subducción de Kermadec-Tonga en el Cinturón de Fuego del Pacífico, donde las placas continentales se unen y es común la actividad volcánica y sísmica. En Samoa Americana, la capital Pago Pago fue arrasada por cuatro olas de tsunami entre 4,6 y 6,1 metros de altura. Las olas avanzaron hasta 90 metros tierra adentro antes de retroceder. El Presidente de Estados Unidos, Barack Obama, declaró a la Samoa Americana como zona de desastre y la capital Apia, fue evacuada totalmente y su población se refugió en las zonas altas. Los precursores ionosféricos del terremoto de Samoa aparecen unos días antes y se reconoce de nuevo un patrón: antes del terremoto la distancia Debye disminuye, pero aumenta el día del evento.

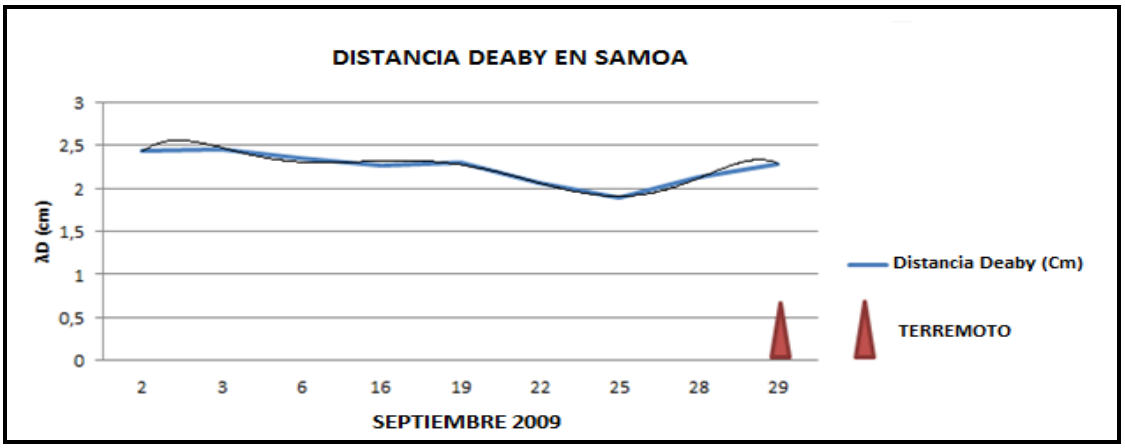


Figura 6.9: Longitud de Debye para el caso del terremoto de Samoa.

La longitud de Debye también muestra una depresión el 25 de septiembre, lo que sugiere un posible precursor y el anuncio del evento sísmico del 29 de septiembre del 2009. Se puede resaltar que para el día del terremoto, la distancia Debye se recuperó, ensanchándose.

Durante los últimos años, con el desarrollo de la tecnología de la tele-observación por satélite, se han obtenido resultados en el análisis de los precursores infrarrojos de los terremotos.

La radiación de onda larga saliente (por sus siglas en OLR), es la densidad de energía electromagnética de todas las longitudes de onda que la tierra irradia hacia el espacio exterior, es decir, la radiación térmica que emite la superficie de la tierra.

Basado en estos resultados, se propone también algún tipo de conexión entre la anomalía de radiación infrarroja y la variabilidad de la distancia Debye. Con base en los datos de radiación de onda larga saliente de satélites geoestacionarios y de sus características de variación, la Figura 6.10 muestra un ensanchamiento de la energía térmica infrarroja registrada 4 días antes del terremoto de Samoa.

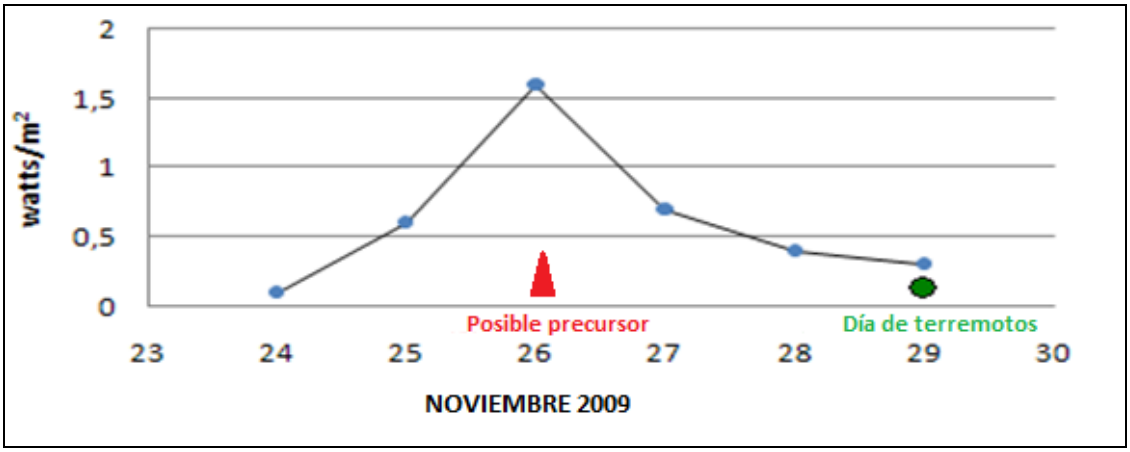


Figura 6.10: Gráfico derivado de la varianza de la estimación del espectro de potencia en 26/09/2009. Fuente: NOAA / AVHRR, AQUA / AIRS OLR.

Las características del infrarrojo térmico observado en Samoa se correlacionan con la distancia de Debye deprimida el mismo día. (Ver Figura 6.9).

6.5 Actividad sísmica del volcán galeras

Galeras es un volcán del sur de Colombia, situado a 9 km de la ciudad de San Juan de Pasto, capital del departamento de Nariño. Es uno de los volcanes de mayor actividad en Colombia y el que cuenta con mayores reportes históricos de erupciones importantes desde el siglo XVI. Una erupción explosiva se produjo en el volcán Galeras el 17 de enero de 2008. La sismicidad del evento fue similar a erupciones anteriores en 1992, 1993, y 2004-2006.

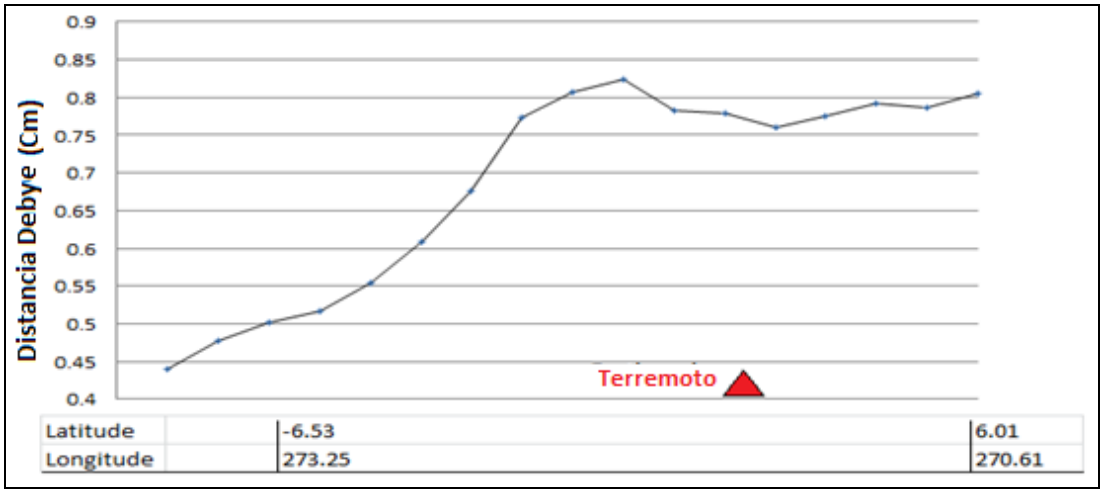


Figura 6. 11: Dinámica de la esfera Debye sobre el volcán Galeras, 1 día antes de la erupción del 17 de Enero del 2008.

Se observa de la Figura 6. 11, que la distancia Debye muestra una depresión sobre el epicentro.

Otro de los objetivos del presenten estudio, es buscar la auto-comparación del Galeras. ¿Cuánto es la entropía mutua de algunos parámetros en condición de pre-erupción contra la entropía mutua en estado de reposo? (Ver Figura 6.12).

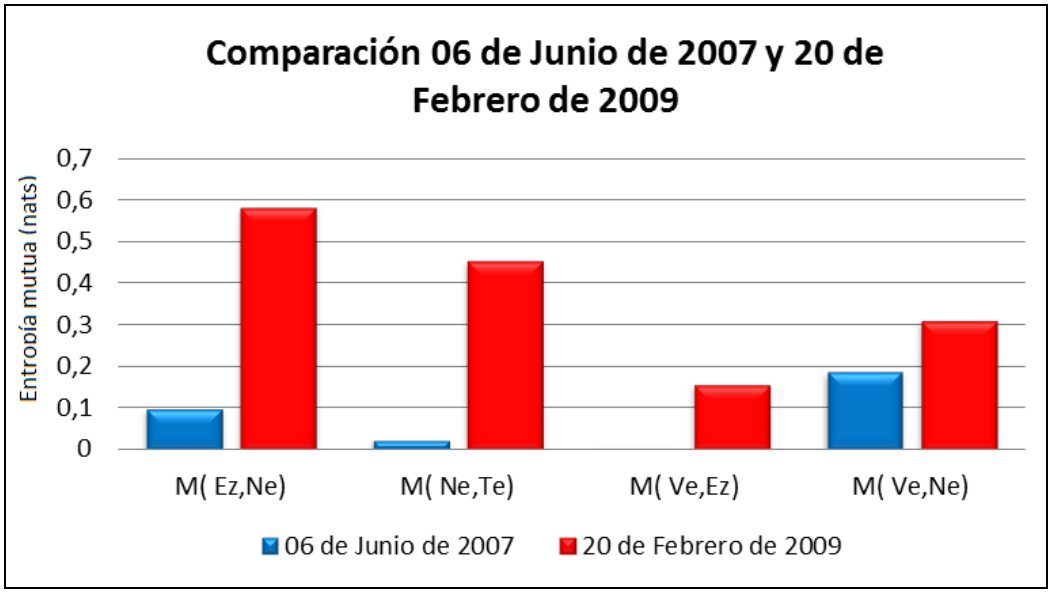


Figura 6.12: Comparación entre entropías mutuas en estado de pre-erupción contra entropías mutuas en estado de reposo.

La condición de pre-erupción corresponde a las barras rojas y la condición de reposo a las barras azules.

En la gráfica de izquierda a derecha las entropías mutuas son:

- Campo eléctrico vertical-densidad de electrones: M (Ez ,Ne).
- Densidad de electrones-temperatura de electrones: M (Ne,Te).
- Velocidad de electrones-campo eléctrico vertical: M (Ve , Ez).
- Velocidad de electrones- densidad de electrones: M (Ve,Ne).

Situación similar se repite para otra fecha (Figura 6.13):

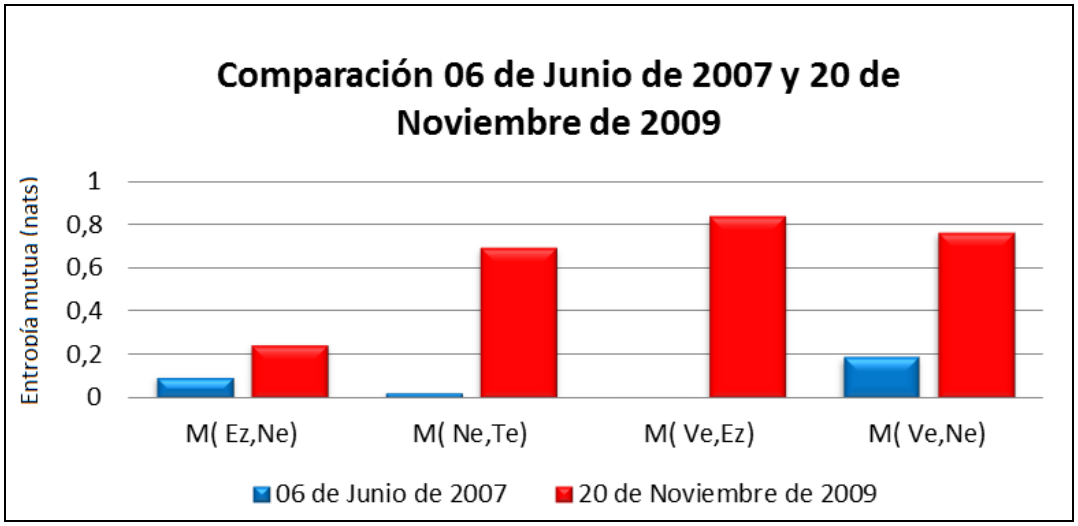


Figura 6.13: Se repite la situación de mayor entropía mutua durante la pre-erupción.

6.6 Erupción del volcán del Huila

INGEOMINAS informó sobre el aumento de la actividad sísmica y dos explosiones del Nevado del Huila el 19 de febrero de 2007, "una nube de ceniza se elevó a una altitud de aproximadamente 6 km (19.700 pies)". Durante las observaciones aéreas del 20 de febrero, depósitos de ceniza fueron vistos en el sector oeste. La fumarola procedente de varios puntos a lo largo de una fisura se elevó a 7 km (23.000 pies). Flujos de lodo de un glaciar se derramaron por la ladera. Basándose en los informes de posibles avalanchas, las autoridades ordenaron la evacuación de las ciudades fronterizas con los ríos".

La Figura 6.14 permite visualizar la electrodinámica de una esfera Debye prototipo contraído en su radio, 1 día antes de la erupción mencionada arriba. Es de resaltar la disminución de la velocidad de los electrones, consecuencia de la reducción del volumen de la esfera Debye.

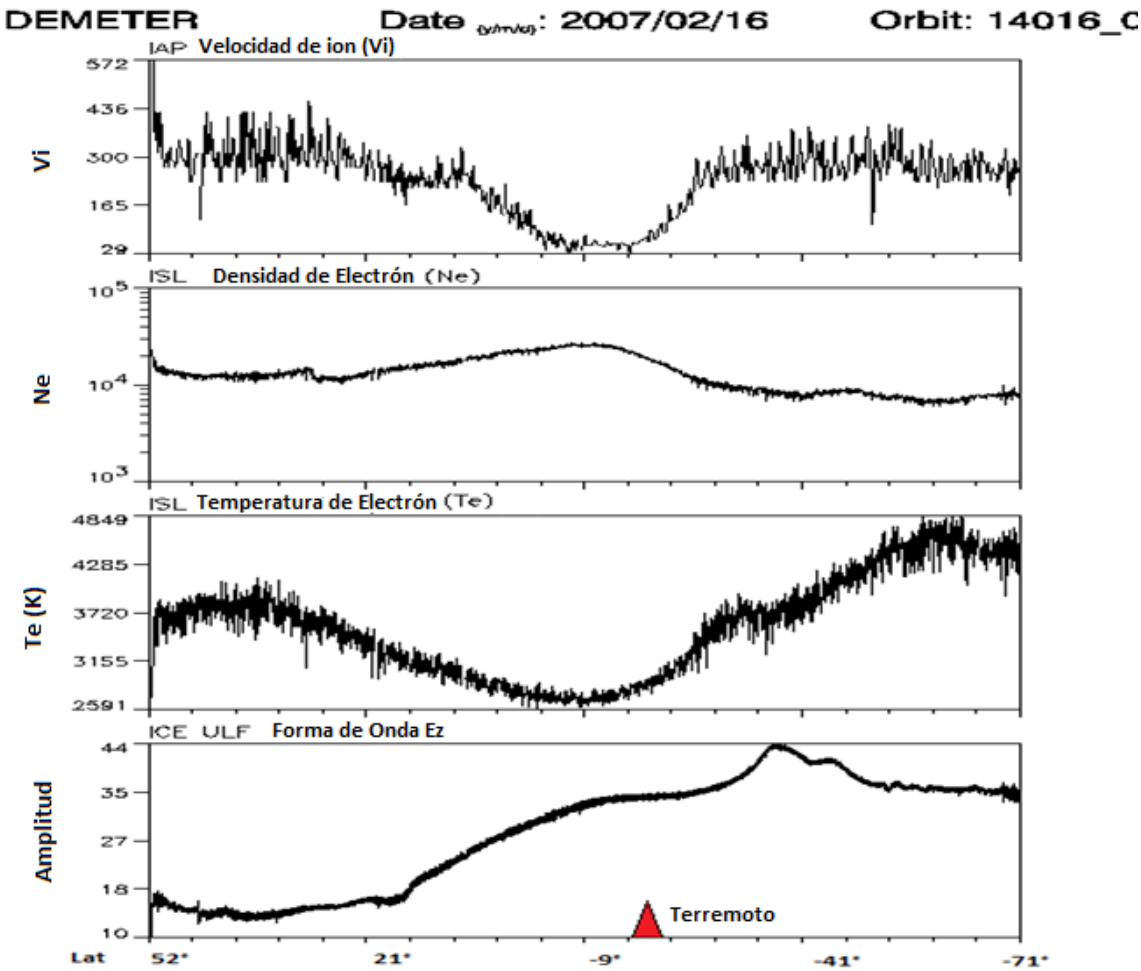


Figura 6.14: Distancia Debye en relación con el Nevado del Huila.

Para el Volcán del Huila, la distancia Debye, calculada aparte descendió a 2.3 cm antes de la erupción. Observar el aumento de la densidad de electrones en contraste con la disminución de la temperatura de los mismos electrones, combinación que conduce a una depresión del radio de la esfera Debye.

La auto-comparación de las entropías mutuas también arroja resultados similares a los expuestos en el caso del volcán Galeras. Esto se muestra en la Figura 6.15.

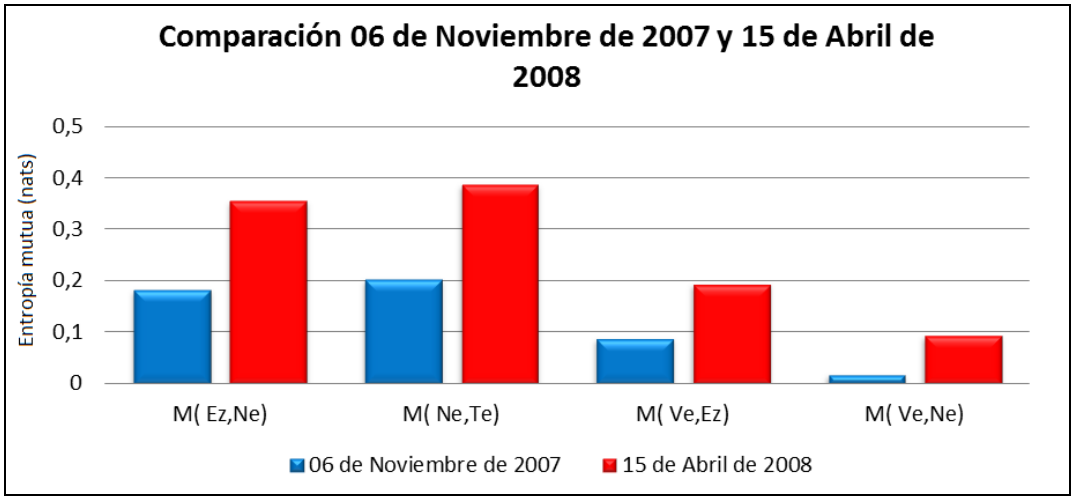


Figura 6.15: Volcán Nevado del Huila: auto-comparación 06 de Noviembre de 2007 y 15 de Abril de 2008.

Igual que en el caso anterior, la entropía mutua de los parámetros de la esfera indica mayor valor para la situación de actividad sísmica (barras rojas). Las barras azules por su parte reflejan baja actividad sísmica.

Recordando que la complejidad es la suma de las entropías mutuas, la Figura 6.16 compara la complejidad electromagnética para las dos condiciones: alta sismicidad (barra roja) contra baja sismicidad (barra azul).

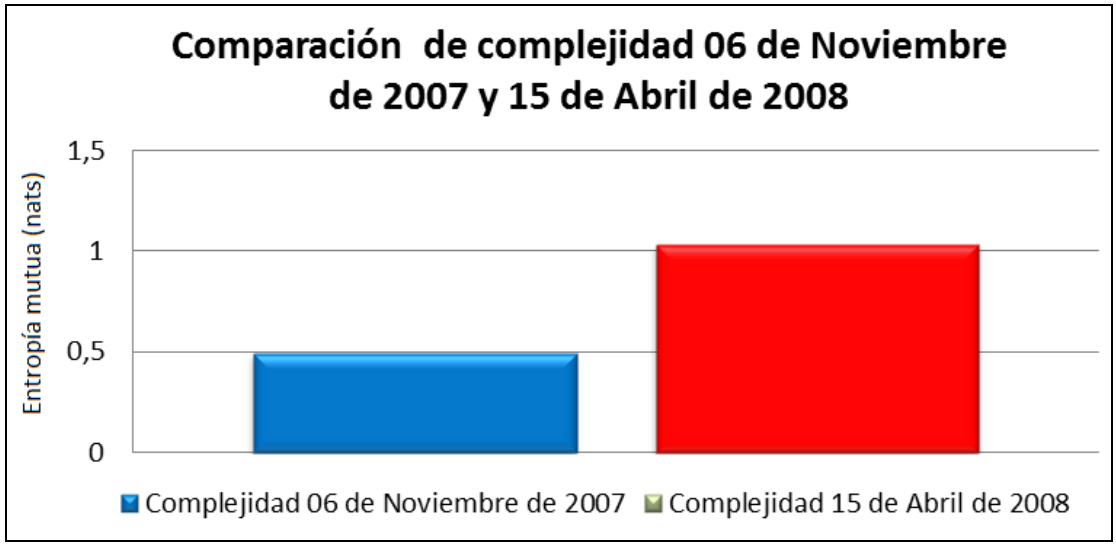


Figura 6.16: Comparación de la complejidad de una esfera Debye para el 06 de Noviembre de 2007 y 15 de Abril de 2008; caso Nevado del Huila.

Comparación de ambas complejidades de una esfera Debye para dos días, alta actividad y baja actividad sísmica. Color Azul significa baja sismicidad y rojo alta sismicidad.

6.7 Enjambre de sismos en cerro Machín el 25 de diciembre de 2009

El procesamiento de los datos captados por el Demeter en esa fecha, permitió la creación de la Figura 6.17. Con esta gráfica se cumple una de las hipótesis de este trabajo: el evento sísmico está relacionado con baja entropía mutua de los campos electromagnéticos.

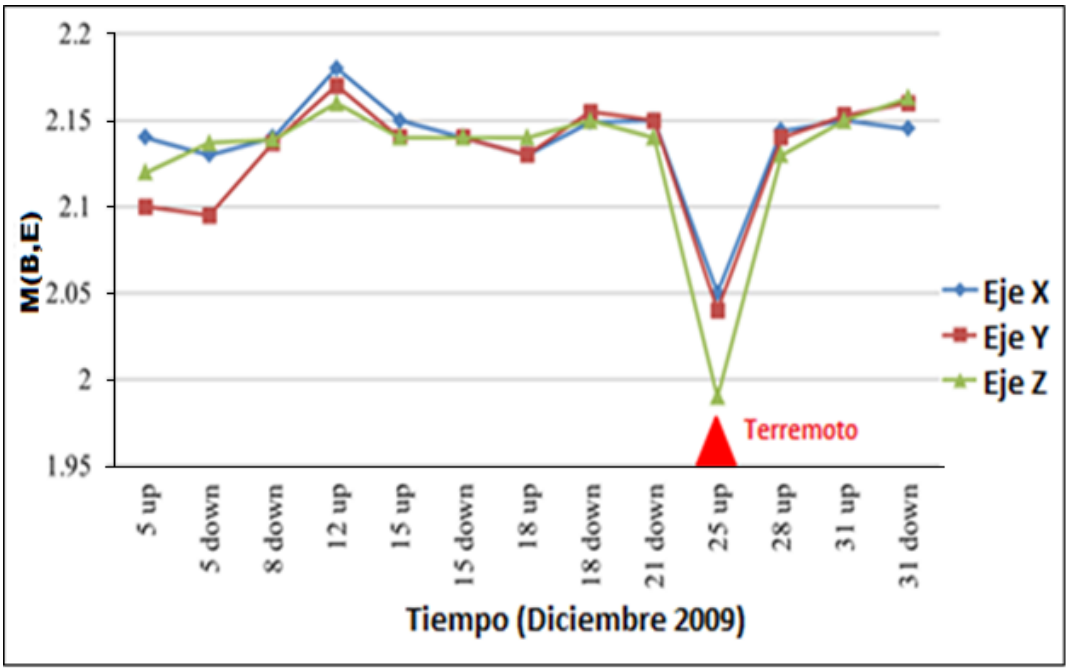


Figura 6.17: Entropía mutua del Cerro Machín.

Cerro Machín estuvo extremadamente activo el día 25 de diciembre de 2009 y la entropía mutua tuvo depresión aguda.

En la órbita de esa misma fecha, la distancia Debye estuvo deprimida sobre las coordenadas del evento sísmico. La Figura 6.18 ilustra la variación de la distancia Debye en función del recorrido del Demeter.

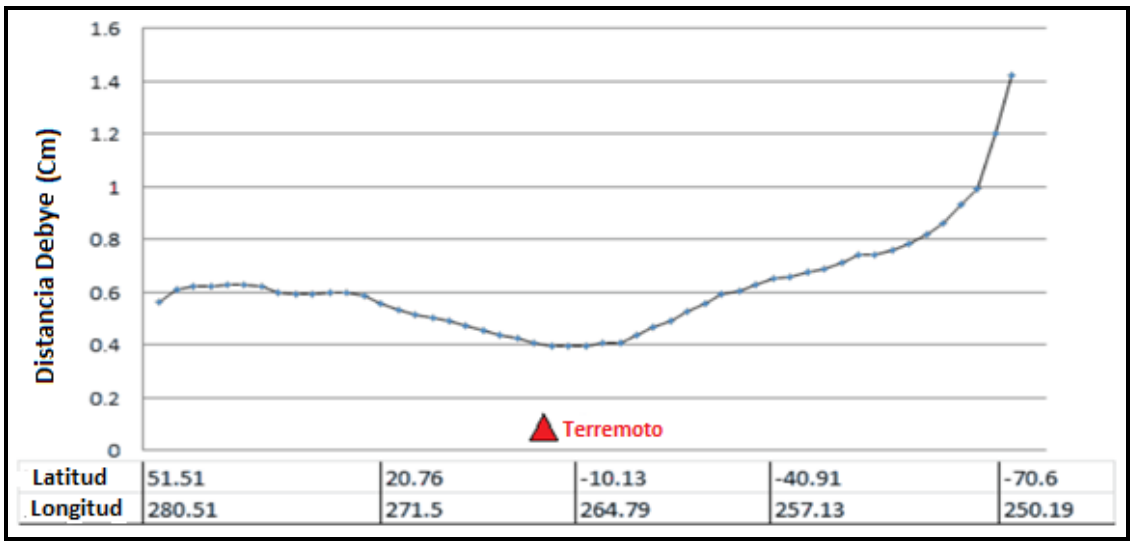


Figura 6.18: Variación de la distancia Debye en función del recorrido del Demeter: Caso Cerro Machín.

La actividad del volcán Cerro Machín se reflejó en la dinámica de la esfera Debye. El radio de Debye descendió hasta 0,4 sobre la zona sísmica.

6.8 El volcán pagan también mostró un patrón electromagnético similar

El Volcán Pagan en Pagan, Islas Marianas del Norte, entró en erupción en el año 2006; "Los residentes de Pagan reportaron caída de ceniza que se acumuló en un campamento a una tasa de 6,4 mm por día. También describieron una fumarola que se elevó a una altitud de 640 m (2100 pies) y un olor a azufre, que en ocasiones se colaba a través de su campamento. En base a imágenes de satélite, el Washington VAAC informó de un penacho de gas y ceniza que flotaba sobre todo Ganó el 5, 6 y 8 de diciembre. El servicio meteorológico nacional de EE.UU. emitió una alerta de niebla para las Islas Mariana después de la última erupción

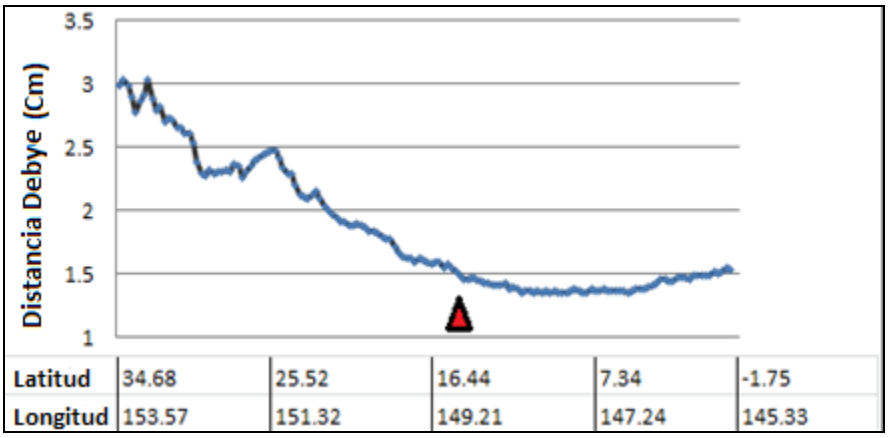


Figura 6.19: Longitud Debye: caso Pagán.

La Figura 6.19 ilustra la depresión de la distancia Debye sobre la zona de la erupción.

La longitud Debye disminuye sobre la zona del evento en Pagan. La componente z correspondiente a la penetración del campo eléctrico vertical, causó que la longitud de Debye se redujera a 1,5 cm.

La gráfica anterior fue obtenida procesando la información registrada por el Demeter durante la órbita 12538, mostrada en la Figura 6.20.

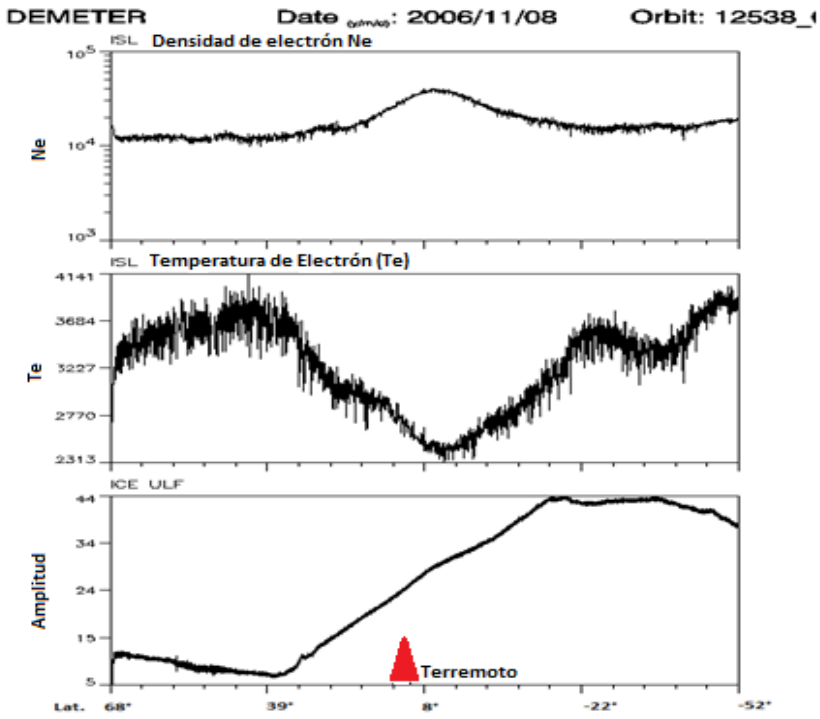


Figura 6.20: Componente z del campo eléctrico vertical que modula la densidad y temperatura de electrones. Volcán Pagan.

6.9 Volcán Ruiz y la respuesta de la ionosfera

El último caso presenta la dinámica de la ionosfera en relación con la actividad sísmica del volcán del Ruiz.

Otra hipótesis se cumple con la Figura 6.21: la penetración del campo eléctrico vertical modula la distancia Debye.

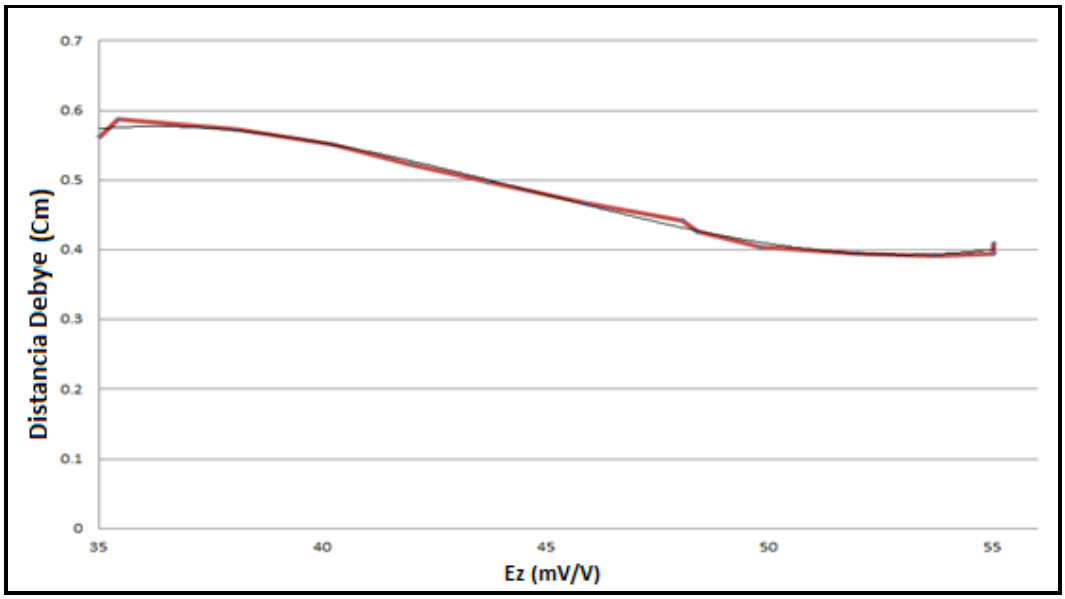


Figura 6.21: Variación de la distancia Debye en función del campo eléctrico para el caso del Nevado del Ruiz.

La figura anterior fue lograda a partir de datos transmitidos por el Demeter en su órbita 28957-0. La modulación que realiza la componente z del campo eléctrico vertical modula varios parámetros de la esfera Debye, tal como se puede ver en la Figura 6.22.

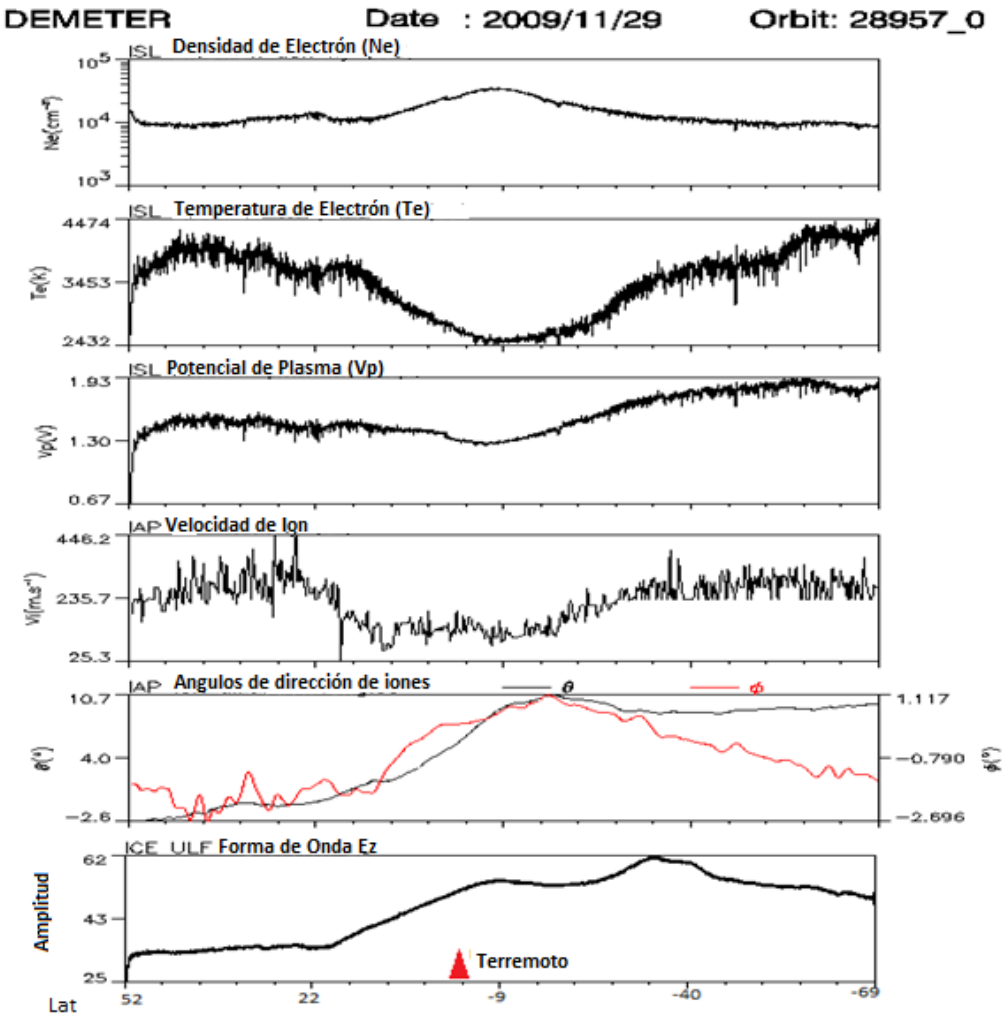


Figura 6.22: Caso volcán Ruiz: Modulación de algunas variables por el campo eléctrico vertical.

Como se observa en la Figura 6.22, el campo eléctrico también modula temperatura, densidad, tensión del plasma, velocidad de iones y ángulo de partículas.

6.10 Conclusiones del capítulo

- Datos del plasma en la ionosfera registrados por el DEMETER, han mostrado un gran apoyo con el fin de explicar la dinámica de Debye observada en conexión con terremotos.

- Se ha mostrado asociación entre la actividad térmica de la superficie de la tierra y una esfera Debye con ayuda de información obtenida de NASA EOS Aqua para el caso del terremoto en Samoa.

- Los resultados sugieren que las variaciones de los parámetros de la esfera de Debye implican conexión con el proceso de preparación del terremoto.

- Según los resultados, el análisis de la dinámica de la longitud de Debye es útil para los estudios de conexión ionosfera / litosfera. En este trabajo se observa que el empleo de un método que enlaza ambas consideraciones teóricas y los aspectos empíricos tiene el potencial de dar lugar a una mejor caracterización del comportamiento de la ionosfera, lo que resulta en una futura capacidad de previsión.

- Este estudio puede mejorar la caracterización de los precursores de terremotos adicionando la Distancia Debye como indicador. También se inicia una misión para entender la respuesta de la parte de la ionosfera sobre Colombia a la actividad sísmica. Sin duda, muchas preguntas surgirán y sus respuestas podrían realizar una nueva área de investigación.

- Es evidente que hay una fuerte conexión entre los eventos sísmicos y la variabilidad de la ionosfera. Además, algunos parámetros como la distancia de Debye podrían ser utilizados como precursores de terremoto. Un Fuerte sismo (Wenchuan) que tiene una magnitud mayor que ocho, se ha estudiado en busca de perturbaciones de la ionosfera en función de diferentes parámetros del plasma. Estas perturbaciones fueron registrados por los instrumentos de satélite DEMETER [55] ISL e IAP.

- Las perturbaciones de la ionosfera observadas cerca del epicentro del terremoto muy probablemente ocurrieron, debido al campo eléctrico vertical modulado por emisión de radón, aerosoles metálicos y otros, al excitar los electrones y los iones en la ionosfera.

- Estudio en tiempo real de los parámetros del plasma puede dar buenos consejos para la predicción de terremotos.

CAPÍTULO 7

EXPERIMENTO DE SIMULACIÓN EN LABORATORIO PARA PREDECIR FALLAS EN TRANSFORMADORES CON BASE EN LA ENTROPÍA DEL FLUJO MAGNÉTICO RADIADO

En este capítulo se relata varios experimentos para analizar la entropía de escala múltiple y espectro de frecuencia de las ondas magnéticas emitidas por un transformador para varias condiciones. El modelo eléctrico incorporado es resistivamente cargado en varias etapas, desde vacío hasta sobrecarga. Se midieron las ondas magnéticas emitidas por la máquina eléctrica y fueron procesadas con software basado en entropía de múltiple escala. Los conceptos de entropía podrían llevar a desarrollar una teoría de envejecimiento del transformador. Entonces, si se conoce la historia de la entropía, es posible predecir la vida útil del dispositivo.

En el apéndice A se describen experimentos para medir la entropía en condiciones de carga no lineal y se correlaciona con el THD y el factor de potencia.

7 EXPERIMENTO DE SIMULACIÓN EN LABORATORIO PARA PREDECIR FALLAS EN TRANSFORMADORES CON BASE EN LA ENTROPÍA DEL FLUJO MAGNÉTICO RADIADO

El transformador es un componente esencial del sistema de transmisión y distribución y representa uno de los componentes clave en los sistemas de servicios públicos que requieren una vigilancia constante. Por esta razón, es necesario mejorar las técnicas y métodos para mantener la buena función de la red e impedir fallos de transformadores. La vida útil de este equipo es un factor decisivo para la gestión de los riesgos asociados a la fiabilidad de la red y, por supuesto, proporciona un servidor de calidad impactando directamente en la disponibilidad. Actualmente, se realizan varias pruebas preventivas en transformadores energizados que utilizan técnicas como el análisis de ultrasonido y la termografía.

Este capítulo aplica el método de entropía multi-escala (MSE) a ondas magnéticas radiadas y tomadas cerca del circuito del transformador, a través de medición no invasiva e indirecta de la corriente transportada por el flujo magnético.

El enfoque que se presenta para hacer frente a este problema radica en la complejidad del transformador, que refleja su capacidad para adaptarse y funcionar en un entorno y para operar a través de la diversidad de las múltiples cargas cambiantes, siendo su complejidad también multi-escala. Las fallas en equipos de energía tienen origen eléctrico, térmico y químico, y están estrechamente relacionados con el rendimiento y la vida útil del equipo. Por lo tanto, la ganancia o pérdida de complejidad puede ser un signo de patología de la dinámica del transformador. En consecuencia, este enfoque analiza la complejidad de un transformador y se centra en medir las ondas magnéticas e infrarrojas radiadas en múltiples escalas de tiempo. La entropía de múltiple escala es un nuevo método para analizar la complejidad física de series de tiempo en eventos físicos y se ha aplicado a una amplia diversidad de fenómenos [36].

Con base en lo anterior se hacen caracterizar los cambios en la dinámica de la complejidad del transformador debido al envejecimiento, y la sobrecarga de armónicos. Este análisis es una extensión de trabajos previos que se centró en la aplicación del MSE a la entropía y el coeficiente de variación (CV) como herramientas para la evaluación de calidad de la energía, [56].

En este experimento, se analizó la entropía de escala múltiple y espectro de frecuencia de las ondas magnéticas radiadas por un transformador para varias condiciones. El modelo eléctrico incorporado es resistivamente cargado en varias etapas, desde vacío hasta sobrecarga. Se midieron las ondas magnéticas radiadas y posteriormente fueron procesadas con software basado en entropía de múltiples escalas. Los conceptos de entropía podrían llevar a desarrollar una teoría de envejecimiento del transformador; de esta manera, si se conoce la historia de la entropía es posible predecir la vida útil del dispositivo.

Los enfoques tradicionales para medir el envejecimiento de máquinas electromecánicas no tienen en cuenta la complejidad del flujo magnético como un indicador de la edad. Complejidad, entendida como la suma de las entropías individuales, es menor para transformadores viejos, hipótesis que fue confirmada en el laboratorio a través de la comparación de 3 transformadores, de los cuales 2 de ellos fueron envejecidos artificialmente mediante calentamiento en un horno eléctrico. Adicionalmente fueron analizadas múltiples escalas de las series de tiempo, utilizando varios algoritmos de entropía de múltiple escala (MSE). Los datos obtenidos indican la pérdida de complejidad para el envejecimiento.

Ali et al [57] discutieron la aplicación de varias técnicas para la evaluación de la vida del aislamiento del transformador, cromatografía del aceite, cromatografía de exclusión (SEC) del aislamiento de papel para medir los cambios en la distribución del peso molecular (en relación con el grado de polimerización DP) y modelos informáticos de proceso de degradación tales como la resistencia a la tracción, lo cual es de importancia crítica en la evaluación de la probabilidad de daños en el papel en condiciones de fallo.

Armónicos en sistemas de potencia de alta tensión pueden causar grandes errores. Pruebas realizadas por la empresa noruega National Grid (Statnett), Bergenshalvoens Kommunale Kraftselskap (BKK) y el Instituto de Investigación de Energía Eléctrica de Noruega (ahora SINTEF Energy Research) reveló errores del 80% al 1,200%, [58].

Se propone para medir los armónicos, un método inalámbrico e indirecto. Ecuaciones experimentales fueron desarrolladas en pruebas de simulación en laboratorio para calcular el índice de armónicos THD de un transformador. Como resultado de la discusión se propone una ecuación empírica que conecta la entropía con el THD. En la sección 8.1.2 se muestra el procedimiento matemático para llegar a la expresión que permite ligar estas dos entidades.

7.1 Experimentos

7.1.1 Sobrecarga de un transformador cargado resistivamente

La entropía se puede entender como un componente de la complejidad. Esto está en relación con el contenido de armónicos, lo que afecta y distorsiona la forma de onda. Observar las Figura 7.1 y Figura 7.2.

El espectro de frecuencia desde 60 Hz hasta 780 Hz mostrado en las figuras mencionadas es adecuado para el diagnóstico de condiciones anormales

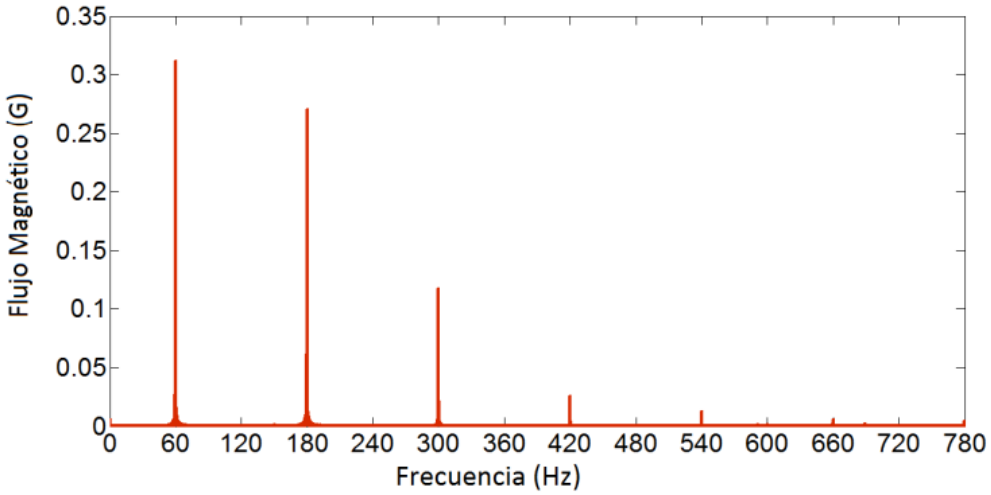


Figura 7.1: Espectro mostrando armónicos causados por sobrecarga de un transformador en un cortocircuito cargado resistivamente.

La Figura 7.2, revela ganancia de entropía por calentamiento del transformador sujeto a la prueba.

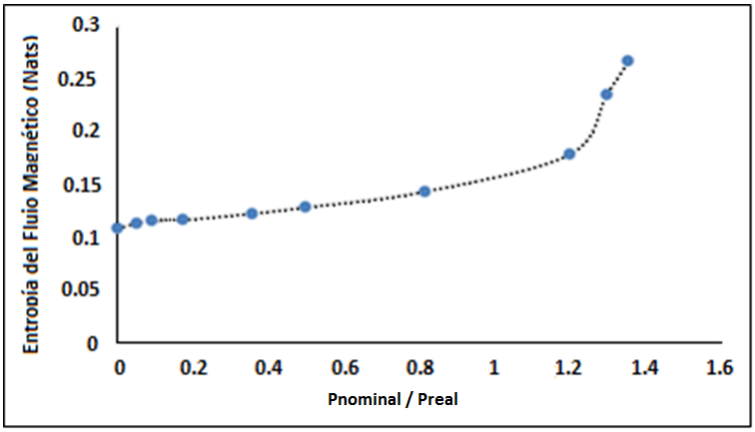


Figura 7.2: Aumento de la entropía, vinculada a la sobrecarga.

De la Figura 7.2 se puede observar que el transformador sobrecalentado aumenta la entropía del flujo magnético. Los valores de la entropía más altos que 0,15 nats, revelan sobrecarga.

7.1.2 Medición del THD a partir de la entropía multiescala.

Otra aplicación útil de la entropía es la medición inalámbrica del THD. Con base en los datos capturados y la curva resultante, se propone la ecuación (7.4) con la que es posible obtener el THD.

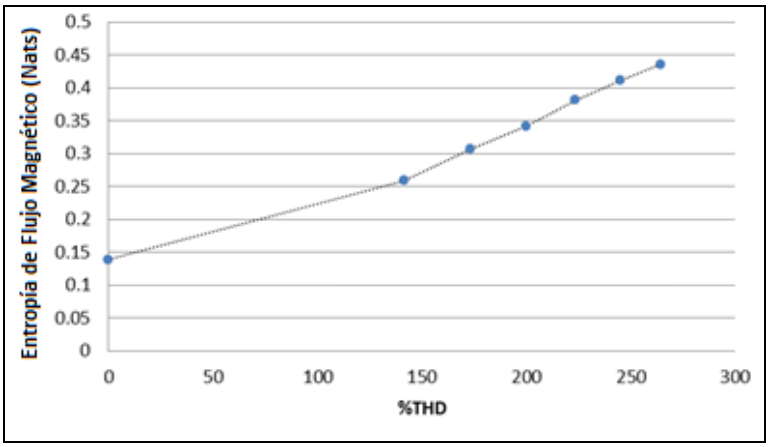


Figura 7.3: Posibilidad de obtener el índice de THD armónico mediante la medición de las ondas de entropía magnética radiada.

Ecuación empírica

La ecuación por línea de tendencia de la Figura 7.3 es:

$$y = ae^{b(x)} \tag{7.1}$$

Donde $a = 0.1402$ y $b = 0.0044$

$$ApEn = ae^{b(THD)} \tag{7.2}$$

$$\ln\left(\frac{ApEn}{a}\right) = d(THD)\ln e \tag{7.3}$$

$$THD = \frac{1}{0.0044}\ln\left(\frac{ApEn}{0.1402}\right) \tag{7.4}$$

7.1.3 Medición del envejecimiento del transformador

La vida media esperada de un transformador pudiera saberse a partir de las medidas de entropía. La Figura 7.4 muestra el resultado del experimento.

La entropía de múltiple escala MSE se aplicó a la serie de datos de campo magnético generados por 3 transformadores con el fin de estimar la generación de entropía durante un tiempo (2 minutos cada uno) de muestra de su ciclo vital. Los transformadores se tomaron de una misma cochada y con idénticas referencias. Dos de ellos fueron envejecidos mediante calentamiento en un horno eléctrico.

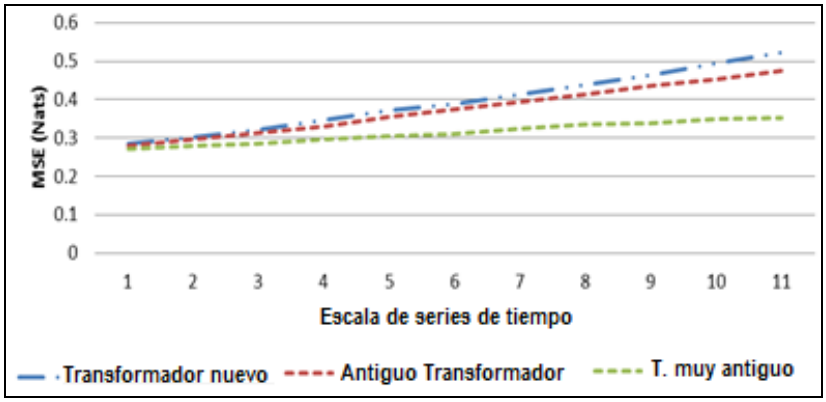


Figura 7.4: Comparación entre varios transformadores. El transformador más viejo presenta el menor valor de entropía.

La entropía, la no-linealidad del flujo magnético y la saturación del núcleo del transformador están íntimamente ligadas. Los principales efectos no lineales en el núcleo del transformador son la saturación, la corriente y la histéresis de Foucault. La saturación es el efecto predominante en los transformadores de potencia, seguido de los efectos de histéresis de Foucault. En la saturación, el núcleo del transformador actúa como una fuente de corriente generadora de armónicos.

Se puede considerar que el envejecimiento del núcleo disminuye el equilibrio térmico-electromagnético del transformador reflejándose en una menor entropía informática.

7.2 Conclusiones del capítulo

Se han expuesto argumentos de validación para la aplicación de la entropía a los circuitos eléctricos.

Cuando un transformador es sometido a sobrecarga, su núcleo trabaja en régimen de saturación, este hecho hace que se produzcan distorsiones armónicas, provocando irregularidades en las ondas electromagnéticas emitidas, aumentando la entropía de las ondas magnéticas emitidas.

Se ha mostrado la conexión entre THD y entropía de múltiple escala obteniéndose una ecuación que representa el modelo matemático.

Se propone un nuevo método para evaluar el envejecimiento de los transformadores.

CAPÍTULO 8

ENTROPIA MUTUA EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA

Este capítulo presenta otra forma de evaluar la calidad de la energía suministrada por los transformadores. La entropía de la señal electro-magnética revela la presencia de armónicos en el suministro de energía eléctrica industrial y doméstica. Se mostrarán algunas mediciones de las ondas electromagnéticas radiadas tomadas por debajo de los transformadores eléctricos de 115 kv/13.2 kv, de redes de la ciudad de Manizales (Colombia) a través de una medición no invasiva e indirecta (usando sensores inalámbricos) de la complejidad de energía transportada por el suministro. Los usuarios eléctricos están preocupados por la calidad de la energía eléctrica, ya que a causa de la mala calidad ocurren daños y mal funcionamiento para diferentes tipos de cargas. Algunas industrias son muy sensibles y muchas pérdidas se producen por inestabilidades, distorsión armónica, perturbaciones en la línea, impulsos, interrupciones, sobretensiones, sub-tensiones y fallos de onda. Esto produce bloqueos de computadores, parpadeo y daños, entre otros.

8 ENTROPIA MUTUA DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA

Entropía, como un indicador aceptado de la complejidad de las realidades físicas, es proporcional al logaritmo del número de estados en un sistema termodinámico. Algunos autores identifican entropía como un trastorno de un sistema, pero esto no es del todo cierto. La entropía de la información la define por primera vez Shannon, en 1949, y se aplica a múltiples eventos físicos. En este contexto, la entropía describe la complejidad de las ondas eléctricas y magnéticas radiadas por el transformador. Se encontró que el aumento de entropía significa espectro más amplio. Esta situación, introduce EMI (interferencias electromagnéticas).El "ruido EMI" interfiere sobre los teléfonos, televisores, radios, computadoras, sistemas de control y otro tipo de equipo electrónico.

8.1 Experimento debajo de líneas de alta tensión

El objetivo del experimento es medir los campos electromagnéticos bajo un transformador de 115kV, y analizar el comportamiento de las señales cuando son procesadas por los cálculos de entropía. El experimento tiene las siguientes fases:

1. Adquisición: Los circuitos para medir campos magnéticos y eléctricos se basan en bobina y sensores de condensadores.
2. Acondicionamiento de Señal: se estableció un ancho de banda de 60 a 1000 Hz.
3. Tratamiento de la Información: Ecuaciones mostradas en el capítulo 5: ecuaciones (5.17) y (5.19), se aplican a los datos con el fin de obtener la entropía de escala múltiple y la entropía mutua. Para obtener figuras espectrales, se utilizó Matlab Fast Fourier Transform (FFT).

4. Interpretación de los resultados: Los resultados indican que es posible evaluar la calidad de la energía de una manera no invasiva e indirecta. Se propone una nueva técnica para medir armónicos.

8.2 Resultados

8.2.1 Caso 1: Espectro de las ondas magnéticas tomado en un circuito que alimenta los hogares y oficinas

Los datos obtenidos con los sensores inalámbricos fueron procesados y las siguientes gráficas fueron obtenidas.

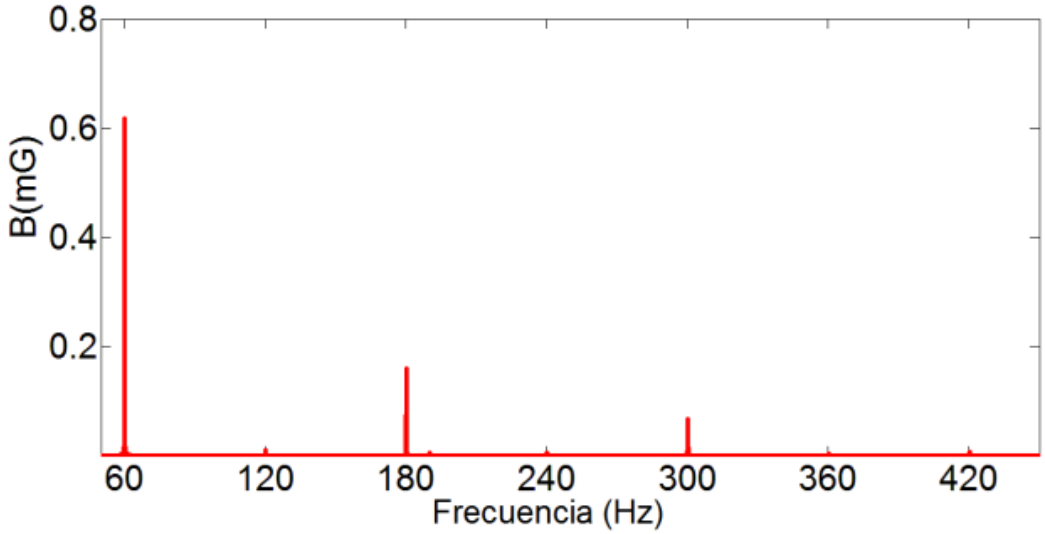


Figura 8.1: Espectro magnético para viviendas y red de establecimientos comerciales.

La Figura 8.1 muestra la generación de armónicos debido a cargas no lineales correspondientes a corrientes que se añaden a la fundamental. La distorsión de la onda puede afectar negativamente el rendimiento del sistema. Si la carga se convierte en no lineal, una condición resonante prevalece y la corriente y tensión nominal pueden aumentar dramáticamente. Por lo tanto, las pérdidas correspondientes en los alambres conductores, barras de bus, transformadores y condensadores de corrección del factor

de potencia utilizados en el sistema de distribución, afectan a la calidad de la fuente de alimentación.

Ejemplo: una carga de iluminación que consume 100 kVA, se incrementa aproximadamente a 133 kVA debido al 33% que carga la corriente armónica adicional. La corriente armónica causará más calentamiento al transformador debido a pérdidas por corrientes parásitas en el núcleo y a la mayor resistencia del cable causada por el efecto de la piel. Entonces, esta situación anómala puede resultar en el fallo prematuro de los componentes y la posibilidad de fuego.

8.2.2 Caso 2: Espectro magnético del circuito Industrial

Las fábricas ofrecen mayores cargas no lineales como el puente de onda completa de 3 fases. Se crean corrientes armónicas con una frecuencia 5 y 7 veces 60 Hz. La amplitud de los armónicos será de aproximadamente 1/5 y 1/7 de la amplitud de la corriente fundamental en el caso de que fueran característicos.

En la Figura 8.2, una señal fundamental de 60 Hz contendría una corriente de 200 amperios; otra señal contendría una corriente de 300 Hz con una amplitud de 1/5 veces de 40 amperios.

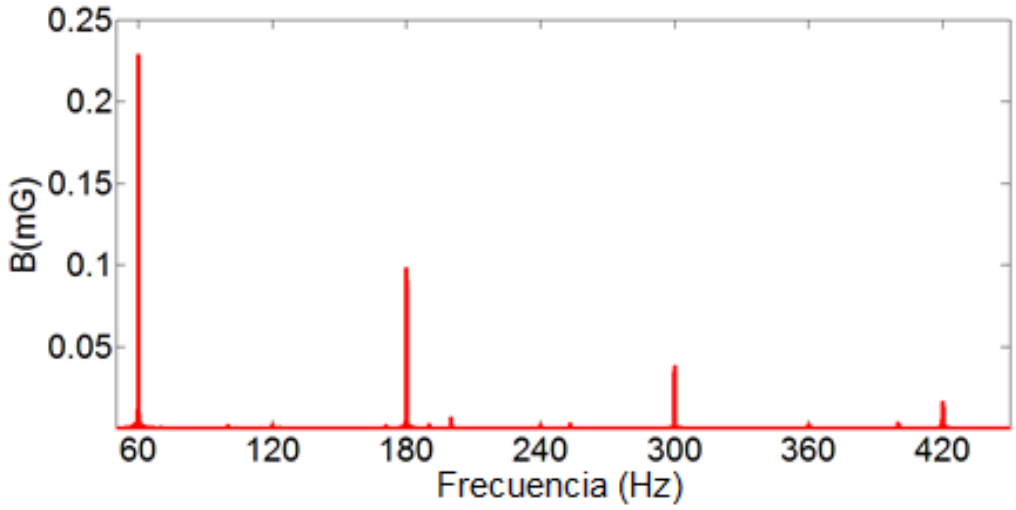


Figura 8.2: Espectro magnético de la red Industrial.

Ejemplos típicos de cargas no lineales incluyen rectificadores (fuentes de alimentación, unidades de UPS, iluminación), unidades de velocidad ajustable de motores, dispositivos ferromagnéticos, unidades de motor de CC y el equipo de arco.

Tabla 8.1: THD de señales electromagnéticas en la ciudad de Manizales

ESPECTRO	**%THD**
Campo eléctrico: Red de viviendas y establecimientos comerciales	2.21
Campo Eléctrico: Red Industrial	0.07
Campo Magnético: Red de establecimientos comerciales y viviendas	8.01
Campo magnético: Red Industrial	21.63

La Tabla 8.1 muestra la distorsión (THD) en porcentaje de los armónicos de las ondas eléctricas y magnéticas medido y de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\%THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2} E_h^2}}{E_L} \tag{8.1}$$

$$\%THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2} B_h^2}}{B_L} \tag{8.2}$$

8.2.3 Caso 3: Comparación de la entropía electromagnética entre circuitos Industriales y Viviendas / comerciales

La Entropía multi-escala de las ondas magnéticas radiadas es un indicador de la complejidad. La mayor entropía de la red industrial está relacionada con mayores cargas no lineales y sus fenómenos termodinámicos asociados. Un sistema de distribución

conectado a un equipo no lineal puede causar recalentamiento de los transformadores viejos, lo que aumenta la entropía.

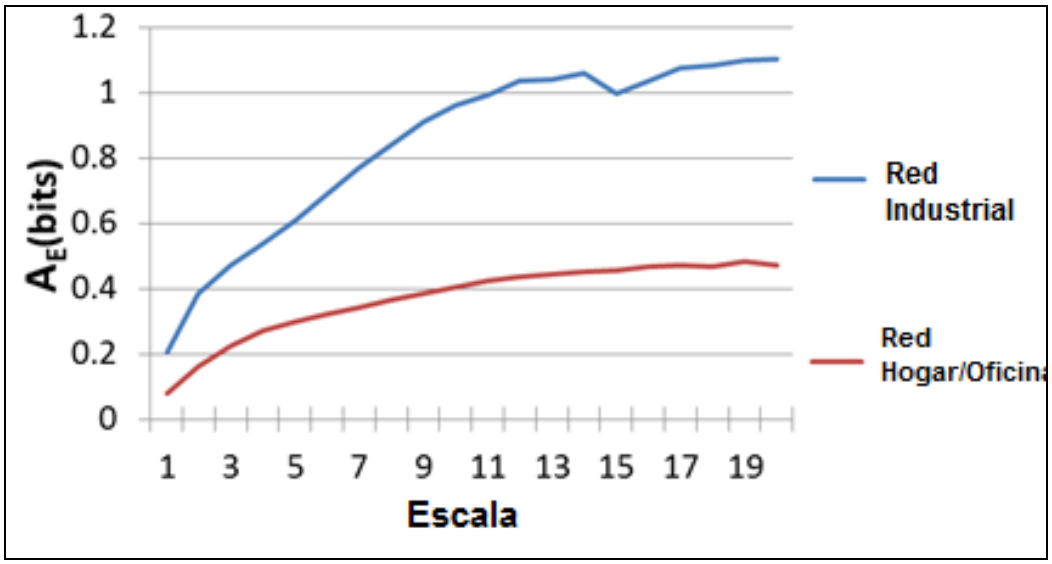


Figura 8.3: Comparación de la entropía de las ondas magnéticas radiadas entre ambas redes: Industrial y el hogar / oficina.

Se estima que el 90% de las fábricas industriales son controlados por algún tipo de fuente de alimentación de modo de conmutación (SMPS). Eso significa que el 50% de toda la energía utilizada puede tener corrientes armónicas que sobrecargan los transformadores, condensadores y otros componentes del sistema de distribución. Los motores representan el 40% de toda la energía eléctrica consumida. Más del 80% de toda la energía utilizada para el control de motores pueden tener corrientes armónicas que cargan excesivamente a los transformadores, condensadores y otros componentes del sistema de distribución. Estas condiciones podrían tener resultados de sobrecalentamiento de los componentes de los sistemas, lo que aumenta la entropía de los equipos de calefacción, mal funcionamiento de los equipos, interferencia de las comunicaciones, mal funcionamiento de interruptores y fusible, problemas de proceso y calentamiento de los conductores eléctricos.

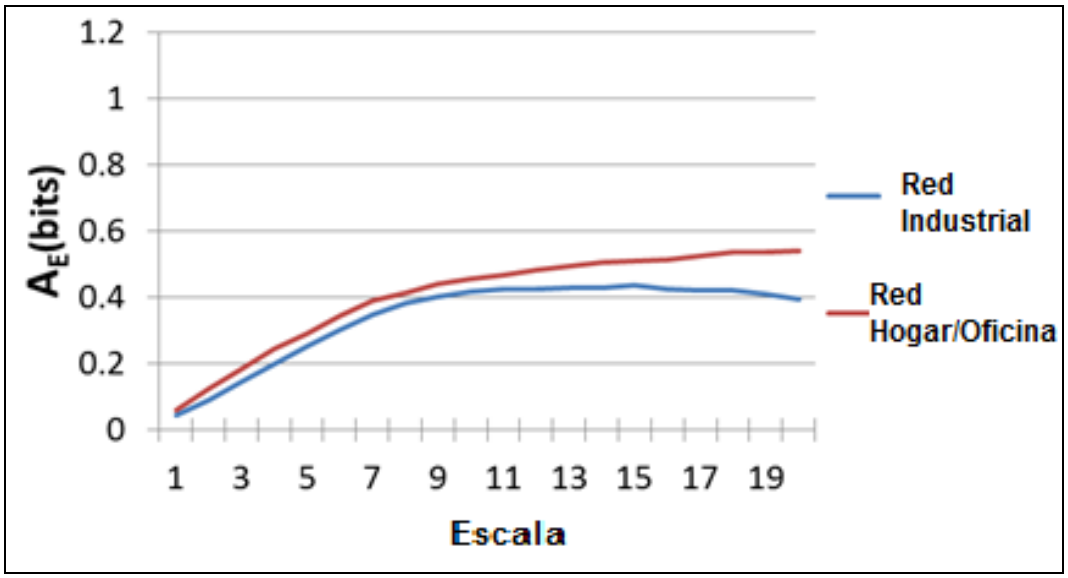


Figura 8.4: Comparación de las entropías de escala múltiple de ambas redes de las ondas eléctricas, tal como se detecta con el sensor inalámbrico debajo de la torre de transmisión de alta tensión.

La Figura 8.4 compara ambas redes mostrando menor entropía para la red industrial. Esto se explica porque las fábricas han dispuesto la instalación de filtros para eliminar los armónicos de tensión. Las soluciones propuestas para la mitigación de armónicos son relativas a manejadores de velocidad variable. Este tipo de aparatos eléctricos representa alto porcentaje de la potencia instalada en las instalaciones industriales y son la fuente de corriente armónica más significativa. La entropía mutua mide la información mutua que comparten los campos electromagnéticos entre sí.

La Tabla 8.2 muestra el M (E, B) (entropía electromagnética mutua) para ambas redes:

Tabla 8.2: Valores de entropía mutua de campos electromagnéticos en la ciudad de Manizales.

RED	**M(B,E)**
Industrial	0.001791
Vivienda / establecimiento comercial	0.000162

La entropía Mutua puede analizar un fenómeno tal como la interdependencia de las ondas electromagnéticas. Este tipo de correlación puede indicar una relación predictiva

que puede ser tomada en la práctica. Esta medida predice tendencias en función de los valores reales.

Algunos de los beneficios de esta propuesta son:

- Creación de planes y estrategias para mitigar los armónicos con el fin de disminuir daños en el equipo.

- Análisis de armónicos y mejora del factor de potencia, mediante el ajuste de filtros activos y pasivos. Mejorar rendimiento de los equipos de operación. Evaluar la sensibilidad de las redes eléctricas y electrónicas a las perturbaciones. Dar servicio a empresas del sector en la evaluación de la calidad de la energía.

- Detectar, resolver y prevenir problemas en los sistemas de energía de los clientes. Supervisar con el fin de obtener información sobre las perturbaciones, atendiendo y explicando quejas de los usuarios. Proteger la reputación de calidad de la energía.

8.3 Conclusiones del capítulo

La entropía de múltiple escala puede ser una herramienta para medir el THD de circuitos de potencia.

Las medidas hechas debajo de los transformadores de las redes industrial y doméstica de Manizales, muestran mayor entropía mutua para el circuito industrial lo que está relacionado con mayor contenido de armónicos.

CAPÍTULO 9

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Caracterización adicional de los precursores electromagnéticos de terremotos y erupciones volcánicas con el fin de clasificación, selección y producción de alertas se propone en este trabajo. Depresión de la distancia Debye y mínimos de entropía mutua de los campos electromagnéticos aparecen ligados a fenómenos sísmicos.

Nuevo procedimiento basado en entropía mutua puede conducir a la evaluación de la energía eléctrica, especialmente en el tema de los armónicos.

Así, dos productos nacen de esta tesis: Identificación de precursores ionosféricos de terremotos y erupciones volcánicas y un procedimiento para medición de armónicos radiados por transformadores y líneas de alta potencia.

9 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

9.1 Precursores ionosféricos de terremotos y erupciones

El análisis conjunto de los parámetros de la atmósfera (gases como radón, aerosoles y el campo eléctrico global vertical), y la ionosfera (parámetros de la esfera de Debye) durante los terremotos y erupciones volcánicas realizado en los capítulos anteriores ha demostrado la presencia de variaciones correlacionadas de anomalías ionosféricas implicando su conexión con el terremoto antes de su ocurrencia. Una de las posibles explicaciones para esta relación es el mecanismo de acoplamiento litosfera-atmósfera-ionosfera, que establece vínculos físicos entre los diferentes actores del fenómeno. Así se forma una cadena de sucesos ligados a la actividad de las fallas geológicas, geoquímica de las variaciones atmosféricas, modulación del campo eléctrico vertical producido especialmente por el gas radón, penetración del campo eléctrico y modulación de los parámetros de la esfera Debye en la ionosfera, especialmente su distancia.

Entonces, de acuerdo con el estado del arte, todo se inicia con la emanación de gas radón ya sea desde las fallas o del volcán. El radón ioniza la atmósfera modulando la resistencia interna del generador de campo eléctrico global. Este proceso culmina con la producción de una sobretensión del campo eléctrico, produciendo una depresión o un ensanchamiento de la distancia de la esfera Debye.

Se registraron señales electromagnéticas anómalas: sobretensiones del campo eléctrico, cambios en los espectros de campo eléctrico y magnético, aumento de la energía de las partículas y modulación de algunos parámetros de la esfera Debye, frecuencia de colisión, densidad, temperatura, frecuencia de corte, distancia de acercamiento, velocidad, ángulo, contenido de electrones y voltaje del plasma. Se tuvo cuidado de no confundir estas variaciones con las producidas por otros fenómenos como las tormentas solares y geomagnéticas. El procedimiento para evitar esto, fue realizar exámenes paralelos en el dominio del espacio. La presencia de una tormenta solar se debería manifestar en la respuesta de la distancia Debye para todas las zonas

del recorrido, pero si la depresión de la distancia Debye ocurre sólo para la zona de la ionosfera situada sobre el área, se pueden descartar interferencias.La tomografía de la ionósfera realizada por el Demeter orbitando a 700 Kms de la Órbita baja de la tierra, registra anomalías en la atmósfera y la ionosfera que se producen constantemente en las regiones de máxima tensión cerca del epicentro de los eventos sísmicos estudiados. Estos resultados no parecen ser de meteorología o relacionados con la actividad magnética, debido a su larga duración en las regiones con activación sísmica. Los resultados sugieren la existencia de una respuesta de la esfera Debye provocada por los procesos de acoplamiento entre litosfera, atmósfera e ionosfera.

De acuerdo con los datos obtenidos y las gráficas resultantes; parece que existe una fuerte conexión entre los eventos sísmicos y la variabilidad electromagnética de la ionosfera. Además, algunos parámetros como la distancia de Debye podrían ser utilizados como precursores de terremoto. Terremotos como los de Wenchuan, Samoa, se han estudiado en busca de perturbaciones de la ionosfera en función de diferentes parámetros del plasma. Estas perturbaciones fueron registradas por los instrumentos de satélite DEMETER: ICE, ISMC, IDP ISL e IAP.

9.2 Hallazgos interesantes

El campo eléctrico ULF registrado por el satélite muestra perturbaciones sobre las zonas del epicentro con amplitudes de aproximadamente 3 - 50mV/m, antes de los eventos estudiados, lo cual es consistente con la predicción contenida en la ecuación (2.76). La amplitud de las anomalías de tierra de campo eléctrico presenta valores aproximadamente desde 3mV/km a 1000V/km. Variaciones anómalas de la distancia Debye en forma de ensanchamientos y depresiones, se observan en todos los casos de terremotos en un período que se extiende entre 0 y 9 días. Emisión de ondas electromagnéticas ELF presísmicas se ven varios días antes del terremoto.

Por lo tanto, los datos de plasma transmitidos por el DEMETER han mostrado un apoyo único a fin de explicar la mayor parte de las variaciones atmosféricas observadas antes de los terremotos.

9.3 Revisión del cumplimiento de objetivos e hipótesis

9.3.1 En relación con las hipótesis

a) "La distancia Debye se perfila como un nuevo posible indicador de erupciones y terremotos".

La Figura 9.1, muestra una propuesta para la conexión entre la actividad sísmica con el campo eléctrico atmosférico vertical a través de la emanación de gas radón, el cual ioniza la atmósfera facilitando su penetración en la ionosfera. Así, el campo eléctrico modula en amplitud el radio de la esfera Debye. A través de este camino, la electrodinámica de la esfera Debye copia a la actividad sísmica operando como transductor.

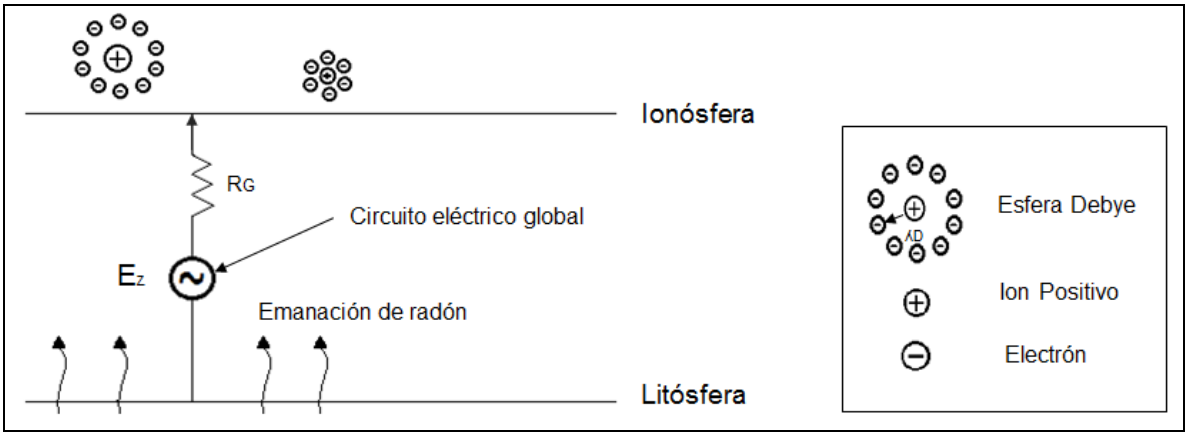


Figura 9.1: Zhou et al. Geochemical Transactions, 2010.

Los resultados de la tesis abren la puerta para la creación de un nuevo indicador para seleccionar precursores de erupciones y terremotos.

b) "Es viable evaluar mediante el análisis de la entropía de las ondas electromagnéticas radiadas por el circuito de alta potencia, los siguientes componentes:

- Envejecimiento de transformadores
- Porcentaje de armónicos THD.
- Sobrecarga de transformadores.
- Comparación entre la edad de varios transformadores en función de la entropía del campo magnético radiado:

Método:
Se tomaron 3 transformadores de la misma cochada, igual referencia y dos de ellos se sometieron a envejecimiento mediante calentamiento en un horno. Posteriormente se les midió la entropía MSE en forma separada.

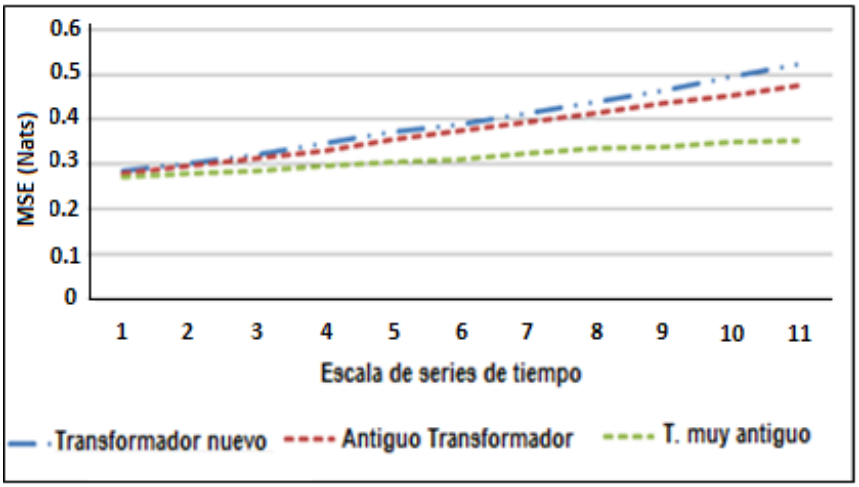


Figura 9.2: Comparación entre varios transformadores. El transformador más viejo presenta el menor valor de entropía.

En el gráfico anterior, se observa que el transformador más viejo presenta el menor valor de entropía informática.

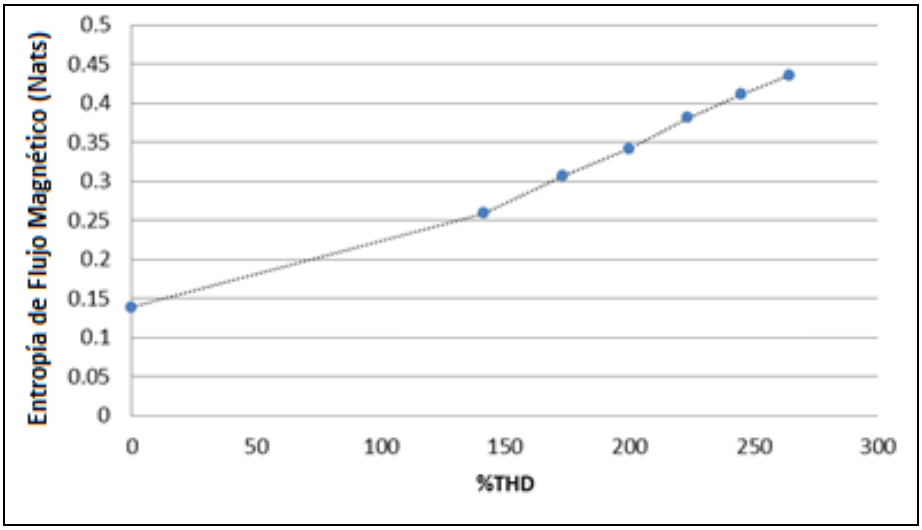


Figura 9.3: Posibilidad de obtener el índice de THD armónico mediante la medición de las ondas de entropía magnética radiada.

$$THD = \frac{1}{0.0044} \ln\left(\frac{ApEn}{0.1402}\right)$$

La Figura 9.4, muestra el esquema de la instrumentación empleado para evaluar la calidad de la energía eléctrica.

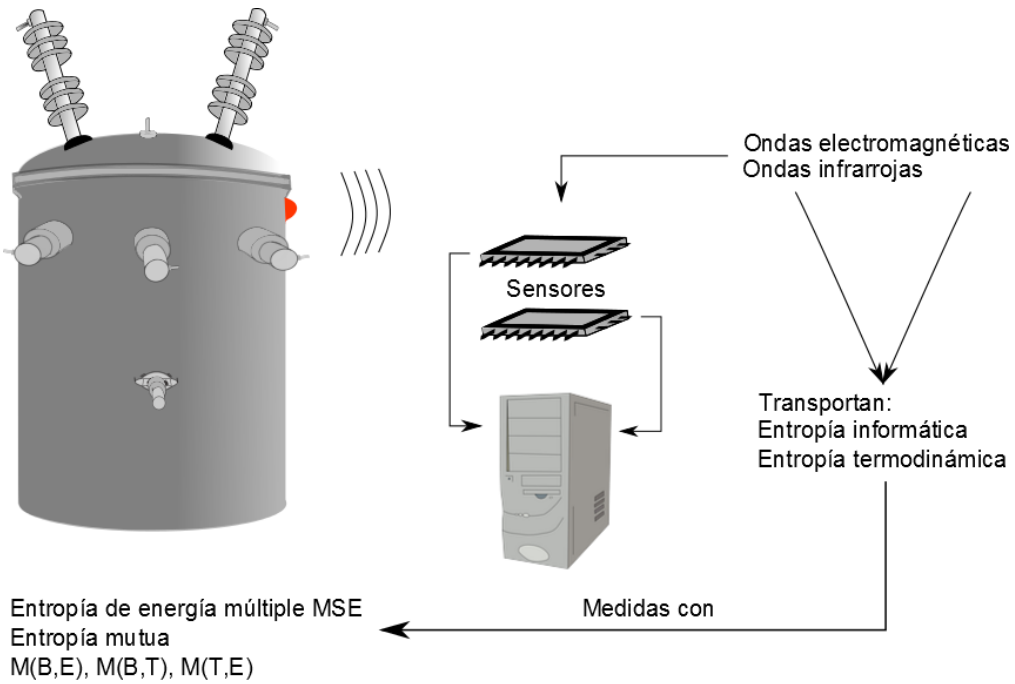


Figura 9.4: Instrumentación inalámbrica de un trasformador de potencia

9.3.2 En relación con los objetivos

a) "Desarrollar un modelo matemático que explique la interacción entre campo eléctrico atmosférico vertical y la esfera Debye. Crear ecuaciones que permitan predecir teóricamente la distancia Debye; esto, en el contexto de la caracterización de los precursores ionosféricos de terremotos y erupciones volcánicas".

Las ecuaciones creadas para clasificación automática de precursores son las siguientes: 2.29, 2.41, 2.77, 2.78, 2.79, 3.6, 5.63.

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{(6.91)^2 T_e e \dfrac{e\left[\int_0^\infty A(\omega)\sin\omega t d\omega + \int_0^\infty B(\omega)\cos\omega t d\omega\right]}{m_-}\bar{\tau}}{E_0 n e^2 \left(\dfrac{1}{m_- f_e}\right)}} \tag{2.29}$$

$$\sigma(t)=\begin{pmatrix} ne^2\dfrac{f_e}{m_-\left(\omega_e^2+f_e^2\right)}\left[\int_0^\infty A(\omega)\sin\omega t d\omega+\int_0^\infty B(\omega)\cos\omega t d\omega\right] & -ne^2\left(\dfrac{\omega_e}{m_+\left(f_e^2+\omega_e^2\right)}-\dfrac{\omega_i}{m_+\left(f_i^2+\omega_i^2\right)}\right) & 0 \\ ne^2\left(\dfrac{\omega_e}{m_+\left(f_e^2+\omega_e^2\right)}-\dfrac{\omega_i}{m_+\left(f_i^2+\omega_i^2\right)}\right) & ne^2\dfrac{f_e}{m_-\left(\omega_e^2+f_e^2\right)}\left[\int_0^\infty A(\omega)\sin\omega t d\omega+\int_0^\infty B(\omega)\cos\omega t d\omega\right] & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_0 \end{pmatrix} \tag{2.41}$$

$$\mathrm{J}(t)=\left(K\frac{T_e ev}{E_0\lambda_D{}^2}\right)\left[\int_0^\infty A(\omega)\sin\omega t d\omega+\int_0^\infty B(\omega)\cos\omega t d\omega\right] \tag{2.77}$$

$$E_z(r)=-K_3\left(0.25A\frac{r}{\lambda^2{}_{D_e}}-1\right) \tag{2.78}$$

$$\tan\alpha_e=\frac{KT_e ev}{E_0\lambda_D{}^2 A} \tag{2.79}$$

$$Y_0(t)=\frac{2}{\pi}\left[J_0(t)\left(\ln\frac{t}{2}+\gamma\right)+\sum_{m=1}^{\infty}\frac{(-1)^{m-1}h_m}{2^{2m}(m)^2}\right] \tag{3.6}$$

$$S=k_B\left(\frac{\hbar\omega}{2}\coth\frac{\hbar\omega\beta}{2}-\frac{\beta\hbar\omega}{2}-\ln\left(1-e^{-\beta\hbar\omega}\right)\right) \tag{5.63}$$

Desde arriba hacia abajo, las variables que se pueden derivar de los datos básicos que captura el Demeter son las siguientes:

- Densidad de corriente en la esfera Debye : J(t).
- Campo eléctrico de penetración: Ez.
- Angulo de electrones.
- Distancia Debye.
- Conductividad.
- Entropía termodinámica.
- Función de Neumann.

Los datos adicionales constituyen una base de datos útil en el entendimiento de la electrodinámica de la ionosfera.

b) "Determinar un modelo instrumental para medición no invasiva del contenido de armónicos de una onda eléctrica en función de su entropía, en el contexto de la evaluación de la calidad de la potencia eléctrica".

El modelo instrumental funcionó exitosamente y las medidas obtenidas fueron útiles.

c) "Proponer un nuevo método para medir el envejecimiento de los transformadores eléctricos en función de sus entropías".

d) La Figura 9.2 ilustra esta aplicación.

En cuanto a la calidad de la energía eléctrica, se puede concluir que:

- El aumento de entropía significa espectro más amplio (debido a los armónicos).
- Los resultados muestran un MSE mayor para la red industrial en comparación con la red residencial.
- La entropía de la señal magnética radiada por el transformador es un candidato potencial como una herramienta no invasiva. Es una medida indirecta de la calidad de la energía en los sistemas eléctricos.

9.4 Aplicaciones sobre calidad de la energía

En este trabajo se presentan nuevos métodos y propuestas para medir los campos electromagnéticos radiados por transformadores de potencia para evaluar la calidad de la energía suministrada por el sistema de distribución. Estas medidas han permitido encontrar relaciones entre los fenómenos electromagnéticos que perturban la forma de onda y la entropía de las ondas electromagnéticas. Las irregularidades, la distorsión, el envejecimiento y la sobrecarga del transformador se detectan por la entropía. Por otra parte de acuerdo con este nuevo estudio, la medición del factor de potencia de los campos electromagnéticos, se muestra en este informe.

El monitoreo del sistema eléctrico es fundamental para garantizar un suministro confiable y de calidad. La medición directa e indirecta en la red puede ser por métodos invasivos y no invasivos. Medición de la tensión y la corriente del sistema eléctrico se realiza a través de la intervención directa con instrumentos invasivos en instalaciones para la detección de fallos incipientes en los elementos de la red (transformadores, generadores, filtros y cargas).

Estos últimos son una solución mejor en la detección de posibles problemas de calidad de seguimiento parcial a través de la energía de las señales emitidas por el sistema. Las señales son leídas por sensores ubicados en las inmediaciones de los elementos que conforman la red (métodos como la emisión infrarroja y acústica). Se ha demostrado en este trabajo que las entropías de las señales magnética y eléctrica, se eleva cuando las ondas sufren deformaciones debido a la generación de armónicos por cargas no lineales.

La Figura 9.5 muestra la relación entre la entropía de la señal radiada de campo magnético y el número de armónicos que se agregan a la fundamental produciendo distorsión de armónicos.

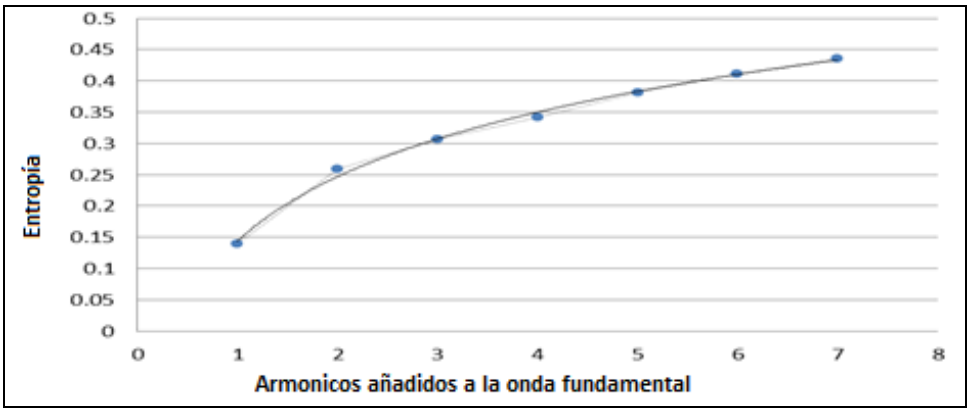


Figura 9.5: Aumento de entropía del campo magnético debido a la generación de armónicos que se agregan a la onda fundamental de 60 Hz.

La Figura 9.5 fue obtenida en la siguiente forma. Se creó matemáticamente y en forma teórica. Mediante computador se fueron agregando ondas adicionales con valores múltiples de la fundamental y con igual magnitud; luego se corrió el programa MSE para obtener los valores de entropía.

El propósito de este ejercicio es disponer de un modelo para conseguir validar ecuaciones creadas de entropía versus THD. Además se puede utilizar para calibrar otras gráficas.

Si se añaden armónicos de distinta magnitud y/o de diferente orden se conseguiría una gráfica distinta.

9.5 Trabajos futuros

- Medición inalámbrica del factor de potencia en circuitos de alta tensión
- Desarrollo y la validación de nuevas estrategias para la evaluación de los diferentes problemas de calidad de energía.
- Investigar el comportamiento no lineal de diferentes cargas del sistema de potencia, estimar la cantidad de EMI emitida por el convertidor de potencia.
- Comparar este método con otros, como los procedimientos termográficos e instrumentos invasores de medición de la calidad de la energía eléctrica.
- Montar una estación terrestre tipo GPS en la Universidad Nacional, Sede Manizales, para registrar la variación del contenido de electrones, TEC sobre la

zona del complejo volcánico Ruiz y Cerro Bravo, y divulgar información a través de Internet. Adicionalmente integrar este instrumento a la red de desastres de Manizales. El objetivo de este trabajo futuro es registrar la historia de la variación TEC de electrones y correlacionarla con la actividad sísmica del complejo volcánico. En esta forma se añade un nuevo indicador de actividad volcánica expresado en la variabilidad de la ionosfera sobre dicha área. De esta forma podría afinarse los procedimientos de predicción de erupción volcánica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1]. https://groups.google.com/forum/#!msg/nuevaliteraturacontemporanea/7H-EsmN3yYo/teOtUgQlADgJ

[2]. http://hypatia.morelos.gob.mx/index2.php?option=com_content&do_pdf=1&id=292

[3]. www.geofisica.unam.mx/.../kotsarenko.pdf

[4]. S. Pulinets, A. Legen'ka, and V. Alekseev, "Pre-earthquake effects and their possible mechanisms," Dusty and Dirty Plasmas, Noise and Chaos in Space and in the Laboratory, pp. 545–557, 1994.

[5]. http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Docs/calidad.pdf

[6]. www.physionet.org/physiotools/mse/tutorial/

[7]. demeter.cnrs-orleans.fr

[8]. en.wikipedia.org/wiki/Debye_length

[9]. L. D. Landau, E. M. Lifshitz (1980) (en inglés). *The Classical Theory of Fields*. Butterworth-Heinemann. ISBN 0-7506-2768-9.

[10]. Goldston & Rutherford (1997). Institute of Physics Publishing, Philadelphia. ed. *Introduction to Plasma Physics*.

[11]. Decrease of the electric *field penetration* into the *ionosphere* due to ...www.ann-geophys.net/28/.../angeo-28-779-2010.pd*f*

[12]. *Demeter Homepage demeter.cnrs-orleans.fr*

[13]. *Conductivity* of the *ionosphere* - Geomagnetism.

geomag.org/.../Maus_ionospheric_conductivity.pdf

[14]. Crawford Frank S, Dr: Waves-Berkeley physics course-mcgraw-hill Company.

[15]. Chapman, S.J. and J. Bartels, "Geomagnetism" , Clarendon Press, 1951.

[16]. Clemmow, P.C. & Dougherty, J.P., Electrodynamics of particles and plasmas. Redwood City CA: Addison-Wesley, 1969.

[17]. w*ww.springer.com/.../9783540208396-c1.pdf* seismo-*ionospheric* coupling .

[18]. *www.redalyc.org/pdf/568/56836106.pdf* de NY Kotsarenko – 1997.

[19]. *onlinelibrary.wiley.com › ... ›* Vol 117 Issue A2 -

de YQ Hao - 2012 - 10/02/2012 - Multi-instrument observation on co-seismic *ionospheric* effects after great Tohoku earthquake. Y. Q. *Hao*1,; Z. Xiao1,2,; D. H. Zhang1,2.

[20]. *www.ss.ncu.edu.tw/~jyliu/paper/2006076.pdf* de VV Hegai – 2006 at *ionospheric* altitudes before earthquakes (see appro- ... of the *ionosphere* above the epicentral zone of an immi- ... *Vershinin* et al., 1999; Hao et al., 2000).

[21]. USGS (26 de octubre de 2009). «Historic Earthquakes Rat Islands, Alaska».

[22]. *www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/12/75/2012/nhess-12-75-2012.xml*

Suppl., Abstract T51B-0453, 2004. 4 Dobrovosky, I. R., Zubkov, S. I., and Myachkin, V. I.: Estimation of the size of earthquake preparation zones, PAGEOPH, 117.

[23]. *www.iagaitalia.it/media/Perrone.pdf*. Davies and Baker,1965). *Ionospheric* parameters were studied related to the Tashkent earthquake in 1966. (*Antselevich*, 1971; Datchenko et al., 1972).

[24]. Atmospheric electricity affects cloud height - physicsworld.com http://physicsworld.com/cws/article/news/2013/mar/06/atmospheric-electricity-affects-cloud-height.

[25]. P. Varotsos, k. Alexopoulos . Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes. Tecnophysics, 110 (1984) 73-98

[26]. He, Y.; Yang, D.; Zhu, R.; Qian, J.; Parrot, M. Variations of electron density and temperature in ionosphere based on the DEMETER ISL data. Earthquake Science 2010, vol. 23, no. 4, pp. 349–355.

[27]. Chun-Chieh Hsiao; J. Y. Liu K.-I;. Oyama N. L., Yen Y. A,. Liou S., S. Chen J. J. Miau; Seismo-ionospheric precursor of the 2008 Mw7.9 Wenchuan earthquake observed by FORMOSAT-3/COSMIC; GPS Solut (2010) 14:83–89 DOI 10.1007/s10291-009-0129-0

[28]. Pulinets, S.; Legen'ka, A. Spatial-U temporal characteristics of large scale disturbances of electron density observed in the ionospheric F region before strong earthquakes. Cosmic Res. 2003, vol. 41, no. 3, pp. 221–229.

[29]. Real-Time Global Ionospheric Total Electron Content iono.jpl.nasa.gov/latest_rti_global.html

[30]. Scholz, C.; Sykes, L.; Aggarwal, Y. Earthquake prediction: A physical basis. Science 1973, vol. 181, pp. 803–809.

[31]. Davies, J.; Archambeau, C. Modeling of atmospheric and ionospheric disturbances from shallow seismic sources. Physics of the Earth and Planetary Interiors 1998, vol. 105, pp. 183–199.

[32]. Pulinets, S.; Boyarchuk, K.; Khegai, V.; Kim, V.; Lomonosov, A. Quasielectrostatic model of atmosphere-thermosphere-ionosphere coupling. Adv. Space Res. 2000, vol. 26, no. 8, pp. 1209–1218.

[33]. On the validity of *entropy* production principles for linear *electrical ...itf.fys.kuleuven.be/~christ/pub/Elecmepjspfinal.pdf*

[34]. Salama Abdelhady. A fundamental equation of thermodynamics that embraces electrical and magnetic potentials. Journal of Electromagnetic Analysis & Applications, 2(3):162–168, 2010

[35]. "Herschel' y 'Planck' inician su viaje por el espacio" El País. Consultado el 30 de mayo de 2011.

[36]. Madalena Costa, Ary L Goldberger, and C-K Peng. Multiscale entropy analysis of biological signals. Physical Review E - Statistical, Nonlinear and Soft Matter Physics, 71(2 Pt 1):021906, 2005.

[37]. Claude E. Shannon. A mathematical theory of communication. Bell System Technical Journal, 27:379–423, 1948.

[38]. Steven M Pincus. Approximate entropy as a measure of system complexity. Proceedings of the National Academy of Sciences, 88(6):2297–2301, 1991.

[39]. Peter Grassberger and Itamar Procaccia. Estimation of the Kolmogorov entropy from a chaotic signal. Physical review A, 28(4):2591–2593, 1983.

[40]. Joshua S Richman and J Randall Moorman. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy. American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology, 278(6):H2039– H2049, 2000.Frank Bucholtz Joseph V. Michalowicz, Jonathan M. Nichols. Calculation of entropy and mutual information for sinusoids. 2009.

[41]. Clausius, R. (1850). «Über die bewegende Kraft der Wärme». Annalen der Physik 79: pp. 368–397, 500–524 Part I, Part II. [Traducción en inglés: «On the Moving Force of Heat, and the Laws regarding the Nature of Heat itself which are deducible therefrom». Phil. Mag. (1851), 2: 1–21, 102–119].

[42]. Wien, Wilhelm (1898). "Wikisource: Ueber die Fragen, welche die translatorische Bewegung des Lichtäthers betreffen". Annalen der Physik 301 (3): I–XVIII.

[43]. Max Planck (1914). The Theory of Heat Radiation (La teoría de la radiación por calor), P. Blakiston Son & Co. Dover (1959) y (1991). ISBN 0-486-66811-8.

[44]. http://es.wikipedia.org/wiki/Oscilador_arm%C3%B3nico_cu%C3%A1ntico

[45]. Fan, H.; Xu, X.; Hu, L. Entropy-variation with resistance in a quantized RLC circuit derived by the generalized Hellmann–Feynman theorem. Chin. Phys. 2010, vol. 19, no. 6 Shannon, C. A Mathematical Theory of Communication. Bell System Technical Journal, 1948, vol. 27.

[46]. Pauli, W. (1933). Handbuch der Physik. Berlin: Springer. p. 162.

[47]. Saradjian, M.R. And Akhoondzadeh, M., Prediction of the date, magnitude and affected area of impending strong earthquakes using integration of multi precursors earthquake parameters. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11, 1109–1119, 2011.

[48]. He, Y., Yang, D., Qian, J., And Parrot, M., Response of the ionospheric electron density to different types of seismic events. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11, 2173-2180, doi: 10.5194/nhess-11-2173-2011, 2011.

[49]. Blecki, J., Parrot, M. And Wronowski, R., Plasma turbulence in the ionosphere prior to earthquakes, Some remarks on the DEMETER registrations. Journal of Asian Earth Sciences, 41 (4-5), 450-458, doi: 10.1016/j.jseaes.2010.05.016, 2011.

[50]. www.ingeominas.gov.co/.../Volcan-Cerro-Machin/Generalidades.asp...Instituto Colombiano de Geología y Minería Ingeominas: Cerro Machín (Departamento Del Tolima, Colombia).

[51]. Chicangana, G., The romeral fault system: A shear and deformed extinct subduction zone between oceanic and continental lithospheres in northwestern South America. Earth Sci. Res. J. Vol 9, No. 1, 51 -66, 2005.

[52]. Instituto Colombiano De Geología Y Minería Ingeominas, Cerro Machin (Departamento del Tolima, Colombia) www.slideshare.net/.

[53]. Polyanin, A.D., Handbook of Linear Partial Differential Equations for Engineers and Scientists, Chapman & Hall/CRC Press, Boca Raton, ISBN 1-58488-299-9, 2002.

[54]. Fitzpatric, R., Plasma Physics: University of Texas at Austin: farside.ph.utexas.edu/teaching/plasma/380.pdf.

[55]. Xuemin Zhang, ULF electric field anomalies by DEMETER satellite and comparison with ground-based observation around Wenchuan M8.0 earthquake.P

[56]. H. Estrada, E.A. Cano-Plata, C. Younes-Velosa, and C.L. Cortes. Entropy and coefficient of variation (cv) as tools for assessing power quality. Ingenieria e Investigacion, 31(2 SUPPL.):45–50, 2011.

[57]. Ali, M., Eley, C. D.; Emsley, A. M.; Heywood, R. J.; Xaio. Measuring and understanding the ageing of kraft insulating paper in power transformers. Electrical Insulation Magazine, IEEE May-June 1996 Author(s):, X.Volume: 12 , Issue: 3 Page(s): 28 - 34.

[58]. Seljeseth, Helge. Harmonics and Quality of Power Proceedings. Conference Publications. 820 - 824 vol.2. 14-18 Oct 1998.

[59]. J-P Eckmann and David Ruelle. Ergodic theory of chaos and strange attractors. Reviews of modern physics, 57(3):617, 1985.

[60]. T.M. Cover and J.A. Thomas. Elements of Information Theory. Wiley, 2006.

[61]. Wildi, T. Electrical Machines, Drives and Power Systems. Prentice Hall, 2002.

[62]. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power systems. IEEE Std 519-1992.

[63]. Richtmyer, Robert D. (1978): Principles of advanced mathematical physics, Springer-Verlag, New York, ISBN 0-387-08873-3.

[64]. Fundamentals of Plasma Physics - J. A. Bittencourt - Google Books :books.google.com › Science › Physics ›.

[65]. Millman Jacob; Vacuum tube and semiconductor electronics; Mc Graw Hill; 1958.

[66]. Scientific Workplace: software.

APÉNDICE A

A.1 EXPERIMENTOS DE COMPARACIÓN EN LABORATORIO DEL MÉTODO TRADICIONAL Y EL MÉTODO PROPUESTO

A.1.1Comparación entre métodos

Experimentos para comparar métodos de adquisición y procesamiento de señales para medición de distorsión armónica y factor de potencia fueron realizados con el fin de validar un método alternativo para determinar el THD y factor de potencia en forma no invasiva y con base en la entropía.

A.1.1.1 Método de conducción.

Este método tradicional adquiere las señales de voltaje y corriente mediante la conexión directa e invasiva de instrumentos de medición, voltímetro, amperímetro y fasímetro. Una vez adquiridas las señales, son procesadas mediante programas de computación que realizan los cálculos basados en teoría clásica de circuitos. El resultado se visualiza en un display. Adicionalmente a los instrumentos mencionados se requiere equipo de soporte especializado: camión con escalera, dispositivos de protección, etc.

A.1.1.2 Método de radiación.

La adquisición de las señales se realiza con 2 sensores de campo eléctrico y magnético inalámbricos conectados al procesador de audio de un computador

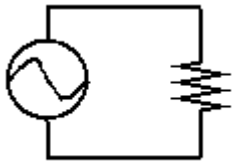
personal. El procesamiento está basado en la teoría de la entropía de múltiple escala. Es suficiente con colocar los sensores debajo de la línea de alta tensión o del transformador elegido sin necesidad de realizar ninguna conexión directa. La información de las señales de voltaje y corriente es transportada por las ondas electromagnéticas y captadas por los sensores inalámbricos ya mencionados.

A.1.2 Circuito resistivo

La entropía térmica e informática de los circuitos eléctricos lineales y no lineales es tema nuevo y en conflicto por opiniones diversas. Todavía no hay consenso en la comunidad de la Ingeniería Eléctrica. Así, la discusión de la generación de entropía por un sencillo circuito se puede prestar a una diversidad de opiniones. Las opiniones oscilan entre dos extremos: los circuitos eléctricos producen mínima entropía o su creación de entropía es máxima.

La Figura A.1 y Figura A.2, ilustran los espectros del circuito R excitado por una onda sinusoidal de 60 hercios. Es posible comparar el espectro de la corriente que fluye por el circuito con el espectro del campo magnético radiado y registrado con una bobina, conectada a un computador personal. Notar que son idénticos, lo cual sugiere la validez del método de instrumentación basado en radiación. Es evidente la no formación de armónicos, confirmando un nulo THD.

Se realizaron una seria de medidas a través de circuitos con rectificación y sin rectificación a través de un puente de diodos con cargas R, RL y RLC. Se empleó una fuente de 55 voltios, un reóstato de 50 ohms, una inductancia de 9mH y un capacitor de 40uF. Los diferentes esquemas circuitales y las pruebas de comparación se muestran a continuación:



R

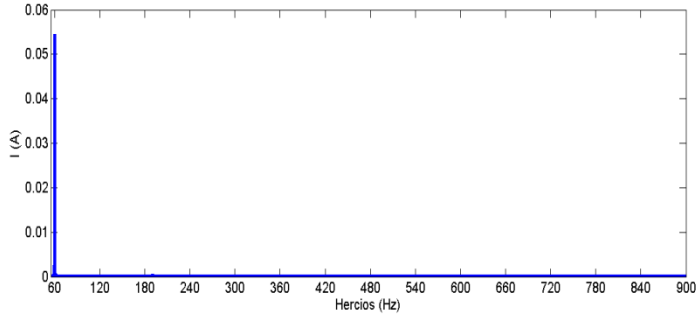


Figura A.1: Espectro de la corriente fluyendo a través de un resistor

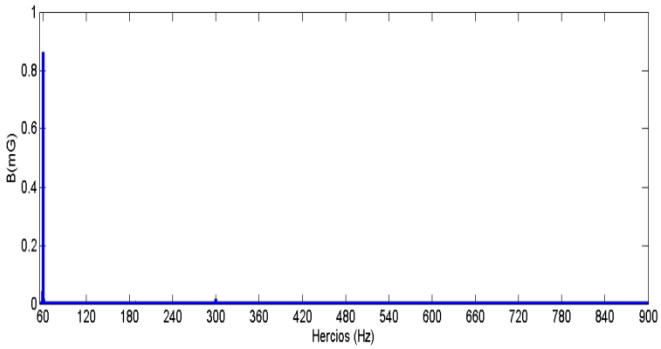
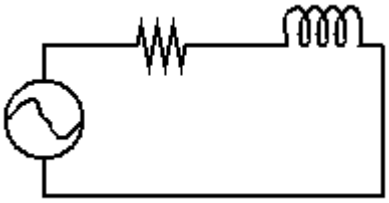


Figura A.2: Espectro de la onda magnética radiada por un circuito R. Contiene la fundamental de 60 hercios.

A.1.3. Circuito RL

El siguiente experimento sobre un circuito RL muestra espectros similares, conteniendo la fundamental de 60 hercios.



RL

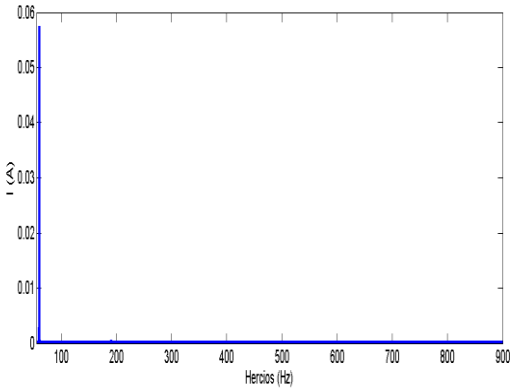


Figura A.3: Circuito RL con su espectro de corriente asociado.

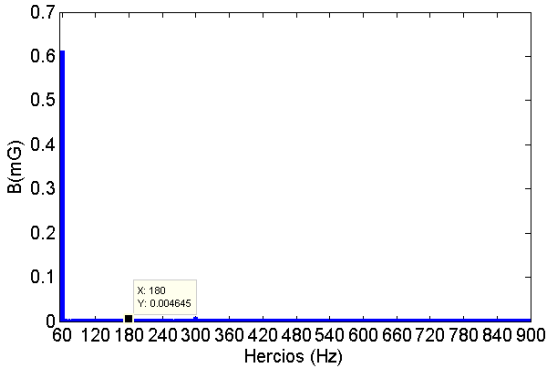


Figura A.4: Espectro del campo magnético radiado por el circuito RL.

A.1.4. Circuito RLC

A continuación se muestran los espectros tomados en un circuito RLC.

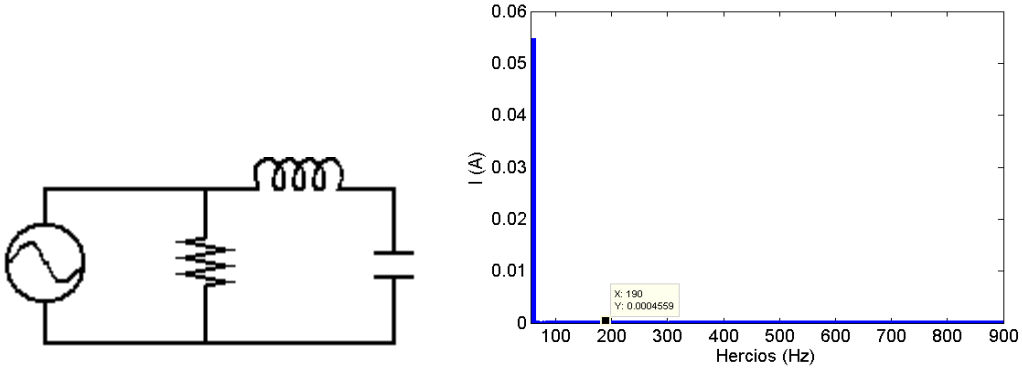


Figura A.5: Circuito RLC con su espectro de corriente correspondiente.

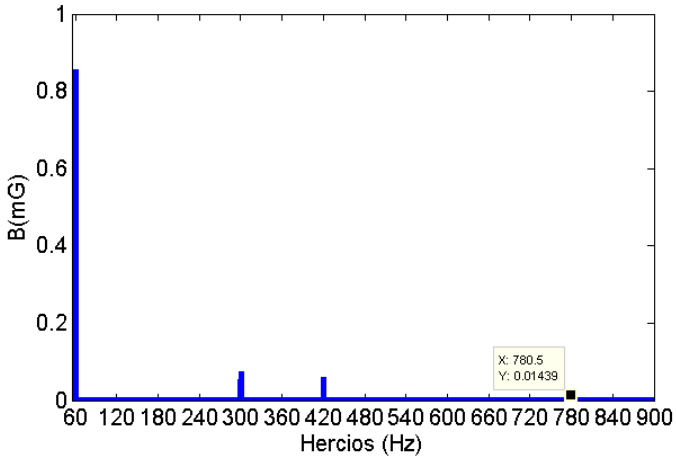


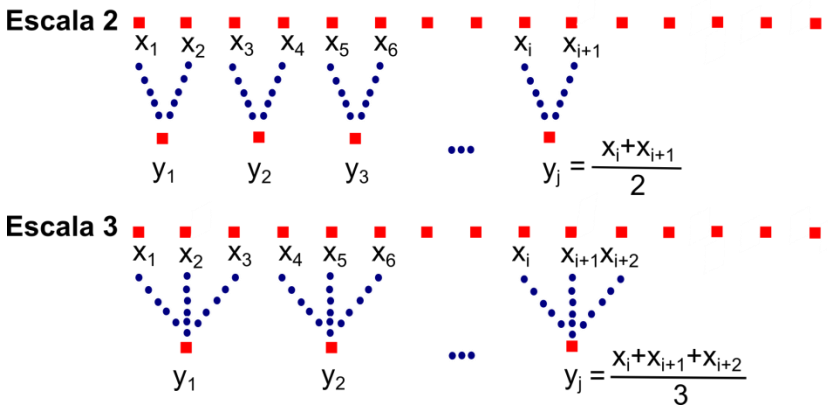
Figura A.6: Espectro de la onda magnética generada por el circuito RLC.

El circuito presenta una frecuencia natural de 3.3 KHZ.

La Figura A.6 muestra el espectro de la señal de onda magnética. Los equipos pueden tener diferente ancho de banda y de ahí la diferencia con la Figura A.5. Esta es una de las razones por las cuales separamos este experimento del cuerpo de la tesis y se deja para perfeccionar en un trabajo futuro.

A.1.5. Entropía de múltiple escala del campo magnético radiado por los circuitos R, RL y RLC excitados por una onda sinusoidal de 60 Hercios.

Madalena Costa et al, desarrollaron el algoritmo de entropía de múltiple escala, el cual consiste en tomar la señal y evaluarla en 20 escalas superiores de tiempo a través de la entropía muestral (SampEn) desarrollada por Richman and Moorman, donde la primera escala es la señal original. La forma de calcular las escalas es la siguiente:



La entropía multiescala es mostrada en la Figura A.7. Es interesante notar como la similitud de los espectros se copia en la curva de entropía, pues las 3 gráficas se superponen. Este hallazgo sugiere la validez del método de adquisición de las ondas magnéticas radiadas en el análisis de los circuitos eléctricos. La saturación de la gráfica de la entropía para escalas mayores de 9 indica el tope de fluctuación en la forma de onda.

Los circuitos elegidos para experimentación, permiten ilustrar claramente la producción de entropía desde un punto de vista informático y térmico. Además proporcionan un campo de pruebas físicas claras y matemáticamente sencillas.

En el presente trabajo se propone cómo el uso de la entropía en circuitos eléctricos produce información física correcta y útil. En las redes experimentadas resaltan expresiones fenomenológicas relacionadas con la producción de entropía como una función de las variables relevantes: potenciales y corrientes y sus productos, ondas electromagnéticas y también de sus derivadas.

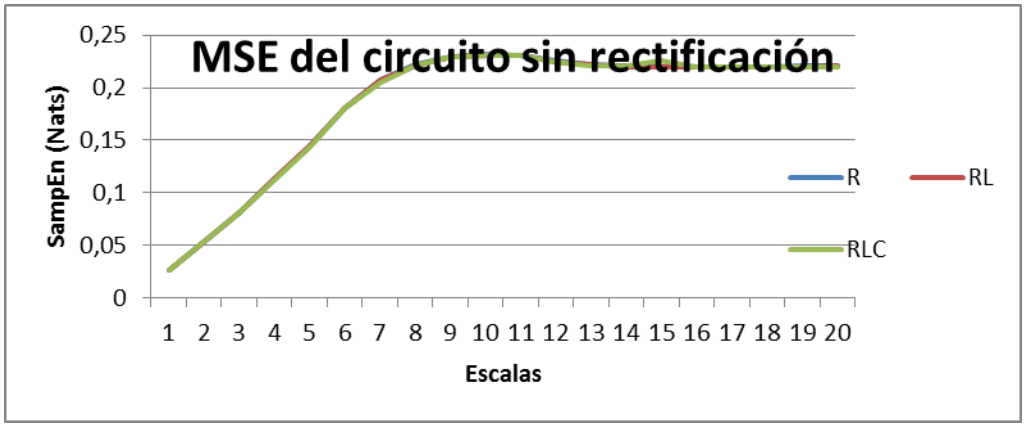


Figura A.7: Entropía de corriente de múltiple escalas para los circuitos R. RL y RLC excitados por una onda de 60 Hercios.

La instrumentación usó el siguiente equipo:

- Osciloscopio marca Fluke-123.
- Multímetro Fluke.
- Computador PC.
- Sensores de campo magnético y de campo eléctrico.
- Software Adobe Audición.
- Software MSE.
- Software Excel.

A.1.5.1. Circuito rectificado R

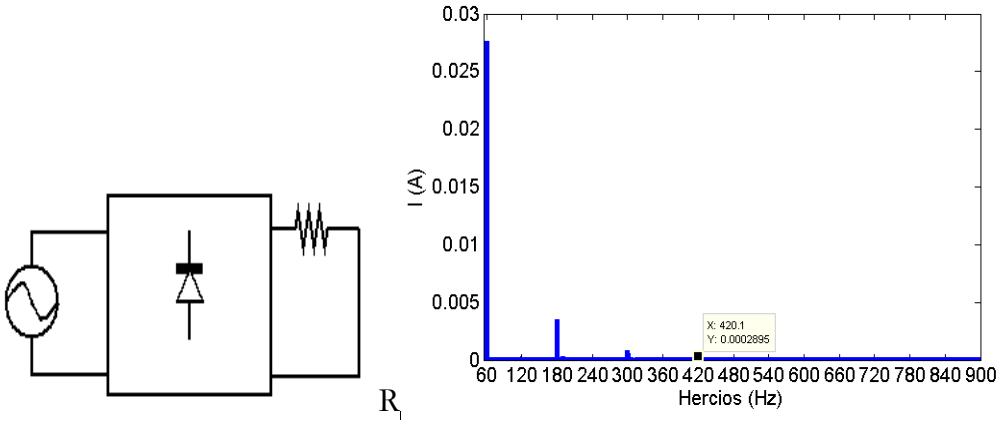


Figura A.8: Circuito R con rectificación de la onda de entrada y su espectro asociado de corriente.

El rectificador es un díodo 1N400. La onda se distorsiona al ser rectificada y siendo el factor de potencia diferente a 1. Según la Figura A.21, su valor es aproximadamente de 0.8.

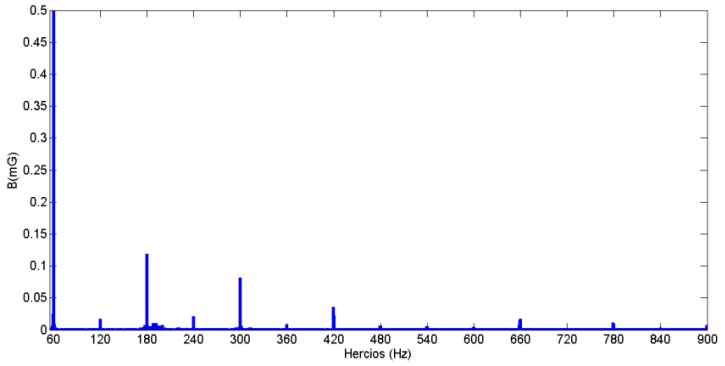


Figura A.9: Circuito R con rectificación de la onda completa y su espectro asociado de campo magnético radiado.

La aparición de armónicos pares puede estar relacionada con la no linealidad de la onda de voltaje empleada y suministrada por el transformador, el cual puede agregar distorsión armónica por su condición de circuito no lineal. Probablemente la histériesis y otros componentes no lineales del flujo magnético son la causa de estos armónicos pares. La diferencia entre las gráficas Figura A.9 y Figura A.8 puede significar diferentes niveles de sensibilidad. Esta es otra razón por la cual este experimento pasó a ser un anexo y no entra en la defensa.

A.1.5.2. Circuito rectificado RL

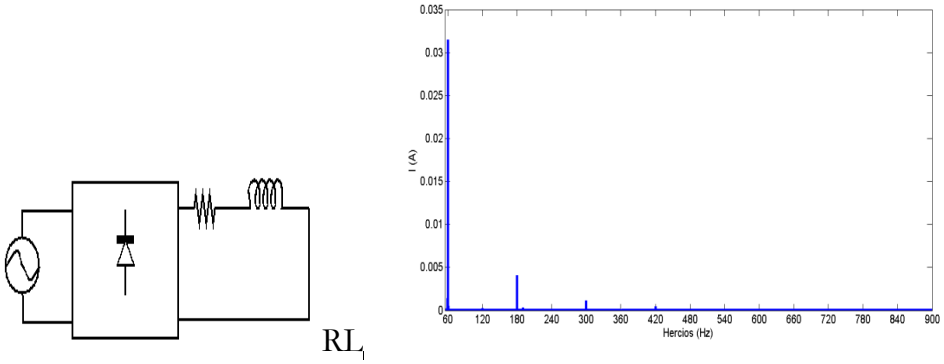


Figura A.10: Circuito RL con rectificación de onda completa y su espectro asociado de corriente.

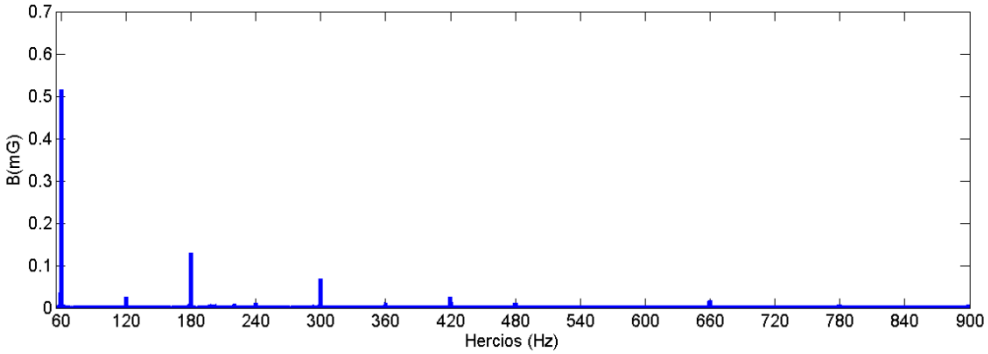


Figura A.11: Circuito RL con rectificación de onda completa y su espectro asociado de campo magnético radiado.

A.1.5.3. Circuito rectificado RLC

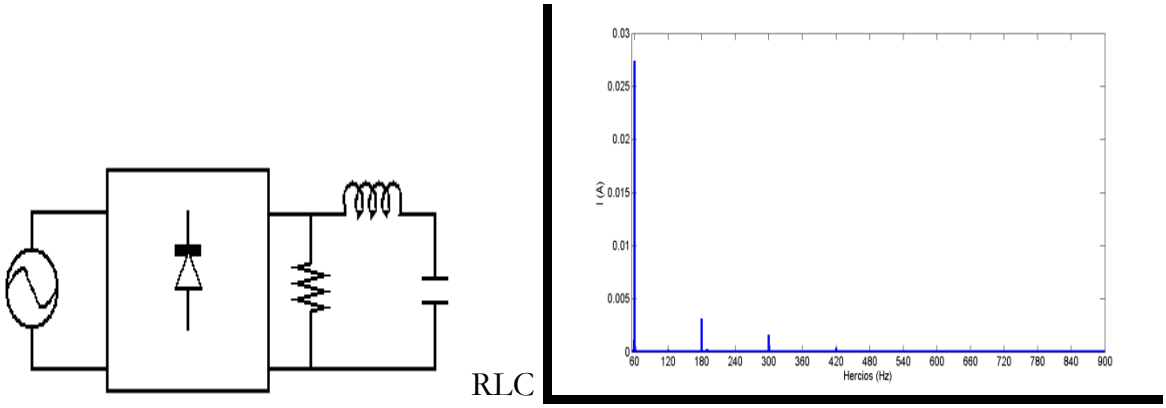


Figura A.12: Circuito RLC con rectificación de onda completa y su espectro asociado de corriente.

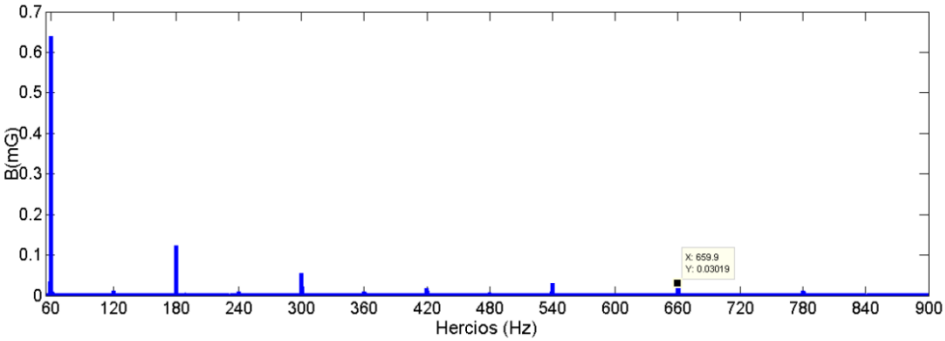


Figura A.13: Circuito RL con rectificación de onda completa y su espectro asociado de campo magnético radiado.

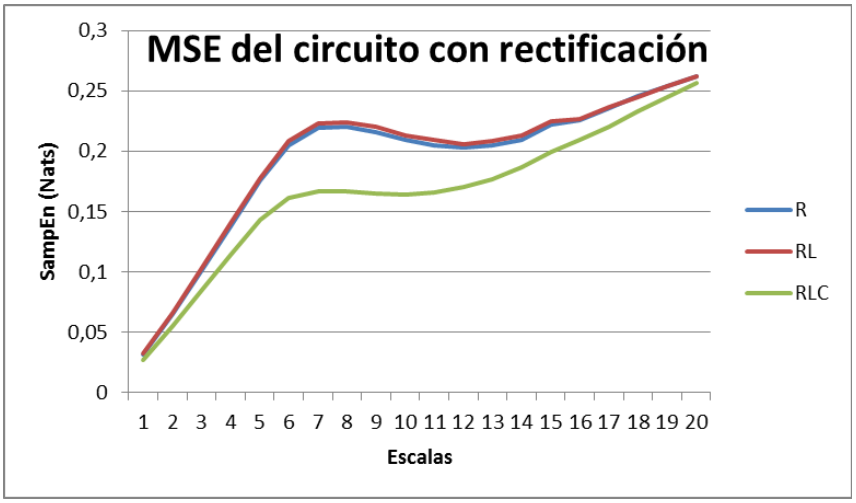


Figura A.14: Entropía del campo magnético radiado de múltiple escala para los circuitos R. RL y RLC excitados por una onda de 60 Hercios.

Un nuevo tratamiento y análisis de los circuitos lineales y no lineales basado en la producción de entropía térmica e informática, por supuesto debe respetar las ecuaciones de Maxwell en un contexto inspirado en la teoría de las probabilidades en complemento con la teoría determinística. La producción de entropía contiene elementos estocásticos: de acuerdo con la teoría de la fluctuación de la disipación; las agitaciones térmicas en un resistor están relacionadas con la teoría de la distribución aleatoria actuando sobre los electrones. El voltaje estocástico generado aumenta la fluctuación del campo magnético generado y por lo tanto incrementa la entropía. Medición y comparación de THD para los circuitos sin rectificación en ambos métodos.

A.1.6. Comparación entre el THD medido sobre los mismos circuitos para ambos métodos

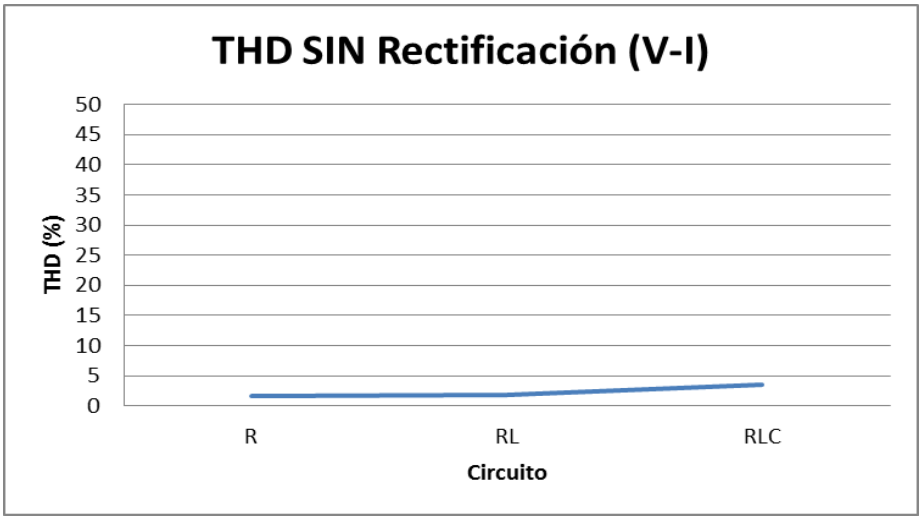


Figura A.15: THD medido con el método de conducción

La Figura A.15 muestra un THD mayor que cero, lo cual puede estar relacionado con la no linealidad del transformador empleado.

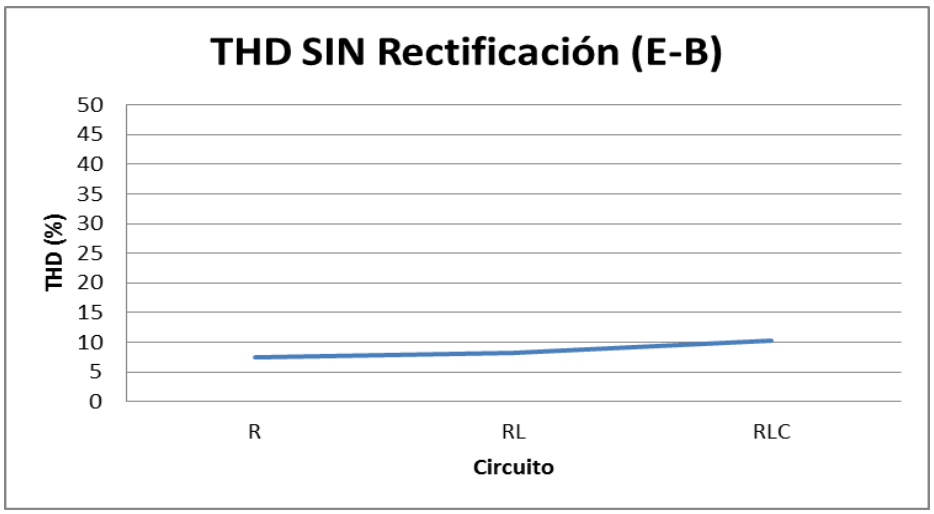


Figura A.16: THD del campo magnético radiado por los tres circuitos

Se repitió el experimento haciendo ajustes en la respuesta de frecuencia del amplificador empleado. De nuevo, la no linealidad del transformador y las condiciones no lineales de los componentes permiten que el circuito RLC produzca mayor distorsión armónica.

A.1.7. THD para ambos métodos en circuitos R, RL y RLC con rectificación

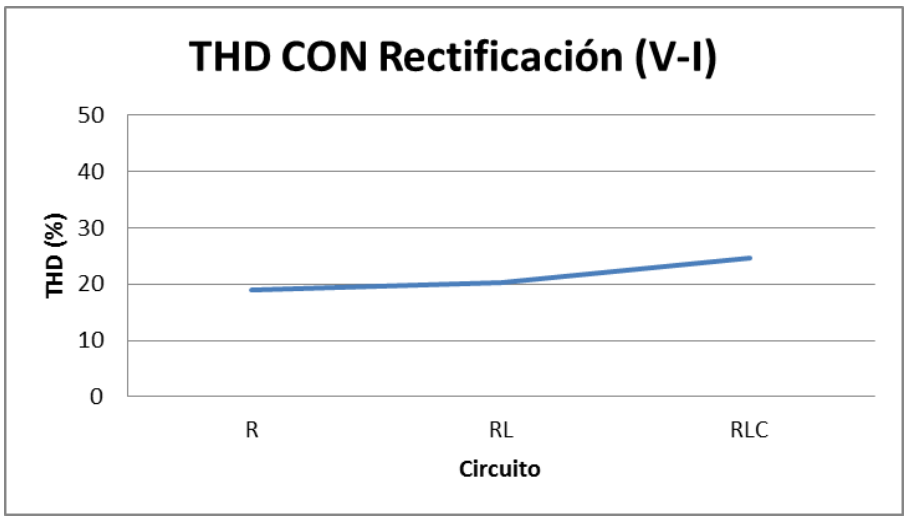


Figura A.17: THD de corriente para los circuitos R, RL, RLC rectificados

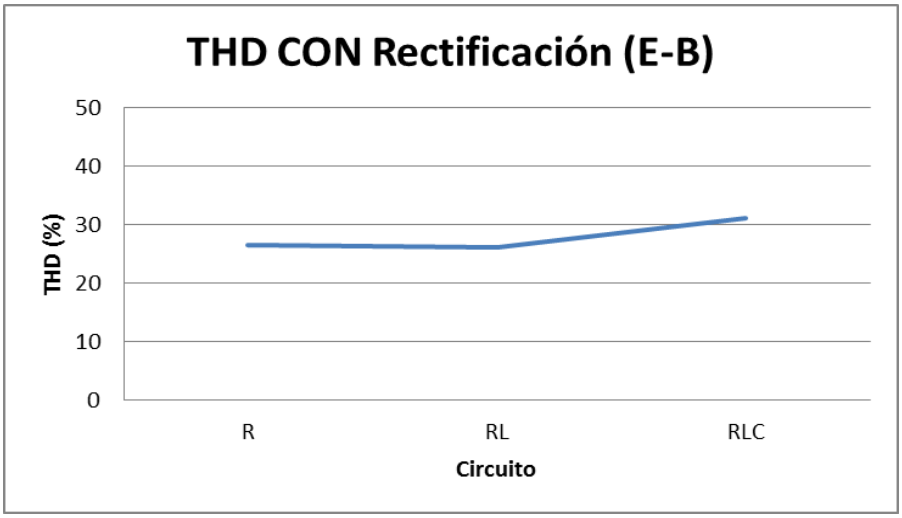


Figura A.18: THD del campo magnético radiado en circuitos R,RL y RLC rectificados.

A.1.8. Comparación entre valores medidos para THD en ambos métodos

Tabla A. 1: Valores medidos de THD en circuitos R, RL y RLC. VI significa voltaje y corriente. EB indica ondas electromagnéticas

	CON RECTIFICACIÒN		**SIN RECTIFICACIÒN**	
	VI	**EB**	**VI**	**EB**
R	0.1899	0.2661	0.0167	0.0773
RL	0.203	0.2609	0.0181	0.1031
RLC	0.2455	0.3122	0.0345	0.0695

A.1.9. Medición del factor de potencia total en los circuitos sin rectificación

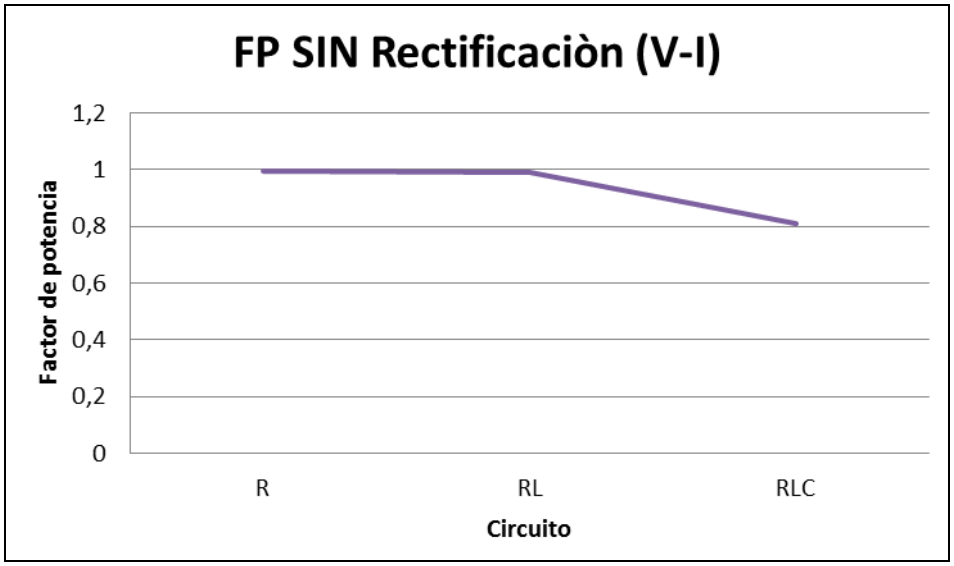


Figura A.19: Medidas del factor de potencia con el método tradicional.

La gráfica Figura A.19 muestra el factor de potencia total medido con distorsión armónica.

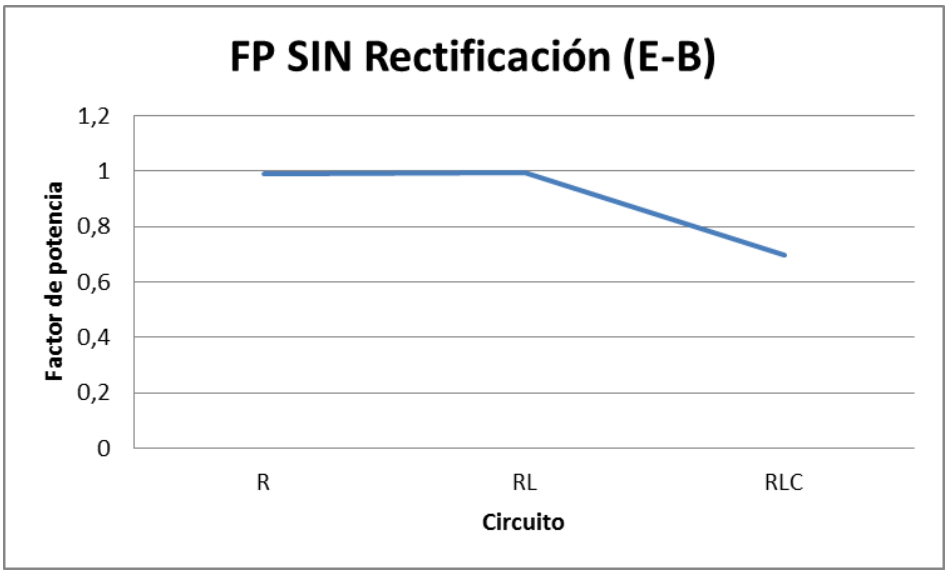


Figura A.20: Medidas del factor de potencia con el método propuesto

A.1.10. Medición del factor de potencia en los circuitos con rectificación

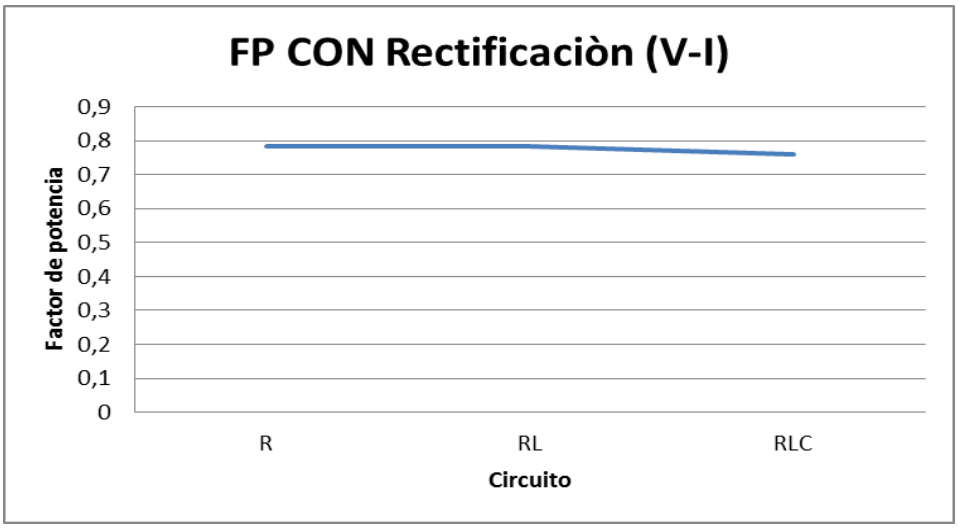


Figura A.21: Factor de potencia en términos del voltaje y corriente medidas en forma directa en los circuitos con el método tradicional

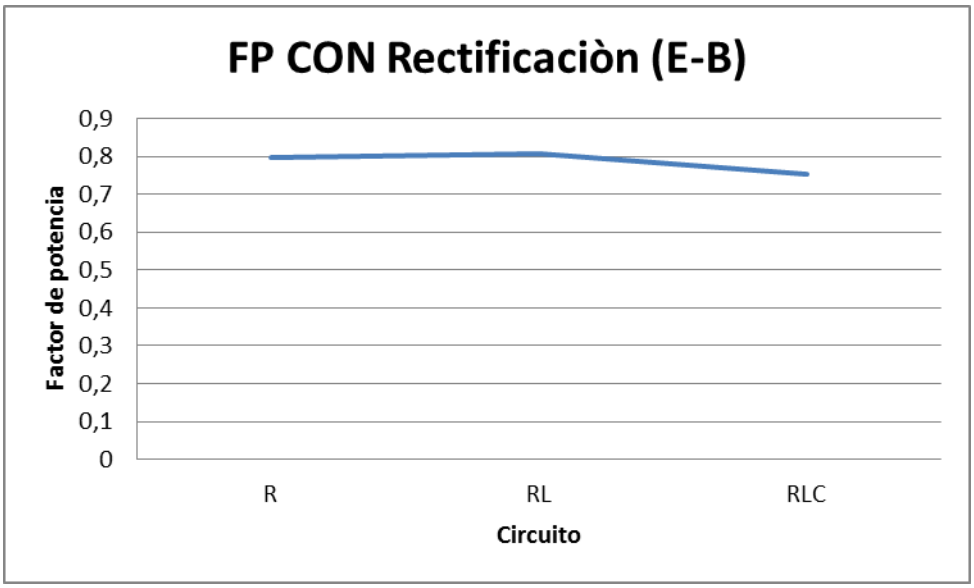


Figura A.22: Medidas del factor de potencia con el método tradicional.

Tabla A. 2: Valores medidos de factor de potencia en circuitos R, RL y RLC. VI significa voltaje y corriente. EB indica ondas electromagnéticas

	FACTOR DE POTENCIA			
	CON RECTIFICACIÒN		**SIN RECTIFICACIÒN**	
	VI	**EB**	**VI**	**EB**
R	0.7838	0.796	0.997	0.9923
RL	0.7842	0.8062	0.9918	0.9949
RLC	0.7587	0.7548	0.8088	0.6956

A.1.11. Procedimiento para realizar los experimentos

A.1.11.1. Circuitos medidos

Se hicieron mediciones en 3 circuitos R, RL y RLC con y sin rectificación, alimentados a una tensión de 55 Voltios RMS y corriente AC, ver Figura A.23. Los componentes utilizados fueron: R= 50ohms, L= de 9mH, C= de 40uF.

A.1.11.2. Equipo utilizado

- Osciloscopio digital Fluke de 2 canales tipo scopometer , multímetro digital Fluke y computador PC portable.
- Sensores: 1 bobina de 8 mh, 1 capacitor de placas paralelas de 32 nF.
- Amplificadores: 2 amplificadores de audio para la adquisición de las ondas electromagnéticas mediante los sensores.
- Software: Windows, Matlab y MSE.

A.1.11.3. Procedimiento de medición

a) Se conectan los sensores de campos magnético y eléctrico con amplificación al scopemeter Fluke y se toman las medidas durante 30 segundos.

b) Creación de los archivos de datos correspondientes utilizando las facilidades del scopemeter.

c) A continuación se exportan los archivos de campo magnético y eléctrico al PC.

d) Se corre el programa MSE(entropía de múltiple escala).Producto: valores de entropía para múltiples escalas.

e) Aplicación del programa THD-PF que contiene fórmulas adecuadas para obtener los resultados deseados: factor de potencia y distorsión armónica.

Para el procesamiento de las señales se usò matlab y se implementaron los siguientes algoritmos para hallar el factor de potencia y el THD en corriente:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\frac{1}{T}\int_T uidt}{\sqrt{\frac{1}{T}\int_T u^2 dt}\sqrt{\frac{1}{T}\int_T i^2 dt}} \tag{A.1}$$

$$THD = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \ldots + I_h^2}}{I_1} \tag{A.2}$$

A.1.11.4. Imágenes de los equipos

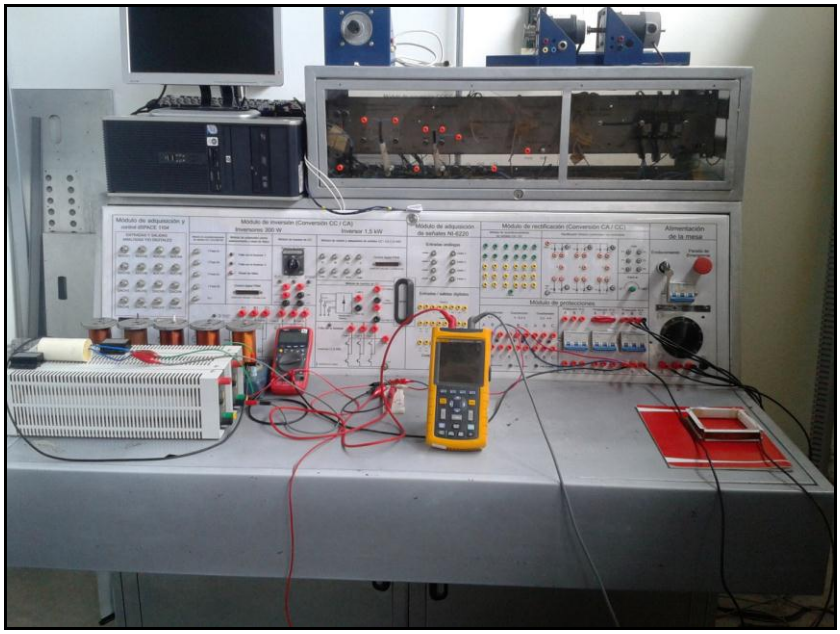


Figura A.23: Banco de pruebas mostrando equipos.

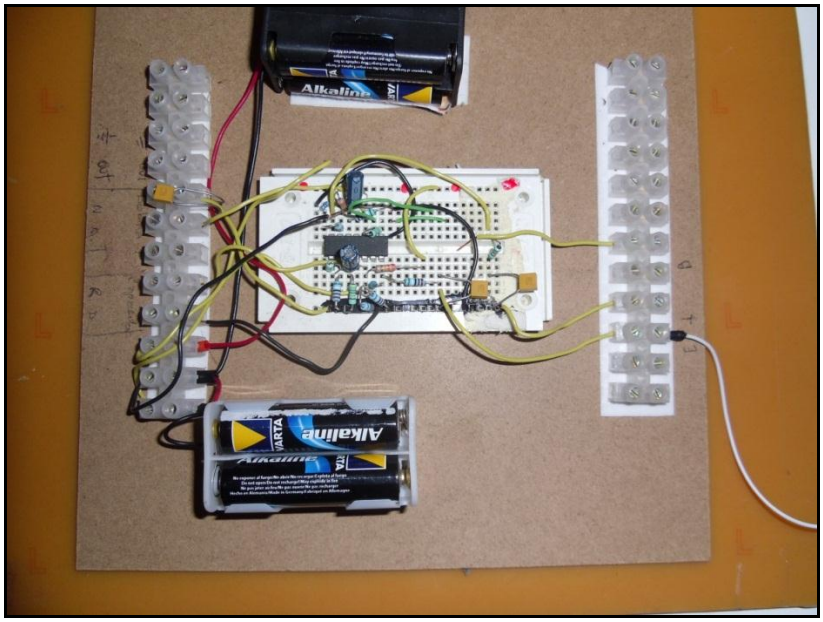


Figura A.24: Se muestra el condensador formado por 2 placas paralelas. Encima se aprecia el amplificador de audio empleado.

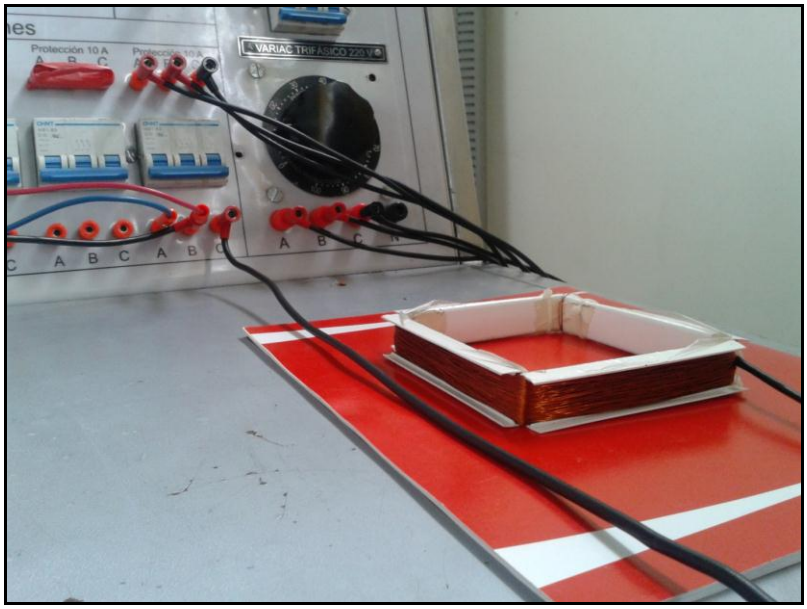


Figura A.25: Bobina para captación del campo magnético.

A.2 EXPERIMENTOS DE SIMULACIÓN EN LABORATORIO: RESPUESTA DEL PLASMA AL CAMPO ELÉCTRICO EN UN TUBO DE ENSAYO

Plasma confinado en un tubo de ensayo bajo condiciones controladas de laboratorio, puede reproducir una respuesta ante la acción de campos electromagnéticos externos. El tubo de ensayo es una válvula al vacío dentro de la cual se crea plasma mediante la emisión termoiónica de un electrodo llamado cátodo.

Adicionalmente a los electrones libres emitidos por el cátodo, aparecen iones positivos y negativos. La combinación de este grupo de cargas móviles da lugar a la aparición de esferas Debye y a la formación de entes plasmáticos. El núcleo puede ser un ion positivo rodeado de una nube de electrones a una distancia denominada radio Debye. Lo contrario también ocurre: ion negativo rodeado de iones positivos.

A.2.1 La ecuación de Poisson y la distancia Debye

La distancia Debye es un parámetro fundamental en la descripción del plasma. Se puede imaginar un arreglo o malla de esferas conteniendo cargas móviles.

La fórmula para la distancia Debye es obtenida a partir de la ecuación de Poisson, [63].

$$\nabla^2 V(r) = -\frac{1}{\varepsilon_0}\sum_{i=1}^{N} q_i n_i(r) \tag{A.3}$$

donde:
q es la especie: electrón, ion positive o neutro.
n_i : concentración de cargas : electrones $/\,cm^3$ o iones positivos positive iones $/\,cm^3$.
V(r): potencial generado por las cargas.

$$n_i(r) = \bar{n}_i e^{-q_i V(r)/K_B T} \tag{A.4}$$

Combinando (A.3) y (A.4), se obtiene:

$$\nabla^2 V(r) = -\frac{1}{\varepsilon_0}\sum_{i=1}^{N} q_i \bar{n}_i e^{-q_i V(r)/K_B T} \tag{A.5}$$

Para resolver esta ecuación se aplican la serie de Taylor:

$$e^{-q_i V(r)/K_B T} aprox = 1 - q_i V(r)/K_B T \tag{A.6}$$

Sustituyendo (A.6) en (A.5), se llega a:

$$\nabla^2 V(r) = \sum_{i=1}^{N} q_i^2 \bar{n}_i \frac{V(r)}{\varepsilon_0 K_B T} - \frac{1}{\varepsilon_0}\sum_{i=1}^{N} q_i \bar{n}_i \tag{A.7}$$

$$\nabla^2 V(r) = \left(\sum_{i=1}^{N} q_i^2 \bar{n}_i \frac{1}{\varepsilon_0 K_B T}\right) V(r) \tag{A.8}$$

El segundo término es cero para sistemas eléctricamente neutros. El término en paréntesis tiene unidades del inverso del cuadrado de la distancia. Entonces, la distancia Debye se define como:

$$\lambda_D = \frac{\varepsilon_0 K_B T}{\sum_{i=1}^{N} q_i^2 \bar{n}_i} \tag{A.9}$$

Si las cargas son electrones, la anterior ecuación toma la forma:

$$\lambda_{D_e} = \frac{\varepsilon_0 K_B T_e}{\sum_{i=1}^{N} q_i^2 \bar{n}_i} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 K_B T_e}{q_e^2 \bar{n}_e}} \tag{A.10}$$

Para iones positivos. La fórmula se convierte en:

$$\lambda_{D_i} = \frac{\varepsilon_0 K_B T_i}{\sum_{i=1}^{N} q_i^2 \bar{n}_i} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 K_B T_i}{q_i^2 \bar{n}_i}} \tag{A.11}$$

donde:

λ_D : es la distancia Debye.

ε_0: permitividad del espacio libre.

K_B : constante de Boltzman.

q_e : carga del electrón.

T_e y T_i son las temperaturas de los electrones y iones.

n_e : densidad de electrones.

Las siguientes definiciones son tomadas del libro "Plasma Physics", [64].

La distancia promedio entre partículas se determina a través de la ecuación:

$$r_D = n_s^{-\frac{1}{3}} \tag{A.12}$$

donde:

S, significa especie: electrón o ion.

La distancia de máximo acercamiento se expresa como:

$$r_C = \frac{q_s^2}{4\pi \grave{o}_0 T_s} \tag{A.13}$$

Otro parámetro de interés es:

$$\Lambda = 4\pi n_s \lambda_D^3 \tag{A.14}$$

Este parámetro es conocido como el número de partículas contenidas en la esfera Debye. Entonces, las ecuaciones (A.11), (A.12), (A.13) y (A.14), pueden ser combinadas para lograr:

$$\Lambda = \frac{\lambda_D}{r_c} \tag{A.15}$$

A.2.2 Experimento de simulación

El comportamiento dinámico de una esfera Debye en la ionosfera bajo la acción de un campo eléctrico y magnético, puede simularse gracias a un experimento sencillo en el laboratorio. Para lograrlo, se utilizó un tubo de ensayo al vacío. El tubo está dotado de un electrodo emisor de electrones llamado cátodo y un segundo electrodo, al cual se aplica una tensión positiva o negativa para generar campo eléctrico. Adicionalmente, se utiliza un tercer electrodo llamado rejilla. El cátodo se calienta con un filamento a una temperatura del orden de 2500° kelvin. Como consecuencia de la alta temperatura, algunos electrones pueden escapar del cátodo formando una nube de carga espacial (ver Figura A.26). La nube está formada de plasma lista para responder a campos electromagnéticos aplicados externamente y en forma controlada.

La simulación de la respuesta del plasma a campos electromagnéticos en el ambiente de un tubo de ensayo bajo condiciones controladas de laboratorio, se inicia con una descripción de la dinámica del movimiento de un electrón bajo la influencia de un campo eléctrico (ver Figura A.26).

A.2.2.1 Fuerza eléctrica sobre electrones del plasma en el tubo de ensayo.

Algunas de las siguientes ecuaciones fundamentales son tomadas del libro [65].

$$\overrightarrow{F_{el}} = -e\overrightarrow{E_z} \tag{A.16}$$

$\overrightarrow{F_{el}}$: Fuerza que experimenta un electrón de la esfera Debye en un tubo de ensayo bajo la acción de un campo eléctrico E aplicado.
e : Carga del electrón.

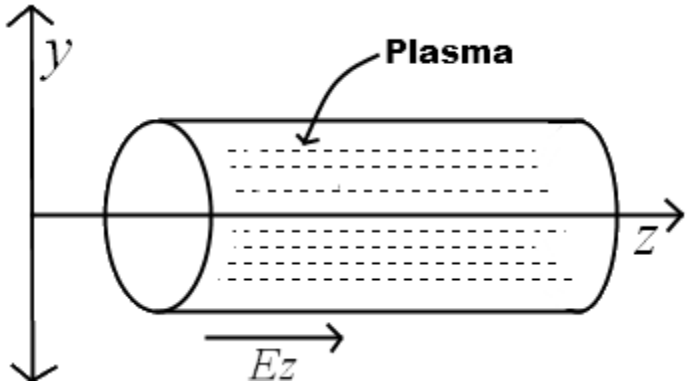


Figura A.26: Experimento en laboratorio con un tubo de ensayo: un pentodo (válvula al vacío) contiene plasma en la forma de electrones e iones positivos y negativos. Los electrones están simbolizados por rayas cortas horizontales.

De acuerdo a la segunda ley de Newton:

$$\overrightarrow{F_{el}} = -e\overrightarrow{E_z} = m_e \frac{\overrightarrow{dv}}{dt} \tag{A.17}$$

$$e\overrightarrow{E_z} = ma_z \tag{A.18}$$

De compromiso con las leyes de la cinemática:

$$v_z = v_{0z} + a_z t \tag{A.19}$$

$$z = z_0 + v_{0z}t + \frac{1}{2}a_z t^2 \tag{A.20}$$

La ecuación anterior predice una trayectoria parabólica del electrón en la vecindad de un campo eléctrico, la Figura A.27 lo muestra.

Aplicando la segunda ley de Newton, se obtiene:

$$\frac{-eE_z}{m_e} = \frac{dv_z}{dt} \tag{A.21}$$

También:

$$\frac{-e}{m_e}\int_{z_0}^{z} E_z dz = \int_{v_{0z}}^{v_z} v_z dv_z \tag{A.22}$$

Así, la diferencia de potencial se define como:

$$V = -\int_{z_0}^{z} E_z d_z \tag{A.23}$$

También:

$$E_z = -\frac{dV}{dz} \tag{A.24}$$

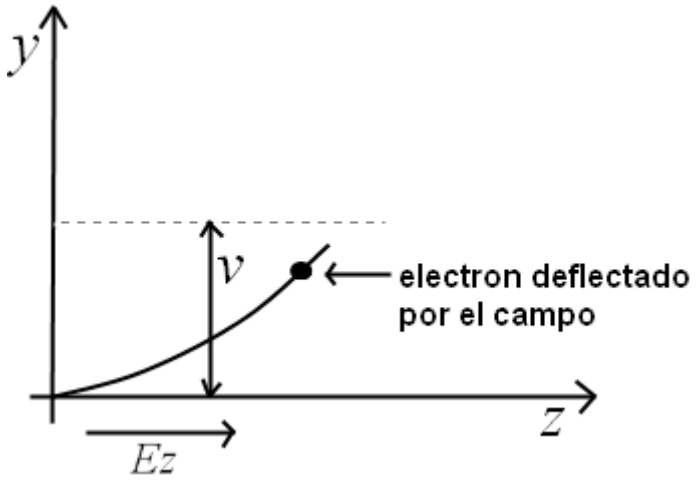


Figura A.27: Trayectoria parabólica de un electrón en la presencia de un campo eléctrico.

Combinando las anteriores ecuaciones se consigue la expresión para la trayectoria que describe el electrón moviéndose en un campo de fuerza.

La siguiente fórmula de la cinemática relaciona las componentes de la trayectoria:

$$y = \left(\frac{1}{2} \frac{a_y}{v_{0z}^2} \right) z^2 \tag{A.25}$$

La densidad de corriente se muestra como:

$$J = \frac{I}{A} \tag{A.26}$$

donde:
J : Densidad de corriente
I : Corriente de electrones
A: Área de la sección de haz de plasma

$$J = \frac{N_e}{tA} \tag{A.27}$$

Entonces:

$$J = \frac{N_e v}{LA} \tag{A.28}$$

La densidad de electrones n_e se define de esta forma:

$$n_e = \frac{N}{LA} : electrones / m^3 \tag{A.29}$$

"LA" es el volumen conteniendo los N electrones

La ecuación (A.28) se convierte en:

$$J = new \tag{A.30}$$

Que se reescribe como:

$$J = \frac{\frac{49T_e v}{\lambda^2_{De}}}{1} = 49\frac{v}{\lambda^2_{De}}T_e = pv \tag{A.31}$$

J: Densidad de la corriente de carga electrónica espacial dentro de la nube que se forma cerca del cátodo emisor de corriente termoiónica, en función de la distancia Debye de una esfera dentro del plasma del tubo (Ver Figura A.28)

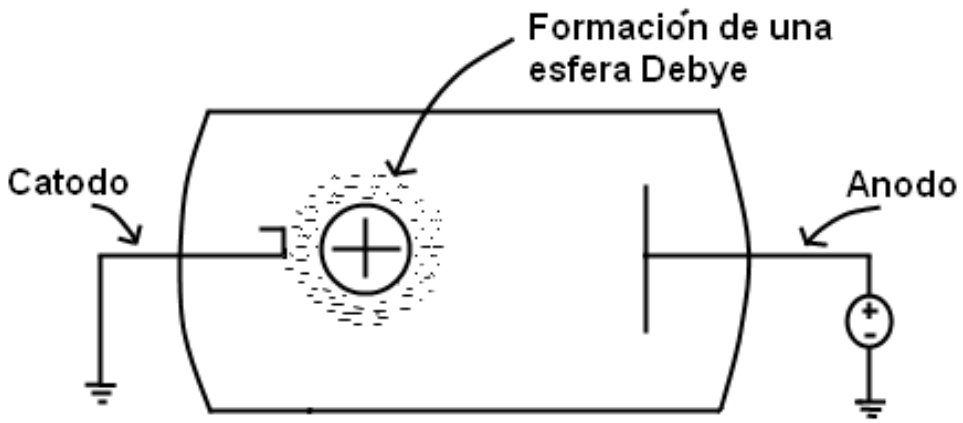


Figura A.28: Formación de una nube de carga espacial en el tubo de ensayo.

El esquema de la Figura A.28 es la base del circuito mostrado en la Figura A.29. La foto ilustra el circuito instalado para encontrar la relación entre una esfera Debye en el interior del tubo y el campo eléctrico aplicado en la rejilla. Los resultados se obtuvieron con el uso de un amperímetro para medir la corriente de ánodo; con base en este valor se deriva el valor de la conductancia, y posteriormente el dato de la distancia Debye.

El tubo de ensayo se muestra a la izquierda de la tableta electrónica

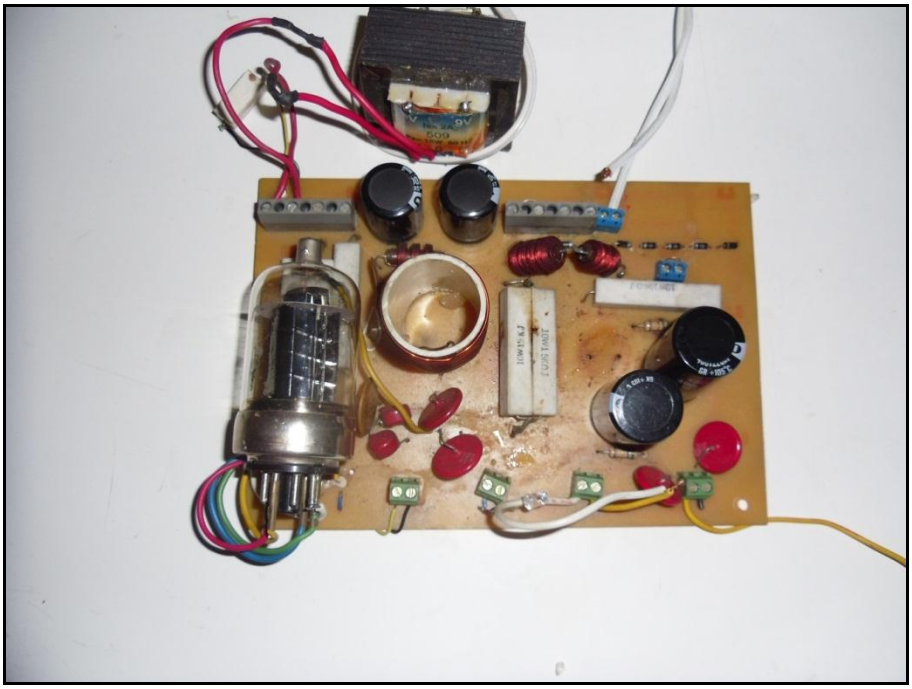


Figura A.29: Foto del circuito empleado para evaluar la respuesta del plasma a la aplicación de un campo eléctrico.

El interés ahora es encontrar una expresión que muestre la relación entre la densidad de carga y el campo eléctrico aplicado.

Se reinicia la discusión con la bien conocida fórmula:

$$\frac{1}{2} m_e v^2 = eV \tag{A.32}$$

La ecuación de Poisson establece que:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \tag{A.33}$$

Siendo:

$$\rho = n_e e : amperios / m^2 \tag{A.34}$$

En función de la distancia Debye:

$$\rho = \frac{49T_e e}{\lambda^2{}_{De}} : coulombios /^3 \tag{A.35}$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = \frac{\rho}{\in_0} = \frac{J}{v \in_0} = \frac{49T_e}{\lambda_{De}^2 \in_0} \tag{A.36}$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = \frac{1}{\lambda_{De}^2} \tag{A.37}$$

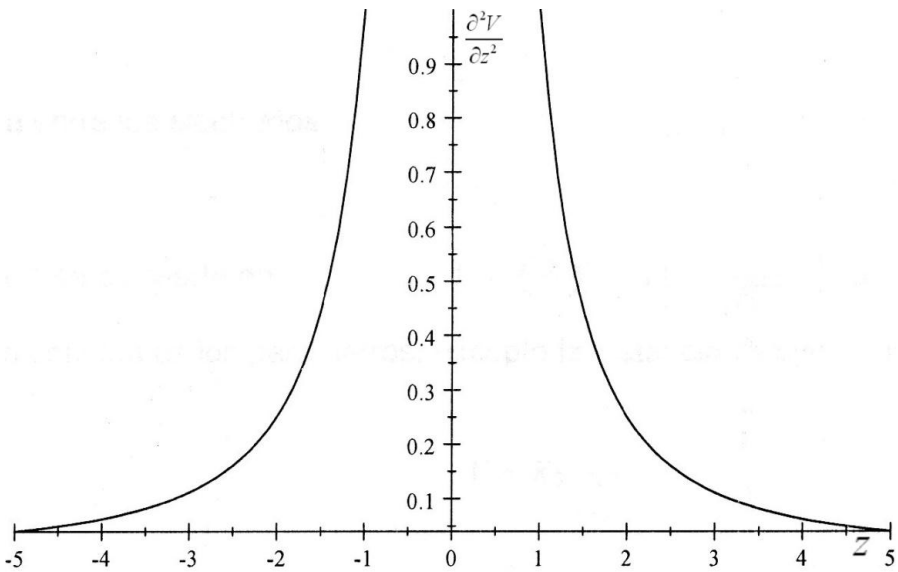


Figura A. 30: Relación entre la segunda derivada del potencial y la distancia Debye: observar la formación de una singularidad para z=0.

Por otro lado:

$$v = \sqrt{\frac{2eV}{m_e}} = \left(\frac{2eV}{m_e}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{A.38}$$

La ecuación (A.33) evoluciona a:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = \frac{J}{\left(\frac{2eV}{m_e}\right)^{\frac{1}{2}} \in_0} = \frac{\frac{49T_e}{\lambda_{De}^2}}{\left(\frac{2eV}{m_e}\right)^{\frac{1}{2}} \in_0} = 49\frac{v}{\in_0 \lambda_{De}^2}\frac{T_e}{\sqrt{2\frac{V}{m_e}e}} \tag{A.39}$$

Posterior simplificación conduce a:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 49\frac{v}{\in_0 \lambda_{De}^2}\frac{T_e}{\sqrt{2\frac{1}{m_e}e}}V^{-\frac{1}{2}} \tag{A.40}$$

$$49\frac{v}{\in_0 \lambda_{De}^2}\frac{T_e}{\sqrt{2\frac{1}{m_e}e}} = K_1\frac{1}{\lambda_{De}^2} \tag{A.41}$$

$$49\frac{v}{\in_0}\frac{T_e}{\sqrt{2\frac{1}{m_e}e}} = K_1 \tag{A.42}$$

Y la expresión (A.40) se reduce a:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = K_1 V^{-\frac{1}{2}}\frac{1}{\lambda_{De}^2} \tag{A.43}$$

Hacer cálculos computacionales con SW (Scientific Work Place) [66], permite arribar a:

$$V = \left(\frac{3}{2}\right)^{\frac{4}{3}}\left(49\frac{v}{\in_0 \lambda_{De}^2}\frac{T_e}{\sqrt{2\frac{1}{m_e}e}}\right)^{\frac{2}{3}} d^{\frac{4}{3}} \tag{A.44}$$

Siendo:

d : Distancia entre los electrodos.

La ecuación (A.44) se convierte en:

$$V = \left(\frac{3}{2}\right)^{\frac{4}{3}} \left(49 \frac{v}{\in_0} \frac{T_e}{\sqrt{2 \frac{1}{m_e} e}} \right)^{\frac{2}{3}} d^{\frac{4}{3}} \frac{1}{\lambda_{De}^{\frac{4}{3}}} \tag{A.45}$$

Asumiendo constantes los parámetros, excepto la distancia Debye, se reduce a:

$$V = K_3 \frac{1}{\lambda_{De}^{\frac{4}{3}}} \tag{A.46}$$

$$V = \frac{1}{\lambda_{De}^{\frac{4}{3}}} \tag{A.47}$$

Así, se llega a lo deseado de la simulación: mostrar la conexión entre la distancia Debye y el potencial aplicado en la gráfica de la Figura A.31.

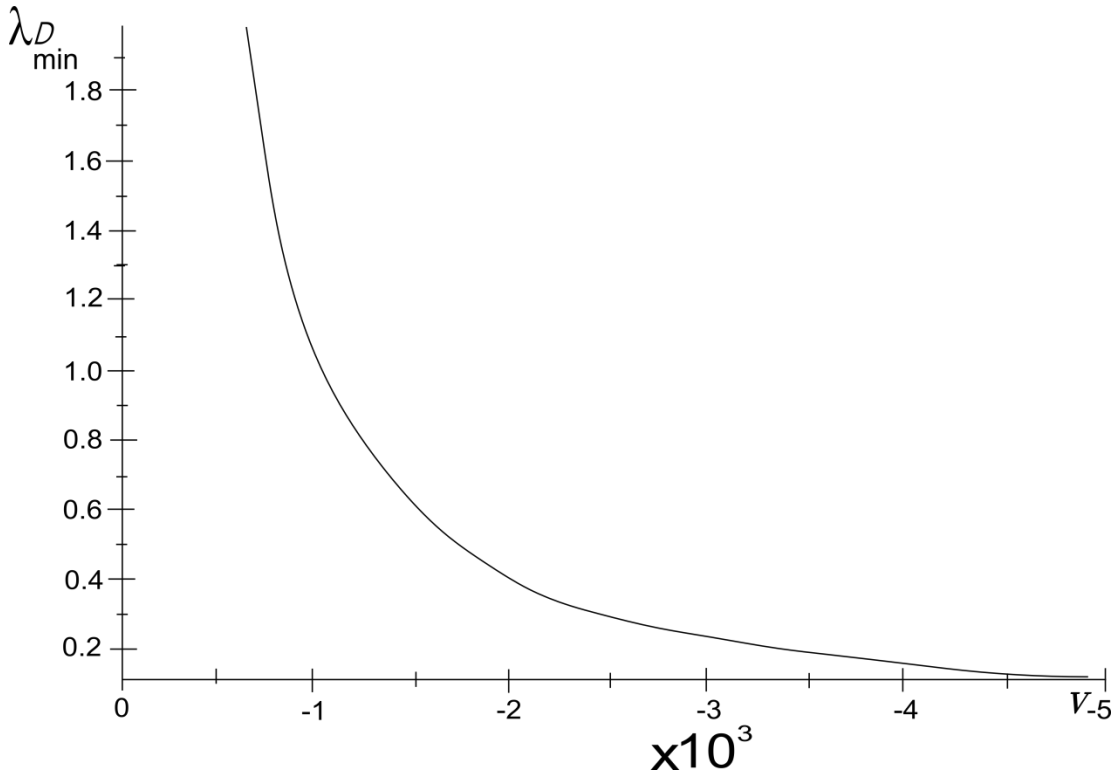


Figura A.31: Distancia Debye en función de la tensión: la esfera Debye se contrae en proporción al campo eléctrico aplicado en rejilla.

CONCLUSIONES APÉNDICE

Las mediciones presentadas en el Apendice A.1 (experimentos de comparación en laboratorio del método tradicional y el método propuesto), están sujetas a la precisión del equipo de medida para captar las señales eléctricas del circuito, es por esto que pueden existir pequeñas diferencias del factor de potencia total V-I, cuando en teoría, en un escenario ideal no deberían existir tales diferencias. En el caso de la medida para las ondas radiadas las diferencias en factor de potencia y THD pueden ser aún mayores, ya que el sensor de onda magnética se encuentra en una etapa temprana de desarrollo y su perfeccionamiento o mejora no es el objetivo a trabajar. Los esfuerzos se concentran en demostrar que los algoritmos de entropía utilizados en esta investigación, pueden ser usados como índices de calidad de la potencia a través de la variabilidad que las señales de corriente y tensión presenten a través de sus componentes radiadas de campo eléctrico y campo magnético.

En teoría, la entropía de escala múltiple mide la irregularidad de la forma de onda. Las señales eléctricas en sistemas de potencia AC, poseen una forma sinusoidal. Cuando la onda se ve afectada por disturbios como por ejemplo armónicos, su forma de onda se ve alterada. Estas alteraciones o irregularidades de la señal son valoradas por la entropía, y a medida que estas irregularidades sean mayores los valores de entropía de escala múltiple también lo serán. Una señal con una forma de onda cada vez más alejada de su forma ideal (sinusoidal) es una señal con una irregularidad cada vez mayor.

Una particularidad de este algoritmo es que la señal es evaluada a partir de la forma de onda que esta posee, no tienen en cuenta su magnitud, por lo que el valor de entropía será igual para una onda de cientos de amperios como para una onda de 1 amperio.

El desfase entre la tensión y la corriente que puede ser provocado por elementos inductivos o capacitivos y medidos por el factor de potencia (desplazamiento) la entropía no lo hace, ya que el algoritmo solo calcula el grado de irregularidad que posee una señal; las irregularidades que son evaluadas son provocadas por fenómenos de distorsión periódica.

Los armónicos que son disturbios periódicos y generados por cargas no-lineales, generan en la señal de frecuencia fundamental deformaciones que la alejan de su forma

ideal. Estas deformaciones crecen a medida que la distorsión armónica se hace mayor; El THDi como una medida del grado distorsión armónica guarda una relación con la entropía de la señal, a medida que el THDi crezca la entropía de la señal también crecerá.

En cuanto al Apéndice A.2 (Experimentos de simulación en laboratorio: respuesta del plasma al campo eléctrico en un tubo de ensayo), se puede concluir que el experimento de simulación de la respuesta de plasma en un tubo de ensayo mostró una relación entre el campo eléctrico aplicado y la distancia Debye, similar a la lograda teóricamente en el capítulo 2, la cual se reproduce:

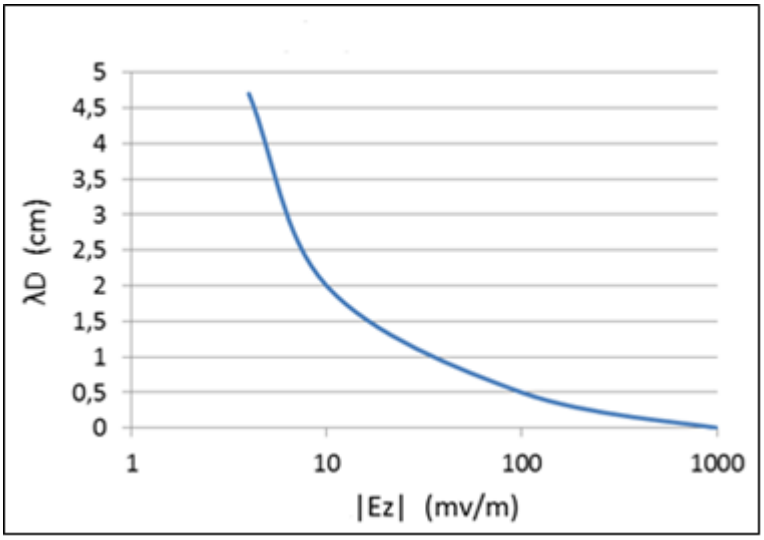


Figura A. 32: Gráfica de la distancia Debye en función del campo aplicado, obtenida teóricamente. Observar la similitud con la producida en laboratorio dentro del tubo de ensayo. Comparar con Figura 5.6.

Por lo tanto se puede argumentar que existe una conexión estrecha entre esfera Debye y el campo eléctrico vertical, lo cual por supuesto no sorprende pero es necesario resaltar, pues la distancia Debye se presentará como indicador de la actividad sísmica.