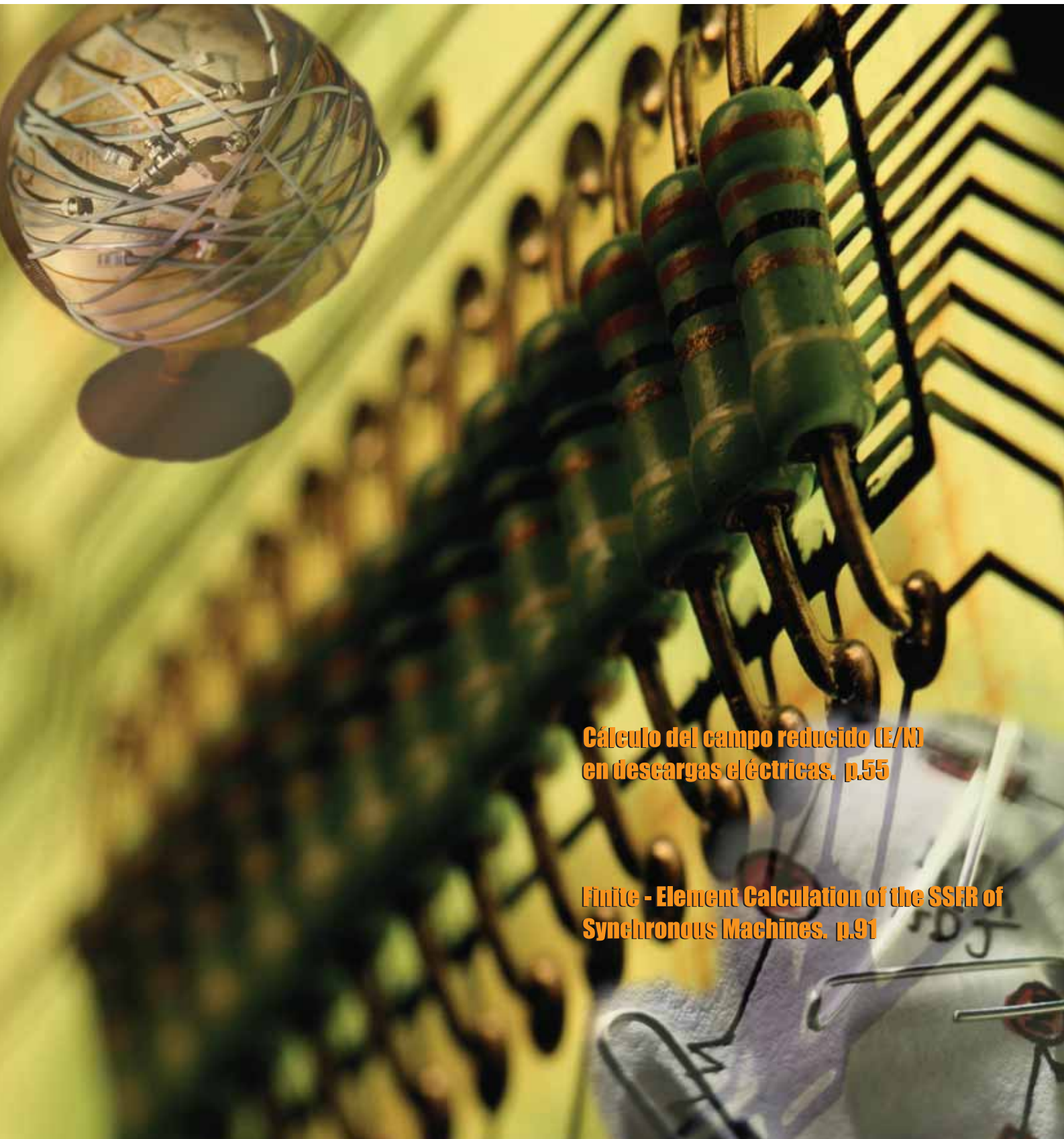


# Científica

Precio \$ 70.00 • Vol. 10 Núm. 2 • Abril - Junio 2006 • Científica : The Mexican Journal of Electromechanical Engineering • ESIME



**Cálculo del campo reducido (E/N)  
en descargas eléctricas. p.55**

**Finite - Element Calculation of the SSFR of  
Synchronous Machines. p.91**



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

José Enrique Villa Rivera  
Director General

Efrén Parada Arias  
Secretario General

José Madrid Flores  
Secretario Académico

Manuel Quintero Quintero  
Secretario de Extensión e Integración Social

Luis Humberto Fabila Castillo  
Secretario de Investigación y Posgrado

Víctor Manuel López López  
Secretario de Servicios Educativos

Luis Antonio Ríos Cárdenas  
Secretario Técnico

Mario Alberto Rodríguez Casas  
Secretario de Administración

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

Jesús Reyes García  
Director ESIME Zacatenco

Ernesto Mercado Escutia  
Director ESIME Culhuacán

Miguel Álvarez Montalvo  
Director ESIME Ticomán

Jorge Gómez Villarreal  
Director ESIME Azcapotzalco

**REVISTA CIENTÍFICA**

Guillermo Urriolagoitia Calderón  
Editor en Jefe

Alma Vicenta Miranda Godínez  
Coordinación Editorial

Cuauhtémoc Jiménez Pérez  
Edición Técnica

Miguel Ángel Tenorio Trejo  
Producción Editorial

Margarita Sam Rodríguez  
Revisión

## Contenido

### Cálculo del campo reducido (E/N) en descargas eléctricas

Primo-Alberto Calva-Chavarría, Alberto R. Portillo M., Víctor M. Salazar-del-Moral, J. M. de-la-Rosa.  
MÉXICO

55

### Estudio de los parámetros que afectan la eficiencia de separación de los separadores tipo ciclón

Claudia del C. Gutiérrez-Torres, Juan G. Barbosa-Saldaña, José A. Jiménez-Bernal, Pedro Quinto-Diez.  
MÉXICO

59

### Gas Turbine Fault Recognition Trustworthiness

Igor Loboda, Sergiy Yepifanov.  
MÉXICO-UCRANIA

65

### VLSI Fuzzy Cells

Alejos-Palomares R., Vázquez-González J. L., Atala-García H., Sánchez-Durán F.  
MÉXICO

75

### Finite-Element Calculation of the SSFR of Synchronous Machines

R. Escarela-Pérez, R. Aguilar-López, E. Campero-Littlewood, J. L. Hernández-Ávila, C. Avilés-Cruz.  
MÉXICO

91

## COMITÉ EDITORIAL

Alexander Balankin  
ESIME-IPN (MÉXICO)

Guillermo Urriolagoitia Calderón  
ESIME-IPN (MÉXICO)

Luis Niño de Rivera y Oyarzábal  
ESIME-IPN (MÉXICO)

Héctor Pérez Meana  
ESIME-IPN (MÉXICO)

Jaime Álvarez Gallegos  
CINVESTAV-IPN (MÉXICO)

Gilberto Enríquez Harper  
ESIME-IPN (MÉXICO)

Eduardo Liceaga Castro  
ESIME-IPN (MÉXICO)

## EDITORES ASOCIADOS

Apolinar Reinoso Hernández  
Centro de Investigación y de Estudios  
Superiores de Ensenada, CICESE (MÉXICO)

José Luis del Río Correa  
UAM (MÉXICO)

Orlando Susarrey Huerta  
ESIME-IPN (MÉXICO)

Baltasar Mena Inesta  
UNAM (MÉXICO)

José Manuel de la Rosa  
ESIME-IPN (MÉXICO)

Pablo Rogelio Hernández Rodríguez  
CINVESTAV-IPN (MÉXICO)

Claude Moog  
CRNS (FRANCIA)

Luis Héctor Hernández Gómez  
ESIME-IPN (MÉXICO)

Patricia Camarena Gallardo  
ESIME-IPN (MÉXICO)

Edgar Sánchez Sinencio  
Texas A&M University College Station (EUA)

Mariko Nakano Miyatake  
ESIME-IPN (MÉXICO)

Rafael Castro Linares  
CINVESTAV-IPN (MÉXICO)

Emmanuel Merchán Cruz  
ESIME-IPN (MÉXICO)

Manuel A. Duarte Marmoud  
Universidad de Chile (CHILE)

Régulo López Callejas  
ININ (MÉXICO)

Francisco Sánchez Sesma  
UNAM (MÉXICO)

Manuel Elices Calafat  
Universidad Politécnica de Madrid (ESPAÑA)

Valery Kontorovich  
CINVESTAV-IPN (MÉXICO)

Garret Sautis  
University of Sheffield (REINO UNIDO)

María Teresa Alonso Rasgado  
University of Manchester (REINO UNIDO)

Víctor Champac Vilela  
INAOE (MÉXICO)

Hidilberto Jardón Aguilar  
CINVESTAV-IPN (MÉXICO)

Michael Shapiro Fihman  
CINVESTAV-IPN (MÉXICO)

Victor F. Kravchenko  
Moscow Institute of  
Physics and Technology  
(FEDERACIÓN RUSA)

Israel Saucedo Meza  
Universidad de Baja California (MÉXICO)

Miguel Ángel Rodríguez Díaz  
Instituto de Física de Cantabria (ESPAÑA)

Vladislav Kravchenko  
ESIME-IPN (MÉXICO)

Joaquín Fernández Valdivia  
Universidad de Sevilla (ESPAÑA)

Miguel Castro Fernández  
Centro de Investigación y Pruebas  
Electromagnéticas de Cuba (CUBA)

Volodymir Ponomaryov  
ESIME-IPN (MÉXICO)

José de Jesús Álvarez Ramírez  
UAM (MÉXICO)

Miguel Cruz Irisson  
ESIME-IPN (MÉXICO)

Revista **Científica** ESIME, ISSN 1665-0654, **Volumen 10, Número 2**, Abril-Junio de 2006. Revista trimestral editada por la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) del Instituto Politécnico Nacional (IPN), México. Edificio 1, 2° piso, Subdirección Académica, Col. Lindavista, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, CP 07738, México, DF, Tel. 5729 6000 exts. 54555/54518, fax 5586 0758. Página web: [www.cientifica.org.mx](http://www.cientifica.org.mx), correo electrónico: [revistacientifipn@yahoo.com.mx](mailto:revistacientifipn@yahoo.com.mx). Certificado de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo. Reserva: 04-2004-053109300500-102, 31-V-06. Certificado de Licitud de Contenido 7611, 10-I-00. Certificado de Licitud de Título 10962,10-I-06. Revista perteneciente al Índice de Revistas Mexicanas de Ciencia y Tecnología del CONACYT. Indizada en *Periódica*, [www.latindex.unam.mx](http://www.latindex.unam.mx) (Departamento de Bibliografía Latinoamericana, DGB, UNAM). Suscripción anual: \$ 300.00 (pesos). Annual fee including airmail charges US \$ 50.00 (fifty US Dollar). El contenido de los artículos firmados es responsabilidad del autor. Prohibida la reproducción total o parcial sin previa autorización. Registro Postal (Publicaciones Periódicas) SEPOMEX PP09 0972. Portada: Digital Dot, SA, Tel./Fax: 5592 8429 y 8589 5311, México, DF. Tipografía: Cuauhtémoc Jiménez Pérez. Impresión: Talleres Gráficos de la Dirección de Publicaciones del IPN, Tresguerras 27, Centro Histórico, México, DF. Tiraje 1 000 ejemplares.



# EDITORIAL

La revista *Científica*, como su nombre lo indica, es un medio de difusión del conocimiento científico y tecnológico, el cual se caracteriza por publicar artículos científicos originales que contribuyen al conocimiento en diversas áreas de la ciencia y la tecnología, así como artículos donde se presentan una revisión profunda sobre diversos temas de interés actual. Continuando con su característica multidisciplinaria en este número, la revista *Científica* publica artículos relacionados con la ingeniería mecánica, la ingeniería eléctrica y la electrónica.

El primer artículo presenta la validación con datos experimentales obtenidos en el aire al nivel del mar de diversos modelos para el cálculo de campo reducido ( $E/N$ ) en descargas eléctricas. Aquí se muestra que un parámetro importante que gobierna el comportamiento de la descarga es la relación del campo eléctrico  $E$  a la presión  $p$  del gas o más exactamente a la densidad de moléculas  $N$  del gas.

El segundo trabajo presenta un estudio de la influencia de cuatro de los principales parámetros que intervienen en la eficiencia de separación de un ciclón con entrada tangencial. Aquí se consideran los efectos de algunas propiedades del gas y de las partículas por separar, así como los efectos de algunas dimensiones geométricas de los ciclones.

El siguiente artículo examina tres métodos para diagnóstico paramétrico de turbinas de gas, en el cual el funcionamiento de los diferentes métodos se simula en condiciones idénticas al desarrollo de fallas y errores aleatorios de medición. Los objetivos de esta investigación son afinar los métodos, compararlos y escoger el mejor, con base en criterios probabilísticos para el reconocimiento correcto e incorrecto de las clases de fallas.

En «VSLI Fuzzy Cells» se presenta el desarrollo de celdas básicas para la construcción de funciones de membresía trapezoidales, las cuales se encuentran formadas por un circuito de sustracción de corriente, un multiplicador-divisor y circuitos de forma  $S$ - $Z$  usando tecnología CMOS de  $0.18 \mu\text{m}$  en modo de corriente.

Finalmente se presenta el uso de técnicas modernas de elementos finitos para obtener eficientemente la respuesta a la frecuencia de máquinas síncronas en reposo, esto responde al continuo interés que existe por evitar pruebas experimentales en máquinas de alta potencia, debido a que implican altos costos y riesgo de daños. El modelo de elementos finitos desarrollado en este trabajo también toma en consideración los circuitos externos conectados a la máquina a través de una solución simultánea de las ecuaciones de los circuitos y del dominio electromagnético.

Así, de esta manera, el presente número publica contribuciones que colaboran e incrementan el conocimiento en campos relativos las ingenierías eléctrica, mecánica y electrónica.

# Cálculo del campo reducido ( $E/N$ ) en descargas eléctricas

Primo Alberto Calva Chavarría

Alberto R. Portillo M.

Víctor M. Salazar del Moral

J. M. de la Rosa

Instituto Politécnico Nacional, ESIME Zacatenco,  
Col. Lindavista, CP 07738, México, DF.  
MÉXICO.

Recibido el 25 de octubre de 2004; aceptado el 22 de mayo de 2005.

## 1. Resumen

Los diferentes modelos propuestos del líder se han validado con datos experimentales obtenidos en aire al nivel del mar. Un parámetro importante que gobierna el comportamiento de la descarga es la relación del campo eléctrico  $E$  a la presión  $p$  del gas o más exactamente a la densidad de moléculas  $N$  del gas. En este artículo se reportan los valores del campo reducido ( $E/N$ ) y del gradiente de potencial ( $E$ ) utilizando el modelo de Gallimberti con datos experimentales obtenidos a 2 930 m.s.n.m. ( $\delta=0.7$ ).

**Palabras clave:** descargas eléctricas, canal del líder, campo reducido, gradiente de potencial.

## 2. Abstract (Calculus of Reduced Field ( $E/N$ ) in Electrical Discharges)

The different models proposed of the channel lider have been validated with experimental data obtained in atmospheric air at sea level. An important parameter that governs the behavior of the electrical discharge is the relation of the electric field  $E$  to the pressure  $p$  of the gas or more exactly to molecules density  $N$  of the gas. In this paper values of the reduced field ( $E/N$ ) and potential gradient ( $E$ ) obtained using the model of Gallimberti with experimental data with air at 2 240 meters at sea level are reported.

## 3. Introduction

La principal diferencia entre los modelos propuestos para el canal del líder, estriba en si consideran o no un equilibrio local

termodinámico [1,2,3]. El modelo de Gallimberti, vigente hasta ahora, no lo supone, puede ser resuelto analíticamente y está basado en las conclusiones de Braginskii, que consideran al canal del líder como un núcleo cilíndrico homogéneo formado de un plasma débilmente ionizado, donde debido a las colisiones entre los electrones y las moléculas se transfiere energía del campo eléctrico al gas, la evolución en el tiempo de las condiciones internas de una sección del canal puede ser estudiada sobre la base de procesos termodinámicos e hidrodinámicos, los cuales son generados por la energía de entrada.

De acuerdo con Braginskii [3], el canal del líder puede ser considerado como un núcleo cilíndrico homogéneo envuelto por una nube densa de gas, con presión, temperatura y densidad de partículas constantes sobre la sección transversal del núcleo; la variación de estos parámetros con respecto a los valores del gas circundante no alterado se concentra entonces en la nube. Para un segmento del canal de longitud unitaria, la ecuación de conservación de energía puede ser escrita separadamente para el núcleo y la nube como:

$$\frac{dW_I}{dt} + p \frac{d(\pi a^2)}{dt} = Q_j \quad (1)$$

$$\left( \varepsilon^* + \frac{p}{m^* N} \right) \frac{dM}{dt} = Q_R + Q_T \quad (2)$$

donde:

- $W_I$  = energía interna
- $Q_T$  = pérdidas por conducción térmica
- $Q_R$  = pérdidas por radiación
- $Q_j$  = potencia térmica de entrada
- $M$  = masa total
- $\varepsilon^*$  = energía interna por unidad de masa
- $m^*$  = densidad de moléculas del gas en el canal del núcleo
- $p$  = presión en el canal del núcleo
- $m$  = masa de las moléculas del gas
- $M = mN\pi a^2$
- $W_I = M\varepsilon = mN\pi a^2 \varepsilon^*$
- $a$  = radio del núcleo

La presión en el núcleo se toma igual al valor atmosférico  $p_o$  y se supone que el gas en el canal del líder se comporta como un gas perfecto y que el grado de ionización, definido como la relación de iones positivos a la densidad de moléculas del gas ( $n_+/N$ ), es

mucho más bajo que la unidad, por lo cual se tiene que  $p = NKT$ , con  $T =$  temperatura en grados Kelvin y  $K =$  constante de Boltzmann.

Como no se considera equilibrio termodinámico, la energía inter-  
na por unidad de masa se puede calcular con buena aproximación como:

$$\varepsilon^* = \frac{1}{m} \frac{KT}{\gamma - 1} = \frac{I}{\gamma - 1} \frac{p}{mN} \quad (3)$$

donde:

$\gamma =$  relación entre calores específicos a volumen y presión constantes

La potencia de entrada  $Q_j$  puede estimarse como la potencia eléctrica por unidad de longitud  $EI$ ,  $Q_R$  y  $Q_T$  pueden despreciarse si la temperatura del canal no excede  $10^4$  K. Considerando la corriente  $I$  para el núcleo como una variable independiente externa y que las concentraciones de iones positivos y de electrones son las mismas, se tiene para el núcleo que:

$$\frac{dN_e}{dt} = v_1 N_e - a_e N_e n_{e^+} \quad (4)$$

donde:

$v_1 =$  frecuencia de ionización

$a_e =$  coeficiente de recombinación

$N_e =$  número de electrones por unidad de longitud en el canal

$n_e =$  densidad de iones positivos o electrones

Si el canal se comporta como un conductor resistivo el campo eléctrico puede ser expresado por

$$E = \frac{I}{N_e e \mu_e} \quad (5)$$

donde:

$\mu_e =$  movilidad electrónica

$e =$  carga del electrón

$E =$  gradiente de potencial del líder

### Conductividad del líder

En función de las pérdidas despreciables en la frontera, el canal se expande como una masa constante,  $m\pi a_o^2 N_o$ , donde  $a_o$  y  $N_o$  son el radio y número de moléculas del gas a un tiempo  $t_o$ . Se ha observado que para el valor  $E/N$  y  $n^+$ , los cuales

pueden ser determinados para el canal, las constantes de tiempo de ionización  $1/v_1$ , y de recombinación  $1/(a_e n^+)$  son mucho menores que  $1 \mu s$ , el cual a su vez es mucho menor que el tiempo de desarrollo del líder. En consecuencia las densidades de iones positivos y electrones corresponden a un equilibrio entre los procesos de ionización y de recombinación, por lo que

$$n^+ = \frac{v_1}{a_e} \quad (6)$$

y la ecuación (5) puede entonces escribirse como:

$$\frac{E}{N} = \frac{I}{N\pi a_o^2 \frac{1}{a_e} \frac{v_1}{N} N\mu_e e} \quad (7)$$

Como  $1/a_e$ ,  $v_1/N$  y  $N\mu_e$  son solamente funciones del campo reducido  $E/N$  mientras que  $N\pi a_o^2$  es una constante, la ecuación (7) puede usarse para calcular  $E/N$  como función únicamente de la corriente del líder. Esto implica que el grado de ionización y la conductividad del líder:

$$i = \frac{n^+}{N} = \frac{1}{a_e} \frac{v_1}{N} \quad (8)$$

$$\sigma = \frac{1}{a_e} \frac{v_1}{N} N\mu_e e \quad (9)$$

únicamente son funciones de la corriente del líder.

De las ecuaciones anteriores se puede observar que la corriente  $I$  y la conductividad determinan el campo reducido  $E/N$ , el cual a su vez determina el grado de ionización  $i$  y la conductividad  $\sigma$ ; ocurre una retroalimentación en lazo cerrado típica con una alta ganancia fijada por las características diferenciales de la función de transferencia de retroalimentación  $(v_1/a_e)\mu_e$ ; la salida  $E/N$  por tanto se estabiliza, independientemente de las fluctuaciones de la corriente de entrada.

### Expansión del canal del líder

Combinando las ecuaciones (1), (2), (3) y (4) considerando  $p = p_o$  y  $\gamma =$  constante, se encuentra la siguiente ecuación para la expansión del líder:

$$\frac{p}{\gamma - 1} \frac{d(\pi a^2)}{dt} + p \frac{d(\pi a^2)}{dt} = EI \quad (10)$$

La potencia de entrada puede ser expresada en la forma:

$$EI = \frac{E}{N} I \frac{N_o \pi a_o^2}{\pi a^2} \quad (11)$$

donde  $E/N$  es casi constante. La ecuación (11), para la expansión del líder, puede ser integrada directamente para dar la sección transversal del canal a un tiempo  $t$  y una posición  $x$ :

$$(\pi a^2)_{xt} = \sqrt{(\pi a_o^2)^2 + 2 \frac{\gamma - IEN_o \pi a_o}{\gamma N p} \int_{t_o}^t dt} \quad (12)$$

con

$t_o$  = tiempo al cual la cabeza del líder cruza la posición  $x$  y se forma la sección del canal.

Se ha observado experimentalmente que la carga  $q$  por unidad de longitud es constante durante la propagación del líder a pesar de las fluctuaciones de corriente, por lo cual la ecuación (12) puede reescribirse como:

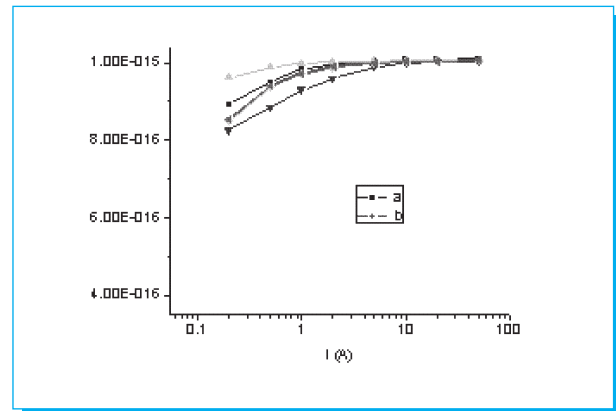
$$\int_{t_o}^t Idt = q_{L_o} (x_t - x) \quad (13)$$

con

$x$  = coordenada curvilínea a lo largo de la trayectoria real del líder  
 $x_t$  = longitud real del líder al tiempo  $t$

**Cuadro 1.** Valores calculados de  $E/N$ .

$I$ (A)	TOPILEJO $E/N$ (Vcm <sup>2</sup> )	NIVEL DEL MAR $E/N$ (Vcm <sup>2</sup> )
0.2	$8.910 \times 10^{-16}$	$8.530 \times 10^{-16}$
0.5	$9.500 \times 10^{-16}$	$9.400 \times 10^{-16}$
1.0	$9.830 \times 10^{-16}$	$9.740 \times 10^{-16}$
2.0	$9.960 \times 10^{-16}$	$9.910 \times 10^{-16}$
5.0	$1.004 \times 10^{-15}$	$1.002 \times 10^{-15}$
10.0	$1.007 \times 10^{-15}$	$1.006 \times 10^{-15}$
20.0	$1.008 \times 10^{-15}$	$1.008 \times 10^{-15}$
50.0	$1.009 \times 10^{-15}$	$1.000 \times 10^{-15}$



**Fig. 1.** Campo reducido del líder en función de la corriente ( $a_o = 1$  mm,  $T_o = 1$  000 K). (a) nivel del mar; (b) Topilejo.

## 4. Body

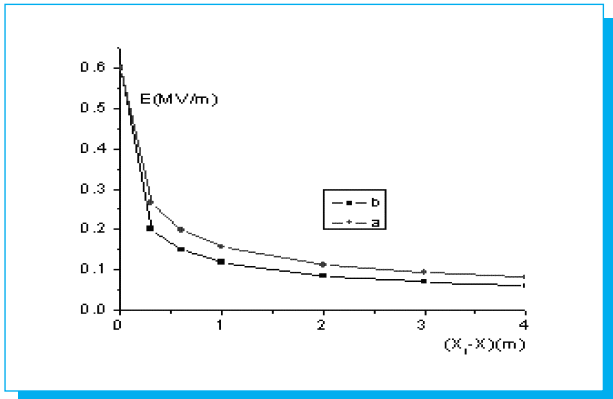
### 4.1 Cálculo y análisis de $E/N$ y $E$

Investigaciones realizadas por el Laboratorio de Pruebas de Equipos y Materiales de la Comisión Federal de Electricidad (LAPEM-CFE) en Topilejo, DF, a 2930 m.s.n.m. [4], indican que la carga asociada por unidad de longitud y velocidad de propagación del líder, no parecen ser influenciadas significativamente por la densidad del aire ( $p = 728$  mbars,  $\delta = 0.7$ ,  $v = 1.5$  cm/s). Considerando  $a_o = 1$  mm y  $T_o = 1$  000 K, en el cuadro 1 se reportan y en la figura 1 se grafican los valores calculados de  $E/N$  en función de la corriente, para Topilejo y a nivel del mar ( $p = 1$  013 mbars).

Similarmente en el cuadro 2 y en la figura 2, se muestran respectivamente los valores calculados y las gráficas de  $E$  en función de la longitud del líder (ecuaciones (12) y (13)) ( $a_o = 1$  mm,  $T_o = 1$  000 K,  $q = 35$   $\mu$ C,  $E/N = 8.91 \times 10^{-16}$  V cm<sup>2</sup> = cte).

**Cuadro 2.** Valores calculados de  $E$ .

$I$ (A)	TOPILEJO $E$ (MV/m)	NIVEL DEL MAR $E$ (MV/m)
0.3	0.201	0.267
1.6	0.149	0.198
1.0	0.118	0.156
2.0	0.084	0.112
3.0	0.069	0.092
4.0	0.060	0.080



**Fig. 2.** Gradiente del líder en función de su longitud ( $a_0 = 1$  mm,  $T_0 = 1000$  K,  $q = 36 \mu\text{C}$ ,  $E/N = 8.91 \times 10^{-16}$  V cm<sup>2</sup>). (a) nivel del mar; (b) Topilejo.

Se observa de la figura 1 que el campo reducido  $E/N$  no es significativamente afectado por la densidad del aire.

El cálculo del gradiente de potencial del líder en función de su longitud, empleando el modelo de Gallimberti, es, de acuerdo con la figura 2, mayor a nivel del mar que a una altitud de 2930 m.

## 5. Conclusiones

Investigaciones previas demostraron que la carga asociada por unidad de longitud y velocidad de propagación del líder, no son influenciadas significativamente por la densidad del aire; con el presente trabajo también es posible afirmar que, similarmente, el campo reducido  $E/N$  no es afectado de manera importante por la densidad del aire ni por variaciones del diámetro y temperatura del canal del líder.

El gradiente de potencial del líder en función de su longitud es 25 % mayor a nivel del mar que a una altura de 2930 m.s.n.m.

## 6. Referencias

- [1] Waters R T, «Electric gradient in the leader channel of the long spark», *3rd. IEEE Int. Conf. on Gas Discharges*, London, UK.
- [2] Les Renardieres Group, «Positive discharges long gaps at Les Renardieres -1975- results and conclusions», *Electra* No. 53 (1975).
- [3] Braginskii S I, «A simple hydrodynamic model of the spark channel», *Soviet Phys JETP*, vol. 34 (1958), pp 1068-1074.
- [4] Pigni *et al.*, «Influence of air density on the impulse strength of external insulation», *IEE Trans.* Vol. PAS-104 (1985) p. 2888.

# INTERNATIONAL MATERIALS RESEARCH CONGRESS

CANCUN, MEXICO  
20-24 AUGUST 2006