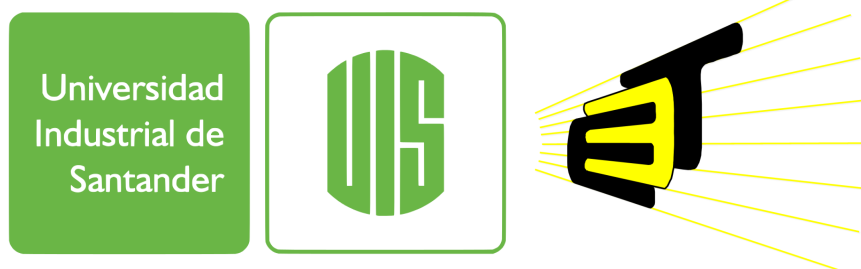


*DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE OZONO GENERADO POR  
PÉRDIDAS CORONA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN*

MARIA ANGÉLICA ANGARITA ACOSTA  
FREDY ALEJANDRO ORDOÑEZ MARQUEZ



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA

2017

***DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE OZONO GENERADO POR  
PÉRDIDAS CORONA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN***

MARIA ANGÉLICA ANGARITA ACOSTA  
FREDY ALEJANDRO ORDOÑEZ MARQUEZ

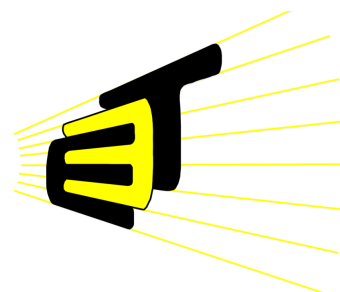
Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Director:

JULIO CÉSAR CHACÓN VELASCO  
M. Sc. en Ingeniería Eléctrica

Codirector:

ERNESTO AGUILERA BERMÚDEZ  
Doctor en Ingeniería



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA

2017

*A mis padres y a mis hermanos quienes han hecho tenga la risa fácil y el corazón generoso.*

***Maria Angélica***

*A mis padres por ayudarme a cumplir uno de mis sueños más anhelados.*

***Fredy Alejandro***

# AGRADECIMIENTOS

---

A Julio César Chacón Velasco, y a Ernesto Aguilera por el excelente acompañamiento durante el desarrollo general del estudio.

A los profesores de la Universidad Industrial de Santander, que de una u otra forma contribuyeron con nuestra formación personal e intelectual.

A mi familia que hizo parte fundamental para nunca desfallecer en el cumplimiento de esta meta.

A mis amigos Alejandra, Cristina, Feisal, Diego, Laura, Wilmer y Ángela, quienes hicieron parte de un apoyo incondicional.

A mi compañero Fredy Alejandro con quien se consolidó un excelente equipo de trabajo, y además de ello una buena amistad.

*Maria Angélica*

Sé que las emociones vividas en este camino fueron compartidas con mis padres Fredy Hernando y Tania Faynori, por lo tanto este logro quiero dedicárselo a ellos que siempre estuvieron presentes llenándome de motivación. Les estaré eternamente agradecido por ayudarme a cumplir uno de mis sueños más anhelados, graduarme como ingeniero UIS. Quiero decirles que son mis modelos a seguir y que los amo con toda mi alma.

Agradezco a mi compañera Maria Angélica por coincidir en el momento justo, y consolidar una bonita amistad.

*Fredy Alejandro*

# Índice general

INTRODUCCIÓN	26
<b>1 GENERALIDADES</b>	<b>27</b>
1.1 EL AIRE Y OTROS GASES EN EL CAMPO ELÉCTRICO . . . . .	27
1.1.1 Formación de iones positivos y negativos . . . . .	28
1.1.2 Constitución del aire . . . . .	28
1.2 FÍSICA BÁSICA DE LA DESCARGA . . . . .	28
1.2.1 Fuentes naturales de ionización . . . . .	29
1.2.2 Ionización y excitación . . . . .	29
1.2.3 Adición y desprendimiento de electrones . . . . .	30
1.2.4 Recombinación . . . . .	31
1.2.5 Coeficientes de ionización, adición y recombinación . . . . .	31
1.2.6 Descargas en campos eléctricos uniformes . . . . .	34
1.2.7 Descargas en campos eléctricos no uniformes . . . . .	36
1.3 DESCARGA CORONA . . . . .	37
1.3.1 Formas de descarga corona . . . . .	37
1.3.1.1 Descarga corona en un conductor con polaridad negativa	38
1.3.1.2 Descarga corona en un conductor con polaridad positiva	39
1.3.1.3 Descarga corona en AC . . . . .	41
<b>2 CORONA EN CONDUCTORES</b>	<b>42</b>
2.1 GRADIENTE DE INICIO DE CORONA . . . . .	42
2.1.1 Gradiente crítico según Peek (gradiente de inicio) . . . . .	43

2.2	FACTORES QUE INFLUYEN EN EL GRADIENTE DE INICIO DE CORONA . . . . .	43
2.2.1	Factor de irregularidad del conductor . . . . .	43
2.2.2	Radio del conductor . . . . .	44
2.2.3	Presión y temperatura (densidad relativa del aire) . . . . .	45
2.3	PÉRDIDAS POR EFECTO CORONA . . . . .	46
2.3.1	Método de Peterson para estimar las pérdidas por efecto corona . . . . .	47
2.3.2	Método de la Electricité de France para estimar las pérdidas por efecto corona . . . . .	48
2.4	EFFECTOS DE LA DESCARGA CORONA . . . . .	49
2.4.1	Interferencia electromagnética . . . . .	50
2.4.2	Ruido audible . . . . .	50
2.4.3	Ozono y $\text{NO}_x$ . . . . .	51
<b>3</b>	<b>GENERACIÓN DE OZONO POR PÉRDIDA CORONA</b>	<b>52</b>
3.1	MECANISMO DE FORMACIÓN DE OZONO . . . . .	53
3.2	ESTUDIO DE LA EMANACIÓN DE OZONO EN LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN POR DESCARGA CORONA A LO LARGO DE LA HISTORIA . . . . .	56
<b>4</b>	<b>REVISIÓN DE ESTUDIOS DE GENERACIÓN DE OZONO POR EFECTO CORONA</b>	<b>60</b>
4.1	MEDICIÓN DE CONCENTRACIÓN DE OZONO GENERADO POR PÉRDIDA CORONA . . . . .	61
4.1.1	Equipo de prueba de laboratorio . . . . .	62
4.1.2	Procedimiento de prueba . . . . .	63
4.1.3	Resultados de la prueba de laboratorio . . . . .	66
4.2	ESTIMACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE OZONO EN LAS CERCANÍAS DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN . . . . .	69
4.2.1	Teoría de dispersión aplicada a líneas de transmisión y generación de efluentes según Roach, Chartier y Dietrich . . . . .	69
4.2.1.1	Viento normal o perpendicular a la línea de transmisión . . . . .	70

4.2.1.2	Viento paralelo a la línea de transmisión . . . . .	72
4.2.1.3	Intensidad de la fuente de efluentes . . . . .	73
4.2.1.4	Coefficientes de dispersión . . . . .	74
4.3	CONCENTRACIÓN DE OZONO EN LAS CERCANÍAS DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN . . . . .	75
4.3.1	Algoritmo propuesto para el desarrollo de la investigación . . . . .	75
<b>5</b>	<b>ANÁLISIS Y RESULTADOS</b>	<b>78</b>
5.1	ANÁLISIS . . . . .	79
5.1.1	Corona bajo condiciones ambientales . . . . .	79
5.1.1.1	Corona bajo condiciones de presión y temperatura (densidad relativa del aire) . . . . .	79
5.1.1.2	Corona bajo condiciones de lluvia . . . . .	79
5.1.1.3	Corona bajo condiciones de humedad . . . . .	80
5.1.2	Pérdida corona y Ozono . . . . .	81
5.1.3	Dispersión de la concentración de ozono en las cercanías de la línea de transmisión . . . . .	83
5.1.3.1	Dispersión de concentración de efluentes bajo un viento paralelo . . . . .	84
5.1.3.2	Dispersión de concentración de efluentes bajo un viento perpendicular . . . . .	93
5.2	RESULTADOS . . . . .	95
5.2.1	Resultados para el CASO UNO . . . . .	99
5.2.2	Resultados para el CASO DOS . . . . .	102
<b>6</b>	<b>OBSERVACIONES</b>	<b>104</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>106</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>108</b>

# Índice de figuras

Figura 1	Ionización intensificada de campo . . . . .	34
Figura 2	Curva característica de la conducción en un gas . . . . .	35
Figura 3	Disposición de cargas en conductor de polaridad negativa . . . . .	38
Figura 4	Modificación del campo y desplazamiento de cargas en torno al conductor negativo . . . . .	39
Figura 5	Disposición de cargas en conductor de polaridad positiva . . . . .	40
Figura 6	Modificación del campo y desplazamiento de cargas en torno al conductor positivo . . . . .	40
Figura 7	Conductor cilíndrico y su relación con su gradiente de superficie . . . . .	45
Figura 8	Función de Peterson entre 0,6 y 2,6 . . . . .	48
Figura 9	Función de Peterson entre 1 y 21 . . . . .	48
Figura 10	Equipo de prueba desarrollado por la OSU . . . . .	62
Figura 11	Circuito de medida desarrollados por la OSU . . . . .	63
Figura 12	Correlación entre la razón de pérdida corona y producción de ozono $P$ , y la pérdida corona en la longitud efectiva $L_e$ . . . . .	67
Figura 13	correlacion entre los valores de la tasa de generación de ozono $W$ , en función de la pérdida de ozono en la longitud efectiva del conductor $L_e$ . . . . .	68
Figura 14	línea de transmisión . . . . .	70
Figura 15	Viento normal o perpendicular a la línea . . . . .	71
Figura 16	Viento paralelo a la línea de transmisión . . . . .	73
Figura 17	Algoritmo . . . . .	77
Figura 18	Curva de pérdida corona para diferentes intensidades de lluvia . . . . .	80

Figura 19	Variación de valores medidos y calculados de pérdida corona bajo humedad realtiva . . . . .	81
Figura 20	Concentración de efluentes debida a una fuente puntual con intensidad de efluentes $Q_1$ . . . . .	85
Figura 21	Concentración de efluentes debida a una fuente puntual con intensidad de efluentes $Q_2$ . . . . .	86
Figura 22	Concentración de efluentes debida a una fuente puntual con intensidad de efluentes $Q_3$ . . . . .	87
Figura 23	Concentración de efluentes debida a tres fuentes puntuales, cada una con intensidades de efluentes $Q_1$ , $Q_2$ y $Q_3$ sometidas a un viento paralelo simultáneamente . . . . .	88
Figura 24	Intensidad de las fuentes de efluentes $Q_1$ , $Q_2$ , y $Q_3$ , cada una generada por dos fuentes puntuales . . . . .	90
Figura 25	Intensidad de las fuentes de efluentes $Q_1$ , $Q_2$ , y $Q_3$ , cada una generada por $N$ fuentes puntuales . . . . .	92
Figura 26	Concentración de efluentes debida a tres fuentes puntuales, cada una con intensidades de efluentes $Q_1$ , $Q_2$ y $Q_3$ sometidas a un viento perpendicular simultáneamente . . . . .	94
Figura 27	Concentración de ozono al nivel del suelo para las líneas A y C en Apple Grove bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en lluvia . . . . .	95
Figura 28	Concentración de ozono al nivel de línea para las líneas A y C en Apple Grove bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en lluvia . . . . .	96
Figura 29	Concentración de ozono al nivel de línea para las líneas A y C en Apple Grove bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima seco . . . . .	96
Figura 30	Concentración de ozono al nivel del suelo para las líneas A y C en Apple Grove bajo viento paralelo e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso . . . . .	97

Figura 31	Concentración de ozono al nivel del suelo para las líneas A y C en Apple Grove bajo viento paralelo e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso . . . . .	97
Figura 32	Aplicativo con interfaz, y sin interfaz . . . . .	111
Figura 33	Ejecución de PC_O3_pkg . . . . .	111
Figura 34	Descompresión de «MCRInstaller» . . . . .	111
Figura 35	Compiler Runtime Installer-MATLAB . . . . .	112
Figura 36	License Agreement - MATLAB . . . . .	112
Figura 37	Confirmation-MATLAB . . . . .	113
Figura 38	Installation Complete- MATLAB . . . . .	113
Figura 39	Ejecución PC_O3 . . . . .	114
Figura 40	Interfaz Gráfica de PC_O3 . . . . .	114
Figura 41	Arreglos para los conductores bajo condiciones de tiempo seco . .	116
Figura 42	Configuración horizontal . . . . .	117
Figura 43	Configuración delta . . . . .	117
Figura 44	Configuración vertical sencilla . . . . .	118
Figura 45	Configuración vertical doble circuito . . . . .	118
Figura 46	Viento paralelo a la línea de transmisión . . . . .	120
Figura 47	Viento perpendicular a la línea de transmisión . . . . .	120
Figura 48	Orden de ingreso de datos en PC_O3 . . . . .	121
Figura 49	Gráficas obtenidas por PC_O3 . . . . .	122
Figura 50	Concentración de ozono al nivel del suelo para caso uno, bajo viento paralelo e inestable, originada por pérdida corona en clima seco .	124
Figura 51	Concentración de ozono al nivel del suelo para caso uno, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima seco . .	124
Figura 52	Concentración de ozono al nivel de línea para caso uno, bajo viento paralelo y inestable, originada por pérdida corona en clima seco .	125
Figura 53	Concentración de ozono al nivel de línea para caso uno, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima seco . .	125

Figura 54 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso uno, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima seco 126

Figura 55 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso uno, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima seco 127

Figura 56 Concentración de ozono al nivel de línea para caso uno, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima seco 127

Figura 57 Concentración de ozono al nivel de línea para caso uno, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima seco 128

Figura 58 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso uno, bajo viento paralelo e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso 129

Figura 59 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso uno, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso 129

Figura 60 Concentración de ozono al nivel de línea para caso uno, bajo viento paralelo y inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso 130

Figura 61 Concentración de ozono al nivel de línea para caso uno, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso 130

Figura 62 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso uno, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso . . . . . 131

Figura 63 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso uno, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso . . . . . 132

Figura 64 Concentración de ozono al nivel de línea para caso uno, bajo viento perpendicular y inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso . . . . . 132

Figura 65 Concentración de ozono al nivel de línea para caso uno, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso . . . . . 133

Figura 66 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso dos, bajo viento paralelo e inestable, originada por pérdida corona en clima seco . 135

Figura 67 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso dos, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima seco . . 135

Figura 68 Concentración de ozono al nivel de línea para caso dos, bajo viento paralelo y inestable, originada por pérdida corona en clima seco . 136

Figura 69 Concentración de ozono al nivel de línea para caso dos, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima seco . . 136

Figura 70 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso dos, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima seco 137

Figura 71 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso dos, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima seco 138

Figura 72 Concentración de ozono al nivel de línea para caso dos, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima seco 138

Figura 73 Concentración de ozono al nivel de línea para caso dos, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima seco 139

Figura 74 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso dos, bajo viento paralelo e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso 140

Figura 75 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso dos, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso 140

Figura 76 Concentración de ozono al nivel de línea para caso dos, bajo viento paralelo y inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso 141

Figura 77 Concentración de ozono al nivel de línea para caso dos, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso 141

Figura 78 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso dos, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso . . . . . 142

Figura 79 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso dos, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso . . . . . 143

Figura 80 Concentración de ozono al nivel de línea para caso dos, bajo viento perpendicular y inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso . . . . . 143

Figura 81	Concentración de ozono al nivel de línea para caso dos, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso . . . . .	144
Figura 82	Concentración de ozono al nivel del suelo para caso tres, bajo viento paralelo e inestable, originada por pérdida corona en clima seco . .	148
Figura 83	Concentración de ozono al nivel del suelo para caso tres, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima seco . .	148
Figura 84	Concentración de ozono al nivel de línea para caso tres, bajo viento paralelo y inestable, originada por pérdida corona en clima seco . .	149
Figura 85	Concentración de ozono al nivel de línea para caso tres, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima seco . .	149
Figura 86	Concentración de ozono al nivel del suelo para caso tres, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima seco	150
Figura 87	Concentración de ozono al nivel del suelo para caso tres, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima seco	150
Figura 88	Concentración de ozono al nivel de línea para caso tres, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima seco	151
Figura 89	Concentración de ozono al nivel de línea para caso tres, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima seco	151
Figura 90	Concentración de ozono al nivel del suelo para caso tres, bajo viento paralelo e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso	152
Figura 91	Concentración de ozono al nivel del suelo para caso tres, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso	152
Figura 92	Concentración de ozono al nivel de línea para caso tres, bajo viento paralelo y inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso	153
Figura 93	Concentración de ozono al nivel de línea para caso tres, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso	153
Figura 94	Concentración de ozono al nivel del suelo para caso tres, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso . . . . .	154

Figura 95	Concentración de ozono al nivel del suelo para caso tres, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso . . . . .	154
Figura 96	Concentración de ozono al nivel de línea para caso tres, bajo viento perpendicular y inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso . . . . .	155
Figura 97	Concentración de ozono al nivel de línea para caso tres, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso . . . . .	155
Figura 98	Concentración de ozono al nivel del suelo para caso cuatro, bajo viento paralelo e inestable, originada por pérdida corona en clima seco . . . . .	159
Figura 99	Concentración de ozono al nivel del suelo para caso cuatro, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima seco	159
Figura 100	Concentración de ozono al nivel de línea para caso cuatro, bajo viento paralelo y inestable, originada por pérdida corona en clima seco . . . . .	160
Figura 101	Concentración de ozono al nivel de línea para caso cuatro, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima seco	160
Figura 102	Concentración de ozono al nivel del suelo para caso cuatro, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima seco . . . . .	161
Figura 103	Concentración de ozono al nivel del suelo para caso cuatro, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima seco . . . . .	161
Figura 104	Concentración de ozono al nivel de línea para caso cuatro, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima seco . . . . .	162

Figura 105 Concentración de ozono al nivel de línea para caso cuatro, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima seco . . . . .	162
Figura 106 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso cuatro, bajo viento paralelo e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso . . . . .	163
Figura 107 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso cuatro, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso . . . . .	163
Figura 108 Concentración de ozono al nivel de línea para caso cuatro, bajo viento paralelo y inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso . . . . .	164
Figura 109 Concentración de ozono al nivel de línea para caso cuatro, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso . . . . .	164
Figura 110 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso cuatro, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso . . . . .	165
Figura 111 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso cuatro, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso . . . . .	165
Figura 112 Concentración de ozono al nivel de línea para caso cuatro, bajo viento perpendicular y inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso . . . . .	166
Figura 113 Concentración de ozono al nivel de línea para caso cuatro, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso . . . . .	166
Figura 114 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso cinco, bajo viento paralelo e inestable, originada por pérdida corona en clima seco . . . . .	170

Figura 115 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso cinco, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima seco 170

Figura 116 Concentración de ozono al nivel de línea para caso cinco, bajo viento paralelo y inestable, originada por pérdida corona en clima seco . 171

Figura 117 Concentración de ozono al nivel de línea para caso cinco, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima seco . . 171

Figura 118 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso cinco, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima seco . . . . . 172

Figura 119 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso cinco, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima seco . . . . . 172

Figura 120 Concentración de ozono al nivel de línea para caso cinco, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima seco 173

Figura 121 Concentración de ozono al nivel de línea para caso cinco, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima seco 173

Figura 122 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso cinco, bajo viento paralelo e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso . . . . . 174

Figura 123 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso cinco, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso . . . . . 174

Figura 124 Concentración de ozono al nivel de línea para caso cinco, bajo viento paralelo y inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso 175

Figura 125 Concentración de ozono al nivel de línea para caso cinco, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso 175

Figura 126 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso cinco, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso . . . . . 176

Figura 127 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso cinco, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso . . . . .	176
Figura 128 Concentración de ozono al nivel de línea para caso cinco, bajo viento perpendicular y inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso . . . . .	177
Figura 129 Concentración de ozono al nivel de línea para caso cinco, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso . . . . .	177
Figura 130 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso seis, bajo viento paralelo e inestable, originada por pérdida corona en clima seco . . . . .	181
Figura 131 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso seis, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima seco . . . . .	181
Figura 132 Concentración de ozono al nivel de línea para caso seis, bajo viento paralelo y inestable, originada por pérdida corona en clima seco . . . . .	182
Figura 133 Concentración de ozono al nivel de línea para caso seis, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima seco . . . . .	182
Figura 134 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso seis, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima seco . . . . .	183
Figura 135 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso seis, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima seco . . . . .	183
Figura 136 Concentración de ozono al nivel de línea para caso seis, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima seco . . . . .	184
Figura 137 Concentración de ozono al nivel de línea para caso seis, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima seco . . . . .	184
Figura 138 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso seis, bajo viento paralelo e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso . . . . .	185
Figura 139 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso seis, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso . . . . .	185

Figura 140 Concentración de ozono al nivel de línea para caso seis, bajo viento paralelo y inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso	186
Figura 141 Concentración de ozono al nivel de línea para caso seis, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso	186
Figura 142 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso seis, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso	187
Figura 143 Concentración de ozono al nivel del suelo para caso seis, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso	187
Figura 144 Concentración de ozono al nivel de línea para caso seis, bajo viento perpendicular y inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso	188
Figura 145 Concentración de ozono al nivel de línea para caso seis, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso	188

# Índice de tablas

Tabla 1	Factor de irregularidad del conductor . . . . .	44
Tabla 2	Conductores empleados en las pruebas de laboratorio . . . . .	64
Tabla 3	Valores constantes tomados para la investigación . . . . .	83
Tabla 4	CASO UNO . . . . .	98
Tabla 5	CASO DOS . . . . .	98
Tabla 6	Resumen de valores de concentración de ozono máximo par el caso uno . . . . .	101
Tabla 7	Resumen de valores de concentración de ozono máximo par el caso dos . . . . .	103
Tabla 8	Arreglos para los conductores bajo condiciones de tiempo seco . .	116
Tabla 9	Ubicación de conductores en la torre de la línea (casos base) . . .	119
Tabla 10	Datos de concentración de ozono para el caso uno, bajo viento paralelo por corona en clima seco, ca . . . . .	123
Tabla 11	Datos de concentración de ozono para el caso uno, bajo viento perpendicular por corona en clima seco . . . . .	126
Tabla 12	Datos de concentración de ozono para el caso uno, bajo viento paralelo por corona en clima lluvioso . . . . .	128
Tabla 13	Datos de concentración de ozono para el caso uno, bajo viento perpendicular por corona en clima lluvioso . . . . .	131
Tabla 14	Datos de concentración de ozono para el caso dos, bajo viento paralelo por corona en clima seco . . . . .	134

Tabla 15	Datos de concentración de ozono bajo viento perpendicular por corona en clima seco . . . . .	137
Tabla 16	Datos de concentración de ozono bajo viento paralelo por corona en clima lluvioso . . . . .	139
Tabla 17	Datos de concentración de ozono bajo viento perpendicular por corona en clima lluvioso . . . . .	142
Tabla 18	CASO TRES . . . . .	146
Tabla 19	Resumen de valores de concentración de ozono máximo par el caso tres . . . . .	147
Tabla 20	CASO CUATRO . . . . .	157
Tabla 21	Resumen de valores de concentración de ozono máximo par el caso cuatro . . . . .	158
Tabla 22	CASO CINCO . . . . .	168
Tabla 23	Resumen de valores de concentración de ozono máximo par el caso cinco . . . . .	169
Tabla 24	CASO SEIS . . . . .	179
Tabla 25	Resumen de valores de concentración de ozono máximo par el caso seis . . . . .	180

# RESUMEN

---

---

**TÍTULO:** DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE OZONO GENERADO POR PÉRDIDAS CORONA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.\*

**AUTORES:** MARIA ANGÉLICA ANGARITA ACOSTA  
FREDY ALEJANDRO ORDOÑEZ MARQUEZ\*\*

**PALABRAS CLAVE:** DESCARGA CORONA, PÉRDIDA CORONA, OZONO

## DESCRIPTION:

En las líneas de transmisión , la descarga corona hace posible la generación de ozono, puesto que la energía involucrada en los procesos de ionización de moléculas en el aire, permite disociar el oxígeno molecular, originando efluentes gaseosos, tales como el ozono. Es posible por lo anterior, que se hace imprescindible la estimación de ozono generado en dicha línea, y verificar que este coincida con las cifras estipuladas en la correspondiente normativa ambiental, debido a que, el ozono tiende a ser un gas tóxico cuando el nivel de concentración del mismo es elevado. Consecuentemente, este dossier se enfoca en estimar el nivel de concentración de ozono en dicha línea, bajo los efectos del viento a una determinada velocidad y dirección del mismo. Para ello, se requirió del desarrollo de una herramienta computacional que permitiera mostrar lo anterior mencionado.

Los resultados extractados de la herramienta computacional, así como el análisis de cada uno de los mismos, también se encuentran consignados; dichos resultados fueron obtenidos para condiciones ideales (condiciones de laboratorio). Cualquier efecto producto del cambio en estas condiciones, será expuesto en estudios futuros.

---

\*Trabajo de grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director M. Sc. Julio César Chacón Velasco

# ABSTRACT

---

---

**TITLE:** DETERMINATION OF OZONE LEVEL GENERATED BY CORONA LOSS ON TRANSMISSION LINES.\*

**AUTHORS:** MARIA ANGÉLICA ANGARITA ACOSTA  
FREDY ALEJANDRO ORDOÑEZ MARQUEZ\*\*

**KEY WORDS:** CORONA DISCHARGE, CORONA LOSS, OZONE

**DESCRIPTION:**

In the transmission lines, the corona discharge makes possible the generation of ozone, since the energy involved in the ionization processes of molecules in the air, allows to dissociate the molecular oxygen, originating gaseous effluents, such as ozone. Therefore, it is essential to estimate the level of ozone generated in this line, and verify that it coincides with the figures stipulated in the corresponding environmental regulations, because, ozone tends to be a toxic gas when the level concentration is high. Consequently, this dossier focuses on estimating the level of ozone concentration in the vicinity of a transmission line, under the effect of various weather conditions (rainy climate, dry climate). Along with this, to show the profiles of concentration of ozone in this line, under the effects of the wind at a certain speed and direction of the same. For this, it was required the development of a computational tool that allowed to show the above mentioned.

The results extracted from the computational tool, as well as the analysis of each one of them, are also recorded; These results were obtained for ideal conditions (laboratory conditions). Any effect resulting from the change in these conditions will be discussed in future studies.

---

\*Degree Project

\*\*Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Electrical Engineering, Electronics and Telecommunications. Director M. Sc. Julio César Chacón Velasco

# INTRODUCCIÓN

---

El efecto corona es un fenómeno de descarga, que se presenta cuando la intensidad de campo eléctrico generada por la diferencia de potencial entre los conductores de una línea de transmisión excede el valor de la rigidez dieléctrica del aire. En presencia de este efecto, las moléculas que componen el aire, tienden a ionizarse, es decir, a ganar o perder electrones, convirtiéndose en cargas eléctricas no neutras que pueden moverse libremente, chocando con los demás átomos neutros presentes en el aire, produciendo energía que da origen a nuevas partículas.

Cada uno de los procesos de ionización involucrados en la generación de descargas corona requieren de un gasto de energía. En su mayoría, dicha energía es convertida en energía térmica, que calienta el aire en las cercanías de los conductores. Una pequeña proporción de dicha energía se convierte en radiación electromagnética (emisión de luz), en energía acústica, y en energía electroquímica necesaria para originar efluentes gaseosos como el ozono. Resulta entonces, trascendental el estudio de generación de ozono originado por descargas corona, puesto que a ciertos niveles, dicho ozono es considerado tóxico.

Este trabajo está enfocado en la estimación de ozono generado a partir de las pérdidas corona presentes en una línea de transmisión, bajo condiciones de clima seco y de clima lluvioso. De igual manera, en el modelado de perfiles de ozono a lo largo de la línea, bajo la acción del viento. Consecuentemente, se requiere el desarrollo de una herramienta computacional que muestre dichos perfiles, bajo diferentes condiciones de clima, y bajo distintas velocidades y direcciones de viento. De esta manera, se puede estimar el nivel de ozono generado por corona en las cercanías de una línea, y verificar que dicho nivel no sobrepase los valores estipulados en la normativa ambiental. Los resultados, serán mostrados para condiciones de laboratorio; cualquier variación en estas condiciones, se verá expuesta en estudios futuros.

---

# 1

## GENERALIDADES

---

### SECCIÓN 1.1

#### EL AIRE Y OTROS GASES EN EL CAMPO ELÉCTRICO

Según el modelo atómico de Bohr-Sommerfield, un átomo está conformado por un núcleo, el cual se encuentra cargado positivamente (positrones y neutrones); y, por una cantidad determinada de órbitas, ubicadas alrededor del núcleo, en las que giran los electrones. Un átomo neutro, posee el mismo número de electrones y de cargas elementales positivas ubicadas en el núcleo, compensándose así contra efectos exteriores. Dicho número, corresponde al número de orden del elemento en el sistema periódico; por ejemplo, para el átomo de hidrógeno, este número toma un valor de 1, mientras que para el átomo de oxígeno un valor de 8, y para el argón de 18.

### 1.1.1 Formación de iones positivos y negativos

El átomo o molécula neutra, existe el mismo número de protones y electrones. Al suministrar cierta cantidad de energía, es posible desvincular uno o más electrones de su ligadura molecular, formándose un *ión positivo*. De igual manera, se consigue la adición de electrones libres mediante ionización al átomo neutro, consiguiendo la formación de un *ión negativo*.

### 1.1.2 Constitución del aire

El aire se encuentra constituido, en las cercanías de la superficie terrestre por un volumen entremezclado de 71,08% de moléculas de nitrógeno, 20,9% de oxígeno, 0,9% de argón, 0,03% de  $CO_2$ , junto con otras cantidades mínimas de ciertos gases nobles, ácido carbónico, y ozono; haciendo parte de ésta mezcla, también, se encuentran vapor de agua, iones positivos y negativos de los gases mencionados anteriormente, y electrones libres. En altas tensiones, bajo condiciones normales, en las que contiene muy pocas cargas libres, el aire es considerado un importante material aislante, ya sea solo o mezclado con alguna sustancia sólida.<sup>1</sup>

El aire, al ser sometido a una energía externa o un esfuerzo eléctrico, puede convertirse en CONDUCTOR. Esto da lugar a dos tipos de descargas: descarga dependiente, y descarga independiente.

## SECCIÓN 1.2

# FÍSICA BÁSICA DE LA DESCARGA

En los diseños de líneas de transmisión, la presencia de cierta distancia entre conductores (mucho mayor que el radio del conductor), junto a la existencia de una diferencia de potencial entre las mismas, genera una intensidad de campo eléctrico  $E$ . Cuando éste campo eléctrico, supera el valor de la rigidez dieléctrica del aire, 30 [ $kV/cm$ ] a 25 [°C], y

---

<sup>1</sup>ROTH, Arnold. Técnica de la alta tensión. Barcelona: Labor, 1966.

760 [mmHg], el aire consigue ionizarse, convirtiéndose en un conductor ocasionando una descarga<sup>2</sup>.

### 1.2.1 Fuentes naturales de ionización

El aire en la atmósfera, bajo condiciones normales es un aislante, pero puede dejar de serlo debido a varios fenómenos que ocurren en la naturaleza que originan partículas conductoras. Un ejemplo de estos fenómenos, es la formación de rayos Gamma por medio de procesos radiactivos, que permiten que el suelo tenga suficiente energía para ionizar moléculas eléctricamente neutras, originando electrones libres e iones positivos.

Los electrones libres originados a partir de procesos naturales de ionización, tienden a unirse rápidamente (en menos de un microsegundo) a la molécula de oxígeno en el aire, formando de esta manera, iones negativos; debido a esto, el aire contiene mayor cantidad de iones positivos que negativos.<sup>3</sup>

### 1.2.2 Ionización y excitación

Al suministrar una energía suficientemente alta a un átomo neutro, el electrón ubicado en el orbital más externo del átomo puede pasar al siguiente nivel de energía, y, bajo estas condiciones, se dice que el átomo se encuentra *excitado*. Un átomo excitado consigue regresar rápidamente a su estado energético natural (en menos de  $10^{-8}$  segundos), liberando el exceso de energía en forma de fotón.

Si la energía suministrada al átomo es mucho mayor que la inicialmente mencionada, el electrón puede saltar tan lejos de su órbita que no podrá regresar a su órbita original, o incluso al átomo. En éste caso, se dice que el átomo se encuentra *ionizado*.

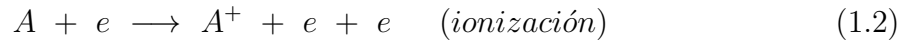
Los procesos de excitación e ionización, se muestran por las siguientes ecuaciones simbólicas:

---

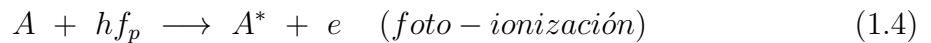
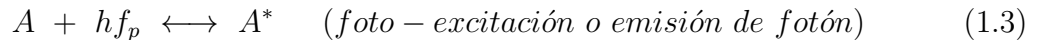
<sup>2</sup>RUGELES, Julio; CHACÓN, Julio. Laboratorio de alta tensión-manual de prácticas. Bucaramanga: UIS, 2013.

<sup>3</sup>EPRI AC transmission line reference book 200 kV and above. Tercera Edición, 2005.

Por impacto de electrones



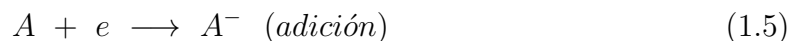
Por fotón



Las ecuaciones 1.1 y 1.2 muestran que un electrón  $e$ , colisiona con el átomo  $A$  con suficiente energía que da lugar a un átomo excitado, o a un ión positivo  $A^+$  junto a otro electrón libre  $e$ . La ecuación 1.3 indica el proceso de fotoexcitación, así como también el proceso inverso de fotoemisión de un átomo excitado; mientras que la ecuación 1.4 explica el proceso de fotoionización.<sup>4</sup>

### 1.2.3 Adición y desprendimiento de electrones

En algunos gases, conocidos como *gases electronegativos*, tales como el oxígeno y el cloro, la órbita más externa no se encuentra completamente llena en estado neutro, dejando uno o dos lugares libres para alojar electrones libres. Sin embargo, a pesar de que los átomos del gas están eléctricamente neutros, ellos poseen una *afinidad* para capturar electrones libres y convertirse en iones negativos estables. La formación de iones negativos por adición de electrones puede ilustrarse por medio de la siguiente ecuación,



Existe un proceso inverso, denominado *desprendimiento* de electrones, en el cual un

---

<sup>4</sup>Ibíd., p. 83.

ión negativo debe ceder un electrón para volver a su estado neutro. Una determinada cantidad de energía es requerida para ocasionar el desprendimiento de electrones, denominada ***afinidad electrónica***. En el aire, el oxígeno es un gas electronegativo, por consiguiente permite la formación de iones negativos.<sup>5</sup>

#### 1.2.4 Recombinación

La coexistencia de partículas cargadas positiva y negativamente en un gas, permite el proceso de recombinación, en el cual la neutralización de la carga toma lugar. El proceso se representa mediante la siguiente ecuación,



en la que  $A^+$  es el ión positivo, y  $B^-$  puede ser un electrón, o un ión negativo. En el proceso mostrado, la emisión de un fotón es generada, y ocurre solamente con un electrón, lo que es conocido como ***recombinación radiactiva***, y puede ser considerada en algunos casos, como el proceso inverso a la fotoionización.<sup>6</sup>

#### 1.2.5 Coeficientes de ionización, adición y recombinación

Los procesos de ionización descritos anteriormente juegan un papel importante en las diferentes fases del desarrollo de la descarga en el gas, en las que se incluyen corona y chispa. Un proceso fundamental involucrado en el inicio y desarrollo de descargas es la ionización de átomos y moléculas por medio de electrones con alta energía.

El electrón, en ausencia de cualquier campo eléctrico aplicado, se mueve aleatoriamente, colisionando de esta manera con moléculas de gas. Por el contrario, en presencia de un campo eléctrico, el electrón adquiere una velocidad en dirección de dicho campo.

Townsend estableció un coeficiente llamado ***primer coeficiente de ionización***  $\alpha$ , el cual representa el número de pares ión-electrón generados en un gas por un solo electrón, que se mueven atravesando una unidad de distancia, en dirección del movimiento del

---

<sup>5</sup>Ibíd., p. 83

<sup>6</sup>Ibíd., p. 83

electrón. El número de electrones adicionales originados por ionización se puede expresar matemáticamente por medio de la ecuación 1.7.<sup>7</sup>

$$dn = n(x) \alpha dx \quad (1.7)$$

donde,

$dn$  : electrones originados por ionización

$n(x)$  : número de electrones en presencia de un campo aplicado

$dx$  : distancia recorrida por los electrones  $n(x)$  en un gas, en dirección al campo

$\alpha$  : primer coeficiente de ionización Towsend

Partiendo de un número inicial de electrones  $n_0$ , cuando  $x = 0$ , y llevando a cabo una integral a lo largo de la distancia recorrida por los mismos, se tiene que

$$\ln \left( \frac{n}{n_0} \right) = \int_0^x \alpha dx,$$

el primer coeficiente de Towsend varía como una función del campo eléctrico, el cual para un campo uniforme se considera constante (ecuación 1.8), y para un campo no uniforme, además, varía con el valor de  $x$  (ecuación 1.9), teniendo como resultado de la integral:<sup>8</sup>

$$n = n_0 e^{\alpha x} \quad (\text{para campos uniformes}) \quad (1.8)$$

$$n = n_0 e^{\int_0^x \alpha dx} \quad (\text{para campos no uniformes}) \quad (1.9)$$

De modo similar, en el proceso de adición de electrones, existe el coeficiente de adición  $\eta$ , definido como la probabilidad de que un electrón libre se adicione por sí mismo a un átomo neutro, para formar un ión negativo cuando se mueve una unidad de distancia a través del gas en la dirección del campo aplicado. Análogamente a las ecuaciones 1.8 y 1.9, aparecen las siguientes ecuaciones que muestran el número de electrones resultantes de la adición de electrones bajo campos uniformes y no uniformes.

<sup>7</sup> ZAENGL, W.S.; KUFFEL, E; and KUFFEL, J. High voltage engineering - fundamentals. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.

<sup>8</sup> *Ibíd.*, p. 296

$$n = n_0 e^{-\eta x} \quad (\text{para campos uniformes}) \quad (1.10)$$

$$n = n_0 e^{\int_0^x -\eta dx} \quad (\text{para campos no uniformes}) \quad (1.11)$$

Si se presentan los dos casos mencionados anteriormente, se considera  $(\alpha - \eta)$  como el coeficiente efectivo de ionización, y el número de electrones se estima mediante las ecuaciones 1.12 y 1.13.

$$n = n_0 e^{(\alpha - \eta)x} \quad (\text{para campos uniformes}) \quad (1.12)$$

$$n = n_0 e^{\int_0^x (\alpha - \eta) dx} \quad (\text{para campos no uniformes}) \quad (1.13)$$

El límite de ionización se da cuando  $\alpha = \eta$ , siendo la probabilidad de ionización igual a la probabilidad de adición de electrones.

Por último, el coeficiente de recombinación, se define como el número de eventos de recombinación por unidad de tiempo y por unidad de densidad de iones positivos y negativos. La tasa de disminución de iones positivos y negativos está dada por,

$$\frac{dn_+}{dt} = \frac{dn_-}{dt} = -R_i n_+ n_- \quad (1.14)$$

donde,

$n_+$  : concentración positiva de iones en el lugar de interés del gas

$n_-$  : concentración negativa de iones en el lugar de interés del gas

$R_i$  : coeficiente de recombinación

Los coeficientes definidos,  $\alpha$ ,  $\eta$ , y  $R_i$ , toman una gran importancia, debido a que son funciones de  $E/p$ , es decir, del campo eléctrico  $E$ , y de la presión a la que está sometida el gas,  $p$ .<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup>Ibíd., p.297

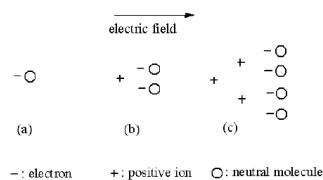
### 1.2.6 Descargas en campos eléctricos uniformes

En el proceso de descripción de la física de la descarga, es importante saber como ocurre una descarga en un espacio de aire bajo un campo eléctrico uniforme y una presión atmosférica determinada. Considerando un sistema de electrodos a una distancia  $d$  de separación, y una tensión aplicada  $V$  entre ellos, el campo eléctrico uniforme que se presenta es  $E = V/d$ .

Por medio de procesos naturales de ionización, o iluminación ultravioleta, se logra la obtención de electrones libres en la cercanía de la superficie del cátodo. Dichos electrones, consiguen ser acelerados desde el cátodo hacia el ánodo, debido a la presencia del campo eléctrico en el vacío. Al encontrarse acelerados, colisionan con moléculas neutras, impartiendoles la mayor parte de dicha energía.

Las moléculas presentes en el aire se ionizan cuando el campo eléctrico es suficientemente alto, originándose nuevos pares ión-positivo-electrón, que a su vez adquieren energía, dando lugar a un proceso denominado **ionización intensificada de campo** (figura 1). Los electrones resultantes de éste proceso, se suman fácilmente a moléculas neutras, formando iones negativos.<sup>10</sup>

Figura 1: Ionización intensificada de campo



Fuente: EPRI AC Transmission Line Reference Book –200kV and Above. Tercera edición, 2005. 85p

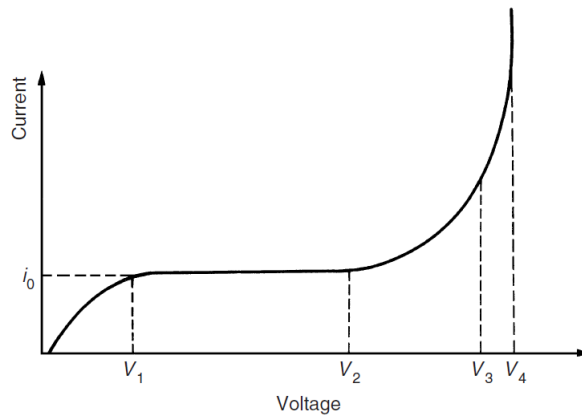
Townsend se encargó de estudiar la variación de corriente medida en un gas entre electrodos de placas paralelas, como función de la tensión aplicada a los mismos. En primera

<sup>10</sup>SABAJ SAAVEDRA, Rodrigo Fernando. Implementación de un modelo a escala para el estudio del efecto corona y medición de sus pérdidas según diversas condiciones y calidad del aire. Santiago: Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2015.

medida, la corriente toma valores proporcionales a la tensión aplicada, hasta tomar el valor de  $i_0$  (corriente de saturación). Al incrementar la tensión a valores críticos, la corriente se hace mayor que la corriente de saturación, aumentando de modo exponencial. El comportamiento de la corriente se muestra en la Figura 2, y la expresión matemática que arroja su valor en la ecuación 1.15.<sup>11</sup>

$$i = i_0 e^{\alpha d} \quad (1.15)$$

Figura 2: Curva característica de la conducción en un gas



Fuente: KUFFEL, E. y ZAENGL, W.S. High voltage engineering - fundamentals. 1 ed. London: Pergamon Press, 1984.

Después de la primera avalancha de electrones, se incrementa la posibilidad de que se originen nuevos electrones libres, dando lugar a una cantidad mucho mayor de nuevas avalanchas. Para dicho caso, Townsend plantea un segundo coeficiente  $\gamma$ , el cual describe el número de electrones secundarios originados y el modo en que se desarrollan las avalanchas posteriores<sup>12</sup> [?]. De esta manera, teniendo en cuenta ambos coeficientes, el comportamiento de la corriente en función de la tensión aplicada a los electrodos, se expresa mediante la ecuación 1.16 El incremento de éste valor de corriente, se presenta

---

<sup>11</sup>ZAENGL. Op. cit., p. 296

<sup>12</sup>RUGELES, Julio. Conceptos básicos en técnicas de la alta tensión. Bucaramanga: UIS, 1984.

hasta la existencia de una descarga auto-sostenida<sup>13</sup> .

$$i = i_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (1.16)$$

En una descarga auto-sostenida, la corriente toma valores muy grandes, por lo cual, matemáticamente debe cumplirse para la ecuación 1.16, que,

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (1.17)$$

Teniendo en cuenta el coeficiente efectivo de ionización  $(\alpha - \eta)$ , se tiene que:

$$\frac{\alpha \gamma}{\alpha - \eta} [e^{(\alpha - \eta)d} - 1] = 1 \quad (1.18)$$

Lo que puede aproximarse a

$$\gamma e^{(\alpha - \eta)d} = \gamma e^{\bar{\alpha}d} = 1 \quad (1.19)$$

siempre que

$$e^{\bar{\alpha}d} \gg 1 \text{ y } \alpha \gg \eta$$

donde  $\bar{\alpha} = \alpha - \eta$ , representa el coeficiente de ionización efectivo .<sup>14</sup>

### 1.2.7 Descargas en campos eléctricos no uniformes

Bajo campos no uniformes, la descarga consigue presentarse en las zonas en las que dicho campo tiene intensidades más altas, dando lugar a una descarga, conocida como ***descarga parcial***. Esta descarga también se presenta cuando la dimensión de los electrodos es mucho menor que la distancia que los separa. Igual que en el caso de campos uniformes, al incrementar el valor de la tensión aplicada a los electrodos, el proceso de descarga toma las mismas etapas, en las que la ionización y las avalanchas

<sup>13</sup>ZAENGL, W.S.; KUFFEL, E; and KUFFEL, J. High voltage engineering - fundamentals. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.

<sup>14</sup>ZAENGL. Op. cit., p. 298

de electrones toman lugar. Sin embargo, la descarga auto-sostenida solo tiene lugar en cierta parte de la brecha, por lo cual la descarga toma el nombre de parcial o descarga corona.

En campos no uniformes, las avalanchas pueden iniciarse en el cátodo o en el ánodo, dependiendo de quién se encuentre más estresado. Cuando el electrodo más estresado es el cátodo, la avalancha se inicia en él, pero esta se desarrolla en la dirección de disminución de campo eléctrico; en el caso contrario, en que el electrodo más estresado es el ánodo, se inicia la avalancha en él, pero en este caso se desarrolla en la dirección de aumento de campo eléctrico.

#### SECCIÓN 1.3

### DESCARGA CORONA

La descarga corona, es una forma de descarga parcial que se presenta en gases. Las manifestaciones físicas de dicha descarga, dependen significativamente de varios aspectos, entre los cuales se encuentran, la geometría de los electrodos, la magnitud y distribución del campo eléctrico cercano al electrodo altamente estresado, y, la composición del medio que se encuentra entre los electrodos.

Los electrones libres al moverse supremamente rápido, se convierten en la principal fuente de ionización y excitación de moléculas en una descarga corona. Por el contrario, los iones de polaridad positiva y negativa, creados por medio de las avalanchas sucesivas de electrones, se mueven mucho más lento, por lo que se acumulan en el espacio formando nubes de carga. La aparición de nubes de carga, dan lugar a la alteración de distribución de campo eléctrico y por consiguiente al desarrollo de procesos de descarga corona de diferentes formas.

#### 1.3.1 Formas de descarga corona

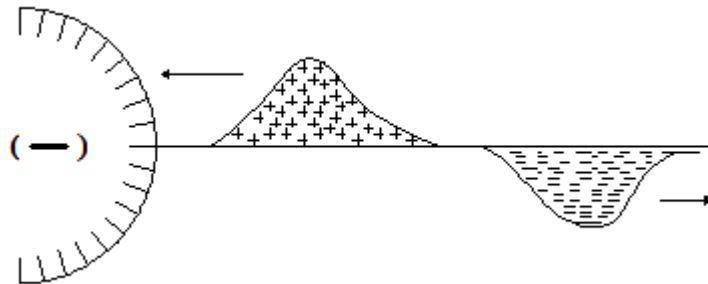
Para describir las diferentes formas de descarga corona, se hace necesario ver este fenómeno en una línea aérea de transmisión. En dicha línea, la descarga toma lugar

en el conductor cilíndrico ubicado cerca a un plano de tierra.

#### 1.3.1.1. Descarga corona en un conductor con polaridad negativa

En un conductor con polaridad negativa, el campo eléctrico se hace más intenso en torno a él. Un electrón libre en esta zona es acelerado, moviéndose en la dirección de disminución de campo, creando una avalancha. Algunos de los fotones originados a partir de la primera avalancha, golpean al conductor, liberando electrones, que a su vez ocasionan otras avalanchas. El número de electrones se multiplica rápidamente; éstos dejan atrás a los iones positivos generados, para finalmente ligarse a moléculas neutras, formando iones negativos.<sup>15</sup>

Figura 3: Disposición de cargas en conductor de polaridad negativa



Fuente: SABAJ SAAVEDRA, Rodrigo Fernando. Implementación de un modelo a escala para el estudio del efecto corona y medición de sus pérdidas según diversas condiciones y calidad del aire. Santiago: Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2015.

El campo eléctrico se hace mayor en las cercanías del conductor, debido a la presencia de la carga espacial positiva, la cual permite que los electrones libres se recombinen con ellas, antes de multiplicarse. Con el movimiento de la carga positiva hacia el conductor, la ionización en la superficie del mismo cesa cuando el campo eléctrico disminuye a valores por debajo del valor inicial, por neutralización de ésta carga, y por la presencia

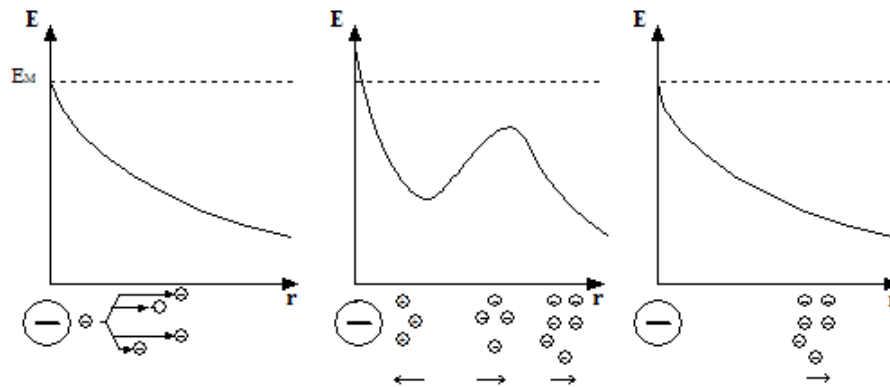
---

<sup>15</sup>SABAJ SAAVEDRA, Rodrigo Fernando. Implementación de un modelo a escala para el estudio del efecto corona y medición de sus pérdidas según diversas condiciones y calidad del aire. Santiago: Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2015.

de carga negativa mucho más lejos. Al alejarse la carga negativa por efecto del campo, se retorna a las condiciones iniciales, haciéndose éste proceso repetitivo.

Debido a la velocidad de formación de la avalancha, se produce un pulso de corriente, viéndose una luminosidad continua.<sup>16</sup>

Figura 4: Modificación del campo y desplazamiento de cargas en torno al conductor negativo



Fuente: SABAJ SAAVEDRA, Rodrigo Fernando. Implementación de un modelo a escala para el estudio del efecto corona y medición de sus pérdidas según diversas condiciones y calidad del aire. Santiago: Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2015

#### 1.3.1.2. Descarga corona en un conductor con polaridad positiva

En un conductor positivo, la avalancha se origina en el aire en torno al conductor por medio de electrones libres creados por procesos naturales, y se desarrolla en dirección a él. Para obtener una descarga autosostenida, es necesaria la creación de electrones secundarios, que en este caso son originados por fotoionización.<sup>17</sup>

Los nuevos electrones, al igual que en el caso de un conductor negativo, se suman a moléculas neutras, para formar iones negativos; iones de ambas polaridades crean nubes de carga casi inmóviles en comparación con los electrones, quienes se mueven rápidamente. Estas nubes de carga, actúan como prolongación del conductor, dando

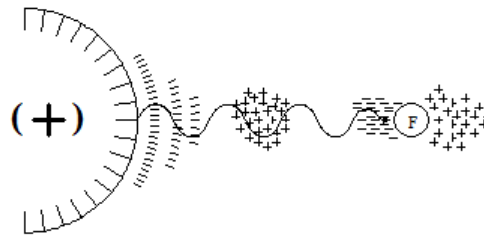
---

<sup>16</sup>Ibíd., p. 6.

<sup>17</sup>Ibíd., p. 7.

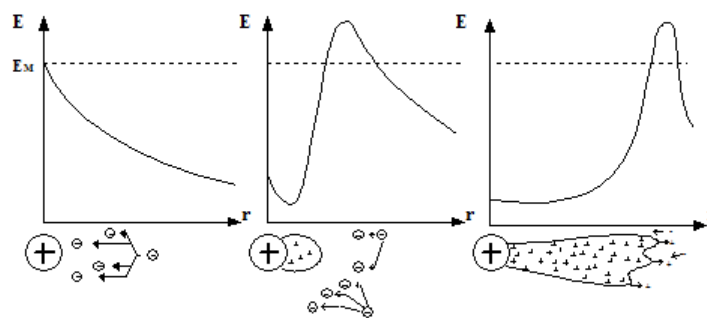
lugar a un canal ionizado o *canal streamer*. Las nuevas ionizaciones son ocasionadas en el extremo de dicho canal. En la zona en la que la intensidad de campo eléctrico es baja, la ionización se detiene. Y, las cargas espaciales constituidas por iones, se mueven debido al campo eléctrico, restableciéndose las condiciones iniciales, y el proceso se repite.<sup>18</sup>

Figura 5: Disposición de cargas en conductor de polaridad positiva



Fuente: SABAJ SAAVEDRA, Rodrigo Fernando. Implementación de un modelo a escala para el estudio del efecto corona y medición de sus pérdidas según diversas condiciones y calidad del aire. Santiago: Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2015

Figura 6: Modificación del campo y desplazamiento de cargas en torno al conductor positivo



Fuente: SABAJ SAAVEDRA, Rodrigo Fernando. Implementación de un modelo a escala para el estudio del efecto corona y medición de sus pérdidas según diversas condiciones y calidad del aire. Santiago: Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2015

---

<sup>18</sup>Ibíd., p. 8.

#### 1.3.1.3. Descarga corona en AC

Cuando al conductor se aplica una tensión alterna, el campo eléctrico en la superficie del mismo varía en dirección y polaridad. Debido a que el valor de tensión toma un valor superior al valor de inicio corona en ambos semiciclos (positivo y negativo), se da paso a la existencia de dos formas de corona en la superficie del conductor. De esta manera, el desarrollo de la descarga bajo tensión alterna se da de una manera muy similar a la descrita en el numeral 1.3.1.1 para el semiciclo negativo, y en el numeral 1.3.1.2 para el semiciclo positivo. La diferencia en el desarrollo de la descarga para este caso radica en que existe la presencia de un espacio de carga residual que tiene igual polaridad que la del semiciclo anterior, antes del comienzo de la descarga en el semiciclo actual. La descarga en AC se inicia en el semiciclo negativo, continuando su desarrollo en el postivo.<sup>19</sup>

---

<sup>19</sup>Ibíd., p. 9.

---

# 2

## CORONA EN CONDUCTORES

---

En el capítulo anterior, se estudió que la descarga corona, es una ruptura parcial del aire, y que tiene lugar cerca del electrodo con mayor nivel de estrés dentro de un campo no uniforme. Si bien, en las cercanías de una línea de transmisión eléctrica, se presentan campos no uniformes, bajo los cuales la probabilidad de que se originen descargas parciales, o, en otras palabras descarga corona, es muy alta. Por consiguiente es imprescindible al momento de elaborar el diseño de una línea de transmisión, tener en cuenta el valor mínimo de tensión bajo el cual se comienza a presentar la descarga, para de este modo evitar a toda costa los efectos generados a partir de dicha descarga, y reducir las pérdidas ocasionadas por la misma.

### SECCIÓN 2.1

#### GRADIENTE DE INICIO DE CORONA

El inicio de descarga corona en un conductor es conocido como el momento en el que después de iniciada la descarga, ésta pasa a ser una descarga autosostenida. De forma teórica es posible encontrar el valor para dicho gradiente, sin embargo, se torna arduo éste cálculo sin tener en cuenta algunas consideraciones prácticas.

## 2.2. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL GRADIENTE DE INICIO DE CORONA

Cierta cantidad de estudios experimentales se han llevado a cabo con el fin de encontrar un método por medio del cual se consiga estimar el valor del gradiente de inicio corona. Sin embargo, uno de los métodos comunmente empleados es el método de Peek.

### **2.1.1 Gradiente crítico según Peek (gradiente de inicio)**

Peek planteó una ecuación empírica, usando datos experimentales medidos en un laboratorio de prueba, en el cual, una tensión es suministrada a un conductor cilíndrico liso. La ecuación empírica, arroja el valor del gradiente crítico visual, o, gradiente de iniciación  $E_0$  requerido para encontrar el gradiente superficial necesario para superar el umbral corona en el gas (aire) que rodea el conductor. Para cilindros paralelos se plantea la siguiente ecuación que muestra el valor del gradiente crítico <sup>1</sup>

$$E_0 = 21,1 m \delta \left( 1 + \frac{0,301}{\sqrt{\delta r}} \right) \quad [kV/cm] \quad (2.1)$$

donde,

$m$  : factor de irregularidad del conductor que toma la condición de la superficie del conductor

$\delta$  : densidad relativa del aire

$r$  : radio del conductor[ $cm$ ]

## **SECCIÓN 2.2**

# **FACTORES QUE INFLUYEN EN EL GRADIENTE DE INICIO DE CORONA**

### **2.2.1 Factor de irregularidad del conductor**

En los conductores de una línea de transmisión, para encontrar el gradiente superficial, los cálculos se hacen regularmente considerando conductores de forma cilíndrica con una superficie completamente lisa. Sin embargo, debido a los posibles daños existentes

<sup>1</sup>RUGELES, Julio;CHACÓN, Julio. Laboratorio de alta tension - manual de practicas. Bucaramanga: UIS, 2013.

## 2.2. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL GRADIENTE DE INICIO DE CORONA

en la superficie del conductor el valor del gradiente crítico visual se torna algo menor que en el primer caso mencionado, debido al efecto de concentración de cargas, y, por consiguiente los gradientes superficiales mayores, originados en puntos o aristas, en los que se inicia el efecto corona. El factor de irregularidad puede escogerse según el estado del conductor, de la siguiente manera<sup>2</sup>:

Tabla 1: Factor de irregularidad del conductor

$m : 1$	conductor liso ideal
$m : 0,95$	conductor cableado nuevo y limpio
$m : 0,70 - 0,80$	conductor cableado envejecido
$m : 0,50 - 0,70$	conductor tratado deficientemente
$m : \leq 0,60$	conductor bajo lluvia, nuevo o envejecido

Fuente:

### 2.2.2 Radio del conductor

Las pruebas llevadas a cabo por el Dr. Whitehead y Mr. F.W. Peek, entre otros, han mostrado que el gradiente de superficie de un conductor liso, requerido para la iniciación de corona, incrementa en cuanto el radio del mismo decrece.

En un conductor cilíndrico, dichas condiciones se pueden describir mediante el uso de la sección transversal mostrada en la figura 7.<sup>3</sup>

El fragmento sombreado  $c$ , representa el conductor, para el cual el radio tiene un valor de  $a$ . La intensidad de campo en la superficie de éste conductor es  $E_s$ , y  $E$  representa la intensidad eléctrica en cualquier punto a una distancia  $x$  desde el centro del conductor. La superficie cilíndrica  $Q$ , que tiene un radio  $b$ , representa la superficie para la cual la intensidad de campo toma un valor constante  $E_0$ . Esta intensidad de campo, es el menor gradiente de potencial al cual puede ocurrir la ionización por impacto.

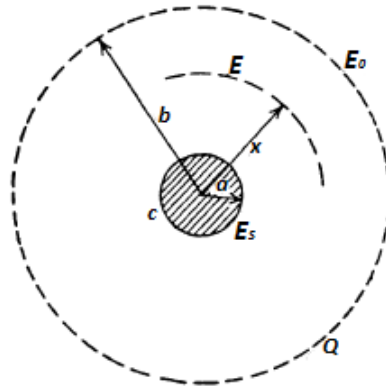
<sup>2</sup>Ibid., p. 53.

<sup>3</sup>DAVIS, Bergen . Theory of the corona. American Institute of Electrical Engineers, Washington, D.C., 1914.

## 2.2. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL GRADIENTE DE INICIO DE CORONA

La ionización por impacto, y la descarga corona, sólo pueden tomar lugar entre la superficie existente entre  $Q$ , y el conductor, región en la que la intensidad de campo eléctrico es mayor que  $E_0$ .<sup>4</sup>

Figura 7: Conductor cilíndrico y su relación con su gradiente de superficie



Fuente: Bergen DAVIS. Theory of the corona. American Institute of Electrical Engineers, Washington, D.C.1914

### 2.2.3 Presión y temperatura (densidad relativa del aire)

La densidad relativa del aire, influye de una manera complicada en la iniciación de corona. Al tomar valores superiores a  $25\text{ }^\circ\text{C}$  (valor normal de temperatura), la ruptura dieléctrica del aire es menor, siendo este aspecto favorable a la formación de la descarga corona. Lo anterior, es consecuencia de un incremento en el espacio libre para la carga. Por otra parte, cuando la presión alcanza valores por encima de los normales ( $760\text{ mmHg}$ ), la ruptura dieléctrica se vuelve menor, haciendo posible la presencia de una mayor cantidad de aire en el mismo volumen, y, de esta manera, el origen de la descarga se tornará complejo.<sup>5</sup>

Debido a las circunstancias mencionadas, se hace necesaria la corrección de la densidad de aire  $\delta$ , por factores de presión y temperatura. Para lograrlo, se implementa la

<sup>4</sup>Ibis., p. 539.

<sup>5</sup>LAYANA, Jose; BUENAVENTURA, Julitza L.; VELASQUEZ, Maria Fernanda. Perdidas por efecto corona en la línea de transmisión de 500 kv quito-guayaquil. Ecuador: Escuela superior politecnica de litoral centro de investigación científica y tecnológica

siguiente ecuación ,

$$\delta = \frac{273 + T_0}{273 + T} * \frac{P}{P_0} \quad (2.2)$$

donde,

$T$ : temperatura en el ambiente en  $^{\circ}C$

$T_0$ : temperatura en condiciones normales [25 $^{\circ}C$ ]

$P$ : presión en el ambiente  $mmHg$

$P_0$ : presión en condiciones normales en [760  $mmHg$ ]

#### SECCIÓN 2.3

### PÉRDIDAS POR EFECTO CORONA

La pérdida de potencia, definida por la tasa de energía extraída de la fuente de alta tensión por la descarga corona, es conocida como pérdida corona.

Debido a que los posibles componentes electromagnéticos, acústicos, y electroquímicos, constituyen sólo una pequeña parte de la energía total, la pérdida corona es efectivamente originada por el movimiento de iones positivos y negativos bajo la acción de un campo eléctrico. La durabilidad de los electrones creados durante la descarga, antes de que consigan sumarse a moléculas neutras y convertirse en iones negativos, es muy corta. Por ello, el movimiento de dichos electrones en el campo eléctrico da lugar a pulsos de corriente, que no contribuyen significativamente a la pérdida corona.

En las líneas de transmisión de AC, la tensión aplicada en forma sinusoidal provoca que una corriente capacitiva sea extraída de la fuente de energía, antes del inicio de corona. Esta corriente que fluye a lo largo del conductor, ocasiona una pequeña pérdida de potencia  $I^2 R$ . Sin embargo, después de que la corona ha dado inicio, el movimiento de los iones en el campo eléctrico alterno, da lugar a una componente de corriente eléctrica alterna adicional, que a diferencia de la primera corriente mencionada, está en

fase con la tensión, por lo cual genera una pérdida, la cual es conocida como pérdida corona.<sup>6</sup>

#### 2.3.1 Método de Peterson para estimar las pérdidas por efecto corona

Diversos estudios experimentales de pérdidas corona se han llevado a cabo, usando jaulas y líneas cortas de prueba, con la finalidad de encontrar ecuaciones empíricas que muestren el valor de pérdidas corona.<sup>7</sup>

Dentro de dichos estudios, Peterson propuso un método analítico convencional, que permite calcular las pérdidas por efecto corona para una línea de transmisión utilizando las siguiente ecuación

$$P_L = \frac{2,09 * 10^{-5} f V^2 F}{\left[ \ln \left( \frac{DMG}{r} \right) \right]^2} \quad (2.3)$$

donde,

- $f$ : frecuencia del sistema [ $Hz$ ]
- $V$ : tensión eficaz de línea [ $kV_{rms}$ ]
- $F$ : factor corona (constante empírica), dependiente de  $E/E_0$
- $DMG$ : distancia media geométrica [ $cm$ ]
- $r$ : radio del conductor [ $cm$ ].

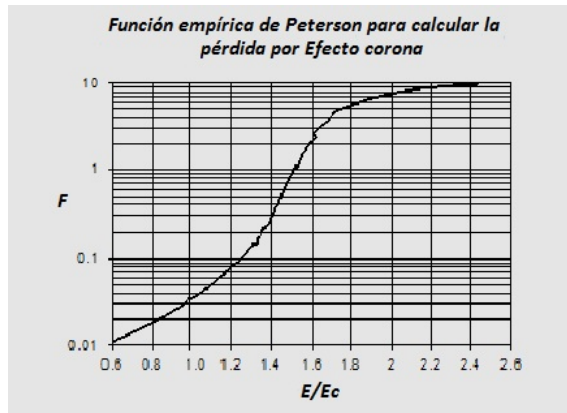
La constante empírica se calcula, en primera instancia encontrando el valor de la relación  $E/E_c$ , para luego por medio de las curvas mostradas en las figuras 8 y 9, hallar el valor que toma  $F$ .

---

<sup>6</sup>EPRI AC transmission line reference book 200  $kV$  and above. Tercera Edición, 2005.

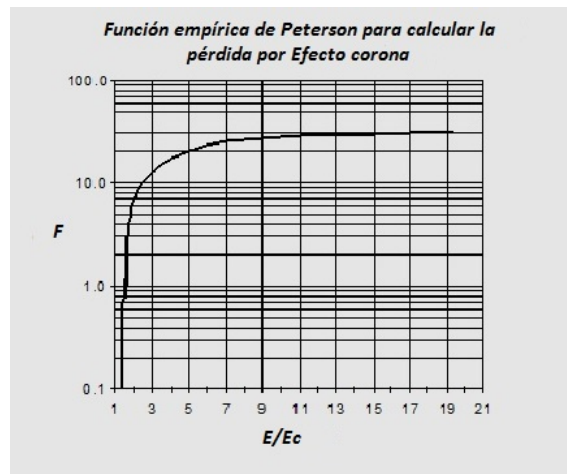
<sup>7</sup>Ibis., p. 117.

Figura 8: Función de Peterson entre 0,6 y 2,6



Fuente: EPRI AC Transmission Line Reference Book –200kV and Above. Tercera edición,2005. 117p

Figura 9: Función de Peterson entre 1 y 21



Fuente: EPRI AC Transmission Line Reference Book –200kV and Above. Tercera edición,2005. 117p

### **2.3.2** Método de la Electricité de France para estimar las pérdidas por efecto corona

La Electricité de France, con base en consideraciones teóricas de carga espacial, en el caso de corona localizada en conductores bajo condiciones experimentales, desarrolló

una fórmula empírica para evaluar las pérdidas corona, para conductores agrupados. El cálculo de pérdida corona según la Electricité de France, se realiza mediante la ecuación mostrada en 2.4.<sup>8</sup>

$$P_L = P_0 r^{1,8} (n + 6)^2 \cdot 10^{7(E^* - 0,7)} \quad (2.4)$$

Donde,

$P_L$  : pérdida corona en  $[W/m]$

$P_0$  :  $1.5 \times 10^{-2}$  para condiciones de clima lluvioso

$P_0$  :  $1.5 \times 10^{-3}$  para condiciones de clima seco

$E^*$  :  $\frac{E_{max}}{E_0}$ , donde  $E_{max}$  es el valor de campo máximo (dado por la fase central) y  $E_0$  es el valor del gradiente crítico, con  $\delta = 1$  y  $m = 1$ , ambos en  $[kV_{rms}/cm]$

$r$  : radio del conductor en  $[cm]$

$n$  : número de conductores en el haz

### SECCIÓN 2.4

## EFECTOS DE LA DESCARGA CORONA

Cada uno de los procesos de ionización involucrados en la generación de descargas corona en las regiones cercanas a las líneas de transmisión, así como la formación y movimiento de partículas cargadas en un campo eléctrico, requieren un gasto de energía. Esta energía, es proporcionada por la fuente de potencia conectada a la línea de transmisión, la cual origina un campo eléctrico cercano a los conductores, indispensable para hacer sostenible las descargas corona.

La mayor cantidad de esta energía es convertida en energía térmica, que calienta el aire en las cercanías de los conductores. Mientras que, una pequeña proporción de dicha energía se convierte en radiación electromagnética (emisión de luz), en energía

---

<sup>8</sup>Ibis., p. 118.

acústica, y en energía electroquímica necesaria para originar efluentes gaseosos como el ozono y óxidos de nitrógeno.<sup>9</sup>

### **2.4.1 Interferencia electromagnética**

El efecto corona en los conductores de las líneas de transmisión, generalmente, se limita a un número de fuentes puntuales distribuidas a lo largo de la longitud de cada conductor. La densidad lineal de las fuentes corona depende en gran medida de las condiciones climáticas y ambientales, donde la más baja densidad lineal se encuentra bajo condiciones de buen tiempo, y la más alta densidad lineal, bajo condiciones de mal tiempo, como la lluvia.

Los gradientes de superficie en conductores presentes en las líneas de transmisión están diseñados para que los modos de corona que ocurran sean pulsos Trichel durante el semiciclo negativo, y de pulsos de aparición, durante el semiciclo positivo. Estos modos de corona dan lugar a pulsos de corriente de corta duración. Dichos pulsos de corriente transitoria generalmente ocasionan radiointerferencia sobre un extenso rango de frecuencias. Las características de la radiointerferencia dependen directamente de las particularidades del espectro de frecuencias de los pulsos de corriente, siendo además función de los parámetros que definen dichos pulsos así como de las características de repetición de pulsos. La extensión del espectro de frecuencia de un impulso es proporcional al producto de la amplitud y duración del pulso (contenido de carga), mientras que el ancho de banda es una función inversa del tiempo de subida del impulso.<sup>10</sup>

### **2.4.2 Ruido audible**

Los principales modos de corona en las líneas de transmisión (denominados descargas negativas de Trichel e inicio de descargas positivas), consisten esencialmente en descargas transitorias repetitivas, en las cuales, tiene lugar la ionización rápida durante un corto intervalo de tiempo del orden de algunos nanosegundos. Durante el desarrollo de las descargas, el gas dentro del canal de descarga se calienta a altas temperaturas,

---

<sup>9</sup>EPRI AC transmission line reference book 200 kV and above. Tercera Edición, 2005.

<sup>10</sup>Ibis., p. 818.

mientras que su volumen no puede expandirse lo suficiente. Como resultado de esto, la presión local aumenta dentro del canal, conforme a las leyes físicas que rigen los gases. El incremento de la presión local en el gas, genera por definición una onda de presión acústica, que se propaga hacia afuera desde el sitio de descarga.<sup>11</sup>

### **2.4.3 Ozono y $NO_x$**

Reacciones electroquímicas complejas toman lugar dentro de los procesos de la descarga por corona (sea esta de polaridad positiva o negativa), lo que resulta en la generación de ozono ( $O_3$ ), y varios óxidos de nitrógeno, conjuntamente conocidos como  $NO_x$ . La disociación de moléculas de oxígeno ( $O_2$ ) en el aire, debida a los procesos de ionización, origina átomos de oxígeno, que consecuentemente reaccionan, dando lugar a moléculas de ozono y óxidos de nitrógeno. Los  $NO_x$  contribuyen a la contaminación del aire atmosférico. Diversos estudios han demostrado que el ozono comprende más del 90 % de todos los oxidantes fotoquímicos responsables de la contaminación del aire. La formación de ozono a grandes niveles, es principalmente debida a la acción de radiación ultravioleta en las emisiones de gases durante los procesos de combustión.

El rápido crecimiento de transmisión a alta tensión a principios de los 70's, elevó la posibilidad de generación de ozono por descarga en los conductores de las líneas de transmisión, y la preocupación debida al impacto en la calidad del aire atmosférico. Estos, el ozono y los  $NO_x$  fueron considerados parte de impacto ambiental generado por líneas de transmisión.<sup>12</sup>

---

<sup>11</sup>Ibis., p. 819.

<sup>12</sup>Ibis., p. 819.

---

# 3

## GENERACIÓN DE OZONO POR PÉRDIDA CORONA

---

---

Algunos oxidantes, presentes en el aire atmosférico, tales como el ozono, contribuyen a la polución de dicho aire. Debido a las descargas por corona, el oxígeno molecular consigue disociarse, haciendo posible por medio de diferentes reacciones electroquímicas la formación de ozono ( $O_3$ ).

Este capítulo estará designado para el estudio ampliado de la formación y medición del nivel de ozono originado por reacciones electroquímicas, generadas a su vez por las pérdidas corona presentes en una línea de transmisión. Es importante que la investigación sobre la producción de oxidantes tales como el ozono generados por líneas de transmisión, se realice sistemáticamente, con la finalidad de garantizar que las futuras líneas de transmisión sean aceptables bajo parámetros normativos.

SECCIÓN 3.1

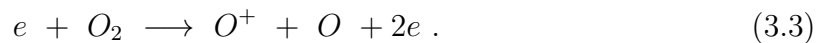
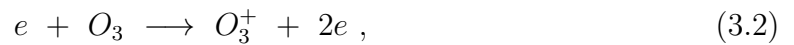
MECANISMO DE FORMACIÓN DE OZONO

En las líneas de transmisión, como se especificó en el capítulo 2, se presenta el efecto corona , o descargas parciales, originadas cuando el valor de intensidad de campo eléctrico  $E$  producto de la diferencia de potencial entre los conductores de dicha línea, exalimita el valor de la rigidez dieléctrica del aire, ocasionando lo que es conocido como *pérdidas corona*.

La descarga parcial en el aire se puede dividir en dos regiones diferentes: la región de ionización, y la región de deriva. La región de ionización rodea el conductor, y se extiende una corta distancia. En esta región, los electrones son acelerados hacia el conductor, y se ionizan las especies neutras en el aire. Debido a estas avalanchas de electrones, la densidad de electrones incrementa de forma exponencial, en dirección al conductor. La principal fuente de electrones es la ionización directa de las moléculas,

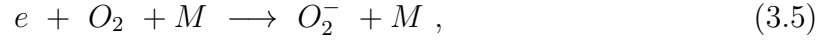


aunque, la ionización del ozono, y la ionización disociativa del oxígeno pueden estar presentes también,

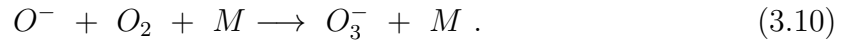
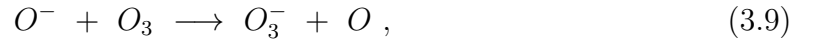
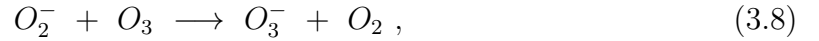


A medida que los electrones se desplazan hacia el conductor, la fijación de electrones a las moléculas neutras también da lugar a la formación de iones negativos , particularmente  $O_2^-$  y  $O^-$ . Por consiguiente, la dependencia radial de estos iones negativos es aproximadamnete similar a la de los electrones. Las principales reacciones de apego que contribuyen a la formación de  $O_2^-$  y  $O^-$  son





donde M representa un compañero de colisión de tercer cuerpo. Además, los iones  $O_3^-$  se forman por medio de reacciones de transferencia de electrones a partir de  $O_2^-$  y  $O^-$



La importancia de este proceso de transferencia se hace evidente alrededor de los límites de la región de ionización, en donde la velocidad de generación de electrones nuevos es mucho menor y la mayoría de los iones  $O_2^-$  se han convertido en  $O_3^-$ .

Se ha encontrado en corona negativa que el ión  $O_3^-$  es dominante dentro de la región de deriva, y su densidad numérica es tres ordenes de magnitud mayor que la de los electrones. En contraste, para corona positiva, los iones  $O^-$ ,  $O_2^-$ , y  $O_3^-$ , tienen una importancia similar, y su densidad numérica es de al menos un orden de magnitud menor que la presentada en los electrones. Por consiguiente, la intensidad de corriente es transportada, significativamente por electrones en la cercanía del conductor.<sup>1</sup>

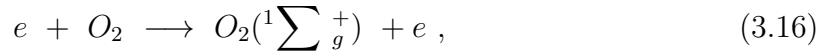
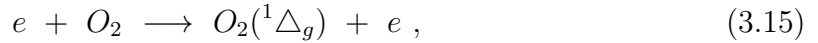
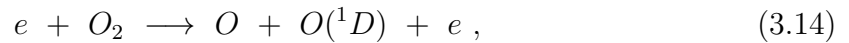
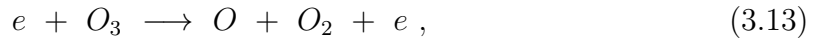
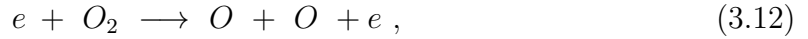
En la región de ionización se forman iones positivos según las reacciones mostradas en las ecuaciones 3.2 y 3.3, y luego, progresan hacia la región de deriva bajo el efecto del campo eléctrico. Sin embargo sólo dos iones positivos ( $O_2^+$  y  $O_3^+$ ) están realmente presentes dentro de la región de deriva, ya que los iones  $O^+$  se convierten eficientemente en  $O_2^+$ , debido a la presencia de la siguiente reacción rápida de transferencia de carga,




---

<sup>1</sup>YANALLA, K; PONTIGA, F.; FERNÁNDEZ RUEDA A.; and CASTELLANOS, A.. Experimental investigation and numerical modelling of positive corona discharge: ozone generation. Departamento de Electronica y Electromagnetismo. Universidad de Sevilla, Spain, 2009.

La mayoría de los radicales y las especies excitadas son producidas dentro de la región de ionización, por medio de la disociación directa consecuente del impacto de electrones, ocasionando la excitación de las moléculas de  $O_2$  y  $O_3$ , a través de las siguientes reacciones:



Las especies  $O_3^*$ , excitadas por vibración, son originadas a partir de la desexcitación de  $O_2^*$ . La seguida difusión de estas especies hacia la región de deriva está limitada por su alta reactividad con las moléculas de oxígeno y ozono. Por consiguiente, el resultado de esta difusión permanece confinado en la región de ionización, o lindando con ella. En contraste, el ozono se forma a partir de la colisión de  $O$  y  $O_2$ , con un compañero de tercer cuerpo (usualmente  $O_2$  u  $O_3$ ) :



La densidad de ozono es mayor muchos órdenes por encima a la de cualquier otra especie presente durante la descarga por corona (con la excepción de  $O_2$ ). Aunque, la generación de ozono se ocasiona en la región de ionización y sus proximidades, en la zona en la que la densidad de átomos de oxígeno es significativa, la distribución espacial de ozono es casi que independiente de la coordenada radial. La homogeneidad del ozono es una consecuencia directa de su enorme concentración; y, el tiempo necesario para generar el ozono en el volumen de descarga, es mucho más largo que el tiempo de difusión característico. Por consiguiente, la distribución del ozono es determinado por

la difusión molecular.<sup>2</sup>

**SECCIÓN 3.2**

**ESTUDIO DE LA EMANACIÓN DE OZONO EN  
LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN POR DESCARGA  
CORONA A LO LARGO DE LA HISTORIA**

Como se vió en la sección anterior, cuando las descargas parciales ocurren en el aire, inducen la reacción  $3 O_2 \rightarrow 2 O_3$ , la cual realmente, se torna más compleja, puesto que en ella están presentes partículas cargadas y no cargadas, debido a las descargas parciales, por ejemplo,  $O, O^+, O^-, O_2, O_2^-, O_2^{*-}$ . Teóricamente  $1 kWh$  puede producir 1220 gramos de  $O_3$ .<sup>3</sup>

Fue entonces, hasta 1956 que el ozono generado a partir de las descargas por corona en líneas de transmisión, se mencionó por primera vez, junto a las pruebas de RI y TVI, en una publicación realizada por Newell y Warburton<sup>4</sup>. En esta época las mediciones de ozono llevadas a cabo fueron no específicas.

Liao, Keen y Powell, investigaron el fenómeno de corona y radiointerferencia en algunos conductores, por medio de una jaula cilíndrica de  $9,2 cm$  de diámetro y mencionaron que circulaba aire fresco de tal manera que el ozono generado por la descarga de corona se eliminaba continuamente.<sup>5</sup>

Castle, Inculet y Burgess, estudiaron la generación de ozono por corona positiva en precipitadores electrostáticos<sup>6</sup>. Ellos reafirmaron las conclusiones planteadas anterior-

---

<sup>2</sup>Ibid., p. 5.

<sup>3</sup>FRYDMAN, Maurice; SHIH, C.H.; SEBO, Stephen A.; HEIBEL, Jhon T.. Examination of ozone emanating from ehv transmission line corona discharges. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-95. No. 2., 1976.

<sup>4</sup>NEWELL, H.H.; WARBURTON, F.F. Variations in radio and television interference from transmission lines. AIEE Trans. (Power Apparatus and Systems). Vol 75, 1956. 420-429p.

<sup>5</sup>KEEN, W.; LIAO, T.W. and POWELL, Jr. Relationship between corona and radio interference on transmission lines, laboratory studies i-point and conductor corona. AIEE Trans. (Power Apparatus and Systems). Vol 76, 1957. 530-540p.

<sup>6</sup>INCULET, I.I.; CASTLE, G.S.P. and BURGESS, K.I. Ozone generation in positive corona elec-

### 3.2. ESTUDIO DE LA EMANACIÓN DE OZONO EN LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN POR DESCARGA CORONA A LO LARGO DE LA HISTORIA

---

mente, de que la cantidad de ozono producida por unidad de tiempo era función directa de la cantidad de energía que se disipaba en la descarga. Su configuración de prueba consistía en alambres finos (de 0,13 a 0,81 *mm* de diámetro) y un cilindro con un largo de 30,5 *cm*, y un diámetro de 3,7 *cm*, y sus datos fueron presentados en términos de la corriente corona, y la denominada función de potencial de corona.<sup>7</sup>

Matteson, Stringer and Busbee, usaron un conductor con un diámetro de 0,81 *mm*, y un arreglo tubular de 5,1 *cm* de diámetro, para estudiar la cinética de la conversión de  $SO_2$  en niebla ácida, en presencia de corona negativa en DC. La cinética de la formación de  $O_3$ , también se investigó bajo la presencia y la ausencia de  $SO_2$ .<sup>8</sup>

La generación de efluentes, principalmente el ozono, por descargas corona en líneas de alta y extra alta tensión fue planteada como una problemática ambiental, a principios de los años setenta (1970's). Desde 1972 una gran cantidad de documentación ha sido publicada, en donde se discuten investigaciones relacionadas con efluentes gaseosos originados por descargas corona en líneas de transmisión.<sup>9</sup>

Scherer, Ware y Shin, describieron el trabajo realizado para The American Electric Power Service Corporation (AEP) durante 1971<sup>10</sup>. Ellos reportaron experimentos en secciones de conductores con un largo de 183 *cm*, y diámetros oscilantes entre 0,13 y 2,54 *cm*, en un tunel cilíndrico disponible para viento de 45 *cm* de diámetro, diseñado por la Ion Physics Corporation. La AEP condujo sus propios experimentos en su laboratorio ubicado en Canton, Ohio. En el montaje experimental se contaba con una jaula de 76

---

trostatic precipitators. IEEE Trans. Industry and General applications. Vol 16A-5, 1969. 489-496p.

<sup>7</sup>FRYDMAN, Maurice; SHIH, C.H.; SEBO, Stephen A.; HEIBEL, Jhon T.. Examination of ozone emanating from ehv transmission line corona discharges. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-95. No. 2., 1976.

<sup>8</sup>STRINGER, H.L.; MATTESON, M.J. and BUSBEE, W.L. Corona discharge oxidation of sulfur dioxide. Environmental Science and Technology. Vol 6, 1972. 895-901p

<sup>9</sup>FRYDMAN, Maurice; SHIH, C.H.; SEBO, Stephen A.; HEIBEL, Jhon T.. Examination of ozone emanating from ehv transmission line corona discharges. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-95. No. 2., 1976.

<sup>10</sup>FRYDMAN, Maurice; SHIH, C.H.; SEBO, Stephen A.; HEIBEL, Jhon T.. Examination of ozone emanating from ehv transmission line corona discharges. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-95. No. 2., 1976.

### 3.2. ESTUDIO DE LA EMANACIÓN DE OZONO EN LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN POR DESCARGA CORONA A LO LARGO DE LA HISTORIA

---

cm de diámetro, 152 cm de longitud, y junto a ello se emplearon varios conductores con diferentes diámetros.

El enfoque utilizado por Westinghouse Electric Corporation, fue diferente. Ellos emplearon arreglos de conductores en paquete (en haz), a escala completa para sus pruebas.

<sup>11</sup>

En cada uno de estos estudios, se evidenció que los niveles de  $NO_x$  medidos, eran supremamente pequeños, y que el ozono comprendía casi toda la formación de efluentes.<sup>12</sup>

Frydman, Levy and Miller desarrollaron un extenso programa de pruebas en campo, realizado durante los años 1970 y 1971. Las pruebas eran dirigidas a 20 localidades a lo largo del sistema AEP 765 – kV. Las pruebas abarcaron una amplia gama de condiciones meteorológicas, aunque ha de resaltarse que las pruebas fueron llevadas a cabo en un corto plazo.

Por otro lado, a largo plazo, se realizaron pruebas intermedias de campo y de laboratorio por The Ohio State University (OSU), para las cuales los resultados fueron publicados en 1972. Para luego, en 1973, publicar un trabajo sobre el efecto de la lluvia en la producción de oxidantes<sup>13</sup>.

Otros trabajos a nivel analítico y de laboratorio realizados por la AEP, fueron publicados por Frydman y Shih<sup>14</sup> [?]. Los experimentos de generación de ozono realizados por Westinghouse Electric Corporation, fueron descritos por Roach, Chartier y Dietrich<sup>15</sup>. Fern y Brabets, publicaron los resultados de la investigación a largo plazo de

---

<sup>11</sup>FRYDMAN, Maurice; SHIH, C.H.; SEBO, Stephen A.; HEIBEL, Jhon T.. Examination of ozone emanating from ehv transmission line corona discharges. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-95. No. 2., 1976.

<sup>12</sup>FRYDMAN, Maurice; SHIH, C.H.; SEBO, Stephen A.; HEIBEL, Jhon T.. Examination of ozone emanating from ehv transmission line corona discharges. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-95. No. 2., 1976.

<sup>13</sup>SEBO, S.A. The effect of rain on oxidant production due to ehv transmission line corona (laboratory experiments). Midwest Power Symposium. Conference Records. Cincinnati, 1973.

<sup>14</sup>FRYDMAN, Maurice; SHIH, C.H.; SEBO, Stephen A.; HEIBEL, Jhon T. Examination of ozone emanating from ehv transmission line corona discharges. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-95. No. 2., 1976.

<sup>15</sup>ROACH, J.F.; CHARTIER, V.L.; DIETRICH, F.M. Experimental oxidant production rates

### 3.2. ESTUDIO DE LA EMANACIÓN DE OZONO EN LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN POR DESCARGA CORONA A LO LARGO DE LA HISTORIA

---

generación de ozono en las zonas adyacentes a las líneas de transmisión.<sup>16</sup>

Stephen A. Sebo, Jhon T. Heibel, Maurice Frydman, y C. H. Shihll, llevaron a cabo experimentos en el laboratorio a nivel de campo, con el objetivo de determinar las concentraciones de ozono y sus tasas de producción en las cercanías de las líneas de alta tensión, desarrollando un mejor entendimiento del desarrollo de esta problemática a través de experimentos usando un rango de conductores en el laboratorio.<sup>17</sup>

---

for EHV transmission lines and theoretical estimates of ozone concentrations near operating lines. Westinghouse Electric Corporation. East Pittsburgh, Pennsylvania. 1973

<sup>16</sup>FERN, W.J. ; BRABETS, B.I. Field investigation of ozone adjacent to high voltage transmission lines. IEEE Trans. Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-93, 1974. 1269-1280.

<sup>17</sup>FRYDMAN, Maurice; SHIH, C.H.; SEBO, Stephen A.; HEIBEL, Jhon T.. Examination of ozone emanating from ehv transmission line corona discharges. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-95. No. 2., 1976.

---

# 4

## REVISIÓN DE ESTUDIOS DE GENERACIÓN DE OZONO POR EFECTO CORONA

---

Con la creación de líneas de alta y extra alta tensión, se ha hecho imprescindible medir las cantidades de ozono que podrían ser despedidas potencialmente de las descargas por corona en dichas líneas bajo condiciones de clima seco, o en presencia de lluvia, debido a que esta generación de ozono en la tropósfera se convierte en un gas tóxico cuando los niveles de concentración son elevados.

En el intento de proteger la salud pública, en diversos países, se han implementado políticas ambientales que se encargan de controlar los niveles de ozono generados, como es el caso de Estados Unidos, en donde por medio de la Agencia de Protección Ambiental, se promulgaron *los primarios y secundarios estándares ambientales de calidad de aire*.

Por otro lado, en Colombia, los *sistemas de vigilancia de la calidad del aire (SVCA)*, se encargan de verificar que los niveles de ozono, y otros contaminantes

#### 4.1. MEDICIÓN DE CONCENTRACIÓN DE OZONO GENERADO POR PÉRDIDA CORONA

---

generados en un tiempo determinado, estén dentro los preestablecidos en la Resolución No. 0610 del 24 de Marzo de 2010, del Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial.

Las bases fundamentales para la revisión de estudios se centraron en los trabajos llevados a cabo por Stephen A. Sebo, Jhon T. Heibel, Murice Frydman, y C. H. Shih<sup>1</sup> (para los valores de concentración de ozono), y en los desarrollados por Roach, Chartier y Dietrichl (para las ecuaciones de dispersión de ozono)<sup>2</sup>. Se consiguió la obtención de datos experimentales, para ser usados en la estimación del nivel de ozono generado en una línea de transmisión, siendo estos consecuentemente comparados con los estipulados en la normativa ambiental Colombiana.

##### SECCIÓN 4.1

### MEDICIÓN DE CONCENTRACIÓN DE OZONO GENERADO POR PÉRDIDA CORONA

Para encontrar los valores de concentración de ozono generado por corona en líneas de transmisión, es necesario recurrir a estudios de campo y de laboratorio, para los cuales los resultados han sido plasmados en diversos papers. En la realización de la presente revisión de estudios de generación de ozono por pérdida corona, fue ineludible fundamentarse en los resultados mostrados en el estudio *Examination of ozone emanating from EHV transmission line corona discharges*, realizado por Stephen A. Sebo, Jhon T. Heibel, Murice Frydman, y C. H. Shih<sup>3</sup> [?], en el cual se llevó a cabo un montaje experimental, un proceso de medición, y un tratamiento de datos. A lo largo de ésta sección se mostrará la información extraída de dicho trabajo.

---

<sup>1</sup>SEBO, S.A. The efect of rain on oxidant production due to ehv transmission line corona (laboratory experiments). Midwest Power Symposium. Conference Records. Cincinnati, 1973.

<sup>2</sup>DIETRICH,F.M.; ROACH,J.F.; CHARTIER, V.L. Experimental oxidant production rates for ehv transmission lines and theoretical estimates of ozone concetrations near operating lines. Westinghouse Electric Corporation. East Pittsburgh, Pennsylvania., 1973.

<sup>3</sup>FRYDMAN,Maurice; SHIH, C.H.; SEBO,Stephen A.; HEIBEL,Jhon T.. Examination of ozone emanating from ehv transmission line corona discharges. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-95. No. 2., 1976.

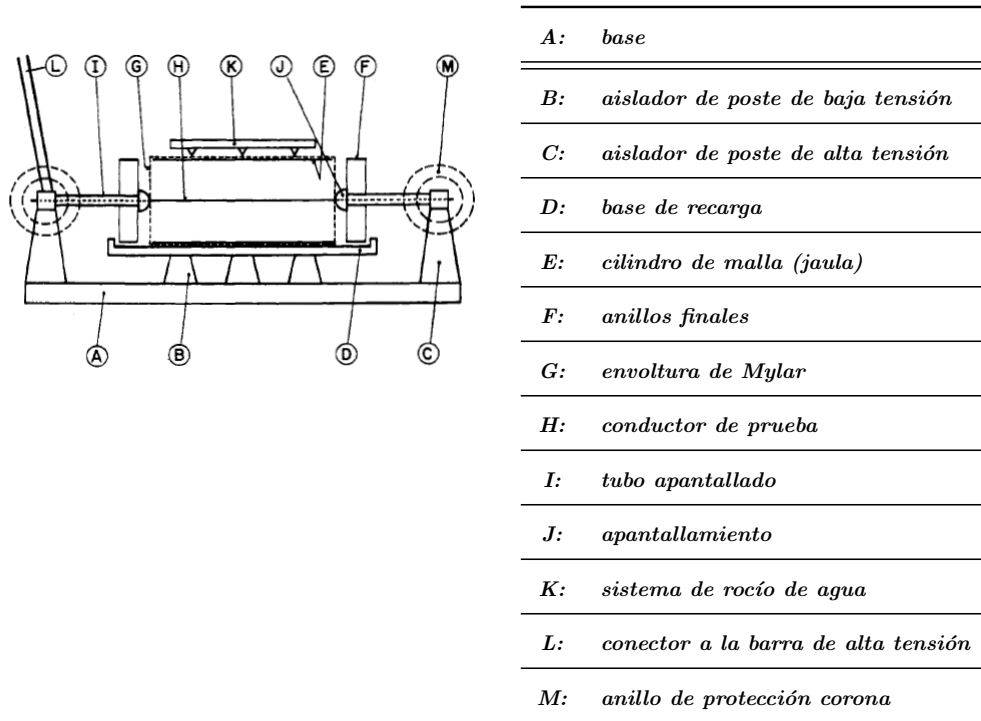
## 4.1. MEDICIÓN DE CONCENTRACIÓN DE OZONO GENERADO POR PÉRDIDA CORONA

### 4.1.1 Equipo de prueba de laboratorio

Un arreglo cilíndrico coaxial de prueba fue desarrollado por la OSU (Ohio State University), el cual estaba constituido por los siguientes componentes principales: electrodos cilíndricos externos autoportantes (jaulas), conductores de prueba (electrodos internos), base, conductos, simulador de lluvia, fuente de alta tensión y componentes de alta tensión, e instrumentación de medida.

Los detalles del arreglo experimental están mostrados en la Figura 10. El electrodo exterior se encontraba compuesto de un cilindro de malla de cobre de 152 cm de largo, y dos anillos al extremo, conectados directamente a tierra. A lo largo de las pruebas, se emplearon diferentes juegos de cilindros con diámetros entre los 38, 76 y 114 cm.

Figura 10: Equipo de prueba desarrollado por la OSU



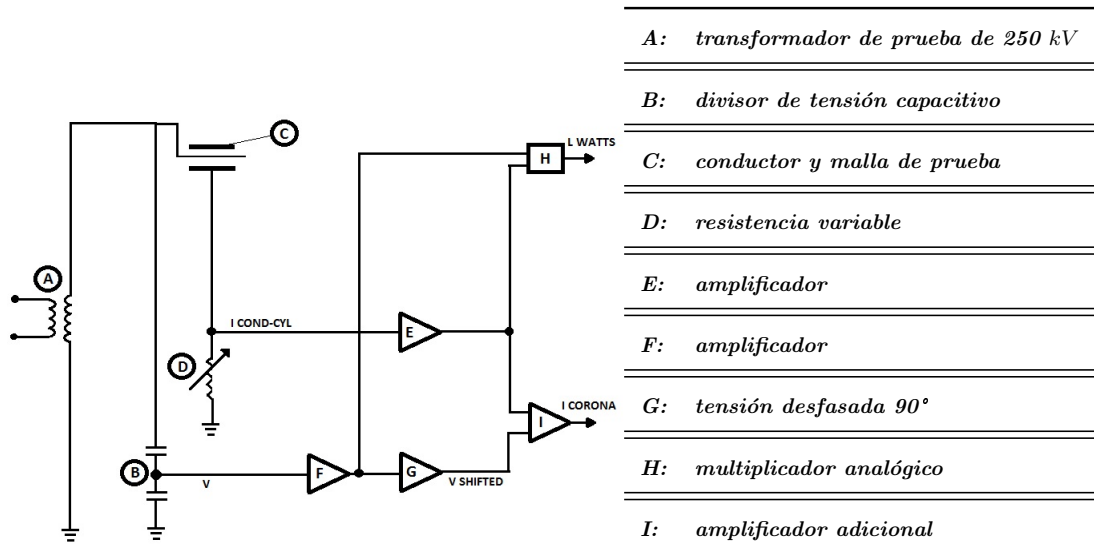
FUENTE: Stephen A. SEBO, Jhon T. HEIBEL, Maurice FRYDMAN, y, C.H. SHIH. Examination of ozone emanating from EHV transmission line corona discharges. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-95. No. 2.1976

### 4.1.2 Procedimiento de prueba

El principio de operación del equipo de prueba fue el siguiente. Un conductor, fue energizado desde un transformador de alta tensión. La tensión del conductor fue incrementada hasta que la tensión de corona diera inicio a lo largo del mismo. El electrodo exterior, consistía en una jaula cilíndrica puesta a tierra, cubierta por láminas de plástico.

Una base soportaba dicha jaula, junto a su base de recarga, y al ducto diseñado para las pruebas de producción de ozono. El electrodo exterior se encontraba conectado a tierra, a través de una resistencia variable (D en la Figura 11), y se conectó un divisor capacitivo de tensión al electrodo interior (B en la Figura 11). Usando las tensiones a través de la resistencia y el elemento de baja tensión del divisor capacitivo, se midieron las pérdidas corona con un circuito multiplicador analógico.

Figura 11: Circuito de medida desarrollados por la OSU



Fuente: Stephen A. SEBO, Jhon T. HEIBEL, Maurice FRYDMAN, y, C.H. SHIH.  
 Examination of ozone emanating from EHV transmission line corona discharges.  
 IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-95. No. 2.1976

Los conductores mostrados en el cuadro 2 fueron empleados en la realización de las pruebas de laboratorio.

#### 4.1. MEDICIÓN DE CONCENTRACIÓN DE OZONO GENERADO POR PÉRDIDA CORONA

---

Tabla 2: Conductores empleados en las pruebas de laboratorio

Conductores de aluminio sólido	0,406 <i>cm</i> de diámetro
	0,523 <i>cm</i> de diámetro
	1,18 <i>cm</i> de diámetro
Conductores de aluminio trenzados	1,13 <i>cm</i> de diámetro
	1,626 <i>cm</i> de diámetro
	2,174 <i>cm</i> de diámetro
Conductores ASCR	3,038 <i>cm</i> de diámetro
Conductores en haz	4 x 0,523 <i>cm</i> de diámetro, espaciados 6,25 <i>cm</i>
	4 x 1,13 <i>cm</i> de diámetro, espaciados 12,05 <i>cm</i>

Las secciones de conductos fueron usados para la medición de los niveles de concentración de ozono y la velocidad del aire. Para el sistema de tuberías (simulación de condiciones de lluvia), se emplearon alrededor de 10 tipos de boquillas, de acuerdo a su rango de presión, su capacidad nominal, su ángulo y patrón de pulverización. La fuente de tensión empleada en las pruebas de laboratorio, fue un transformador de prueba de 0-250 *kV*. Un divisor de tensión capacitivo, fue empleado para propósitos de la medición de tensión, y una resistencia variable conectada al cilindro de malla para fines de la medición de la corriente. La tensión a través de la resistencia, era proporcional a la corriente total del conductor cilíndrico, la cual era la suma vectorial de la corriente capacitiva y de la corriente de pérdida corona. El diagrama circuital del montaje se encuentra mostrado en la figura 11.

La tensión de salida del divisor de tensión capacitivo y la tensión a través de la resistencia variable se amplificaron, y se aplicaron a los terminales de entrada de un multiplicador analógico. La componente de DC de la salida de tensión del multiplicador analógico era proporcional a las pérdidas corona de la sección del conductor. La salida de tensión del divisor capacitivo,  $G$  en 11, se desfasó  $90^\circ$  ( $V_{SHIFT}$ ), y se comparó con la tensión proporcional al total de la corriente del conductor. La ganancia proporcional de la tensión desfasada, se canceló con la ganancia proporcional de la componente de la corriente capacitiva, y la adición a la salida del amplificador era proporcional a la corriente de corona ( $I$  en 11).

#### 4.1. MEDICIÓN DE CONCENTRACIÓN DE OZONO GENERADO POR PÉRDIDA CORONA

---

Las siguientes cantidades fueron medidas durante las pruebas:

- \* Magnitud y forma de onda de la tensión del conductor
- \* Magnitud y forma de onda de la corriente del cilindro conductor
- \* Magnitud y forma de la corriente corona
- \* Magnitud de pérdida corona
- \* Forma de onda del producto VI
- \* Tasa del flujo de aire
- \* Producción de ozono
- \* Temperatura
- \* Presión barométrica
- \* Humedad relativa
- \* Tasa de lluvia simulada

Las mediciones en los conductores, fueron llevadas a cabo para condiciones de clima seco y lluvioso. La tensión del conductor fue incrementada en intervalos de 10  $kV$ . Para los valores por debajo del valor de inicio de corona, las pérdidas corona y la generación de ozono por encima de la concentración ambiental era cero.

Para valores superiores del inicio de corona, la tensión de los conductores fue incrementada en intervalos de 5-10  $kV$ , cada tensión de concentración de ozono fue continuamente monitoreada. Cuando el equilibrio del nivel de ozono se consiguió, aproximadamente 10-15 minutos después, los niveles de concentración fueron grabados. La tensión en el conductor se incrementó hasta que se produjeron flashovers (flameos) entre el conductor y la carcasa. Si los canales de descarga estaban presentes, la tensión del conductor se disminuía en intervalos de 5-10  $kV$ , de donde se obtuvo una segunda serie de mediciones.

De las pruebas, se consiguieron 1312 puntos, bajo los rangos establecidos, los cuales

#### 4.1. MEDICIÓN DE CONCENTRACIÓN DE OZONO GENERADO POR PÉRDIDA CORONA

---

fueron procesados bajo un equipo computarizado. Varios programas de computador fueron desarrollados y usados para el análisis y la consecuente presentación grafica de las medidas experimentales de la producción de ozono por corona.

Las observaciones experimentales de corona en la jaula, fueron grabadas manualmente, transcritas a tarjetas perforadas, para luego ser convertidas a cintas magnéticas. Dichas cintas fueron procesadas, experimento por experimento, por un programa. La salida de este programa fue un resumen experimental de valores observados y computados para cada experimento en forma tabular, así como un archivo de disco para su posterior análisis y graficación.

El archivo de disco colectivo obtenido por este programa se fusionó con los resultados generados a partir de otros experimentos, para formar una librería compuesta de resultados, lo que permitió graficarlos y analizarlos.

La librería fue empleada mediante una combinación de programas y el uso procedimental interactivo, para generar gráficas cruzadas de múltiples variables, para múltiples experimentos. Para una combinación de hasta 10 experimentos contenidos en el archivo gráfico, de 18 observaciones experimentales cada uno, las siguientes variables podrían ser mezcladas gráficamente: pérdida corona, gradiente de tensión de la superficie conductora, tasa de producción de ozono, y relación entre pérdida corona y la producción de ozono.

##### **4.1.3 Resultados de la prueba de laboratorio**

En el curso del análisis, las tasas de producción de ozono  $\mathbf{W}$  ( $g - O_3/kWh$ ), y la razón entre pérdida corona y producción de ozono,  $\mathbf{P}$  ( $kWh/g - O_3$ ), fueron calculadas a partir del flujo de aire, la concentración de ozono, y de las lecturas de la pérdida corona corregidas según la temperatura y presión barométrica de prueba, para luego ser graficadas y analizadas.

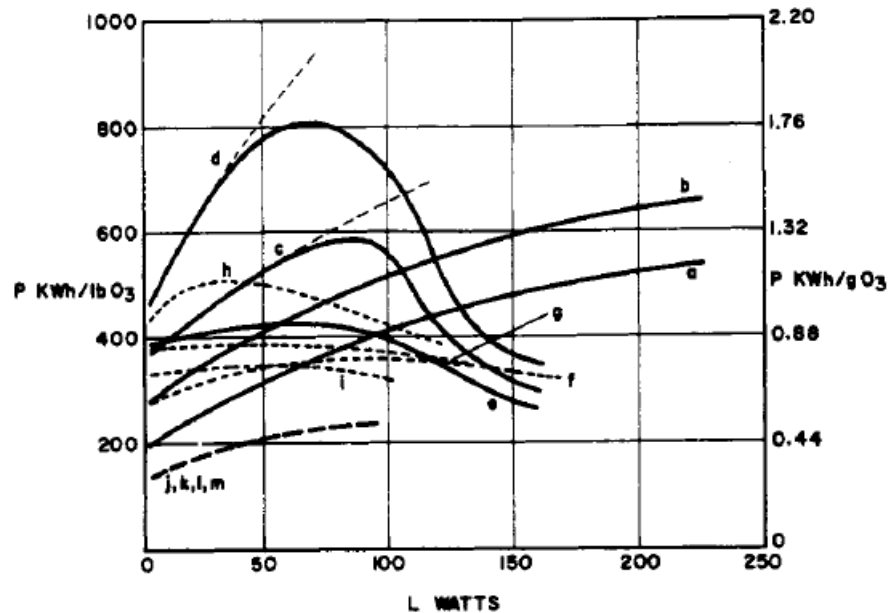
En la figura 12, se muestran los resultados de la correlacion entre la pérdida corona, y la razón de pérdida corona y producción de ozono ( valor inverso a la tasa de producción

#### 4.1. MEDICIÓN DE CONCENTRACIÓN DE OZONO GENERADO POR PÉRDIDA CORONA

de ozono), para varios conductores de prueba, bajo condiciones de clima seco y lluvioso. Las curvas medias fueron las siguientes:

<i>curva media para clima seco</i>		<i>curva media para clima lluvioso</i>	
<i>curva</i>	<i>diámetro del conductor</i>	<i>curva</i>	<i>diámetro del conductor</i>
a:	0,523 cm	f:	1,13 cm
b:	1,13 cm	g:	1,626 cm
c:	1,626 cm y 2,174 cm	h:	3,038 cm
d:	3,038 cm	i:	4 x 1,13 cm
e:	4 x 0,523 cm y 4 x 1,13 cm		

Figura 12: Correlación entre la razón de pérdida corona y producción de ozono  $P$ , y la pérdida corona en la longitud efectiva  $L_e$



Fuente: Stephen A. SEBO, Jhon T. HEIBEL, Maurice FRYDMAN, y, C.H. SHIH. Examination of ozone emanating from EHV transmission line corona discharges. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-95. No. 2.1976

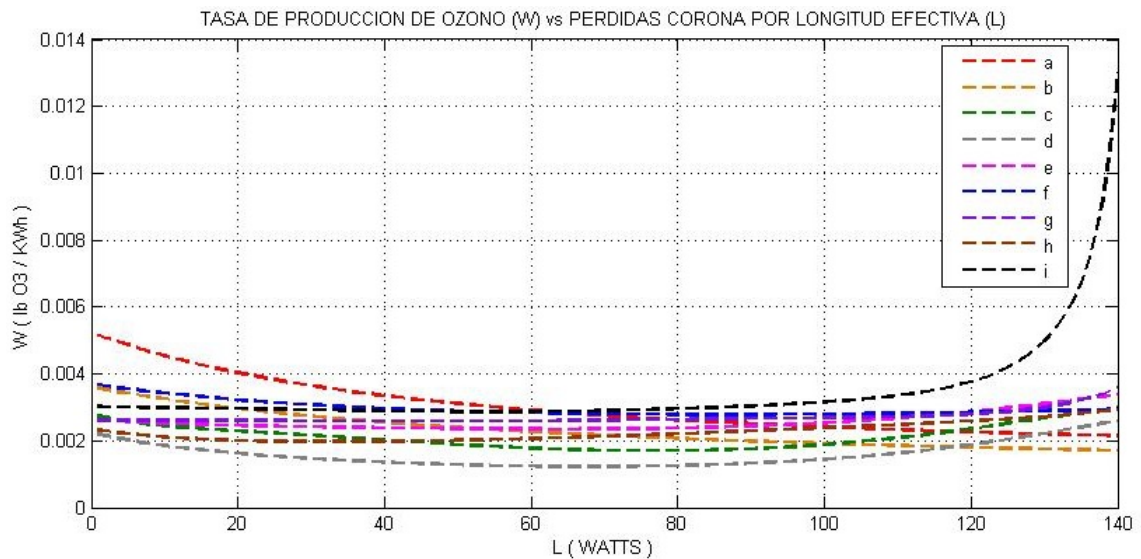
Considerando los 1312 puntos medidos, el promedio de la relación de pérdida corona pa-

#### 4.1. MEDICIÓN DE CONCENTRACIÓN DE OZONO GENERADO POR PÉRDIDA CORONA

ra producir ozono (P) fue de  $0,52 \text{ kWh/g}$  ( $235 \text{ kWh/lb}$ ). Por otro lado, el promedio de la tasa de producción de ozono ( $W = \text{tasaO}_3 = 1/P$ ) fue de  $1,92 \text{ g-O}_3/\text{kWh}$  ( $0,00425 \text{ lb-O}_3/\text{kWh}$ ). La eficiencia de la producción de ozono es de  $100\%$  teóricamente hablando en comparación a la tasa máxima de producción teórica de  $1220 \text{ g-O}_3/\text{kWh}$ . El rendimiento medio de la producción de ozono de los experimentos fue de  $0,157\%$ , y los rendimientos para cada uno de los rangos fue de  $0,037\%$  para clima seco, y  $0,37\%$  para clima lluvioso.

Con base en las curvas mostradas en la figura 12, se muestra la correlación entre los valores de la tasa de generación de ozono  $W$ , en función de la pérdida de ozono en la longitud efectiva del conductor  $L_e$ , en la figura 13, para los cuales se evidencia una tasa constante para las pérdidas corona.

Figura 13: correlacion entre los valores de la tasa de generación de ozono  $W$ , en función de la pérdida de ozono en la longitud efectiva del conductor  $L_e$



SECCIÓN 4.2

ESTIMACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE OZONO EN LAS CERCANÍAS DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

Para determinar la concentración de ozono en las líneas de transmisión, se hace necesaria la aplicación de la teoría de dispersión, dado que dichas concentraciones de efluentes como el ozono, bajo efectos del viento consiguen dispersarse a lo largo de toda la línea y sus cercanías.

La teoría de dispersión empleada en esta investigación, se encuentra plasmada en *Experimental oxidant production rates for EHV transmission lines and theoretical estimates of ozone concentrations near operating lines*, trabajo desarrollado por Roach, Chartier y Dietrichl<sup>4</sup>, quienes basados en las primeras publicaciones de dispersión de humo en un ambiente turbulento, llevadas a cabo por Roberts<sup>5</sup>, consiguieron obtener las ecuaciones necesarias para estimar las concentraciones de ozono bajo los efectos del viento en las líneas de transmisión de corriente trifásica.

**4.2.1 Teoría de dispersión aplicada a líneas de transmisión y generación de efluentes según Roach, Chartier y Dietrich**

La teoría de dispersión se encuentra aplicada a una línea de transmisión trifásica como la que se muestra en la figura 14, la cual se encuentra a lo largo del eje Y, en una configuración horizontal, de modo que en el plano (X, Z), se encuentra la fase central (0,H), y las fases externas en los puntos (-L, H) y (L, H), donde L representa la distancia horizontal a la cual están separadas las fases de la línea, y H la altura de la misma por encima del suelo.

---

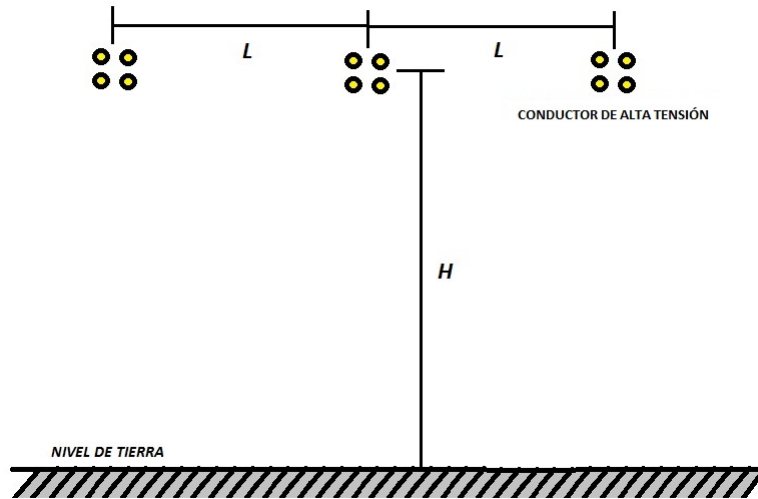
<sup>4</sup>DIETRICH,F.M.; ROACH,J.F.; CHARTIER, V.L. Experimental oxidant production rates for ehv transmission lines and theoretical estimates of ozone concetrations near operating lines. Westinghouse Electric Corporation. East Pittsburgh, Pennsylvania., 1973.

<sup>5</sup>ROBERTS, O. F. T.. The theoretical scattering of smoke in a turbulent atmosphere. Proc. Roy. Soc. A, Vol. 104., 1923. 640-654p.

## 4.2. ESTIMACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE OZONO EN LAS CERCANÍAS DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

Se puede considerar que para cada uno de los haces de conductores, existe sólo una fuente de generación de contaminantes. Cada una de las fuentes posee una imagen, ubicada en  $(0, -H)$  para la fase central, y en  $(-L, H)$  Y  $(L, H)$  para las fases externas, correspondiendo a las fuentes virtuales.

Figura 14: línea de transmisión



Se tienen expresiones matemáticas que permiten estimar la concentración de ozono en las cercanías de la línea a partir de las «fuentes de generación de efluentes», bajo dos tipos de viento, ya sea cada uno de estos estable o inestable, lo que en realidad representa la dispersión de efluentes en la línea de transmisión.

### 4.2.1.1. Viento normal o perpendicular a la línea de transmisión

Para el caso en el que el viento existente es perpendicular a la línea como se muestra en la figura 15, la ecuación que describe la concentración de ozono en las cercanías de la misma es

$$C(X, Z) \cong \sum_{i=1}^3 \frac{\bar{S}_i}{U \sigma_z \sqrt{2\pi}} \left\{ \exp \left[ -\frac{(Z-H)^2}{2(\sigma_z)^2} \right] + \exp \left[ -\frac{(Z+H)^2}{2(\sigma_z)^2} \right] \right\} \quad (4.1)$$

#### 4.2. ESTIMACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE OZONO EN LAS CERCANÍAS DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

donde,

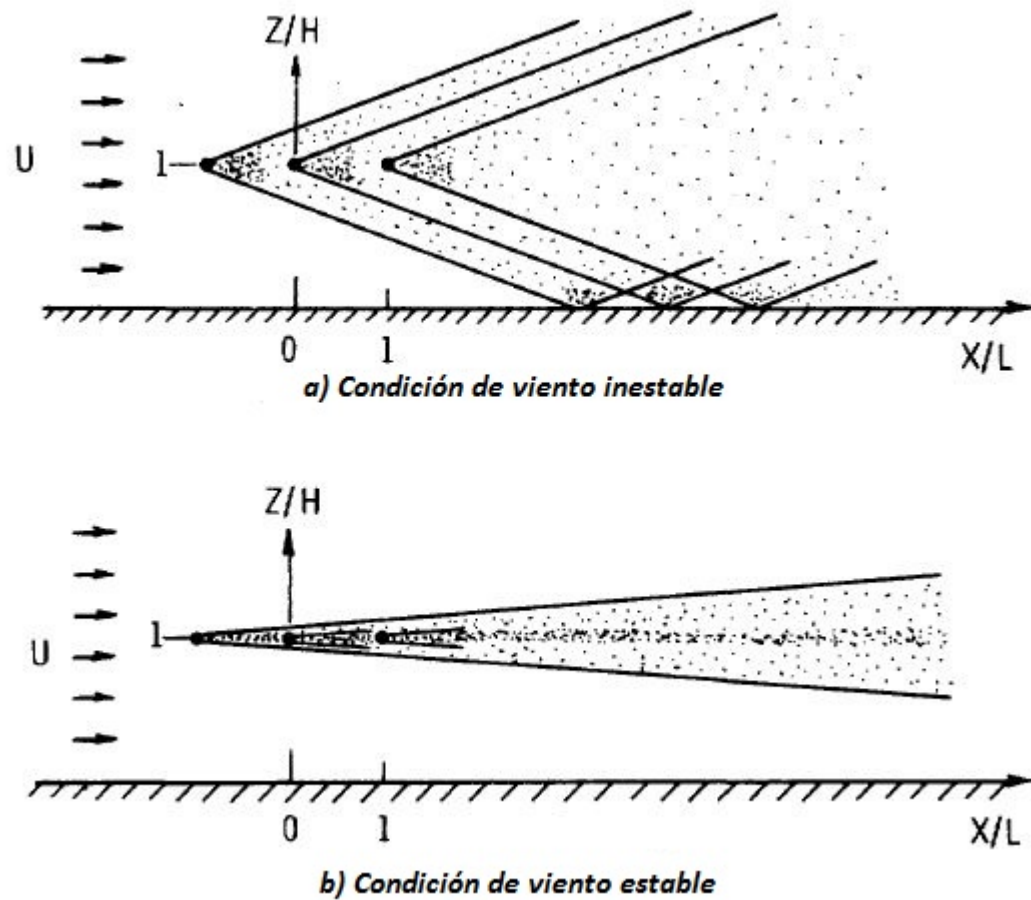
$S_i$  : es la intensidad de la fuente  $i$ , en  $(kg/m/h)$

$U$  : velocidad del viento, en  $(m/h)$

$H$  : altura media de la línea por encima del suelo, en  $(m)$

$\sigma_z$  : coeficiente de difusión en la dirección  $z$

Figura 15: Viento normal o perpendicular a la línea



Fuente: J.F. ROACH, V.L. CHARTIER, y, F.M. DIETRICH. Experimental oxidant production rates for EHV transmission lines and theoretical estimates of ozone concentrations near operating lines. Westinghouse Electric Corporation. East Pittsburgh, Pennsylvania.1973

## 4.2. ESTIMACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE OZONO EN LAS CERCANÍAS DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

---

### 4.2.1.2. Viento paralelo a la línea de transmisión

Para el caso en el que el viento existente es paralelo a la línea como se muestra en la figura 16, las concentraciones se calculan para una línea de longitud finita  $X_0$ . La línea está paralela al eje  $X$ , de modo que la dirección del viento va a lo largo del mismo eje, la longitud de separación de fases se encuentra en el eje  $Y$ , y el eje para la altura sobre el suelo no cambia.

Se supone que cada haz de la línea está compuesta de  $N$  fuentes puntuales de efluentes, igualmente espaciadas. La fuerza de cada uno de las fuentes puntuales es  $\frac{S_i X_0}{N}$ , donde  $S_i$  es la intensidad de la fuente determinada como se describió anteriormente. Sumando las contribuciones de cada una de las fuentes, se tiene la expresión 4.2 que permite estimar la concentración de efluentes en un punto determinado  $(X, Y, Z)$

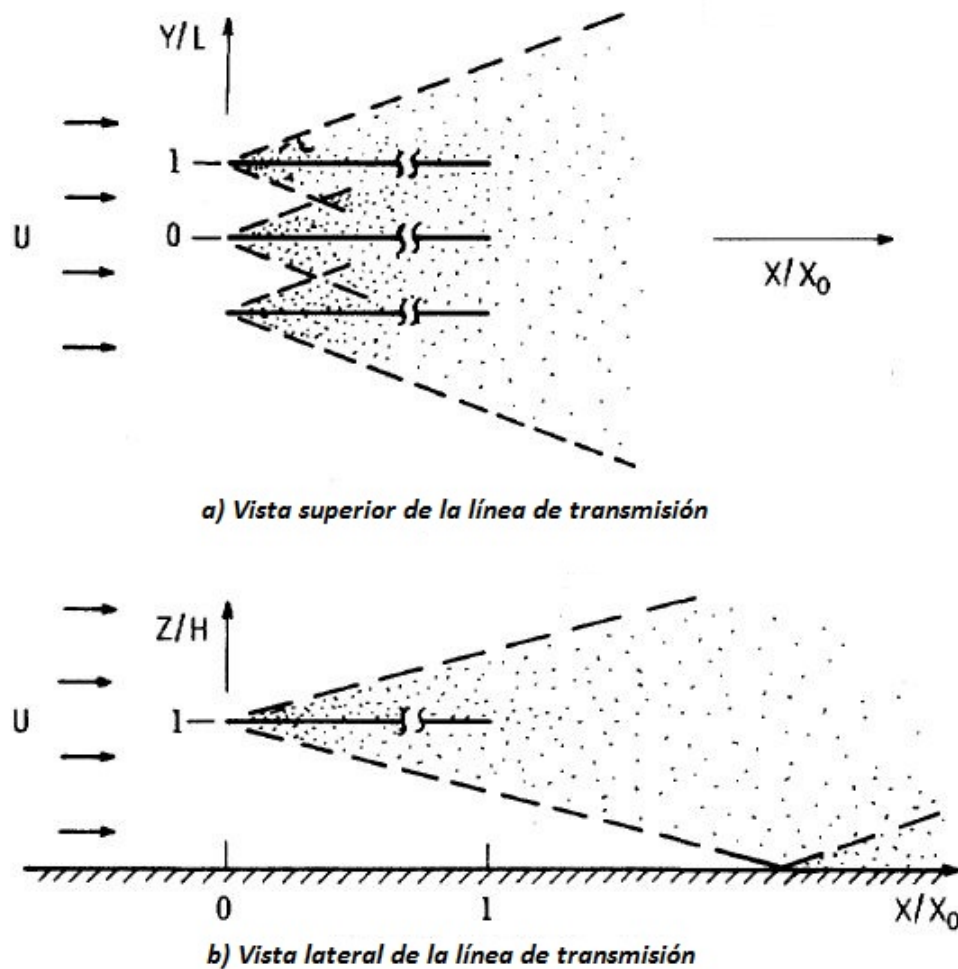
$$C_{(X,Z,Y)} \cong \sum_{i=1}^3 \left[ \frac{\bar{S}_i X_0}{2\pi \cdot U N} \sum_{K=1}^N \frac{1}{\sigma_y \sigma_z} \exp \left[ -\frac{(Y-L_i)^2}{2(\sigma_y)^2} \right] \cdot \left\{ \exp \left[ -\frac{(Z-H)^2}{2(\sigma_z)^2} \right] + \exp \left[ -\frac{(Z+H)^2}{2(\sigma_z)^2} \right] \right\} \right] \quad (4.2)$$

Donde,

- $S_i$  : es la intensidad de la fuente  $i$ , en  $(kg/m/h)$
- $N$  : número de fuentes puntuales de efluentes
- $X_0$  : longitud finita de la línea  $(m)$
- $U$  : velocidad del viento, en  $(m/h)$
- $H$  : altura media de la línea por encima del suelo, en  $(m)$
- $L_i$  : posición de  $i$  -ésima fase
- $\sigma_y$  : coeficiente de difusión en la dirección  $y$
- $\sigma_z$  : coeficiente de difusión en la dirección  $z$

#### 4.2. ESTIMACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE OZONO EN LAS CERCANÍAS DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

Figura 16: Viento paralelo a la línea de transmisión



Fuente: J.F. ROACH, V.L. CHARTIER, y, F.M. DIETRICH. Experimental oxidant production rates for EHV transmission lines and theoretical estimates of ozone concentrations near operating lines. Westinghouse Electric Corporation. East Pittsburgh, Pennsylvania.1973

##### 4.2.1.3. Intensidad de la fuente de efluentes

La intensidad de la fuente de efluentes en la línea de transmisión, bajo cualquiera de los dos tipos de viento de la línea se determina por la multiplicación de la pérdida de corona calculada mediante las ecuaciones 2.3 y 2.4 mostradas en el capítulo 2, y la tasa de producción de ozono. Para ello, se hace necesaria la estimación de la tasa de

## 4.2. ESTIMACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE OZONO EN LAS CERCANÍAS DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

---

producción de ozono  $W$  mediante la ecuación 4.3,

$$W = TasaO_3 \text{ (lbs/kWh)} = \left\{ 3,75 * 10^{-5} \left( \frac{M}{22,4} \right) \left( \frac{273}{T} \right) P \right\} \cdot \left( \frac{Q}{Le} \right) \frac{d[C]}{dPl} \quad (4.3)$$

donde,

$M$  : masa molar en [gramos/mol]

$T$  : temperatura absoluta en [°K]

$P$  : presión atmosférica en [atm]

$Q$  : tasa de flujo de aire en [ft<sup>3</sup>/min]

$Le$  : Longitud efectiva de conductor en [ft]

$C$  : concentración de ozono en [pphm]

$P_L$  : Pérdida corona en [W/fl]

### 4.2.1.4. Coeficientes de dispersión

Al momento de calcular el valor concentración de ozono en un punto determinado, se requiere del valor de los coeficientes de dispersión, obtenidos mediante las ecuaciones 4.4 y 4.5, para condiciones de viento estable e inestable respectivamente, ya sea bajo un viento paralelo o perpendicular a la línea de transmisión.

$$\begin{aligned} \text{viento estable} \implies \quad \sigma_z &= 0,06 (X - X_i)^{0,71} \\ \sigma_y &= 5 \sigma_z \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} \text{viento inestable} \implies \quad \sigma_z &= 0,0315 \left[ \frac{23}{U} + 4,75 \left( \frac{100}{H} \right)^{0,25} \right] (X - X_i)^{0,86} \\ \sigma_y &= \left( \frac{10}{7} \right) \sigma_z \end{aligned} \quad (4.5)$$

SECCIÓN 4.3

## CONCENTRACIÓN DE OZONO EN LAS CERCANÍAS DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

El objetivo principal del desarrollo de este trabajo, radica en la estimación de la concentración de ozono en un punto que se encuentre cercano a la línea de transmisión, debida a las pérdidas por corona producidas en dicha línea, bajo condiciones de clima seco o clima lluvioso, teniendo en cuenta diversas condiciones de viento. Para ello fue necesario el diseño de una herramienta computacional en la que se emplea información de los estudios consignados en las secciones 4.1 y 4.2, y aplicar dicha información no sólo a líneas de transmisión con configuración horizontal, sino también a las principales configuraciones existentes en el sistema eléctrico.

### 4.3.1 Algoritmo propuesto para el desarrollo de la investigación

Para llegar al cumplimiento del objetivo general del trabajo, que abarca la estimación del nivel de ozono en las cercanías de una línea de transmisión generado por pérdida corona, siendo este expresado en unidades de concentración (*pphm*), se planteó un conjunto ordenado de operaciones matemáticas como se muestra a continuación.

**1. Cálculo de pérdida corona por fase:** El valor de pérdida corona puede ser encontrado empleando el método de Peterson mostrado en la ecuación 2.3 en el caso de que la línea tenga un sólo conductor por fase, o el método de la Electricité de France mostrado en la ecuación 2.4 para más de un conductor por fase.

**2. Cálculo de pérdida corona por fase para una longitud efectiva:** La estimación de la pérdida corona en este punto para el desarrollo de este trabajo, se halla para una longitud efectiva  $Le = 1,52$  [m], debido a que los valores mostrados en la figura 12, se obtuvieron para un conductor de prueba de dicha longitud.

### 4.3. CONCENTRACIÓN DE OZONO EN LAS CERCANÍAS DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

---

**3. Estimación de la tasa de generación de ozono por pérdida corona:** Para este aspecto, se utilizaron los datos arrojados por el estudio descrito en la sección 4.2, debido a que este trabajo presenta una modalidad investigativa por la inexistencia del montaje experimental requerido. De la figura 13, se extrae la tasa de producción de ozono ( $W = tasa_{O_3} = 1/P$ ), para la pérdida de corona encontrada en el ítem anterior.

**4. Estimación de la concentración de ozono en las cercanías de la línea de transmisión:** El cálculo de la concentración se lleva a cabo por medio del uso de las ecuaciones consignadas en la sección 4.2, ya sea para el caso de viento perpendicular (ecuación 4.1) o para el caso de viento paralelo (ecuación 4.2), para condiciones de viento estable o inestable en ambos casos.

**5. Relación existente entre pérdida corona y concentración de ozono:** En la sección 4.2, se muestra la ecuación 4.3, por medio de la cual se encuentra la relación de concentración de ozono y las pérdidas corona, dando solución a la ecuación diferencial de la siguiente manera:

Partiendo de 4.3, y resolviendo la ecuación diferencial se tiene

$$C = \left( \frac{256 \cdot 10^3 L_e P_L W T}{117 M P Q} \right) \quad [pphm] \quad (4.6)$$

donde

$L_e$  : Longitud efectiva del conductor, 1.52 [ft]

$P_L$  : Pérdida corona en [W/fl]

$M$  : Masa molar en [gramos/mol]

$T$  : Temperatura absoluta en [K].

$P$  : Presión atmosférica en [atm]

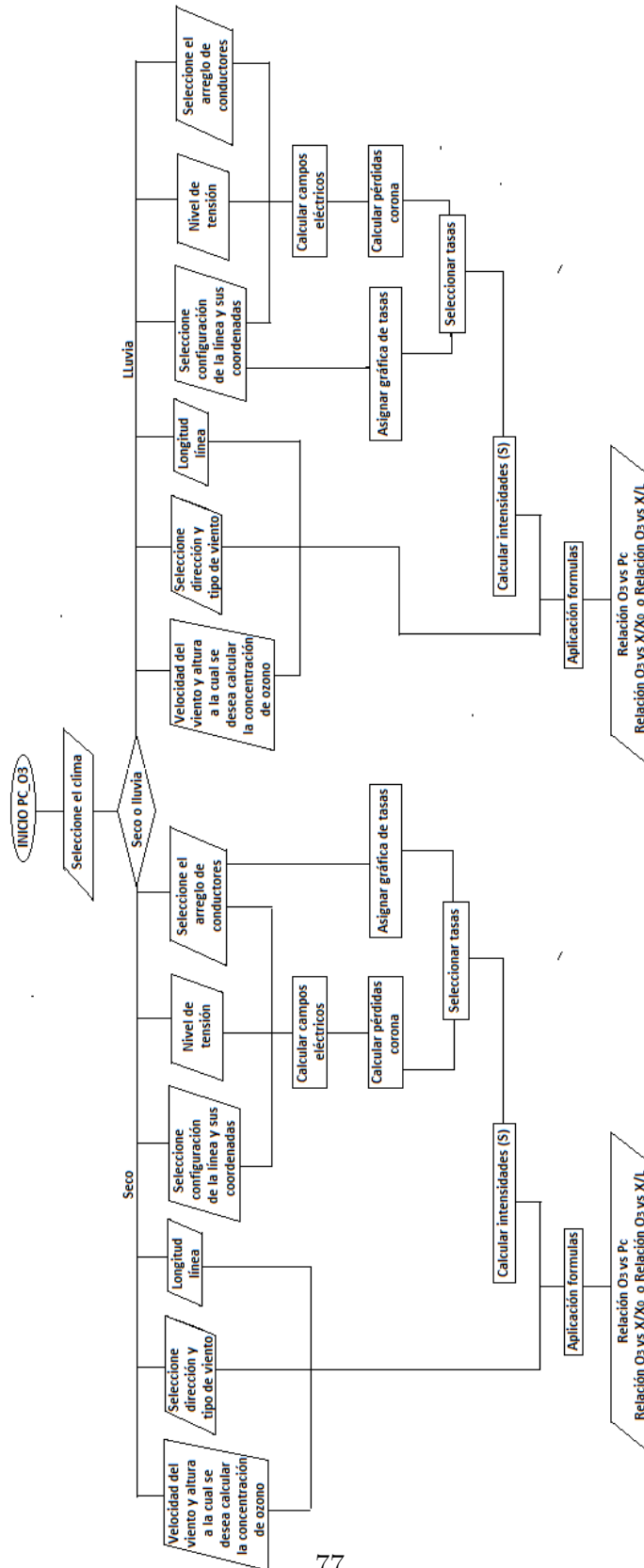
$W$  : Tasa de producción de ozono [lbs/kWh]

$Q$  : Tasa de flujo de aire en [ft<sup>3</sup>/min]

Para finalmente lograr la consecución de la relación entre los valores de pérdida corona, y la concentración de ozono, se empleó en el desarrollo de la herramienta computacional PC\_O<sub>3</sub>, realizada en Matlab, mostrada en el anexo A, representada por la Figura 17.

### 4.3. CONCENTRACIÓN DE OZONO EN LAS CERCANÍAS DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

Figura 17: Algoritmo



---

# 5

## ANÁLISIS Y RESULTADOS

---

La finalidad del objetivo general del trabajo realizada, se resume en la determinación del nivel de ozono generado por las pérdidas corona en las líneas de transmisión. Para la consecución del mismo, se hizo necesaria la realización de una herramienta computacional, como se mencionó en la sección 4.3 del capítulo anterior, la cual simulase y ajustase datos tomados de estudios experimentales, a funciones que correlacionaran los valores de concentración de ozono y pérdida corona, teniendo en cuenta el comportamiento de dicha pérdida bajo diferentes condiciones de tiempo climático.

Esta interfaz, permite elegir entre diversos tipos de configuraciones para líneas de transmisión, expuestas a diferentes condiciones de tiempo climático, y fluctuaciones de viento, para consecuentemente estimar gráficas que muestran cómo se dispersa la concentración de ozono a lo largo de la línea. Para una descripción más detallada remitirse al anexo [A](#).

SECCIÓN 5.1

ANÁLISIS

**5.1.1 Corona bajo condiciones ambientales**

En el capítulo 2, se mostró que es de suma importancia tener en cuenta el valor mínimo de tensión bajo el cual se comienza a presentar la descarga corona, valor denominado *gradiente crítico*, puesto que las pérdidas por corona presentadas en una línea de transmisión dependen de dicho gradiente. Para valores muy grandes del gradiente crítico  $E_0$  las pérdidas corona se hacen menores, y de manera contraria, para valores de  $E_0$  muy pequeños, las pérdidas corona se incrementan (ver ecuaciones 2.3 y 2.4).

A su vez, el gradiente crítico de inicio de corona  $E_0$ , depende de las condiciones meteorológicas (humedad, lluvia, presión y temperatura) a las cuales se encuentra expuesta la línea.

**5.1.1.1. Corona bajo condiciones de presión y temperatura (densidad relativa del aire)**

Como se expuso en la sección 2.2, la densidad relativa del aire (ecuación 2.2) depende de la presión de manera directa, y de la temperatura de manera inversa. Para valores grandes de densidad relativa del aire  $\delta$  el gradiente de inicio corona es mayor, lo que disminuye las pérdidas corona. Por el contrario, para valores pequeños de  $\delta$  el gradiente de inicio corona  $E_0$  toma valores pequeños, incrementando las pérdidas corona.<sup>1</sup>

**5.1.1.2. Corona bajo condiciones de lluvia**

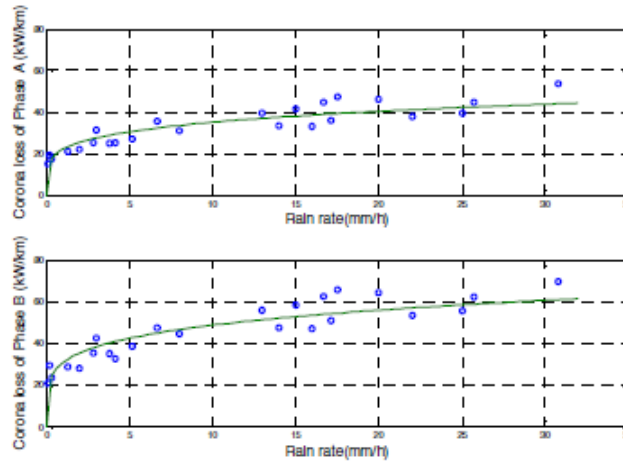
Las pérdidas corona varían como función de la tasa de lluvia para conductores en configuraciones de alta tensión. Por lo general, un aumento en la tasa de lluvia, está

---

<sup>1</sup>RUGELES, Julio; CHACÓN, Julio. Laboratorio de alta tensión-manual de prácticas. Bucaramanga: UIS, 2013

acompañado de un incremento en la pérdida corona como se muestra en la Figura 18.<sup>2</sup>

Figura 18: Curva de pérdida corona para diferentes intensidades de lluvia



Fuente: Yunpeng LIU, Shaohua YOU, Qifa WAN, Fangcheng LU, Weijiang CHEN, y Yong CHEN.UHV AC Corona loss Measurement and Analysis under Rain. Proceedings of the 9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. A-29.Harbin, China. 2009

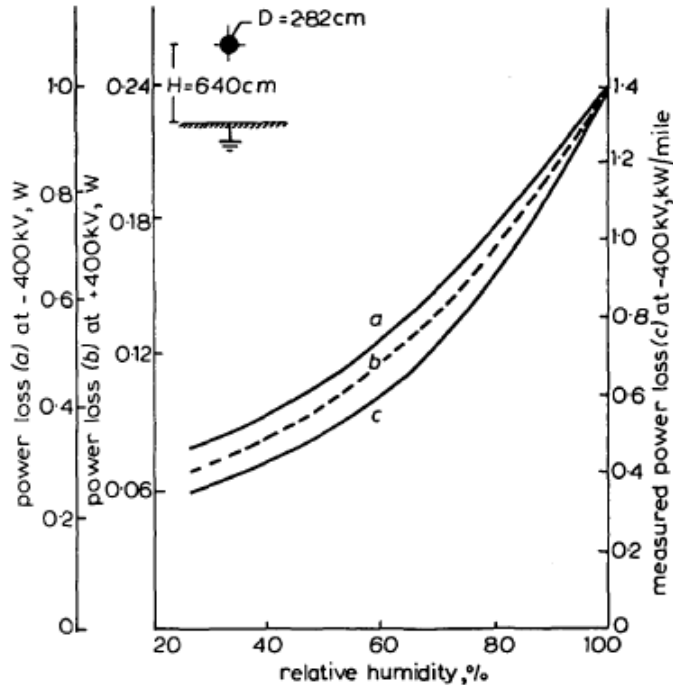
### 5.1.1.3. Corona bajo condiciones de humedad

Debido a que la humedad reduce la movilidad de los electrones libres que ocasionan la descarga, el gradiente de inicio de corona  $E_0$  es más pequeño. Por consiguiente, durante la condición de clima húmedo, la pérdida por corona es mucho mayor, mientras que para condiciones de clima seco es mucho menor (ver Figura 19) [?]<sup>3</sup>.

<sup>2</sup>LIU, Yunpeng ; YOU, Shaohua; WAN,Qifa; LU,Fangcheng ; CHEN,Weijiang; CHE,Yong. Proceedings of the 9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. A-29.Harbin, China.

<sup>3</sup>MENG,Xiaobo; HUI,Jianfeng; MEI, Hongwei; WANG,Liming; GUAN, Zhicheng.

Figura 19: Variación de valores medidos y calculados de pérdida corona bajo humedad realtiva



Fuente: M. KHALIFA, M.Sc, Ph.D., C.Eng., M.I.E.E., and S. El-Debeiky, M.Sc, Ph.D. Analysis of the effect of humidity on d.c. corona power losses.

### 5.1.2 Pérdida corona y Ozono

Debido a que la estimación del nivel de ozono generado por pérdida corona para una línea de transmisión requiere de la medición y obtención de datos experimentales, se limitó dicha estimación a cierto tipo de conductores, dispuestos en líneas de transmisión de diferentes tensiones, y distintas configuraciones.

Para la realización de este trabajo, se tomaron las tensiones normalizadas en Colombia para extra alta y alta tensión de 220 kV, 230 kV, y 500 kV según el Sistema Interconectado Nacional (SIN), bajo la Resolución CREG 097 de 2008<sup>4</sup>, en la que se define como sigue:

<sup>4</sup>CREG. Resolución 097. Tensiones normalizadas en Colombia para extra alta y alta tensión. 2008

\*Nivel 5: Sistemas con tensión nominal superiores a 220 *kV*.

\* Nivel 4: Sistemas con tensión nominal mayor o igual a 57,5 *kV* y menor a 220 *kV*.

\* Nivel 3: Sistemas con tensión nominal mayor o igual a 30 *kV* y menor de 57,5 *kV*.

\*Nivel 2: Sistemas con tensión nominal mayor o igual a 1 *kV* y menor de 30 *kV*.

\*Nivel 1: Sistemas con tensión nominal menor a 1 *kV*.

Para las configuraciones se tuvieron en cuenta las disposiciones más empleadas en el Sistema Interconectado Nacional, dentro de las cuales se encuentran: configuración horizontal, configuración vertical circuito sencillo y configuración vertical doble circuito, y, configuración delta.

Los conductores empleados en el desarrollo de este trabajo fueron los mismos que se usaron en estudio mostrado en la sección 4.1, expuestos en la tabla 2. Para estos conductores, se tienen valores experimentales medidos, que arrojan la correlación entre el valor de pérdida corona y la tasa de producción de ozono. Los resultados experimentales arrojados (ver sección 4.1), demuestran que para rangos de pérdida corona en estos conductores, bajo condiciones de clima lluvioso y seco, las tasas de producción de ozono medidas fueron aproximadamente constantes, como se muestra en la Figura 13.

Teniendo valores de tasas de producción de ozono constantes, según el estudio descrito en la sección 4.2, se emplea la ecuación 4.3,

$$W = TasaO_3 \text{ (lbs/kWh)} = \left\{ 3,75 * 10^{-5} \left( \frac{M}{22,4} \right) \left( \frac{273}{T} \right) P \right\} \cdot \left( \frac{Q}{Le} \right) \frac{d[C]}{dPl}$$

para la cual, del término  $\frac{d[C]}{dPl}$  es posible dar solución a la ecuación diferencial, obteniendo la correlación entre el valor de pérdidas corona de la línea en (*W/m*) y el valor de concentración de ozono en (*pphm*). Los valores de masa molar del ozono *M*, presión atmosférica *P*, temperatura *T*, longitud efectiva del conductor *Le*, y tasa de flujo de aire *Q*, se tomaron como valores constantes debido a que los valores de las tasas de producción experimentales extraídas del estudio mostrado en 4.1 se midieron bajo estas condiciones, totalmente constantes, tomando cada una, los valores que se muestran en la tabla 3

Tabla 3: Valores constantes tomados para la investigación

$M$	48 [g/mol]
$P$	1 [atm]= 101,3247 [kPa]
$T$	25 °C
$Le$	1,52 [m]
$Q$	1240[ft <sup>3</sup> /min]= 0,5852[m <sup>3</sup> /seg]; para conductores individuales
	1880[ft <sup>3</sup> /min]= 0,8873[m <sup>3</sup> /seg]; para conductores en haz

La relación encontrada para las pérdidas corona ( $W/m$ ) y la tasa de producción de ozono ( $p_{phm}$ ), muestra una dependencia lineal entre las dos variables, lo que implica que al aumentar las pérdidas corona en la línea de transmisión, la cantidad de ozono producido por la misma se incrementará en la misma proporción (ver sección 4.1).

### 5.1.3 Dispersión de la concentración de ozono en las cercanías de la línea de transmisión

Como se especificó en la sección 4.2, las concentraciones de ozono bajo condiciones de viento en la línea de transmisión, consiguen estimarse mediante la teoría de dispersión. Esta teoría, en primera instancia publicada por Roberts<sup>5</sup>, aplicada a la dispersión de humo, fue tomada por la Agencia de Protección Ambiental del Norte de California, presentandola en el « Libro de estimaciones de la dispersión atmosférica»<sup>6</sup>, en el que se muestran diversos problemas de dispersión atmosférica y la forma de estudiar el correspondiente comportamiento de efluentes.

En el desarrollo de este trabajo, se tienen dos casos de estudio, para los cuales, en uno de ellos la línea de transmisión se encuentra sometida a un viento paralelo, y en el otro a un viento perpendicular, pudiendo ser para ambos casos, viento estable o inestable, como se explicó en la sección 4.2.

<sup>5</sup>ROBERTS, O. F. T. The Theoretical Scattering of Smoke in a Turbulent Atmosphere. Proc. Roy. Soc. A, Vol. 104.

<sup>6</sup>BRUCE TURNER, D. Workbook of atmospheric dispersion estimates. Air Resources Field Research Office, Environmental Science Services Administration. North Carolina., 1970.

Se realizó el análisis matemático con base en lo estipulado en «el libro de estimaciones de la dispersión atmosférica», par ambos casos (viento paralelo y viento inestable), con el objetivo de llegar a las ecuaciones 4.1 y 4.2, como se muestra a continuación, partiendo de una fuente de emisión de efluentes.

### 5.1.3.1. Dispersión de concentración de efluentes bajo un viento paralelo

Se considera una fuente puntual que genera una intensidad de efluentes  $Q_1$ , a una altura  $H$ , sometida a un viento paralelo en dirección al eje de coordenadas  $X$ , como se muestra en la Figura 20. La ecuación que describe la concentración de efluentes en un punto es

$$C(X,Y,Z)=\frac{Q_1}{U}\left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y}\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Y}{\sigma_y}\right)^2\right)\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z}\left(\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_z}\right)^2\right)+\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_z}\right)^2\right)\right)\right] \quad (5.1)$$

donde,

$Q_i$  : es la intensidad de la fuente  $i$  de efluentes, en  $(kg/m/h)$

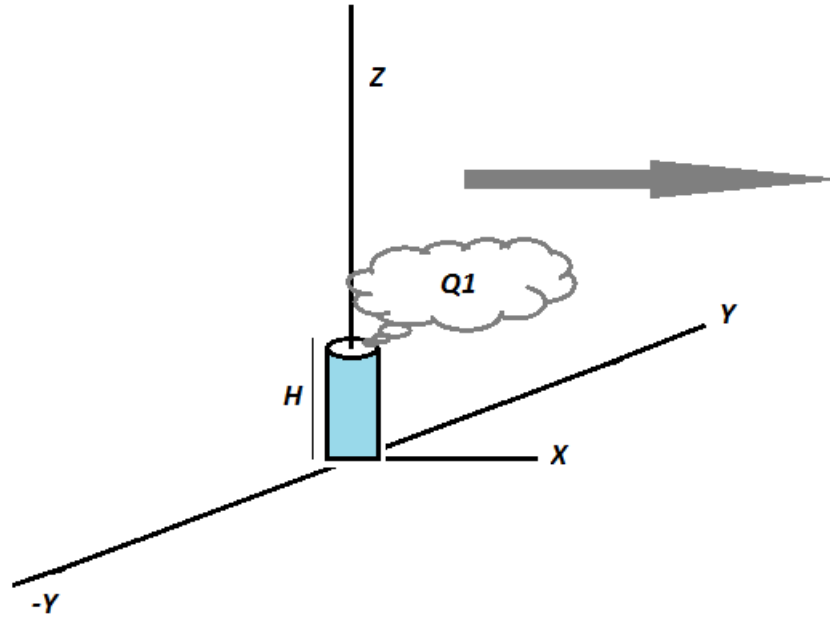
$U$  : velocidad del viento, en  $(m/h)$

$H$  : altura media de la fuente de efluentes, en  $(m)$

$\sigma_y$  : coeficiente de difusión en la dirección  $y$

$\sigma_z$  : coeficiente de difusión en la dirección  $z$

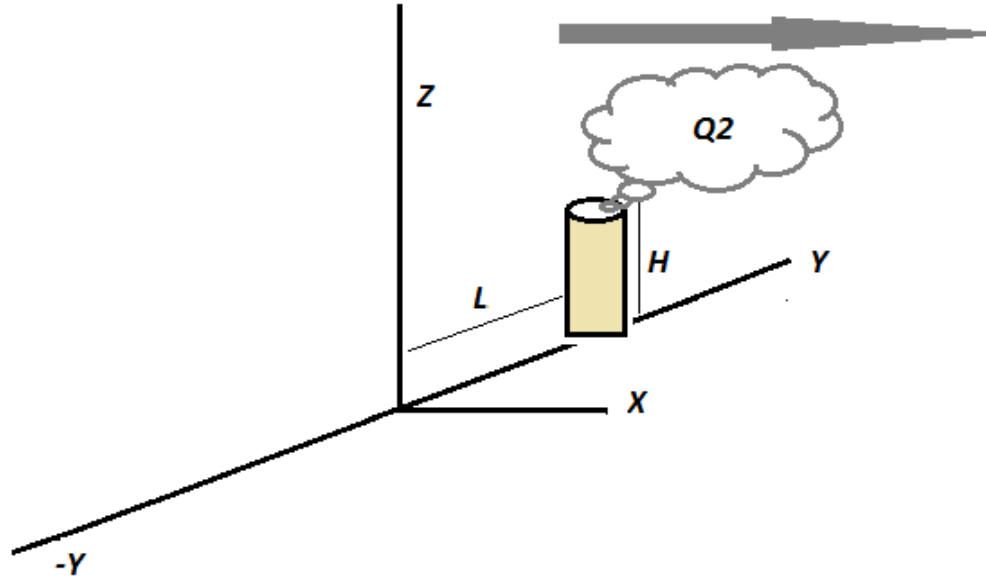
Figura 20: Concentración de efluentes debida a una fuente puntual con intensidad de efluentes  $Q_1$



Ahora se considera que existe una segunda fuente puntual que genera una intensidad de efluentes  $Q_2$ , ubicada una distancia  $L$  a lo largo del eje positivo de coordenadas de  $Y$ , sometida al mismo tipo de viento, como se muestra en la Figura 21. La ecuación que describe la concentración de efluentes en un punto determinado, es la misma ecuación mostrada para la fuente puntual inicial con intensidad de efluentes  $Q_1$ , sólo que en este caso hay una variación en el eje positivo de coordenadas  $Y$ , como se muestra en la ecuación 5.2.

$$C(X,Y,Z) = \frac{Q_2}{U} \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Y-L}{\sigma_y}\right)^2\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \left( \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_z}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_z}\right)^2\right) \right) \right] \quad (5.2)$$

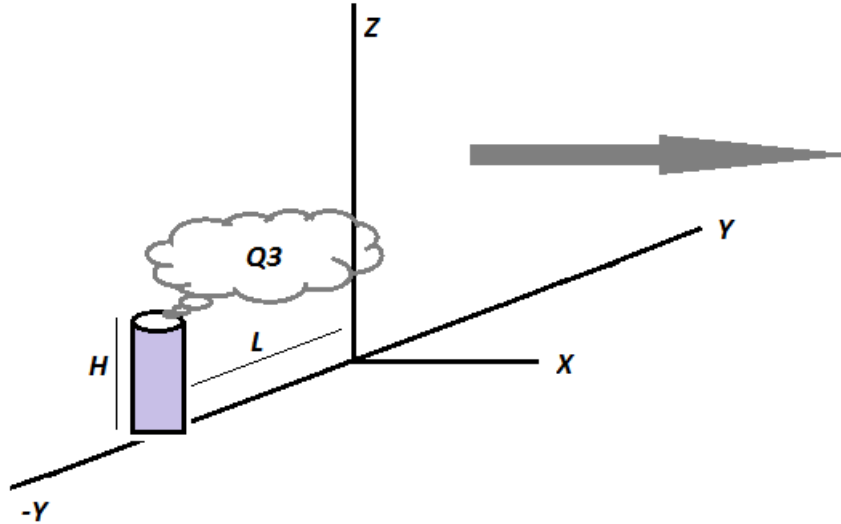
Figura 21: Concentración de efluentes debida a una fuente puntual con intensidad de efluentes  $Q_2$



Considerando un tercera fuente puntual con intensidad de efluentes  $Q_3$  ubicada a una distancia  $L$ , ahora sobre el eje negativo de coordenadas  $Y$ , como se ilustra en la Figura 22, y al igual que las fuentes puntuales con intensidades de efluentes  $Q_1$  y  $Q_2$  sometida a un viento paralelo, la ecuación que describe la concentración de efluentes en un punto es

$$C(X,Y,Z) = \frac{Q_3}{U} \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Y+L}{\sigma_y}\right)^2\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \left( \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_z}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_z}\right)^2\right) \right) \right] \quad (5.3)$$

Figura 22: Concentración de efluentes debida a una fuente puntual con intensidad de efluentes  $Q_3$



Si las tres fuentes puntuales de efluentes mencionadas anteriormente, se encuentran sometidas al mismo viento paralelo simultáneamente (ver Figura 23), la ecuación que describe la concentración de efluentes en un punto determinado es

$$C(X,Y,Z) = \frac{Q_1}{U} \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Y}{\sigma_y}\right)^2\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_z}} \left( \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_z}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_z}\right)^2\right) \right) \right] +$$

$$\frac{Q_2}{U} \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Y-L}{\sigma_y}\right)^2\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_z}} \left( \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_z}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_z}\right)^2\right) \right) \right] +$$

$$\frac{Q_3}{U} \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Y+L}{\sigma_y}\right)^2\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_z}} \left( \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_z}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_z}\right)^2\right) \right) \right]. \quad (5.4)$$

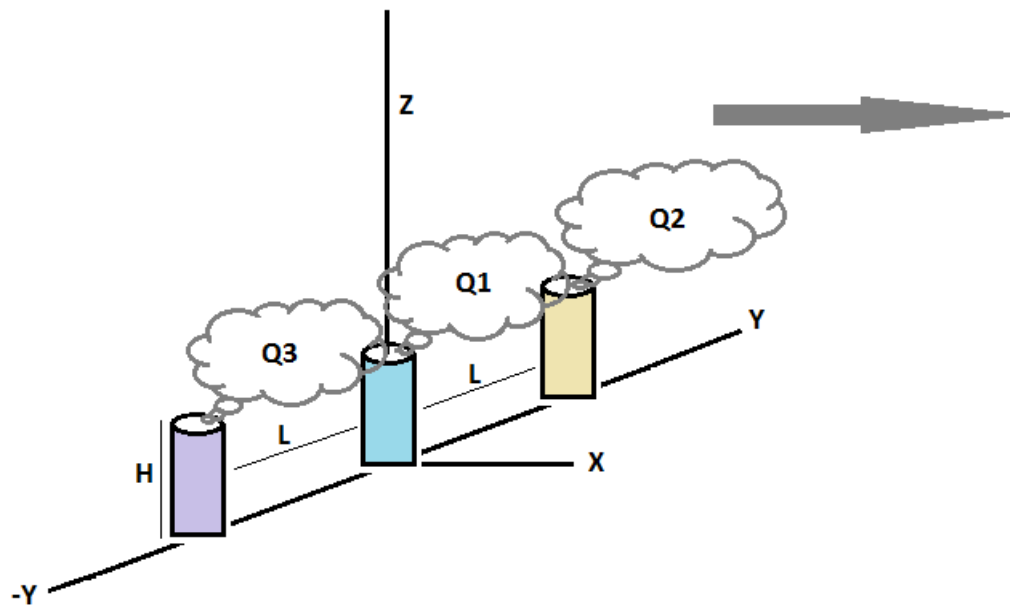
$$(5.5)$$

La ecuación 5.4, puede expresarse mediante términos de una sumatoria, como se muestra

en la ecuación 5.6.

$$C(X,Y,Z)=\left(\sum_{i=1}^2 \frac{Q_i}{U} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Y-L_i}{\sigma_y}\right)^2\right)\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_z}} \left(\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_z}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_z}\right)^2\right)\right) \quad (5.6)$$

Figura 23: Concentración de efluentes debida a tres fuentes puntuales, cada una con intensidades de efluentes  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$  sometidas a un viento paralelo simultáneamente



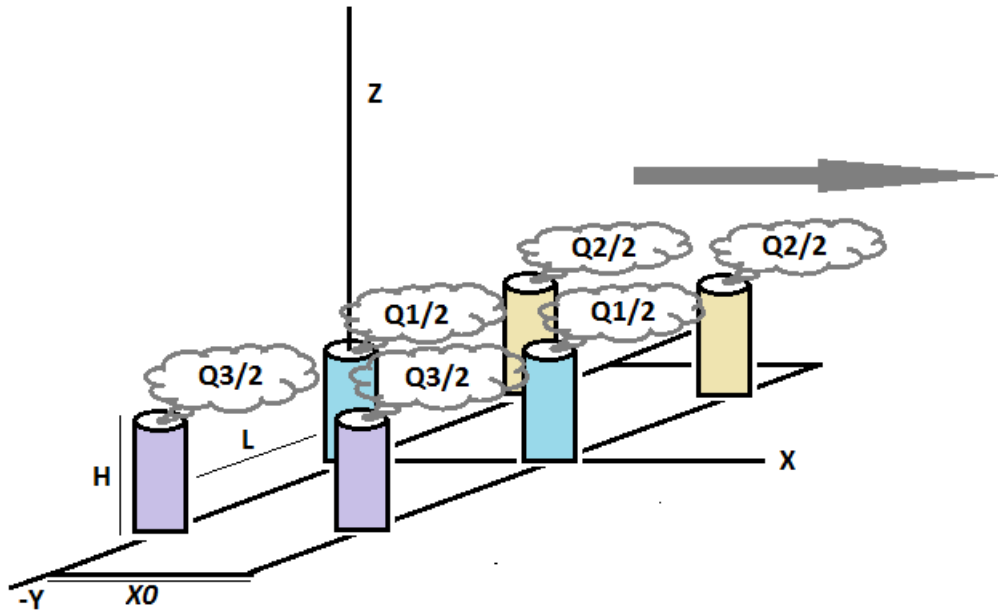
Ahora, se considera, que cada una de las intensidades de efluentes  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$ , está siendo generada no sólo por una sola fuente puntual, sino, por dos fuentes puntuales como se muestra en la Figura 24. Por consiguiente, cada una de las fuentes puntuales, brinda una contribución de intensidad de  $\frac{Q_1}{2}$ ,  $\frac{Q_2}{2}$ , y  $\frac{Q_3}{2}$ , y la ecuación 5.7 describe la concentración de efluentes en un punto determinado.

$$\begin{aligned}
 C(X,Y,Z) &= \frac{Q_1}{2U} \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{y1}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Y}{\sigma_{y1}}\right)^2\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{z1}} \left( \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_{z1}}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_{z1}}\right)^2\right) \right) \right] + \\
 & \frac{Q_2}{2U} \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{y1}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Y-L}{\sigma_{y1}}\right)^2\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{z1}} \left( \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_{z1}}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_{z1}}\right)^2\right) \right) \right] + \\
 & \frac{Q_3}{2U} \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{y1}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Y+L}{\sigma_{y1}}\right)^2\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{z1}} \left( \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_{z1}}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_{z1}}\right)^2\right) \right) \right] + \\
 & \frac{Q_1}{2U} \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{y2}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Y}{\sigma_{y2}}\right)^2\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{z2}} \left( \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_{z2}}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_{z2}}\right)^2\right) \right) \right] + \\
 & \frac{Q_2}{2U} \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{y2}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Y-L}{\sigma_{y2}}\right)^2\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{z2}} \left( \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_{z2}}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_{z2}}\right)^2\right) \right) \right] + \\
 & \frac{Q_3}{2U} \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{y2}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Y+L}{\sigma_{y2}}\right)^2\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{z2}} \left( \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_{z2}}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_{z2}}\right)^2\right) \right) \right]. \tag{5.7}
 \end{aligned}$$

La ecuación 5.7, puede expresarse bajo términos de sumatorias como se muestra en la ecuación 5.8

$$C(X,Y,Z) = \sum_{i=1}^3 \left[ \frac{S_i X_0}{2(2\pi U)} \sum_{k=1}^2 \frac{1}{\sigma_{yk}\sigma_{zk}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Y-L_i}{\sigma_{yk}}\right)^2\right) \left( \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_{zk}}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_{zk}}\right)^2\right) \right) \right] \tag{5.8}$$

Figura 24: Intensidad de las fuentes de efluentes  $Q_1$ ,  $Q_2$ , y  $Q_3$ , cada una generada por dos fuentes puntuales

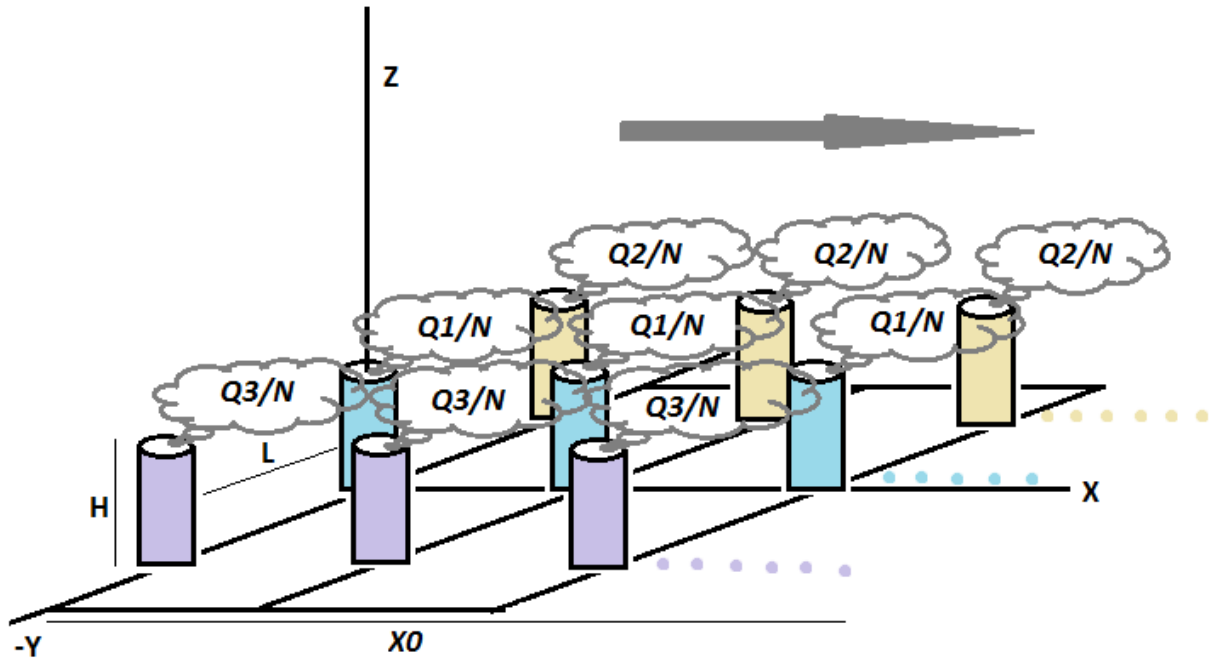


Finalmente, considerando que ahora cada una de las intensidades de efluentes  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$ , se genera por un número  $N$  de fuentes puntuales distribuidas a lo largo de una longitud finita  $X_0$  igualmente espaciadas (para cada intensidad), se tiene que la contribución de cada fuente puntual está dada por  $\frac{Q_1}{N}$ ,  $\frac{Q_2}{N}$ , y  $\frac{Q_3}{N}$ , como se muestra en la Figura 25. La ecuación que describe la concentración de efluentes en un punto determinado

para este caso se expresa mediante la ecuación

$$\begin{aligned}
 C_{(X,Y,Z)} = & \frac{Q_1}{NU} \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{y1}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Y}{\sigma_{y1}}\right)^2\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{z1}} \left( \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_{z1}}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_{z1}}\right)^2\right) \right) \right] + \\
 & \frac{Q_2}{NU} \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{y1}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Y-L}{\sigma_{y1}}\right)^2\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{z1}} \left( \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_{z1}}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_{z1}}\right)^2\right) \right) \right] + \\
 & \frac{Q_3}{NU} \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{y1}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Y+L}{\sigma_{y1}}\right)^2\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{z1}} \left( \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_{z1}}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_{z1}}\right)^2\right) \right) \right] + \\
 & \frac{Q_1}{NU} \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{y2}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Y}{\sigma_{y2}}\right)^2\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{z2}} \left( \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_{z2}}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_{z2}}\right)^2\right) \right) \right] + \\
 & \frac{Q_2}{NU} \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{y2}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Y-L}{\sigma_{y2}}\right)^2\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{z2}} \left( \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_{z2}}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_{z2}}\right)^2\right) \right) \right] + \\
 & \frac{Q_3}{NU} \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{y2}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Y+L}{\sigma_{y2}}\right)^2\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{z2}} \left( \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_{z2}}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_{z2}}\right)^2\right) \right) \right] \dots + \\
 & \frac{Q_1}{NU} \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{yN}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Y}{\sigma_{yN}}\right)^2\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{zN}} \left( \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_{zN}}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_{zN}}\right)^2\right) \right) \right] + \\
 & \frac{Q_1}{NU} \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{yN}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Y}{\sigma_{yN}}\right)^2\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{zN}} \left( \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_{zN}}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_{zN}}\right)^2\right) \right) \right] + \\
 & \frac{Q_2}{NU} \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{yN}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Y-L}{\sigma_{yN}}\right)^2\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{zN}} \left( \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_{zN}}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_{zN}}\right)^2\right) \right) \right] \dots + \\
 & \frac{Q_3}{NU} \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{yN}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Y+L}{\sigma_{yN}}\right)^2\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{zN}} \left( \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_{zN}}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_{zN}}\right)^2\right) \right) \right] \quad (5.9)
 \end{aligned}$$

Figura 25: Intensidad de las fuentes de efluentes  $Q_1$ ,  $Q_2$ , y  $Q_3$ , cada una generada por  $N$  fuentes puntuales



La ecuación 5.9 puede expresarse en términos de sumatoria como sigue

$$C(X,Y,Z) = \sum_{i=1}^3 \left[ \frac{Q_i}{N(2\pi U)} \sum_{k=1}^N \frac{1}{\sigma_{yk}\sigma_{zk}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Y-L_i}{\sigma_{yk}}\right)^2\right) \left( \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_{zk}}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_{zk}}\right)^2\right) \right) \right] \quad (5.10)$$

Para el caso específico en el que se generan efluentes de ozono, el término  $Q_i$  mostrado en la ecuación 5.10 se hace  $S_i X_0$ , donde  $S_i$  se halla como se indica en la subsección 4.2.1.3, para finalmente encontrar la concentración de ozono en un punto determinado por medio de la ecuación

$$C(X,Y,Z) = \sum_{i=1}^3 \left[ \frac{S_i X_0}{N(2\pi U)} \sum_{k=1}^N \frac{1}{\sigma_{yk}\sigma_{zk}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Y-L_i}{\sigma_{yk}}\right)^2\right) \left( \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_{zk}}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_{zk}}\right)^2\right) \right) \right] \quad (5.11)$$

### 5.1.3.2. Dispersión de concentración de efluentes bajo un viento perpendicular

Para el caso de viento perpendicular, se aplica el mismo principio mostrado en el apartado anterior, partiendo de tres fuentes puntuales, cada una con intensidades de fuentes de efluentes  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$ , ubicada sobre eje de coordenadas  $Y$ , y sometidas simultáneamente a un viento perpendicular como se muestra en la Figura. La ecuación que describe la concentración de ozono en un punto determinado bajo acción de este tipo de viento, es

$$\begin{aligned}
 C(X,Y,Z) = & \frac{Q_1}{U} \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{y1}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Y}{\sigma_{y1}}\right)^2\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{z1}} \left( \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_{z1}}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_{z1}}\right)^2\right) \right) \right] + \\
 & \frac{Q_2}{U} \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{y2}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Y}{\sigma_{y2}}\right)^2\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{z2}} \left( \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_{z2}}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_{z2}}\right)^2\right) \right) \right] + \\
 & \frac{Q_3}{U} \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{y3}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Y}{\sigma_{y3}}\right)^2\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{z3}} \left( \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_{z3}}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_{z3}}\right)^2\right) \right) \right]. \quad (5.12)
 \end{aligned}$$

Debido a que las fuentes puntuales se encuentran ubicadas sobre el eje de coordenadas  $Y$ , el término  $\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Y}{\sigma_{y1}}\right)^2\right)$  desaparece de la ecuación 5.12, y, por medio de propiedades de la función de densidad conjunta de variables independientes (ver ecuación 5.13), el término  $\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{y1}}$  a lo largo de la sumatoria se elimina.

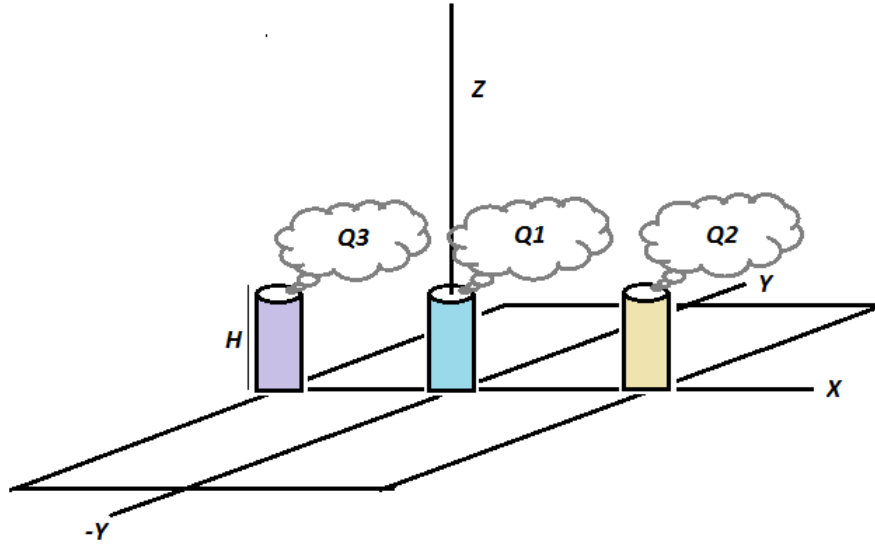
$$f = \frac{1}{(\sigma\sqrt{2\pi})^n} \prod_{i=1}^n \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x_i - \mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad \text{Función de densidad conjunta de } n \quad (5.13)$$

*variables aleatorias independientes*

Resultando entonces de la ecuación 5.12 expresada en términos de sumatoria, la ecuación

$$C(X, Z) = \frac{Q_i}{U\sqrt{2\pi\sigma_z}} \left( \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_z}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_z}\right)^2\right) \right) \quad (5.14)$$

Figura 26: Concentración de efluentes debida a tres fuentes puntuales, cada una con intensidades de efluentes  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$  sometidas a un viento perpendicular simultáneamente



Para el caso específico en el que se generan efluentes de ozono, el termino  $Q_i$  mostrado en la ecuación 5.14 se hace  $S_i X_0$ , donde  $S_i$  se halla como se indica en la subsección 4.2.1.3, y  $X_0$  toma un valor de uno par este caso puesto que solo hay una fuente puntual. Finalmente se encuentra la concentración de ozono en un punto determinado por medio de la ecuación

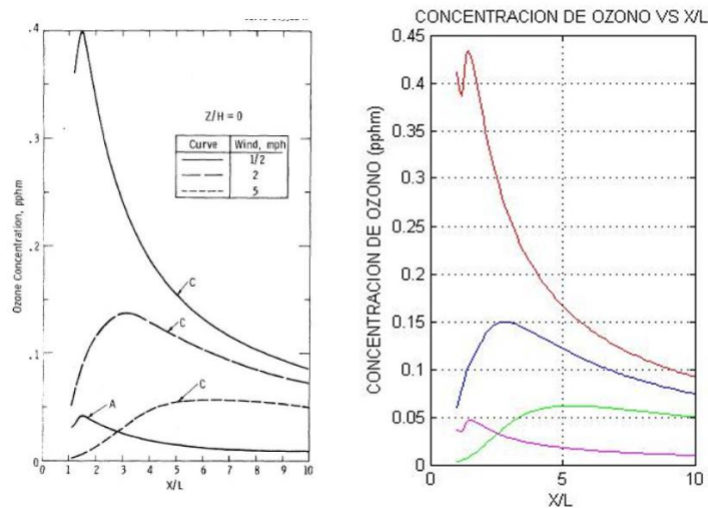
$$C(X, Z) = \frac{S_i}{U\sqrt{2\pi\sigma_z}} \left( \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\sigma_z}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\sigma_z}\right)^2\right) \right) \quad (5.15)$$

## SECCIÓN 5.2

## RESULTADOS

Para corroborar la validez de las ecuaciones y los resultados obtenidos en el estudio descrito en la sección 4.2, se implementaron las ecuaciones 4.1 y 4.2 en matlab, obteniendo los resultados mostrados en la Figuras 27, 28, y 29. Al comparar los resultados simulados, con los arrojados en el estudio mencionado, se obtuvo que para las cercanías al nivel de tierra ( $Z/H = 0$ ) y a nivel de línea ( $Z/H = 1$ ), el perfil de concentración de ozono originado por pérdida corona en condiciones de clima lluvioso y de clima seco a lo largo de una distancia  $X/L$  en dirección del viento, fueron aproximadamente iguales.

Figura 27: Concentración de ozono al nivel del suelo para las líneas A y C en Apple Grove bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en lluvia



## 5.2. RESULTADOS

Figura 28: Concentración de ozono al nivel de línea para las líneas A y C en Apple Grove bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en lluvia

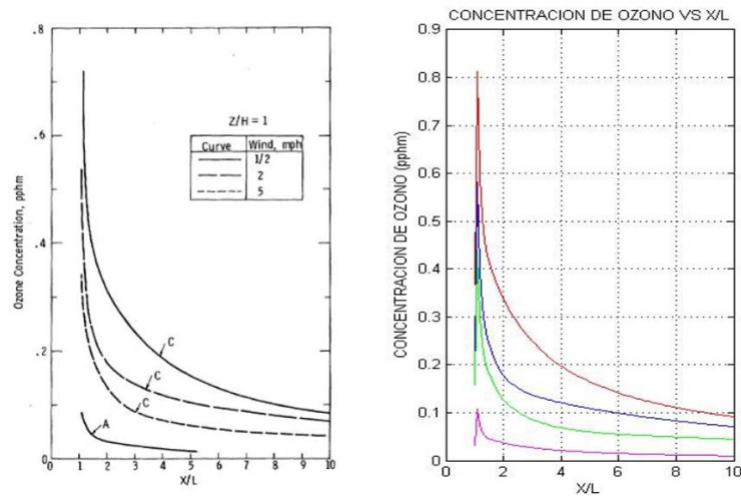
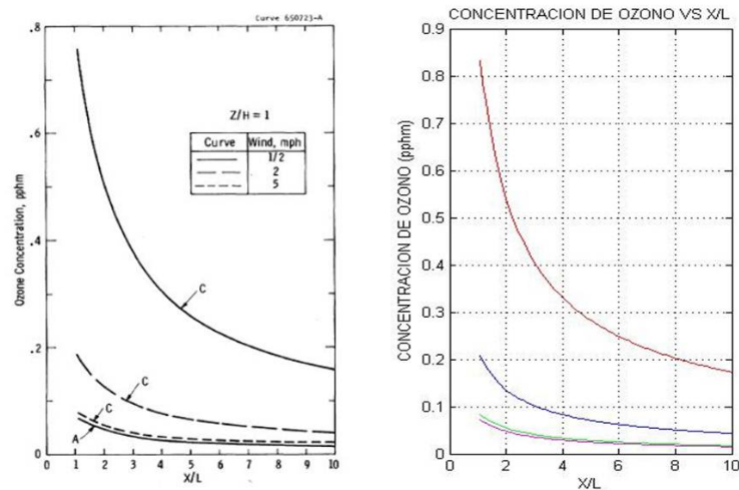


Figura 29: Concentración de ozono al nivel de línea para las líneas A y C en Apple Grove bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima seco



De igual manera, en las Figuras 30 y 31, se valida que para un viento paralelo a la línea de transmisión, el perfil de concentración de ozono producido por la pérdida corona a lo largo de una distancia  $X/X_0$  en dirección del viento en cercanías al nivel de tierra ( $Z/H = 0$ ) y a nivel de línea ( $Z/H = 1$ ), fue aproximadamente el mismo que se obtuvo

## 5.2. RESULTADOS

en el estudio mostrado en la sección 4.2.

Figura 30: Concentración de ozono al nivel del suelo para las líneas A y C en Apple Grove bajo viento paralelo e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

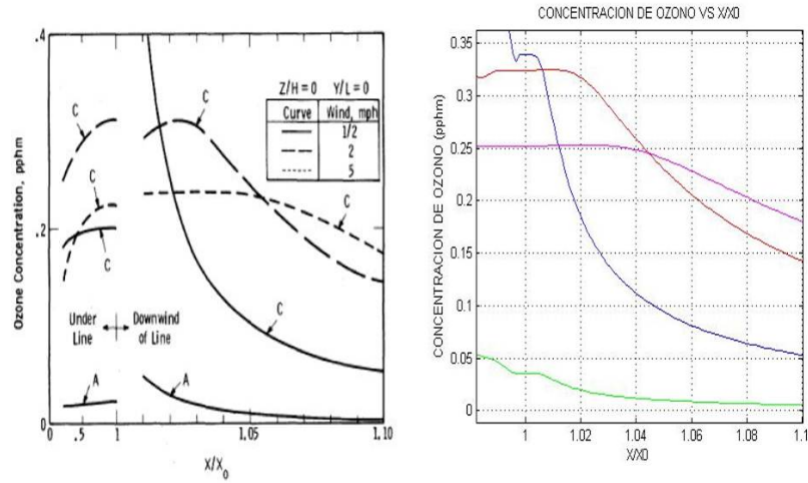
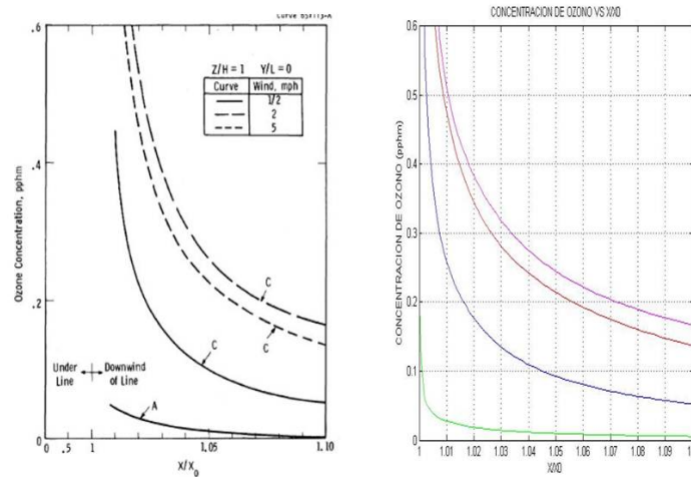


Figura 31: Concentración de ozono al nivel del suelo para las líneas A y C en Apple Grove bajo viento paralelo e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso



Después de verificada la validez de las ecuaciones matemáticas, mediante el uso de la herramienta computacional PC\_O3 (ver apéndice A) se pasó al estudio de producción de ozono por pérdida corona bajo diferentes niveles de tensión (220 kV, 230 kV, y 500 kV).

## 5.2. RESULTADOS

Se evaluaron diversos casos, variando los niveles de tensión, el tipo de configuración, el tiempo climático, y, la dirección y tipo de viento.

Se expondrán a continuación los resultados para una configuración horizontal, a una tensión de 500 kV, con las variaciones descritas en las Tablas 4 y 5. Los demás casos y sus respectivas variaciones se encuentran consignados en los apéndices B, C, D, E, F, G..

Tabla 4: CASO UNO

CONFIGURACIÓN HORIZONTAL							
4 conductores x 1,13 cm de diámetro							
velocidad del viento= 2(m/s)							
CLIMA SECO				CLIMA LLUVIOSO			
nivel de tierra		nivel de línea		nivel de tierra		nivel de línea	
dirección del viento	tipo de viento	dirección del viento	tipo de viento	dirección del viento	tipo de viento	dirección del viento	tipo de viento
paralelo	inestable	paralelo	inestable	paralelo	inestable	paralelo	inestable
	estable		estable		estable		estable
perpendicular	inestable	perpendicular	inestable	perpendicular	inestable	perpendicular	inestable
	estable		estable		estable		estable

Tabla 5: CASO DOS

CONFIGURACIÓN HORIZONTAL							
4 conductores x 1,13 cm de diámetro							
velocidad del viento= 8(m/s)							
CLIMA SECO				CLIMA LLUVIOSO			
nivel de tierra		nivel de línea		nivel de tierra		nivel de línea	
dirección del viento	tipo de viento	dirección del viento	tipo de viento	dirección del viento	tipo de viento	dirección del viento	tipo de viento
paralelo	inestable	paralelo	inestable	paralelo	inestable	paralelo	inestable
	estable		estable		estable		estable
perpendicular	inestable	perpendicular	inestable	perpendicular	inestable	perpendicular	inestable
	estable		estable		estable		estable

Se eligió el nivel de tensión más alto como caso base de análisis, debido a que según lo mostrado en la sección 2.3, las pérdidas generadas bajo esta tensión son mucho mayores, lo que implica una mayor producción de ozono. Junto a esto, se tomó una disposición horizontal, a razón de ser la disposición más encontrada en dicho nivel de tensión dentro del Sistema Interconectado Nacional (SIN).

Para el caso uno (Tabla 4) se estableció una velocidad promedio del viento de 2 ( $m/s$ ), y para el caso dos (Tabla 5) de 8 ( $m/s$ ), debido a que dentro de los estudios meteorológicos realizados por el IDEAM, mostrados en el atlas de viento y energía eólica en Colombia, son los valores mínimo y máximo alcanzados respectivamente [?].

Las dimensiones para la ubicación de los conductores de la línea dispuestos en dicha configuración horizontal, fueron tomadas de un caso base estandarizado, en donde se indica que las fases exteriores se encuentran igualmente separadas respecto a la fase central 10(*metros*), cada una de ellas a una altura de 20(*metros*) (ver Figura 14), distancias mostradas en la Tabla 9, del apéndice A.

Para esta configuración, los valores arrojados para el CASO UNO se encuentran consignados en el apéndice B, y para el CASO DOS en el C. De igual manera, son mostrados de una manera resumida en las Tablas 6 y 7 .

### 5.2.1 Resultados para el CASO UNO

Los valores encontrados para la concentración máxima de ozono en ( $pphm$ ), y su respectiva distancia de aparición para el CASO UNO, en cada uno de las variaciones consignadas en la Tabla 6, bajo análisis mostraron los siguientes resultados:

- \* Bajo condiciones de viento paralelo, se tiene que la concentración de ozono se hace mayor, para los casos de viento estable, tanto a nivel de línea y nivel de suelo.
- \* Bajo condiciones de viento perpendicular, se tiene que la concentración de ozono se hace mayor, sólo para los casos evaluados a nivel de línea.
- \* Para ambas condiciones de clima, para un viento perpendicular (estable e inestable), se tiene el mismo valor de concentración máxima a nivel de tierra, sólo que bajo un

viento estable dicho valor se alcanza mucho más lejana de la línea, caso contrario para el viento inestable.

\* Para todas las variaciones evaluadas, se tiene que para cercanías de nivel de tierra, la concentración máxima de ozono es menor que el obtenido para el nivel de línea.

\* Bajo condiciones de viento paralelo o perpendicular a la línea (estable o inestable), ya sea a nivel de tierra o a nivel de línea, la concentración de ozono se hace mayor cuando dicha línea se encuentra sometida a condiciones de clima lluvioso.

\* Para cualquier condición de clima y dirección de viento, se tiene que bajo un viento inestable la concentración máxima de ozono alcanzada a nivel de tierra, se encuentra a distancias más cercanas a la línea.

\* Para todas las variaciones evaluadas, se tiene que para cercanías al nivel de línea, la concentración máxima de ozono se encuentra al finalizar la línea para viento paralelo, y en la última fase ( $H, L$ ) para viento perpendicular.

NOTA:

→ La distancia  $X/X_0$ , está dada tomando como base el valor de la longitud de la línea

→ La distancia  $X/L$ , está dada tomando como base la distancia horizontal entre fases

Tabla 6: Resumen de valores de concentración de ozono máximo par el caso uno

CASO UNO												
Clima Seco						Clima Lluvioso						
dirección del viento: PARALELO												
	Nivel de tierra		Nivel de línea		Nivel de tierra		Nivel de línea		Nivel de tierra		Nivel de línea	
	Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia $X/X_0$	Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia $X/X_0$	Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia $X/X_0$	Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia $X/X_0$	Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia $X/X_0$	Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia $X/X_0$
viento estable	$1,82 \cdot 10^{-7}$	5	$3,9 \cdot 10^{-5}$	1	$4,49 \cdot 10^{-3}$	5	0,011	1	$3,2 \cdot 10^{-4}$	1	1	
viento inestable	$1,38 \cdot 10^{-7}$	1,1	$1,18 \cdot 10^{-6}$	1	$3,4 \cdot 10^{-5}$	1,1					1	
Clima Lluvioso												
dirección del viento: PERPENDICULAR												
	Nivel de tierra		Nivel de línea		Nivel de tierra		Nivel de línea		Nivel de tierra		Nivel de línea	
	Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia $X/L$	Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia $X/L$	Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia $X/L$	Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia $X/L$	Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia $X/L$	Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia $X/L$
viento estable	$7,5 \cdot 10^{-8}$	450	$8,8 \cdot 10^{-6}$	1	$1,84 \cdot 10^{-5}$	400	$2 \cdot 10^{-3}$	1	$1,8 \cdot 10^{-4}$	1	1	
viento inestable	$7,5 \cdot 10^{-8}$	6	$8,4 \cdot 10^{-7}$	1	$1,84 \cdot 10^{-5}$	7					1	

### 5.2.2 Resultados para el CASO DOS

Los valores encontrados para la concentración máxima de ozono en (*pphm*), y su respectiva distancia de aparición para el CASO DOS, en cada uno de las variaciones consiguientes en la Tabla 7, bajo análisis mostraron los siguientes resultados:

- \* Para un viento paralelo e inestable, la concentración máxima de ozono en cercanías al nivel de tierra se hace mayor en comparación al caso presentado de viento estable.
- \* Bajo un viento paralelo e inestable, se tiene que la concentración máxima de ozono en cercanías del nivel de línea es menor que la concentración máxima obtenida para un viento estable.
- \* Para cualquier condición de clima y dirección de viento, se tiene que bajo un viento inestable la concentración máxima de ozono alcanzada a nivel de tierra, se encuentra a distancias más cercanas a la línea.
- \* Bajo condiciones de viento perpendicular, se tiene que la concentración de ozono se hace mayor, sólo para los casos evaluados a nivel de línea.
- \* Para todas las variaciones evaluadas, se tiene que para cercanías de nivel de tierra, la concentración máxima de ozono es menor que el obtenido para el nivel de línea.
- \* Bajo condiciones de viento paralelo o perpendicular a la línea (estable o inestable), ya sea a nivel de tierra o a nivel de línea, la concentración de ozono se hace mayor cuando dicha línea se encuentra sometida a condiciones de clima lluvioso.
- \* Para todas las variaciones evaluadas, se tiene que para cercanías al nivel de línea, la concentración máxima de ozono se encuentra al finalizar la línea para viento paralelo, y en la última fase (*H, L*) para viento perpendicular.

NOTA:

→ La distancia  $X/X_0$ , está dada tomando como base el valor de la longitud de la línea

→ La distancia  $X/L$ , está dada tomando como base la distancia horizontal entre fases

Tabla 7: Resumen de valores de concentración de ozono máximo par el caso dos

CASO DOS											
Clima Seco						Clima Lluvioso					
dirección del viento: PARALELO											
Nivel de tierra			Nivel de línea			Nivel de tierra			Nivel de línea		
Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia $X/X_0$		Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia $X/X_0$		Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia $X/X_0$		Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia $X/X_0$	
viento estable	$4,6 \cdot 10^{-8}$	5	$9,8 \cdot 10^{-6}$	1		$1,1 \cdot 10^{-5}$	5		$2,7 \cdot 10^{-3}$	1	
viento inestable	$6,1 \cdot 10^{-8}$	1,1	$0,95 \cdot 10^{-6}$	1		$1,5 \cdot 10^{-5}$	1,1		$2,5 \cdot 10^{-4}$	1	
dirección del viento: PERPENDICULAR											
Nivel de tierra			Nivel de línea			Nivel de tierra			Nivel de línea		
Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia $X/L$		Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia $X/L$		Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia $X/L$		Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia $X/L$	
viento estable	$1,9 \cdot 10^{-8}$	450	$2,25 \cdot 10^{-6}$	1		$4,6 \cdot 10^{-6}$	450		$5 \cdot 10^{-4}$	1	
viento inestable	$1,9 \cdot 10^{-8}$	18	$3,85 \cdot 10^{-7}$	1		$4,6 \cdot 10^{-6}$	18		$8,8 \cdot 10^{-5}$	1	

---

# 6

## OBSERVACIONES

---

- El desarrollo del documento de trabajo se llevó a cabo tomando como base estudios experimentales ya publicados, lo que hace que los resultados encontrados, se muestren como una aproximación para estimaciones realizadas en trabajos futuros.
- La herramienta computacional PC\_O3 sólo permite encontrar el perfil del nivel de concentración de ozono a nivel de suelo o a nivel de línea para los casos estudiados, a razón de optimizar la obtención de resultados puesto que, para conseguir ver perfiles con rangos demasiado grandes el proceso puede llegar a tardar demasiado.
- Para las estimaciones encontradas, se asumió la existencia de trayectorias netamente rectas, y a su vez, no se tuvo en cuenta el efecto de la flecha sobre la línea, a razón de simplicidad en el desarrollo de los cálculos.
  
- Se limitó el diámetro de los conductores y sus respectivos arreglos, debido a la necesidad del empleo de datos experimentales de tasa de generación de ozono en  $(lbs/kWh)$  para encontrar las estimaciones planteadas como objetivo. Dichos valores se encontraron para los conductores y arreglos mostrados a lo largo de la descripción del documento.
  
- Tomando como base el modelo de difusión de concentración de efluentes se realizó

---

a modo de propuesta la estimación de dicha difusión para configuraciones de línea diferentes a la horizontal, para ser validadas en trabajos desarrollados más adelante.

- La presión y temperatura, se tomaron como valores constantes, debido a que los datos experimentales de tasas de generación de ozono, se obtuvieron bajo condiciones normales en el laboratorio.

---

## CONCLUSIONES

---

- Para mostrar los niveles de ozono en las cercanías de una línea de transmisión, se desarrolló la herramienta PC\_O3 que cuenta con la capacidad de estimar perfiles de concentración de ozono para determinados conductores, bajo dos diferentes tipos de viento, el cual puede ser estable o inestable, y tomar diferentes velocidades. Por consiguiente, dicha herramienta brindará ayuda en estudios futuros relacionados con la generación de ozono en cercanías de líneas de alta tensión.
- En diversa información teórica y determinados artículos enfocados al estudio de generación de ozono debido a la descarga corona, y consecuentemente de la pérdida corona, se muestra la existencia de una relación proporcional entre la pérdida corona y el nivel de ozono generado por las líneas de transmisión, siendo esto el producto de presentarse tasas de generación constantes. Esto es evidente en los resultados encontrados en los distintos casos evaluados empleando la herramienta computacional PC O3.
- Los resultados arrojados por cada uno de los casos evaluados en la disposición horizontal a una tensión de 500 kV en una línea de transmisión, permiten observar lo siguiente:
  - a) bajo condiciones de lluvia los niveles de concentración de ozono son mayores, debido

---

a que para esta condición atmosférica el valor de pérdida corona se hace mayor. b) Los niveles de concentración de ozono son superiores en cercanías de la línea a razón de que esta es la fuente de generación de dicho efluente. c) Para una mayor velocidad del viento, el nivel de concentración de ozono disminuye. d) Para vientos estables el nivel de concentración de ozono toma valores superiores. Cada uno de los ítems mencionados anteriormente, describen los resultados que debían esperarse según lo estipulado en las bases teóricas usadas en la realización de éste trabajo.

•La Resolución 0610 del 24 de Marzo de 2010, del Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial en Colombia, sugiere valores máximos permisibles de concentración de ozono de  $80 \mu g/m^3$  (4,075 *pphm*) y  $120 \mu g/m^3$  (6,1125 *pphm*) para tiempos de exposición de 8 *horas* y 1 *hora*, respectivamente. Por consiguiente, al comparar los resultados de concentraciones máximas en cada uno de los casos estudiados, es posible concluir que el nivel de concentración de ozono generado en las cercanías de una línea de transmisión es demasiado bajo para ser considerado perjudicial.

# BIBLIOGRAFÍA

---

---

KUFFEL, E., ZAENGL, W., and KUFFEL, J. High voltage engineering - fundamentals. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.

RESOLUCIÓN 0610 del 24 de Marzo de 2010. Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial. Colombia

ROACH J.F. , CHARTIER V.L., y , DIETRICH F.M. Experimental oxidant production rates for EHV transmission lines and theoretical estimates of ozone concentrations near operating lines. Westinghouse Electric Corporation. East Pittsburgh, Pennsylvania.1973

ROTH, A. Técnica de la alta tensión. Barcelona: Labor, 1966.

RUGELES, J. Conceptos básicos en técnicas de la alta tensión. Bucaramanga: UIS, 1984.

RUGELES, J., and CHACÓN, J. Laboratorio de alta tensión - manual de prácticas. Bucaramanga: UIS, 2013.

SEBO, Stephen A., HEIBEL, Jhon T., FRYDMAN Maurice, y, SHIH C.H.. Examination of ozone emanating from EHV transmission line corona discharges. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-95. No. 2.1976





# MANUAL DE USUARIO PARA LA INTERFAZ PC\_O3

---

---

En este apéndice se consigna el funcionamiento y uso de la interfaz de usuario PC\_O<sub>3</sub> creada para mostrar la relación existente entre las pérdidas corona producidas por una línea de transmisión aérea y la concentración de ozono que esta genera en sus cercanías, haciendo uso de MATLAB. PC\_O<sub>3</sub>, también arroja resultados del comportamiento de la concentración de ozono en el espacio circundante a la línea de transmisión bajo condiciones de viento.

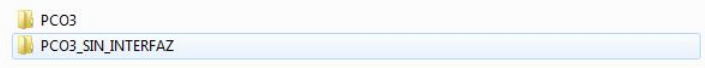
## SECCIÓN A.1

### INSTALACIÓN DE LA INTERFAZ

En la carpeta «PC\_O3», se encuentran los archivos necesarios para que el aplicativo computacional PC\_O3 funcione correctamente. Por lo tanto, esta carpeta no debe ser modificada. A continuación, se describe los pasos a seguir para instalar y ejecutar la interfaz gráfica de PC\_O3.

1. Extraer el archivo (.rar), llamado «PC\_O3».
2. Posteriormente, abrir la carpeta «PC\_O3», donde se encuentran dos archivos (ver Figura 32 ).

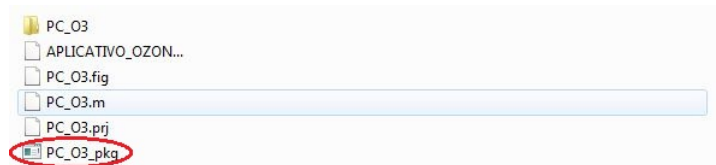
Figura 32: Aplicativo con interfaz, y sin interfaz



- \*«PC\_O3», es el aplicativo con interfaz gráfica, el cuál facilita el ingreso de datos (En este aplicativo no se puede ver el código de programación ni el valor de las variables utilizadas)
- \*\*«PC\_O3.SIN\_INTERFAZ», es el aplicativo sin interfaz gráfica, el cual permite ver el código de programación, y el valor de las variables utilizadas.

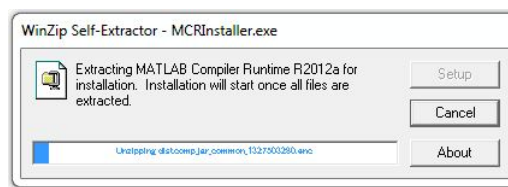
3. Abrir la carpeta «PC\_O3», y ejecutar «PC\_O3\_pkg» (ver Figura 33 ).

Figura 33: Ejecución de PC\_O3\_pkg



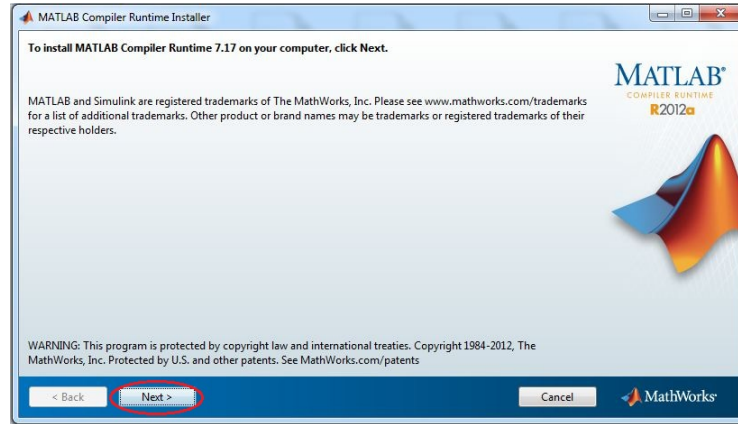
4. Luego de ejecutar «PC\_O3\_pkg», automáticamente se ejecutará «MCRInstaller», y se empezará a descomprimir el aplicativo (ver Figura34). Seguidamente, se debe permitir que el proceso termine.

Figura 34: Descompresión de «MCRInstaller»



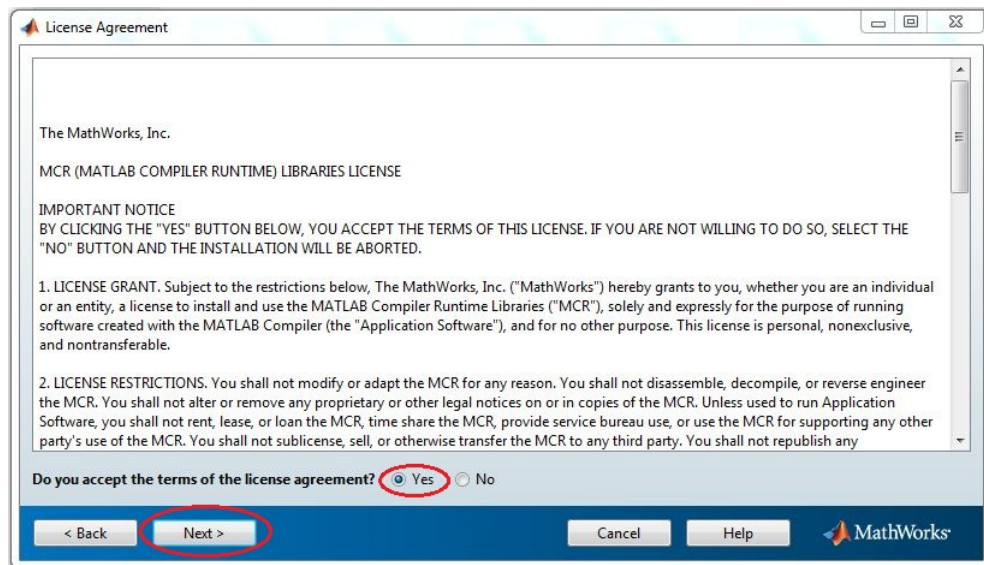
**5.** A continuación, aparecerá el instalador de Compiler Runtime Installer-MATLAB. En seguida, dar clic en «siguiente» (ver Figura 35).

Figura 35: Compiler Runtime Installer-MATLAB



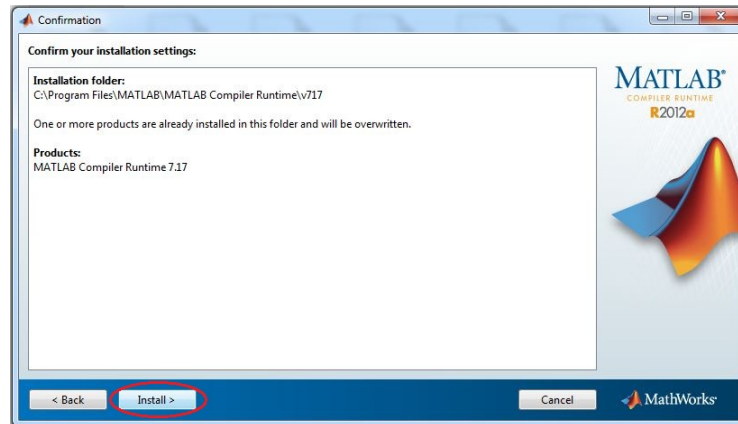
**6.** Aceptar los términos de licencia de Compiler Runtime - MATLAB, dando clic en «yes», y en «siguiente» (ver Figura 36).

Figura 36: License Agreement - MATLAB



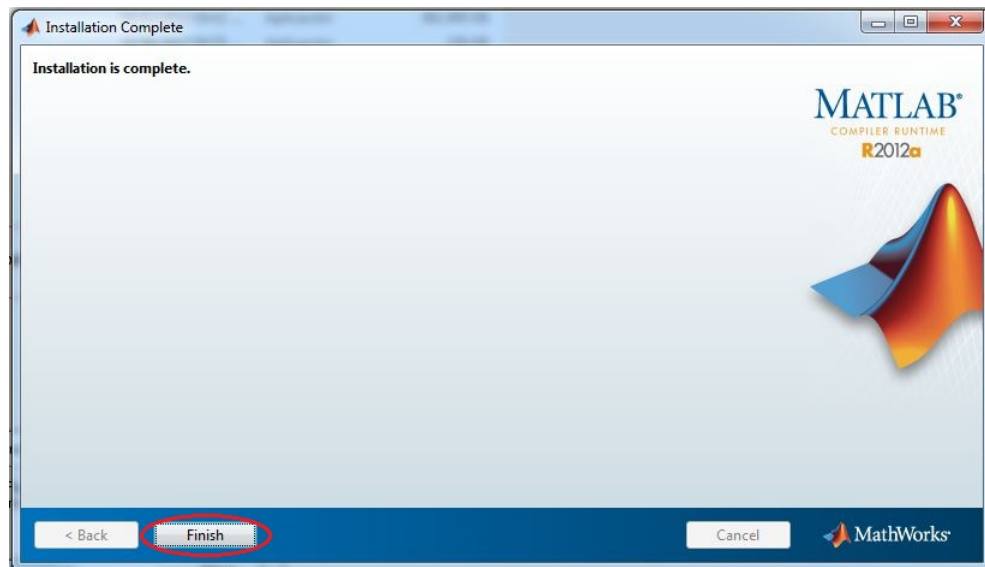
**7.** Confirmar la instalación de Compiler Runtime - MATLAB, dando clic en «Install» (ver Figura 37).

Figura 37: Confirmation-MATLAB



**8.** Finalizar la instalación de Compiler Runtime-MATLAB, dando clic en «Finish» (ver Figura 38).

Figura 38: Installation Complete- MATLAB

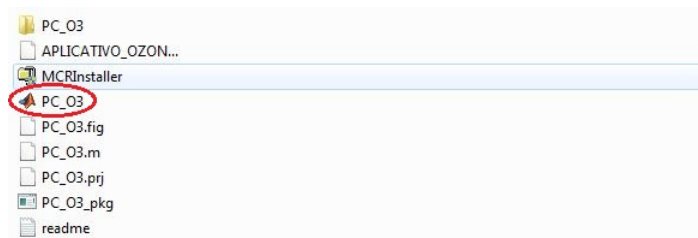


SECCIÓN A.2

## Ejecución de la interfaz

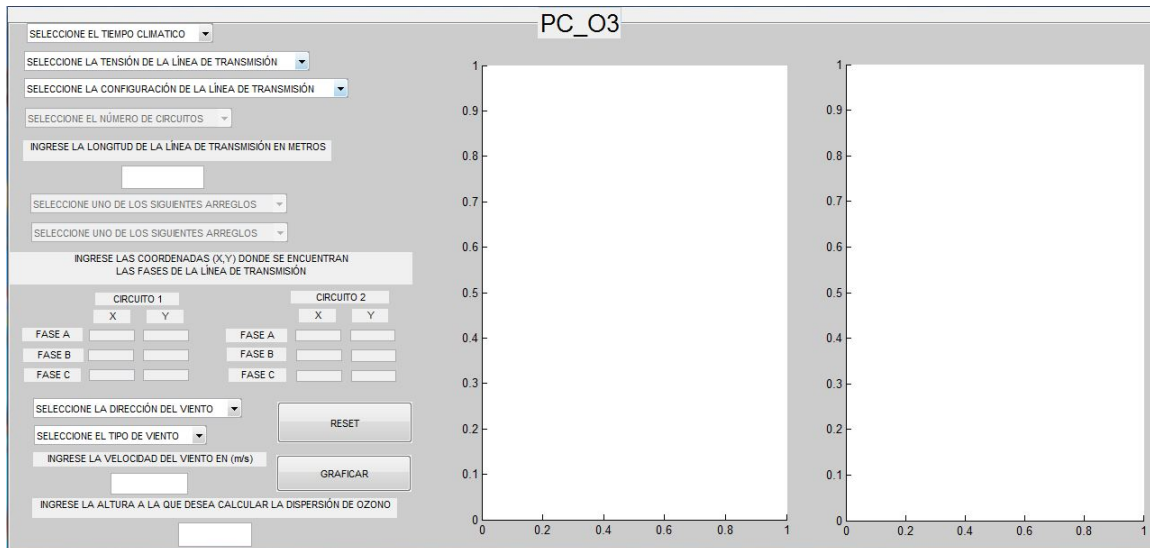
1. Abrir el archivo «PC\_O3» contenido en la carpeta «PC\_O3», para dar inicio a la ejecución del aplicativo (ver Figura 39).

Figura 39: Ejecución PC\_O3



2. Descripción de las variables a introducir en la Interfaz gráfica de «PC\_O3» (ver Figura40).

Figura 40: Interfaz Gráfica de PC\_O3



\* **SELECCIONE EL TIEMPO CLIMÁTICO:** Para esta opción, se ingresa el tiempo climático al cual está expuesta la línea de transmisión. La interfaz, muestra dos opciones de tiempo disponibles, «tiempo seco», y, «tiempo lluvioso».

\* **SELECCIONE LA TENSIÓN DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN:** En este espacio se elige el valor de tensión en *kilo – voltios*, a la cual está alimentada la línea de transmisión. PC\_O3 brinda la posibilidad de elegir entre tres tensiones, normalizadas en Colombia por el Sistema Interconectado Nacional (SIN), bajo la Resolución CREG 097 de 2008: 500 *kV*, 230 *kV*, 220 *kV*.

\* **SELECCIONE LA CONFIGURACIÓN DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN:** En esta designación, PC\_O3 brinda la opción de elegir entre cuatro posibles configuraciones de líneas de transmisión, dicho de otra manera, la disposición que presenta la distribución de fases en la torre de transmisión; dichas configuraciones se listan a continuación.

⇒ Configuración Horizontal (Fig 42)

⇒ Configuración Delta (Fig 43)

⇒ Configuración vertical sencilla (Fig 44)

⇒ Configuración vertical doble circuito (Fig 45)

\* **SELECCIONE EL NÚMERO DE CIRCUITOS:** Esta opción, solo se habilita cuando se selecciona la configuración vertical, para las demás configuraciones, «PC\_O3» supone un sólo circuito.

\* **INGRESE LA LONGITUD DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN EN METROS:** En esta opción, debe ingresarse la longitud de la línea de transmisión en metros, asumiendo que dicha línea no posee flecha, es decir, se supone una línea totalmente recta.

\* **SELECCIONE UNO DE LOS SIGUIENTES ARREGLOS:** En este espacio, se ingresa el diámetro en centímetros del conductor, y el número de conductores por haz, de la línea de transmisión. Se encuentran disponibles los arreglos para los conductores mostrados en la Figura 8 bajo condiciones de clima seco, y en la Figura 41 bajo condiciones de clima lluvioso.

Tabla 8: Arreglos para los conductores bajo condiciones de tiempo seco

<i>conductores por fase</i>	<i>diámetro del conductor</i>
1	0,523 cm
1	1,13 cm
1	1,626 cm
1	2,174 cm
1	3,038 cm
4	0,523 cm
4	1,13 cm

Figura 41: Arreglos para los conductores bajo condiciones de tiempo seco

<i>conductores por fase</i>	<i>diámetro del conductor</i>
1	1,13 cm
1	1,626 cm
1	3,038 cm
4	1,13 cm

\* **INGRESE LAS CORDENADAS (X,Y), DONDE SE ENCUENTRAN LAS FASES DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN:** En esta asignación, se ingresan las cordenas en las que se encuentran ubicadas cada una de las fases de la línea.. Para ello, se tiene en cuenta que los ejes de referencia se toman como se muestra en las Figuras 42, 43, 44, 45, para cada configuración. En la Tabla 9, se muestran distancias estandarizadas para cada configuración por el EPRI.

En el caso de elegir una configuración vertical con doble circuito, se ingresan las cordenas de las fases de los dos circuitos 1 y 2; para los demás casos, se bloqueará el

ingreso de datos de «CIRCUITO 2».

Figura 42: Configuración horizontal

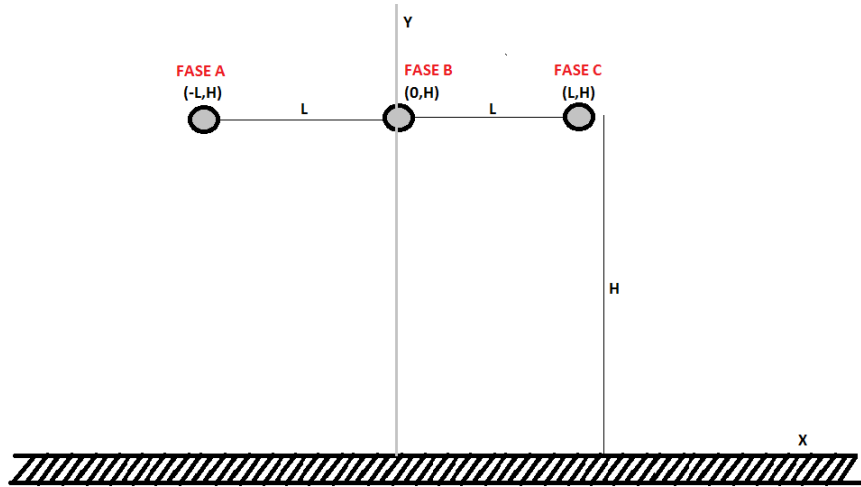


Figura 43: Configuración delta

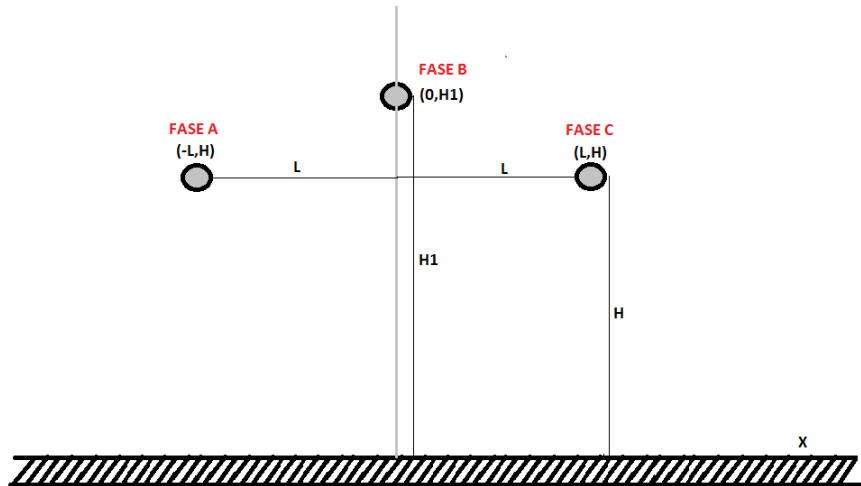


Figura 44: Configuración vertical sencilla

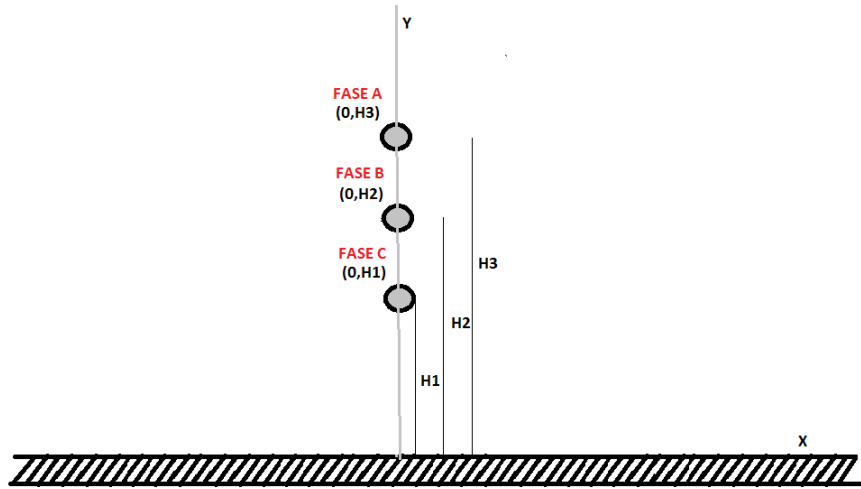


Figura 45: Configuración vertical doble circuito

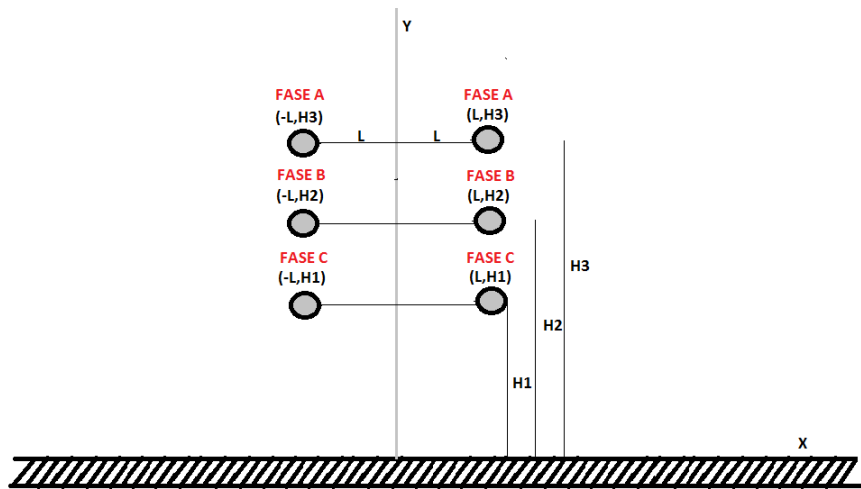


Tabla 9: Ubicación de conductores en la torre de la línea (casos base)

Voltage		Single or Double Circuit (S or D)	Configuration	Phase A		Phase B		Phase C	
Nom (kV)	Max (kV)			Height (m)	Lateral Dist. (m)	Height (m)	Lateral Dist. (m)	Height (m)	Lateral Dist. (m)
230	242	S	Flat	16	-4.5	16	0	16	4.5
		S	Delta	16	-2.5	20.3	0	16	2.5
		S	Single Pole Triangular	16	-2.5	18	2.5	20	-2.5
		S	Vertical	16	-2.5	18.5	-2.5	21	-2.5
		D	Vertical Low-React.	16	-2.5	18.5	-2.5	21	-2.5
		D	Vertical Superbundle	16	-2.5	18.5	-2.5	21	-2.5
345	362	S	Flat	18.5	-7.5	18.5	0	18.5	7.5
		S	Delta	18.5	-4.5	26.3	0	18.5	4.5
		S	Single Pole Triangular	16.5	-3	20	3	23.5	-3
		S	Vertical	15.5	-3	23	-3	30.5	-3
		D	Vertical Low-React.	15.5	-3	23	-3	30.5	-3
		D	Vertical Superbundle	15.5	-3	23	-3	30.5	-3
500	550	S	Flat	20	-10	20	0	20	10
		S	Delta	20	-5	28.7	0	20	5
		S	Single Pole Triangular	18	-5.1	22	5.1	26	-5.1
		S	Vertical	17	-5.1	26	-5.1	35	-5.1
		D	Vertical Low-React.	17	-5.1	26	-5.1	35	-5.1
		D	Vertical Superbundle	17	-5.1	26	-5.1	35	-5.1
765	800	S	Flat	27	-14	27	0	27	14
		S	Delta	27	-8.4	41.6	0	27	8.4
		D	Vertical Low-React.	25	-7	37	-7	49	-7
		D	Vertical Superbundle	25	-7	37	-7	49	-7
1100	1200	S	Flat	36	-18.5	36	0	36	18.5
		S	Delta	36	-11	55	0	36	11

Fuente: EPRI AC Transmission Line Reference Book –200kV and Above. Tercera edición, 2005

\* **SELECCIONE LA DIRECCIÓN DEL VIENTO:** En este espacio, se introduce la dirección del viento al cual se encuentra expuesta la línea de transmisión. En «PC\_03», existen dos opciones para la dirección de viento: «viento paralelo a la línea» (ver Figura 46), y «viento perpendicular a la línea» (ver Figura 47).

Figura 46: Viento paralelo a la línea de transmisión

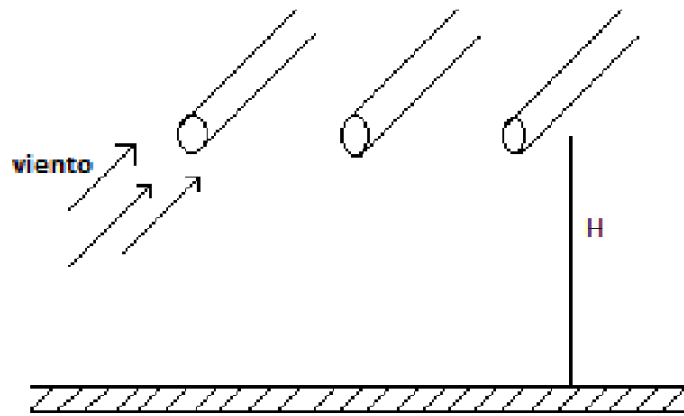
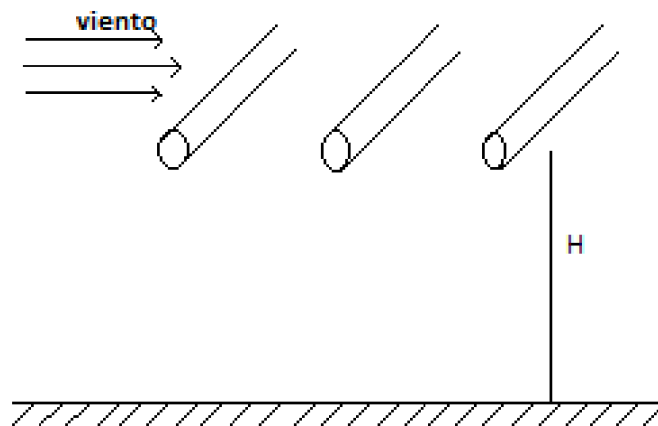


Figura 47: Viento perpendicular a la línea de transmisión



\* **SELECCIONE EL TIPO DE VIENTO:** Esta opción permite elegir el tipo de viento al cual está expuesta la línea de transmisión. En «PC\_O3», existen dos tipos de viento: «viento estable» y «viento inestable».

\* **INGRESE LA VELOCIDAD DEL VIENTO EN (m/s):** Para esta asignación, se ingresa la velocidad del viento en (m/s), a la cual está expuesta la línea de transmisión.

\* **INGRESE LA ALTURA A LA QUE DESEA CALCULAR LA DISPERSIÓN DE OZONO:** En este espacio, se ingresa la altura en metros (eje Y), a la cual se desea calcular la dispersión de la concentración de ozono a lo largo de la dirección del viento elegido.

NOTA:

→ Después de ingresado el valor en los espacios no desplegable, debe oprimirse la tecla «ENTER» en el teclado, apareciendo el espacio en color azul, lo que indica que el valor se ha guardado.

→ El botón «RESET», borrará todos los datos ingresados. Podrá ser usado como botón emergente.

→ La obtención de resultados para algunos de los casos puede tardar hasta tres minutos.

**3.** Ingresar los datos en el orden especificado, oprimiendo seguidamente la tecla «ENTER» (las casillas cambiarán de color), para posteriormente dar clic en «GRAFICAR» (ver Figura 48).

Figura 48: Orden de ingreso de datos en PC\_O3

The screenshot displays the PC\_O3 interface with ten numbered steps indicating the order of data entry:

1. SELECCIONE EL TIEMPO CLIMATICO
2. SELECCIONE LA TENSIÓN DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN
3. SELECCIONE LA CONFIGURACIÓN DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN
4. SELECCIONE EL NÚMERO DE CIRCUITOS
- 4\*. INGRESE LA LONGITUD DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN EN METROS
5. SELECCIONE UNO DE LOS SIGUIENTES ARREGLOS
5. SELECCIONE UNO DE LOS SIGUIENTES ARREGLOS
6. INGRESE LAS COORDENADAS (X,Y) DONDE SE ENCUENTRAN LAS FASES DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN
7. SELECCIONE LA DIRECCIÓN DEL VIENTO
8. SELECCIONE EL TIPO DE VIENTO
9. INGRESE LA VELOCIDAD DEL VIENTO EN (m/s)
10. INGRESE LA ALTURA A LA QUE DESEA CALCULAR LA DISPERSIÓN DE OZONO

A red callout box points to step 4\* with the text: "En el caso de seleccionar una configuración vertical, el cuarto dato a ingresar es el 'NUMERO DE CIRCUITOS'".

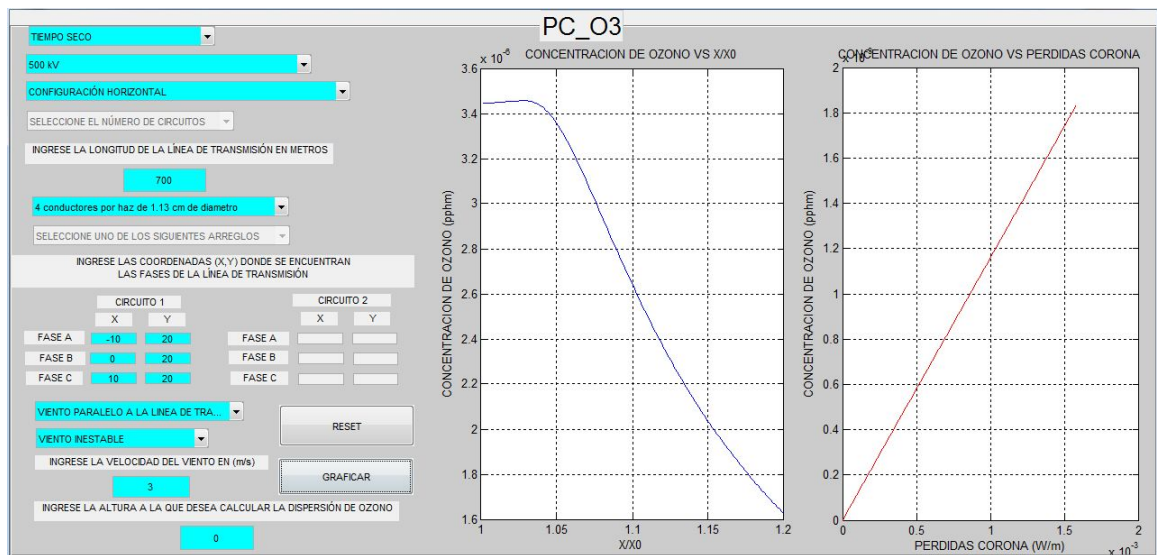
#### 4.. OBTENCIÓN DE DATOS DE «PC\_O3»:

Después de dar clic en «GRAFICAR», en caso de haber seleccionado «VIENTO PARALELO A LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN», aparecerán dos gráficas: «CONCENTRACIÓN DE OZONO vs PÉRDIDAS CORONA», y, «CONCENTRACIÓN DE OZONO vs  $X/X_0$ ». De igual manera, en el caso de haber seleccionado «VIENTO PERPENDICULAR A LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN», aparecerán dos gráficas: «CONCENTRACIÓN DE OZONO vs PÉRDIDAS CORONA», y, «CONCENTRACIÓN DE OZONO vs  $X/L$ ».

- Concentración de Ozono, vs, Pérdidas Corona: En esta gráfica se muestra la relación existente entre la concentración de ozono y las pérdidas corona generadas por la línea de transmisión.

- Concentración de Ozono, vs,  $X/X_0$ ; y Concentración de Ozono, vs,  $X/L$ : En esta gráfica se muestra la dispersión de ozono a lo largo de la línea en dirección del viento a una altura dada.

Figura 49: Gráficas obtenidas por PC\_O3



---

# B

## RESULTADOS LÍNEA DE 500 kV, CONFIGURACIÓN HORIZONTAL CASO UNO

---

---

Tabla 10: Datos de concentración de ozono para el caso uno, bajo viento paralelo por corona en clima seco, ca

CASO UNO				
Clima Seco				
dirección del viento: PARALELO				
	Nivel de tierra		Nivel de línea	
	Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/X <sub>0</sub>	Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/X <sub>0</sub>
viento estable	$1,82 \cdot 10^{-7}$	5	$3,9 \cdot 10^{-5}$	1
viento inestable	$1,38 \cdot 10^{-7}$	1,1	$1,18 \cdot 10^{-6}$	1

Figura 50: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso uno, bajo viento paralelo e inestable, originada por pérdida corona en clima seco

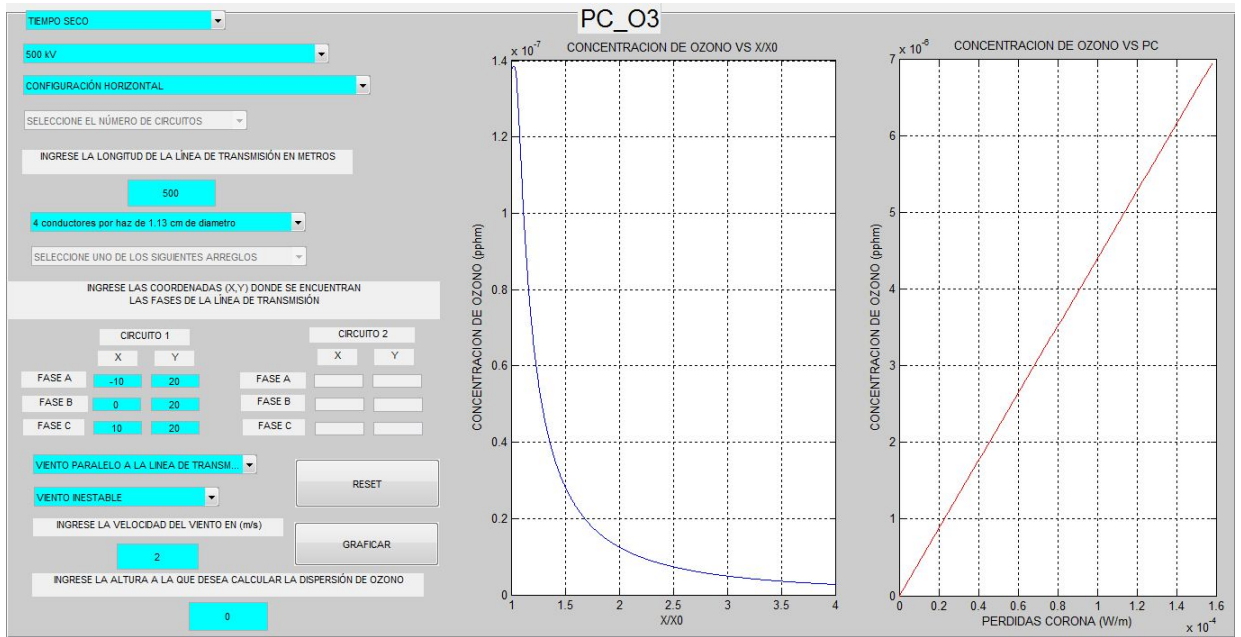


Figura 51: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso uno, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima seco

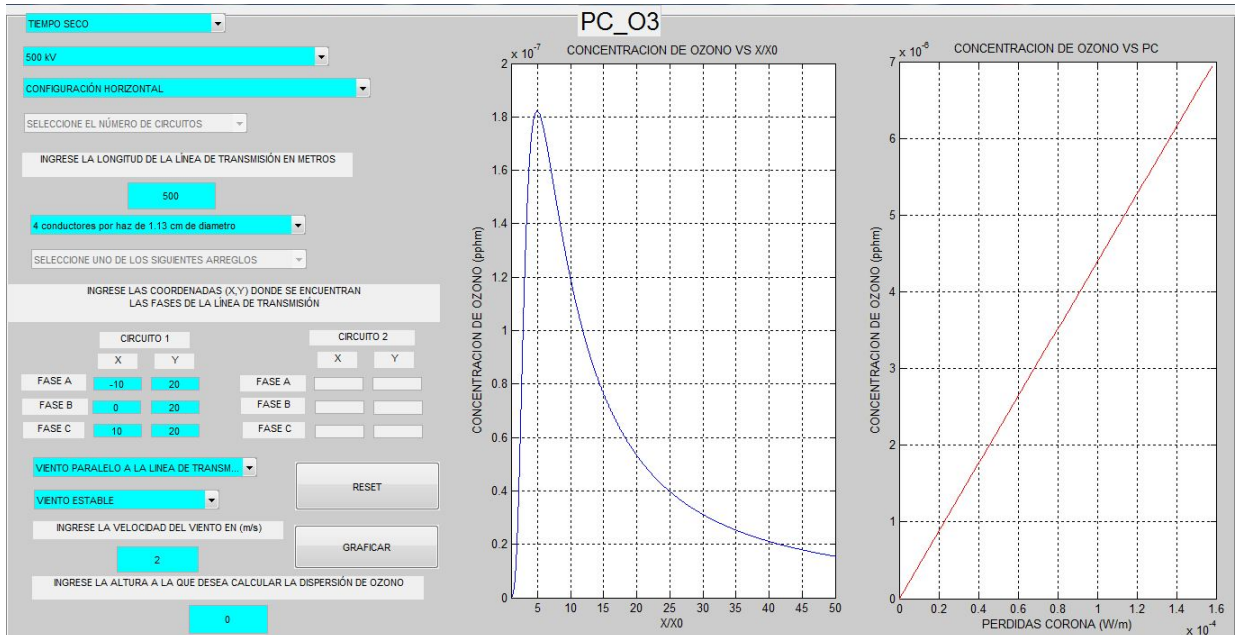


Figura 52: Concentración de ozono al nivel de línea para caso uno, bajo viento paralelo y inestable, originada por pérdida corona en clima seco

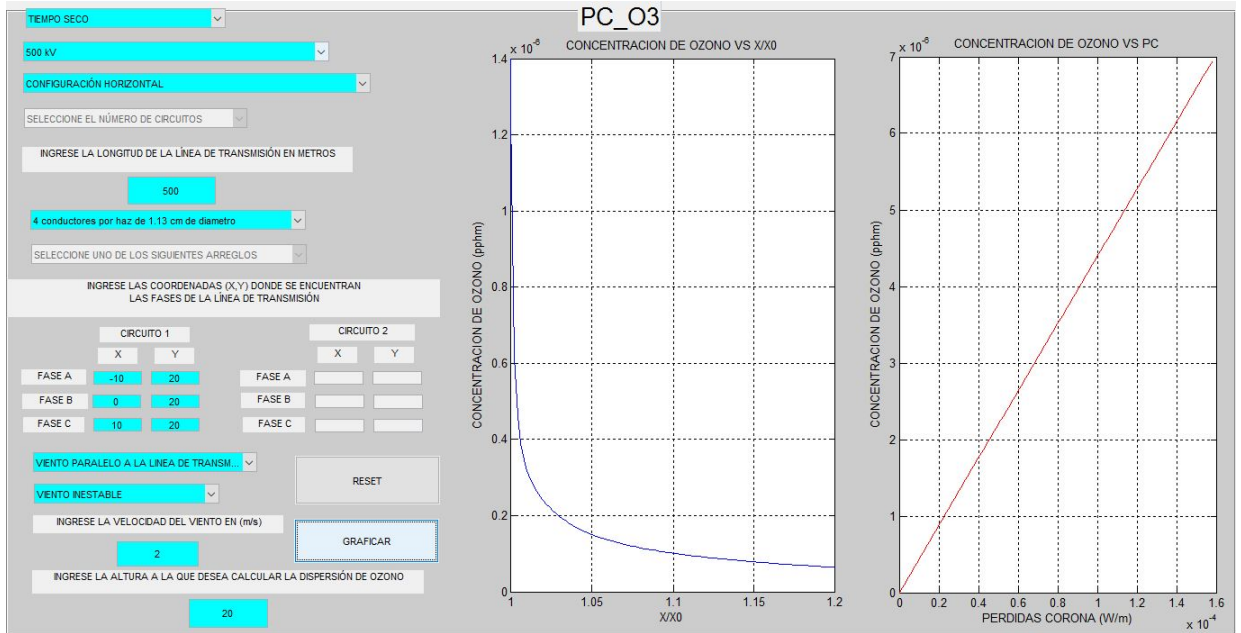


Figura 53: Concentración de ozono al nivel de línea para caso uno, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima seco

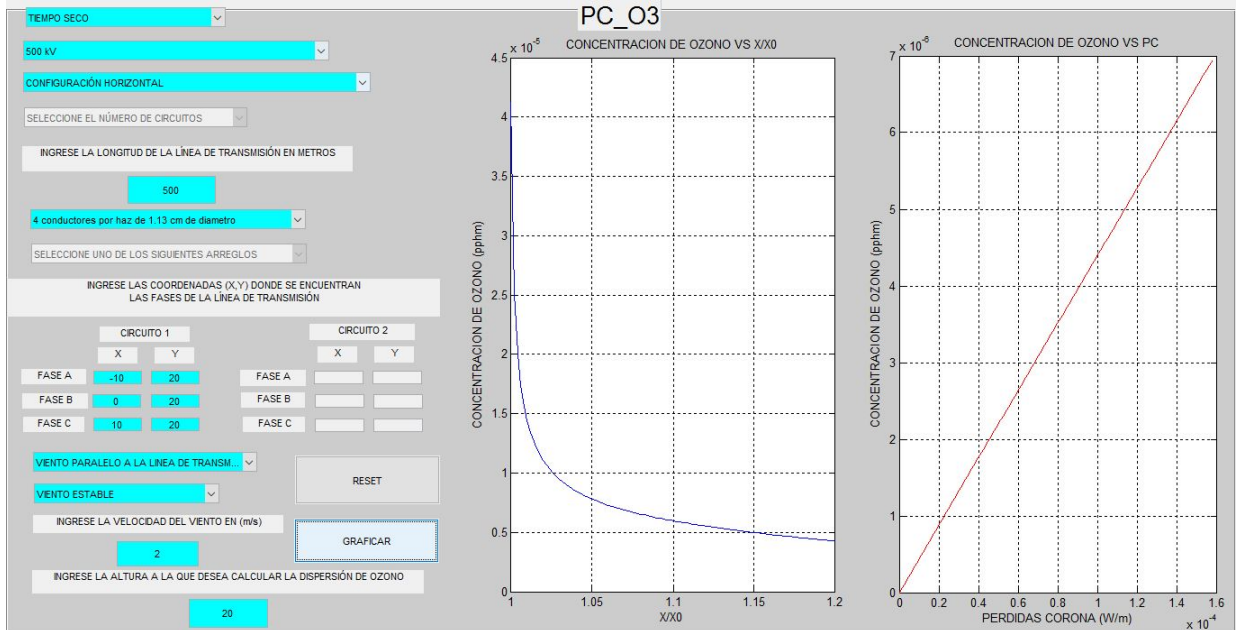


Tabla 11: Datos de concentración de ozono para el caso uno, bajo viento perpendicular por corona en clima seco

CASO UNO				
Clima Seco				
dirección del viento: PERPENDICULAR				
	Nivel de tierra		Nivel de línea	
	Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/L	Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/L
viento estable	$7,5 \cdot 10^{-8}$	450	$8,8 \cdot 10^{-6}$	1
viento inestable	$7,5 \cdot 10^{-8}$	6	$8,4 \cdot 10^{-7}$	1

Figura 54: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso uno, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima seco

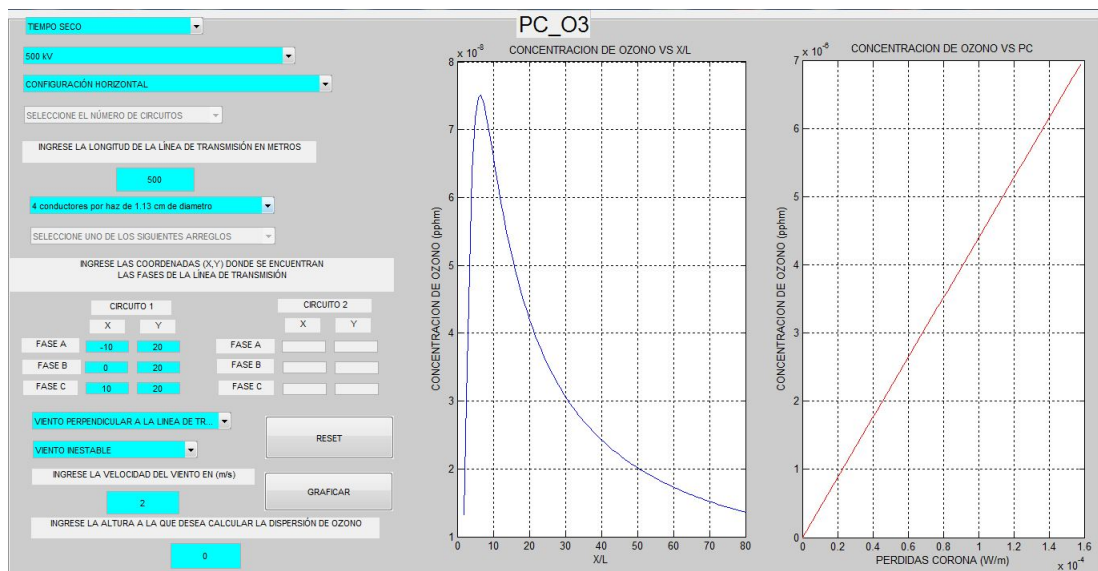


Figura 55: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso uno, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima seco

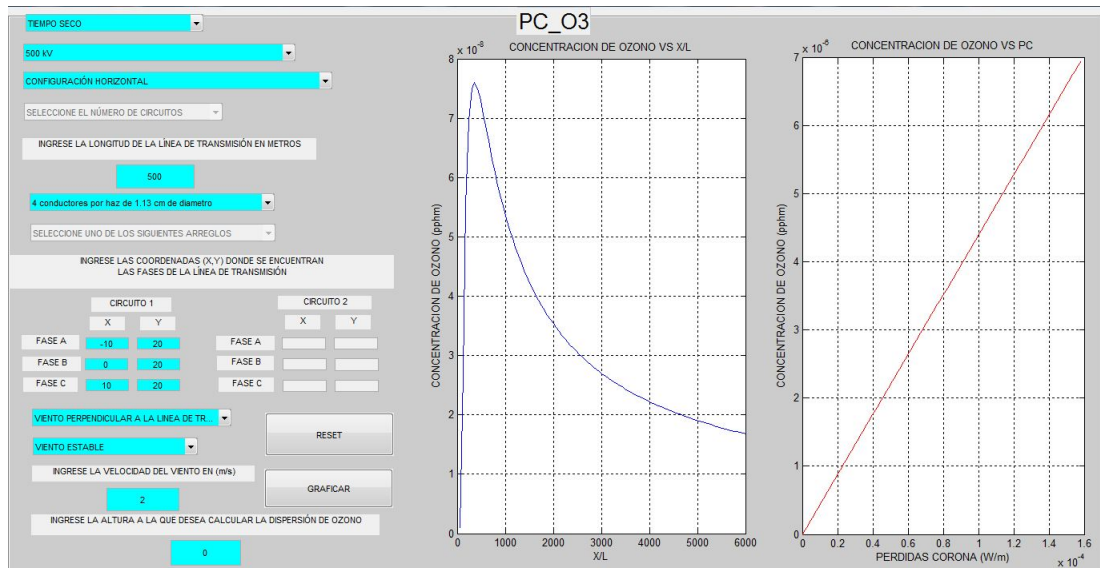


Figura 56: Concentración de ozono al nivel de línea para caso uno, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima seco

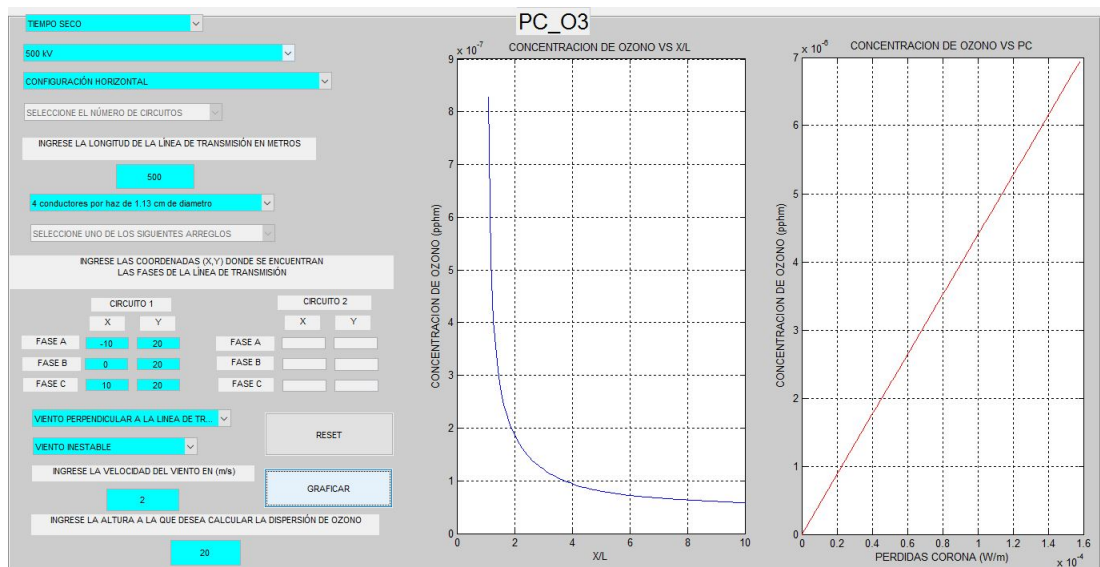


Figura 57: Concentración de ozono al nivel de línea para caso uno, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima seco

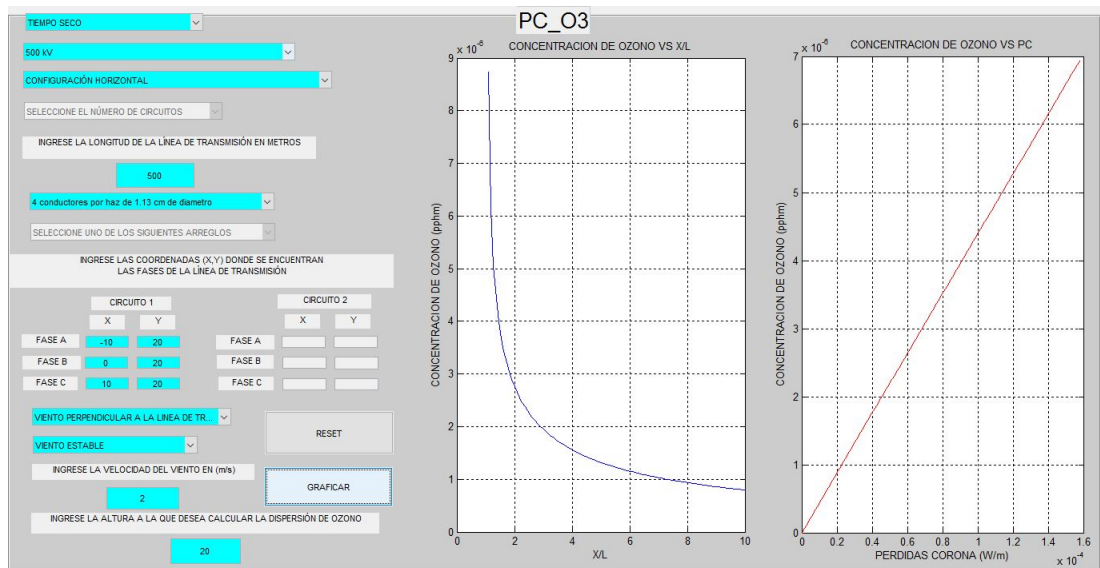


Tabla 12: Datos de concentración de ozono para el caso uno, bajo viento paralelo por corona en clima lluvioso

CASO UNO				
Clima Lluvioso				
dirección del viento: PARALELO				
	Nivel de tierra		Nivel de línea	
	Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia $X/X_0$	Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia $X/X_0$
viento estable	$4,49 \cdot 10^{-3}$	5	0,011	1
viento inestable	$3,4 \cdot 10^{-5}$	1,1	$3,2 \cdot 10^{-4}$	1

Figura 58: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso uno, bajo viento paralelo e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

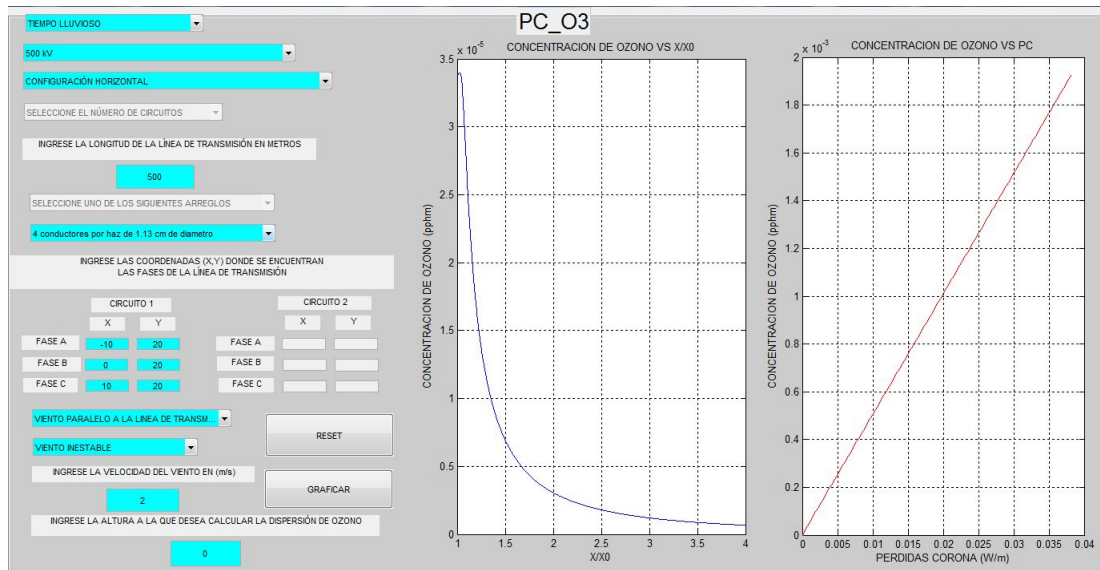


Figura 59: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso uno, bajo viento paralelo e estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

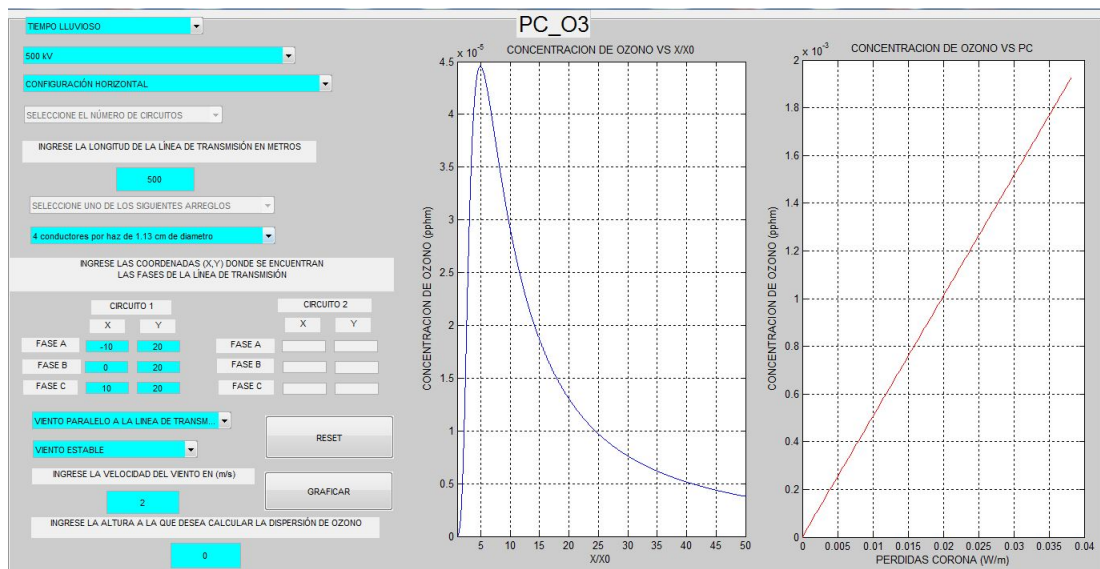


Figura 60: Concentración de ozono al nivel de línea para caso uno, bajo viento paralelo y inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

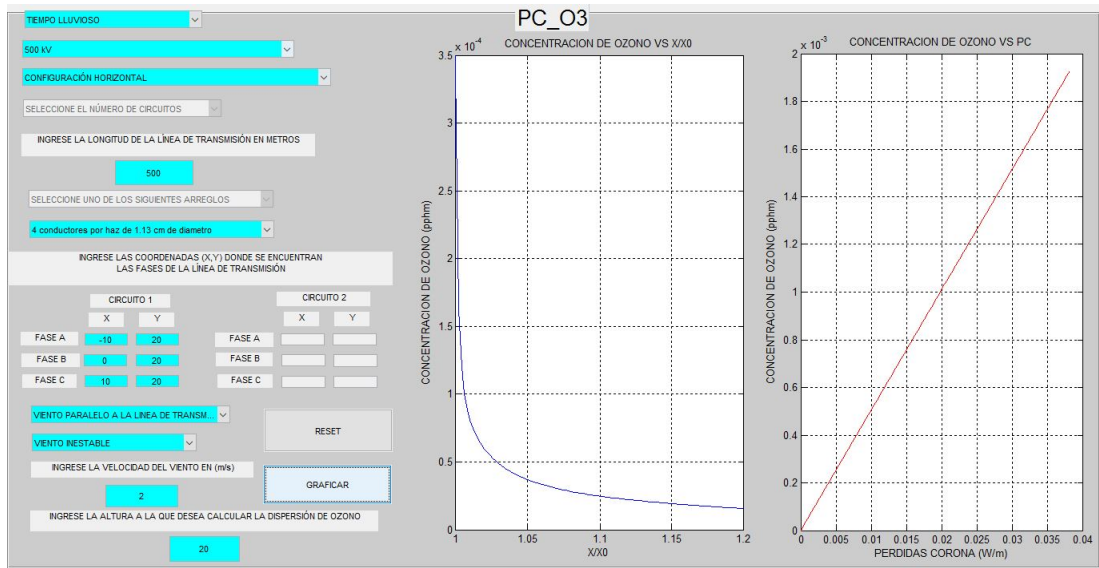


Figura 61: Concentración de ozono al nivel de línea para caso uno, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

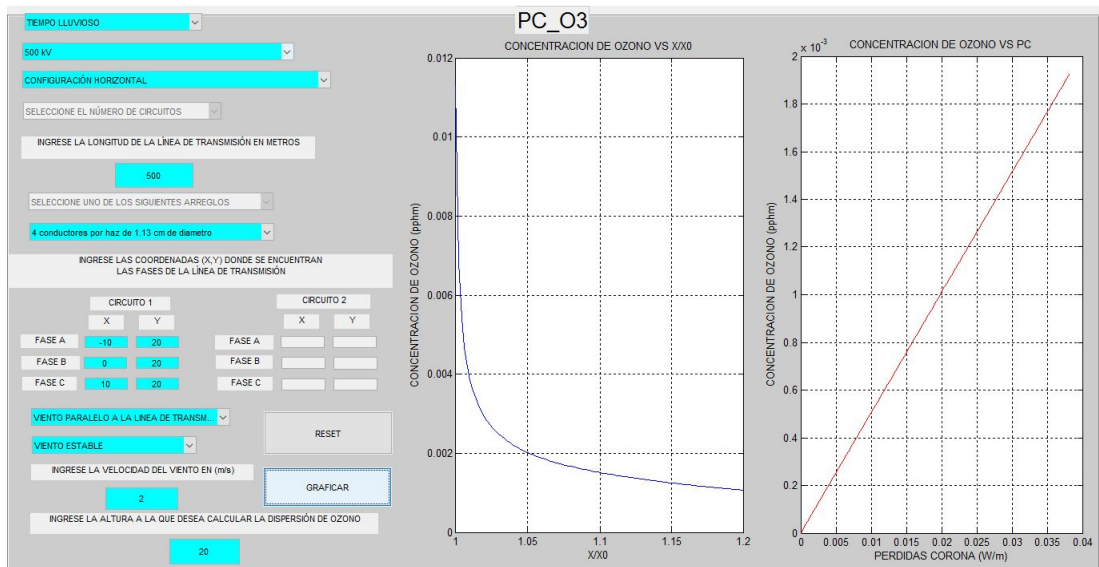


Tabla 13: Datos de concentración de ozono para el caso uno, bajo viento perpendicular por corona en clima lluvioso

CASO UNO				
Clima Lluvioso				
dirección del viento: PERPENDICULAR				
	Nivel de tierra		Nivel de línea	
	Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/L	Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/L
viento estable	$1,84 \cdot 10^{-5}$	400	$2 \cdot 10^{-3}$	1
viento inestable	$1,84 \cdot 10^{-5}$	7	$1,8 \cdot 10^{-4}$	1

Figura 62: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso uno, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

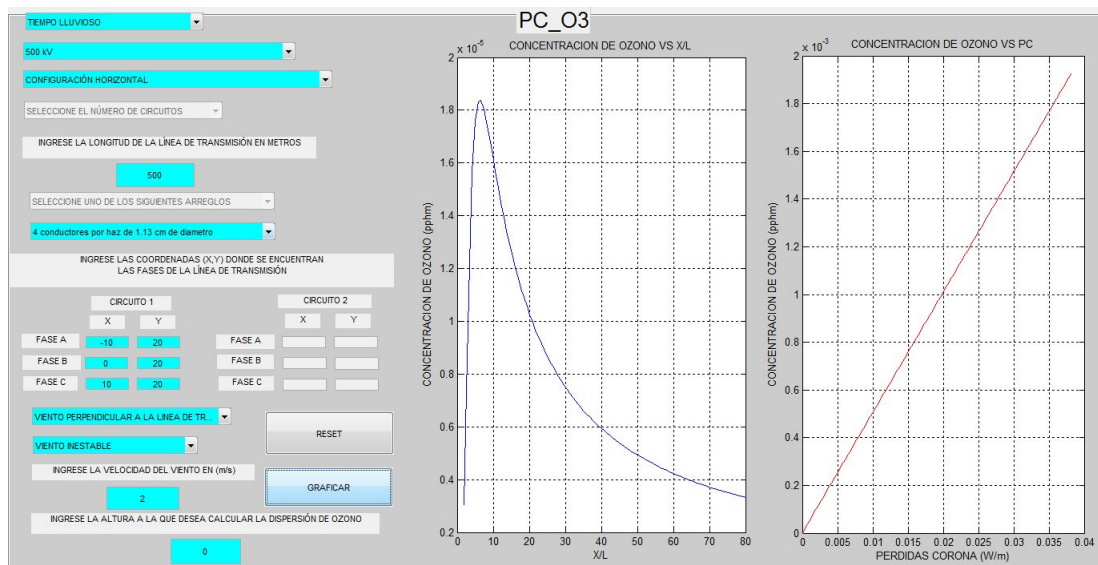


Figura 63: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso uno, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

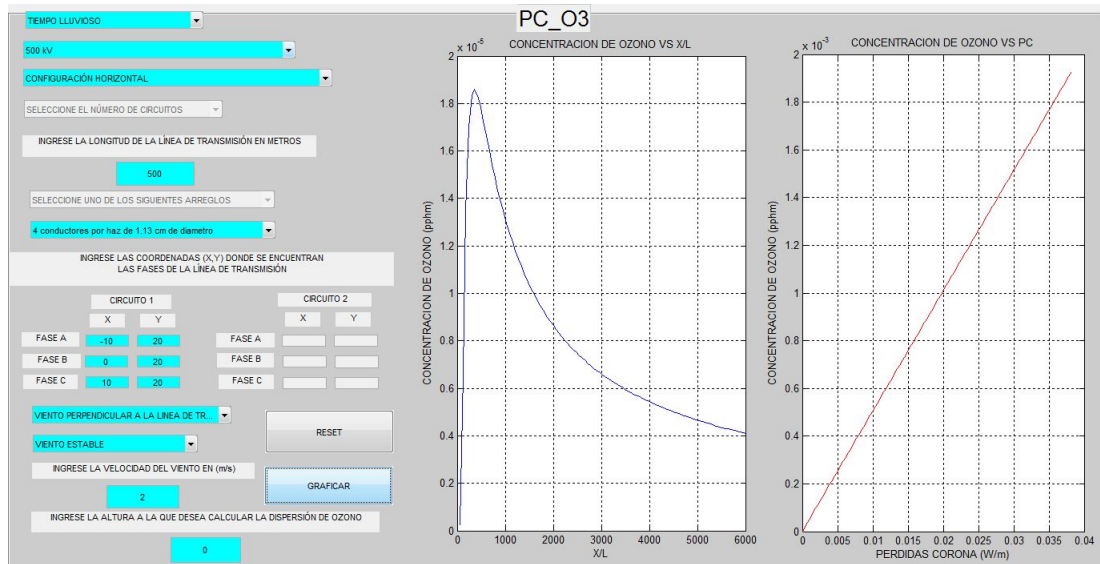


Figura 64: Concentración de ozono al nivel de línea para caso uno, bajo viento perpendicular y inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

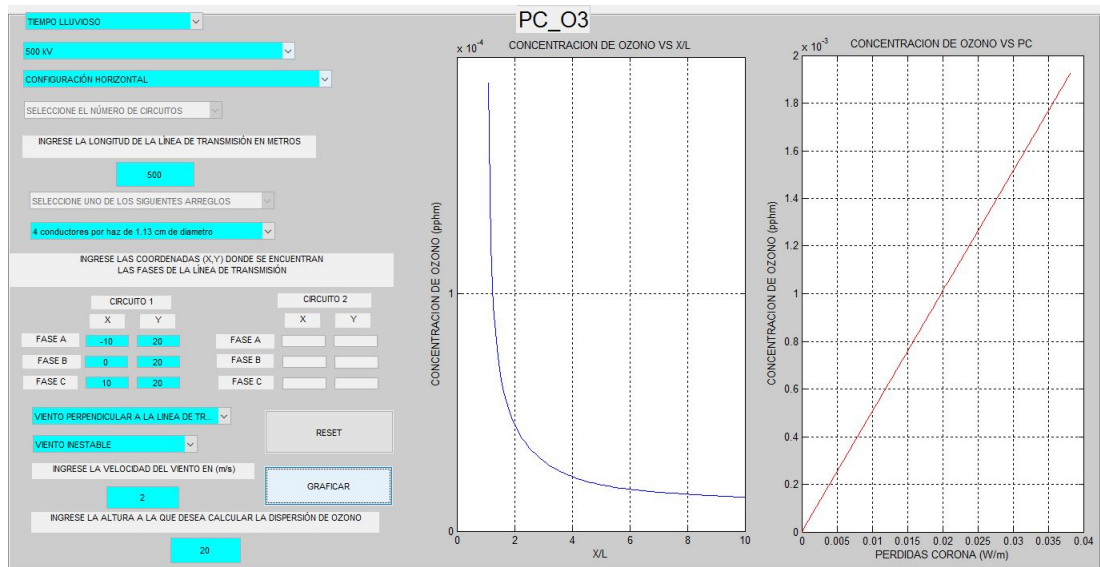
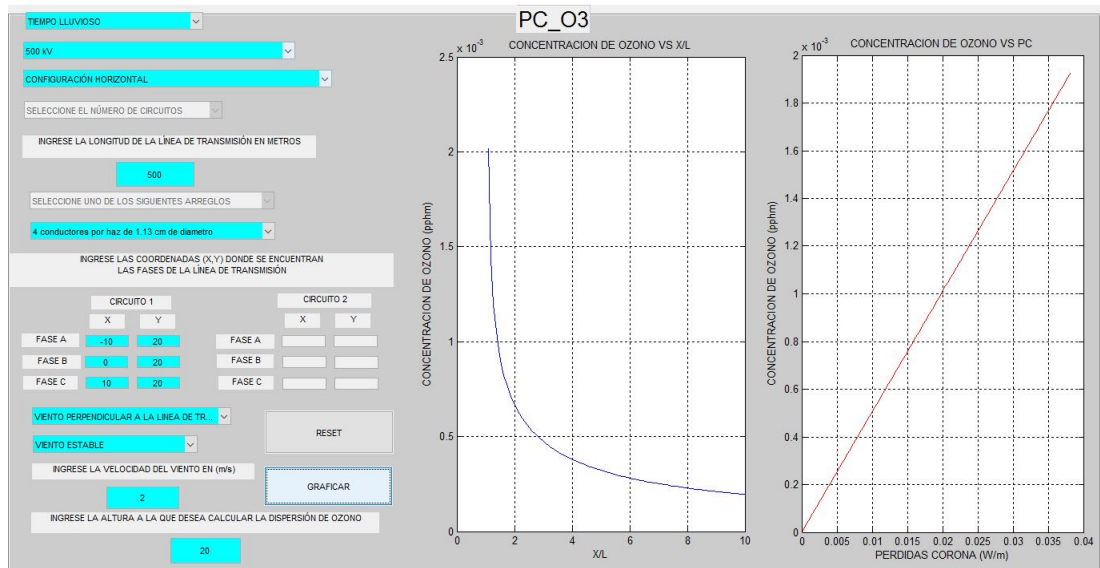


Figura 65: Concentración de ozono al nivel de línea para caso uno, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso



---

# C

## RESULTADOS LÍNEA DE 500 kV, CONFIGURACIÓN HORIZONTAL CASO DOS

---

---

Tabla 14: Datos de concentración de ozono para el caso dos, bajo viento paralelo por corona en clima seco

CASO DOS				
Clima Seco				
dirección del viento: PARALELO				
	Nivel de tierra		Nivel de línea	
	Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/ $X_0$	Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/ $X_0$
viento estable	$4,6 \cdot 10^{-8}$	5	$9,8 \cdot 10^{-6}$	1
viento inestable	$6,1 \cdot 10^{-8}$	1,1	$0,95 \cdot 10^{-6}$	1

Figura 66: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso dos, bajo viento paralelo e inestable, originada por pérdida corona en clima seco

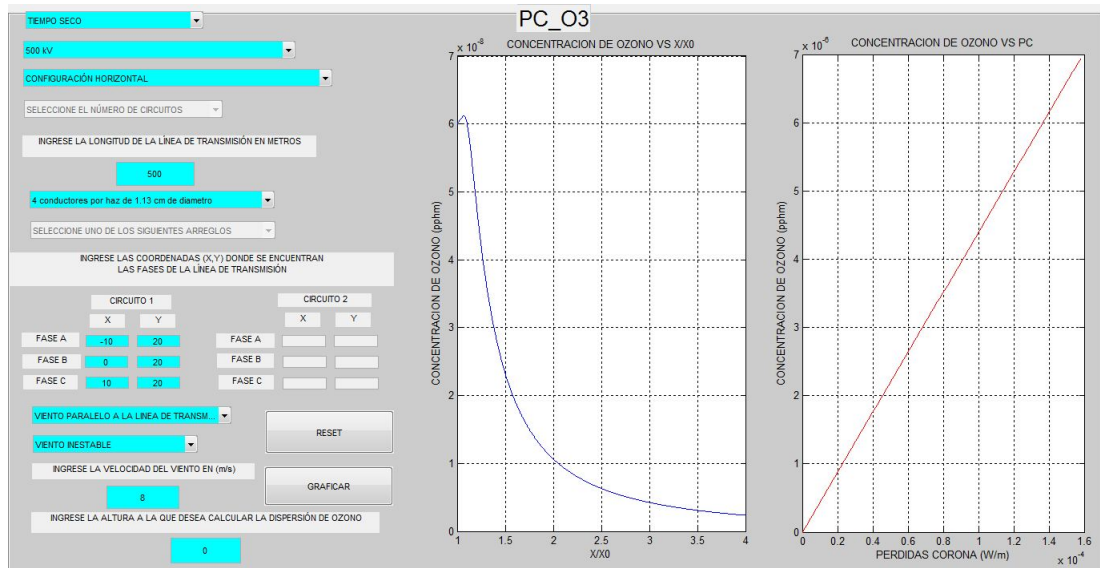


Figura 67: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso dos, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima seco

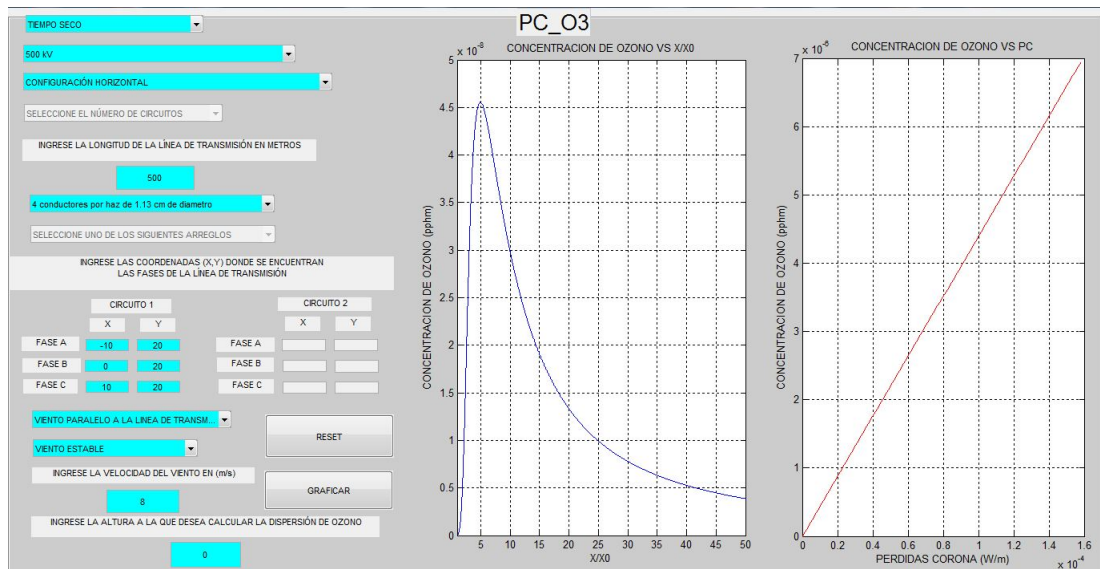


Figura 68: Concentración de ozono al nivel de línea para caso dos, bajo viento paralelo y inestable, originada por pérdida corona en clima seco

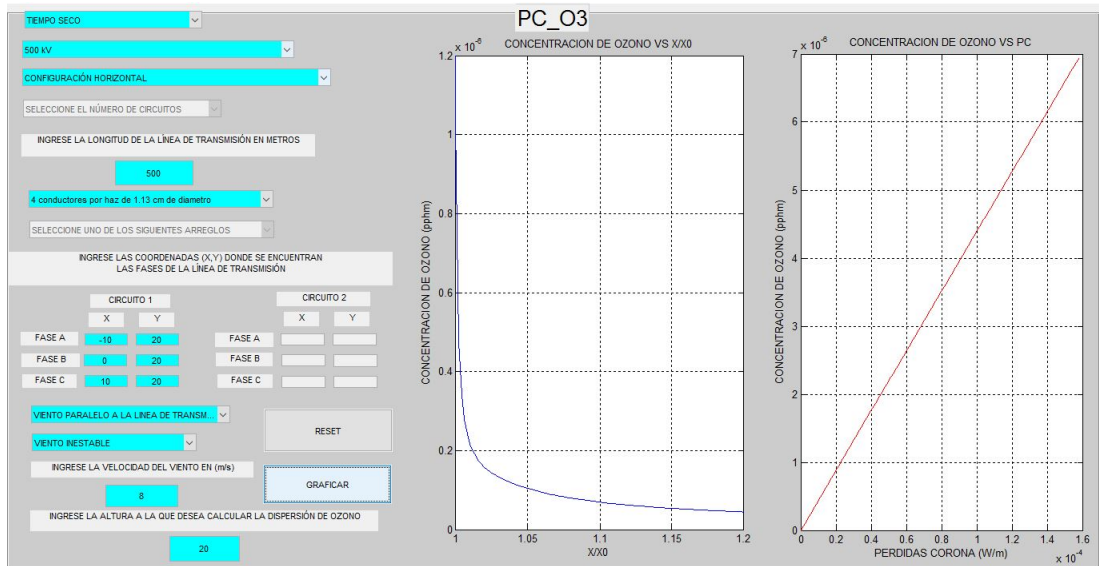


Figura 69: Concentración de ozono al nivel de línea para caso dos, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima seco

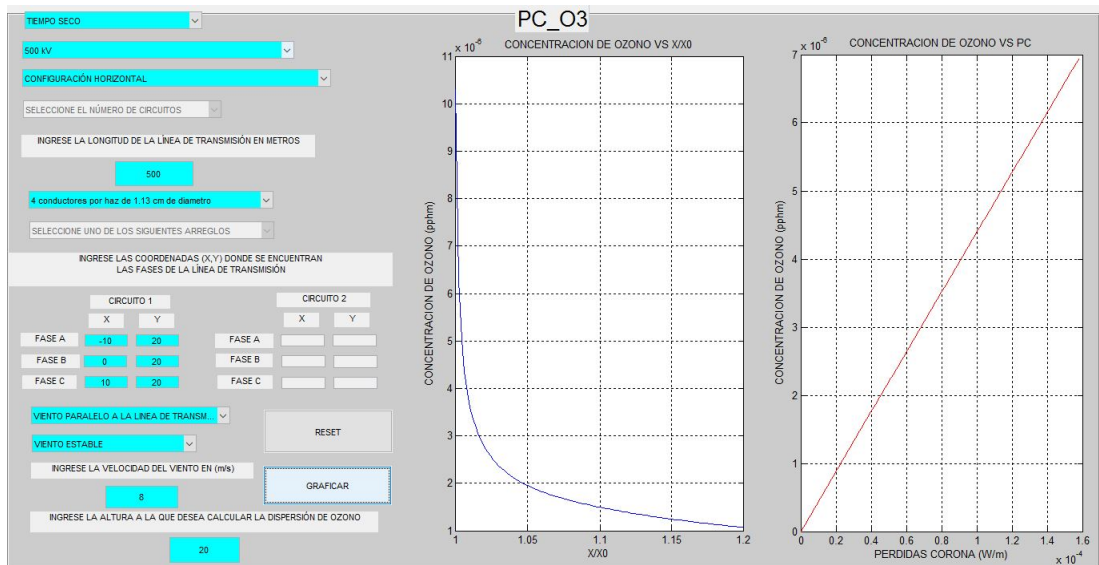


Tabla 15: Datos de concentración de ozono bajo viento perpendicular por corona en clima seco

CASO DOS				
Clima Seco				
dirección del viento: PERPENDICULAR				
	Nivel de tierra		Nivel de línea	
	Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/L	Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/L
viento estable	$1,9 \cdot 10^{-8}$	450	$2,25 \cdot 10^{-6}$	1
viento inestable	$1,9 \cdot 10^{-8}$	18	$3,85 \cdot 10^{-7}$	1

Figura 70: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso dos, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima seco

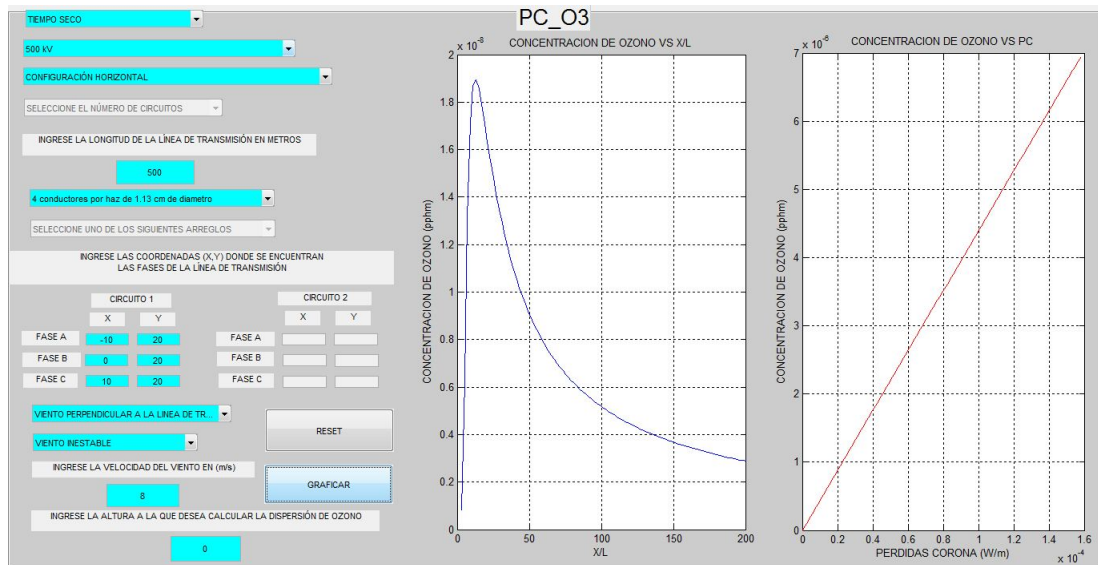


Figura 71: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso dos, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima seco

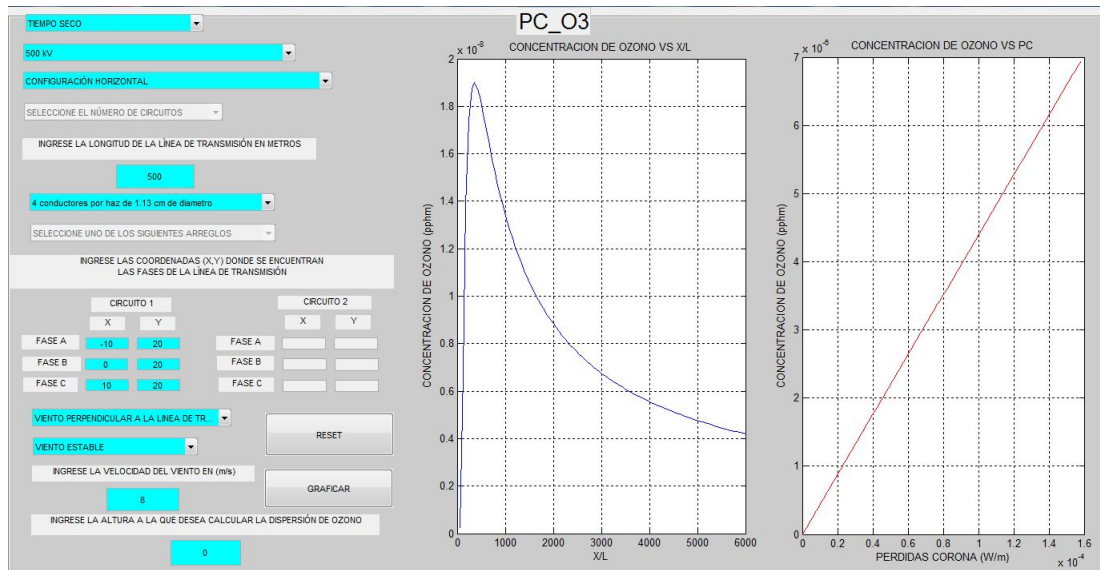


Figura 72: Concentración de ozono al nivel de línea para caso dos, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima seco

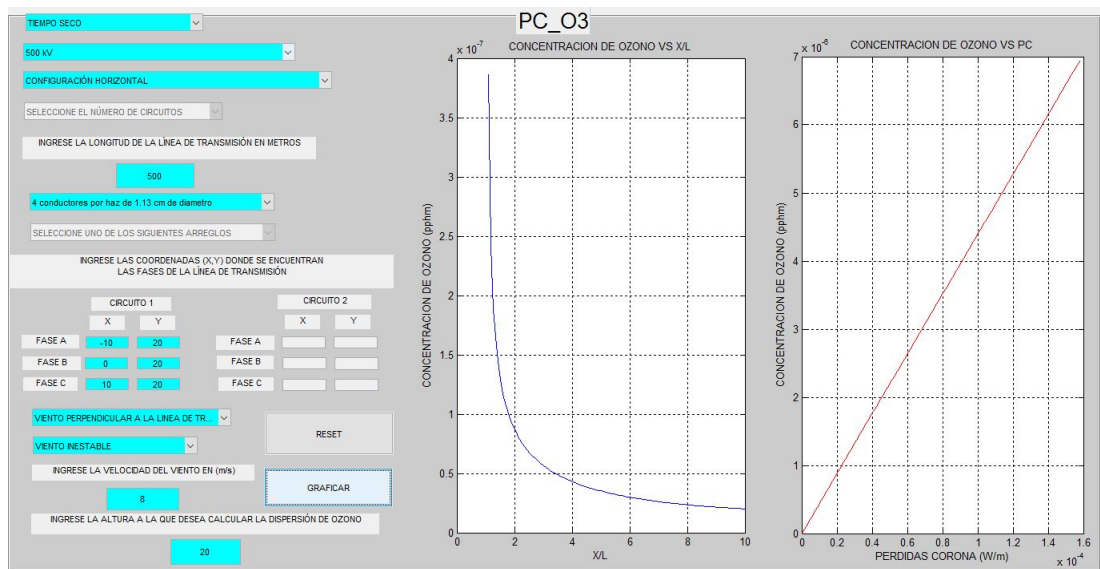


Figura 73: Concentración de ozono al nivel de línea para caso dos, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima seco

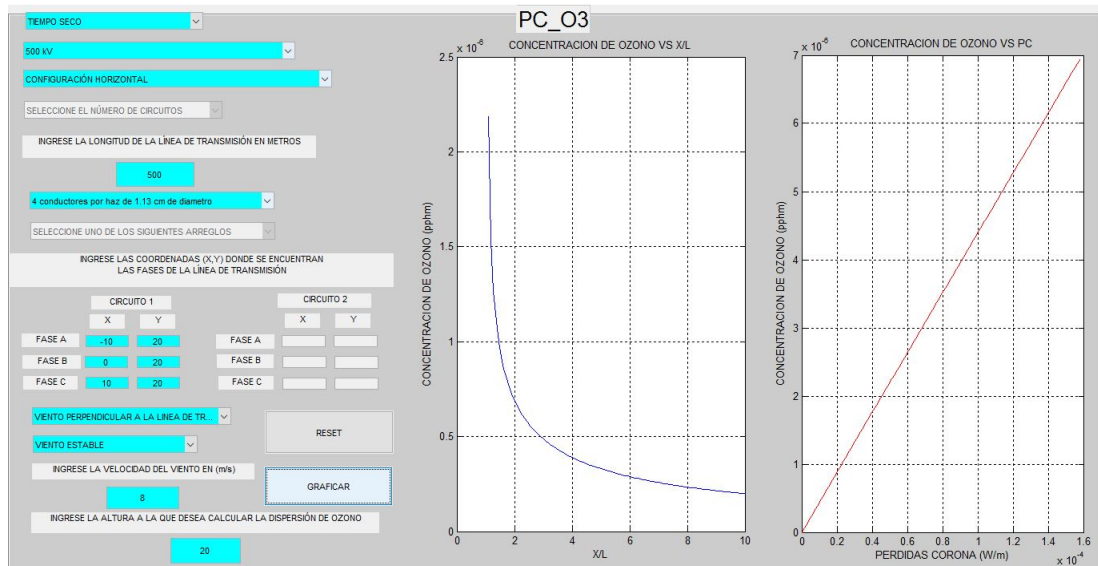


Tabla 16: Datos de concentración de ozono bajo viento paralelo por corona en clima lluvioso

CASO DOS				
Clima Lluvioso				
dirección del viento: PARALELO				
	Nivel de tierra		Nivel de línea	
	Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia $X/X_0$	Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia $X/X_0$
viento estable	$1,1 \cdot 10^{-5}$	5	$2,7 \cdot 10^{-3}$	1
viento inestable	$1,5 \cdot 10^{-5}$	1,1	$2,5 \cdot 10^{-4}$	1

Figura 74: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso dos, bajo viento paralelo e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

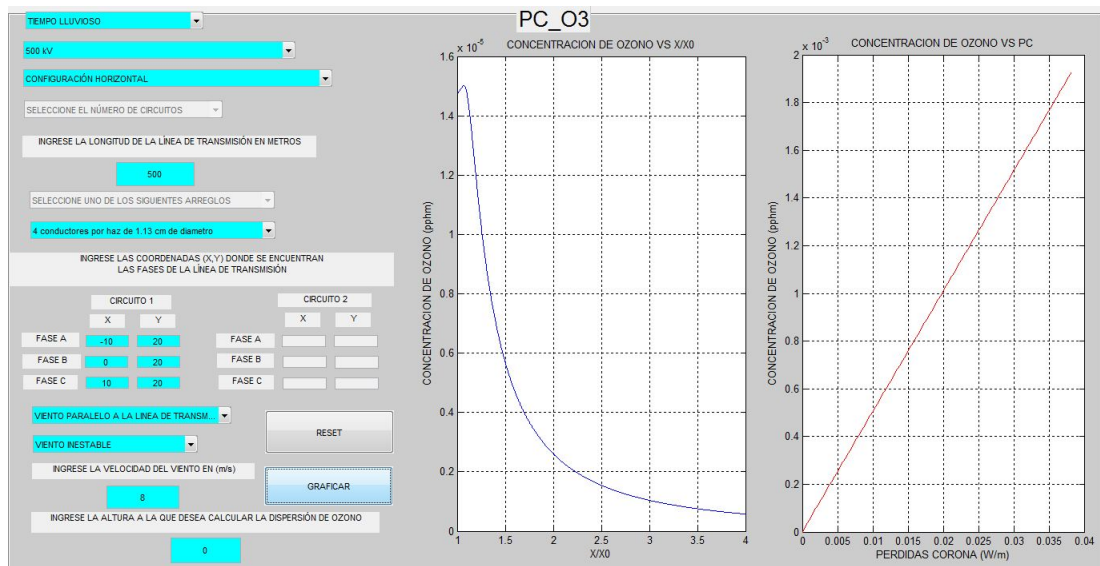


Figura 75: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso dos, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

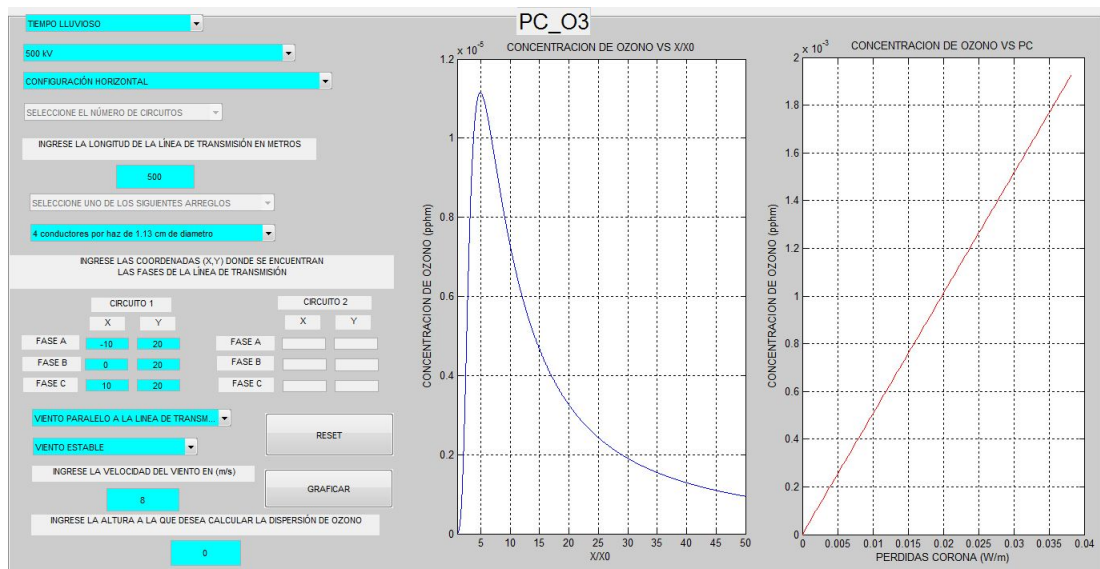


Figura 76: Concentración de ozono al nivel de línea para caso dos, bajo viento paralelo y inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

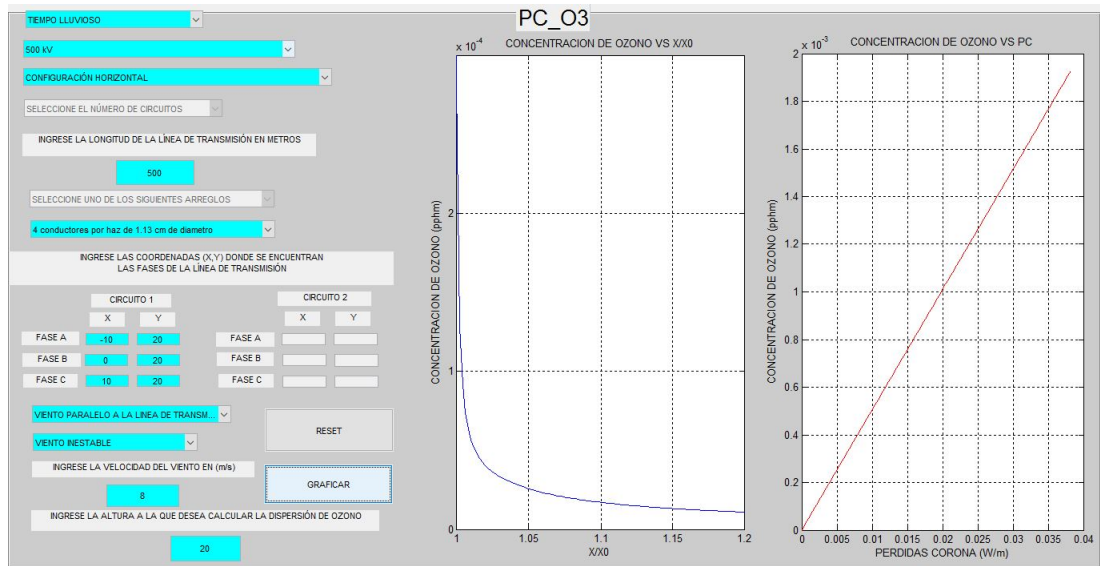


Figura 77: Concentración de ozono al nivel de línea para caso dos, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

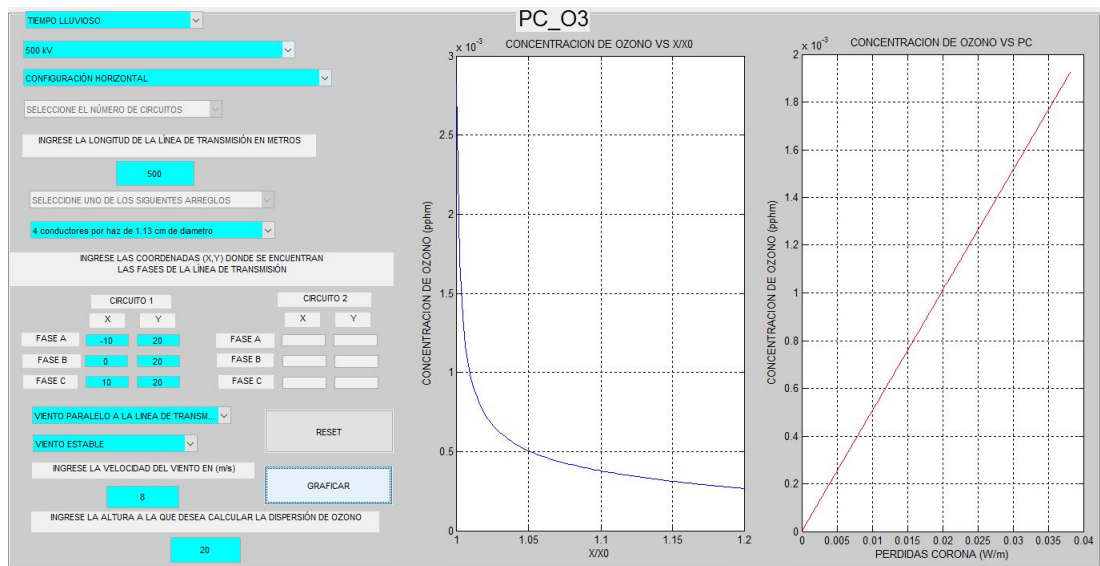


Tabla 17: Datos de concentración de ozono bajo viento perpendicular por corona en clima lluvioso

CASO DOS				
Clima Lluvioso				
dirección del viento: PERPENDICULAR				
	Nivel de tierra		Nivel de línea	
	Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/L	Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/L
viento estable	$4,6 \cdot 10^{-6}$	450	$5 \cdot 10^{-4}$	1
viento inestable	$4,6 \cdot 10^{-6}$	18	$8,8 \cdot 10^{-5}$	1

Figura 78: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso dos, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

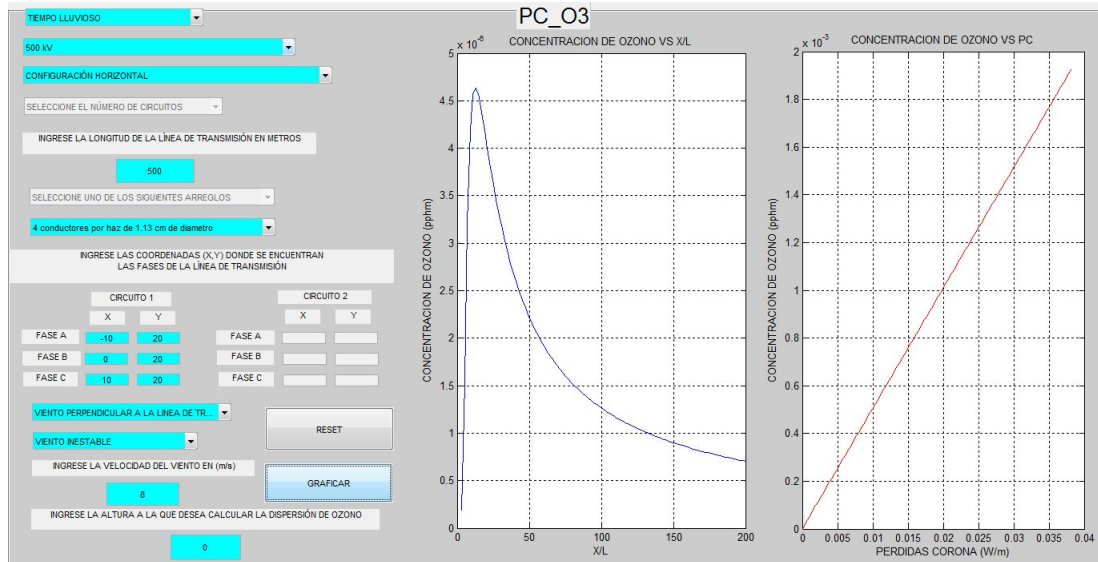


Figura 79: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso dos, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

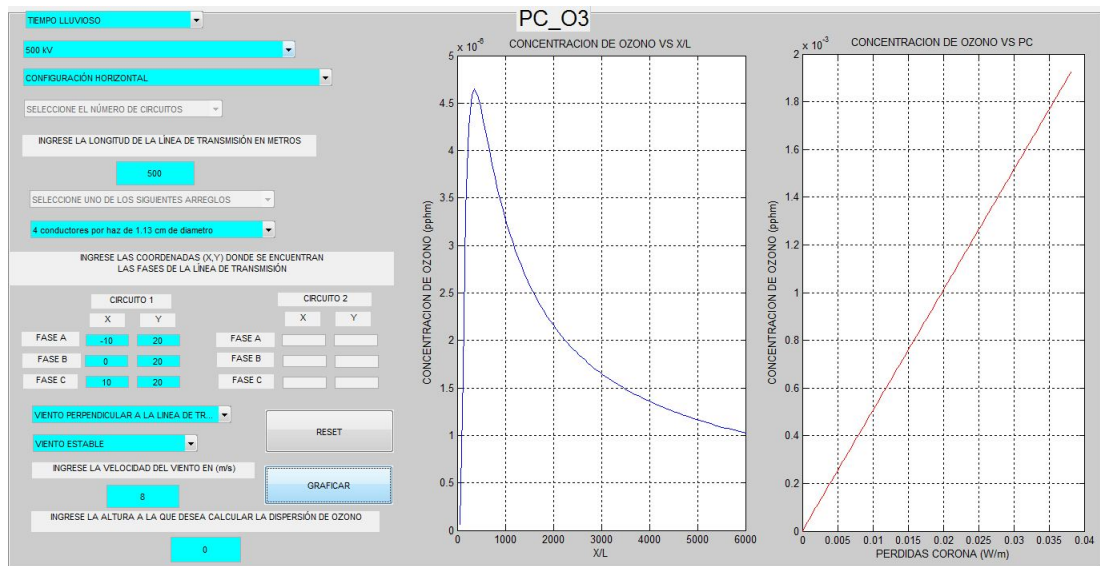


Figura 80: Concentración de ozono al nivel de línea para caso dos, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

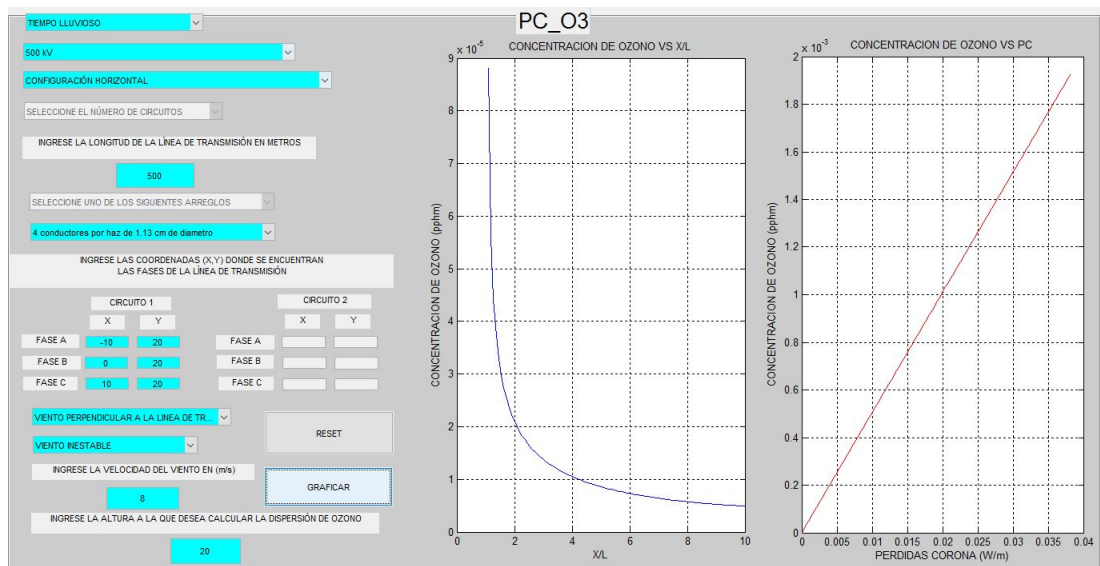
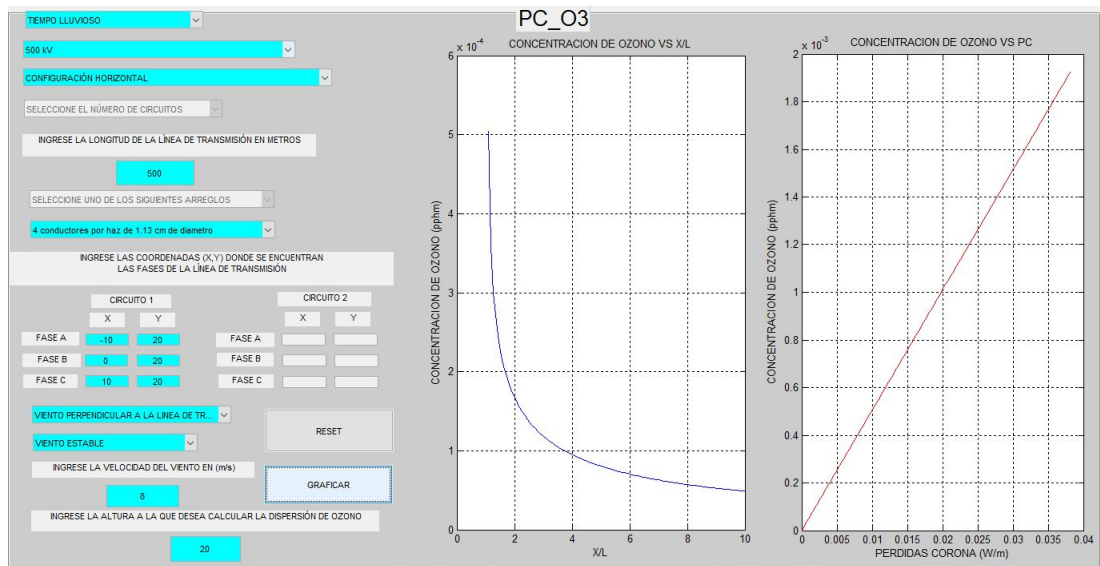


Figura 81: Concentración de ozono al nivel de línea para caso dos, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso



---

# D

## **RESULTADOS LÍNEA DE 230kV, CONF. VERTICAL DOBLE CIRCUITO CASO TRES**

---

Para evaluar la configuración vertical doble circuito, se tomó el caso estipulado en la Tabla 18. Los valores obtenidos para los valores máximos de concentración de ozono y la distancia a la cual esta se presenta, se consignan en la Tabla 19.

Tabla 18: CASO TRES

CONFIGURACIÓN VERTICAL DOBLE CIRCUITO							
1 conductores x 3,038 cm de diámetro							
velocidad del viento= 2(m/s)							
CLIMA SECO				CLIMA LLUVIOSO			
nivel de tierra		nivel de línea		nivel de tierra		nivel de línea	
dirección del viento	tipo de viento	dirección del viento	tipo de viento	dirección del viento	tipo de viento	dirección del viento	tipo de viento
paralelo	inestable	paralelo	inestable	paralelo	inestable	paralelo	inestable
	estable		estable		estable		estable
perpendicular	inestable	perpendicular	inestable	perpendicular	inestable	perpendicular	inestable
	estable		estable		estable		estable

Tabla 19: Resumen de valores de concentración de ozono máximo par el caso tres

CASO TRES											
Clima Seco						Clima Lluvioso					
dirección del viento: PARALELO											
Nivel de tierra			Nivel de línea			Nivel de tierra			Nivel de línea		
Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/ $X_0$		Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/ $X_0$		Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/ $X_0$		Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/ $X_0$	
viento estable	5	$4,6 \cdot 10^{-8}$	1	1		5	1		1	1	
viento inestable	1,1	$6,1 \cdot 10^{-8}$	1	1		1,1	1		1,1	1	
dirección del viento: PERPENDICULAR											
Nivel de tierra			Nivel de línea			Nivel de tierra			Nivel de línea		
Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/L		Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/L		Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/L		Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/L	
viento estable	450	$1,9 \cdot 10^{-8}$	1	1		450	1		450	1	
viento inestable	18	$1,9 \cdot 10^{-8}$	1	1		18	1		18	1	

Figura 82: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso tres, bajo viento paralelo e inestable, originada por pérdida corona en clima seco

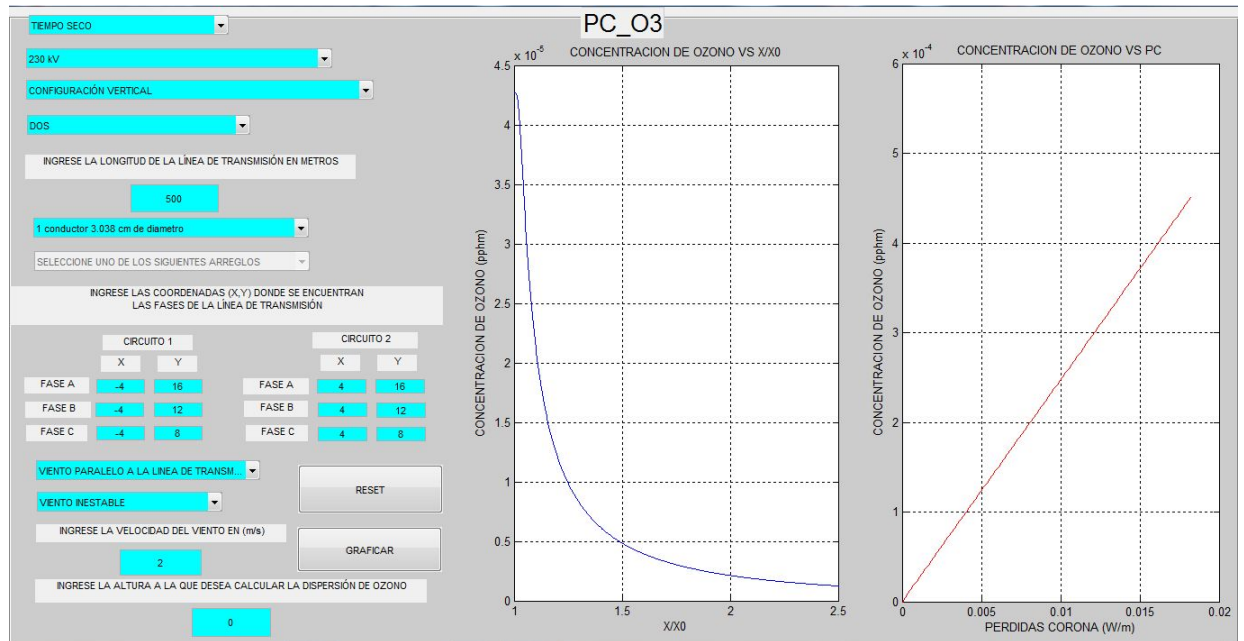


Figura 83: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso tres, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima seco

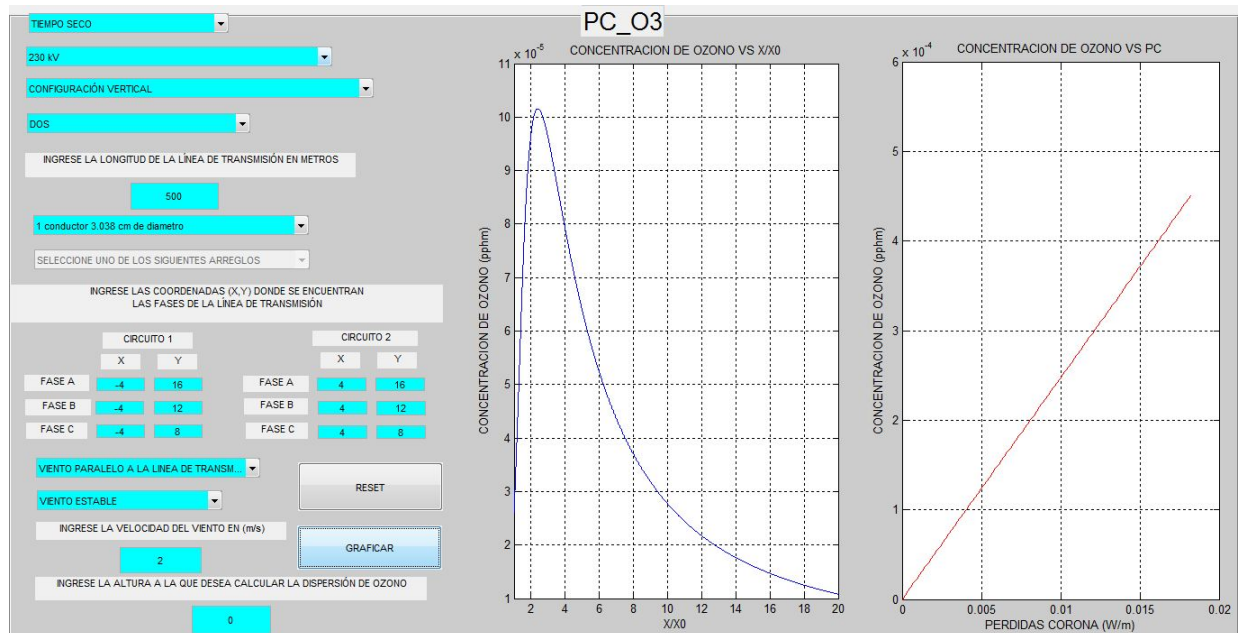


Figura 84: Concentración de ozono al nivel de línea para caso tres, bajo viento paralelo y inestable, originada por pérdida corona en clima seco

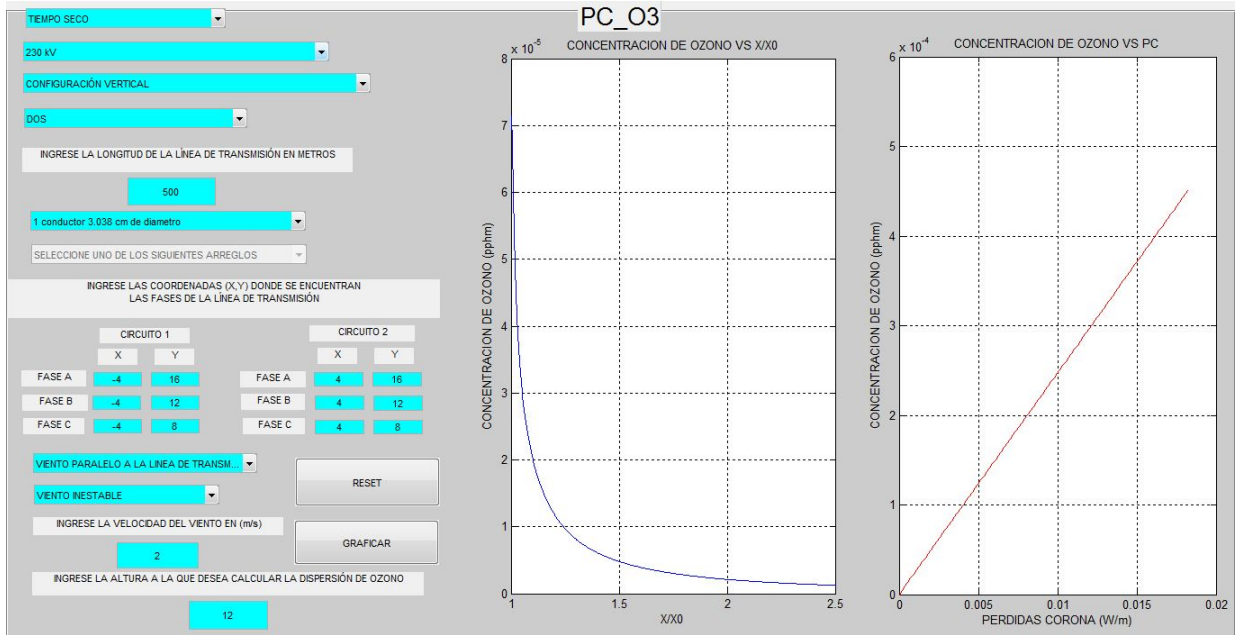


Figura 85: Concentración de ozono al nivel de línea para caso tres, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima seco

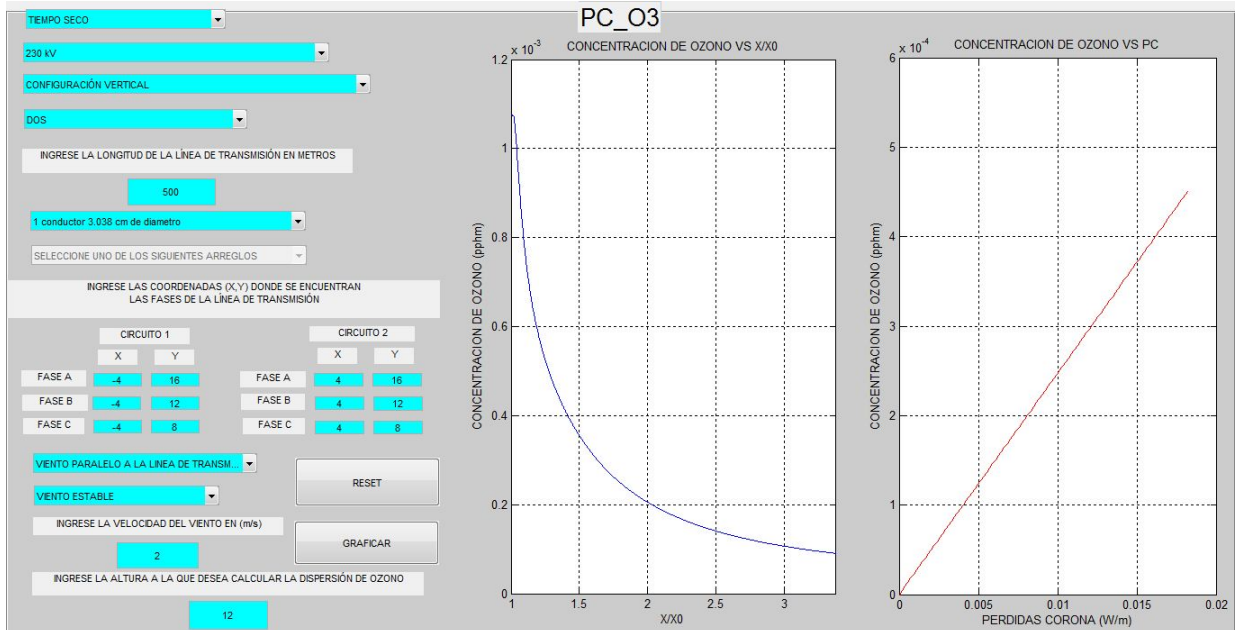


Figura 86: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso tres, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima seco

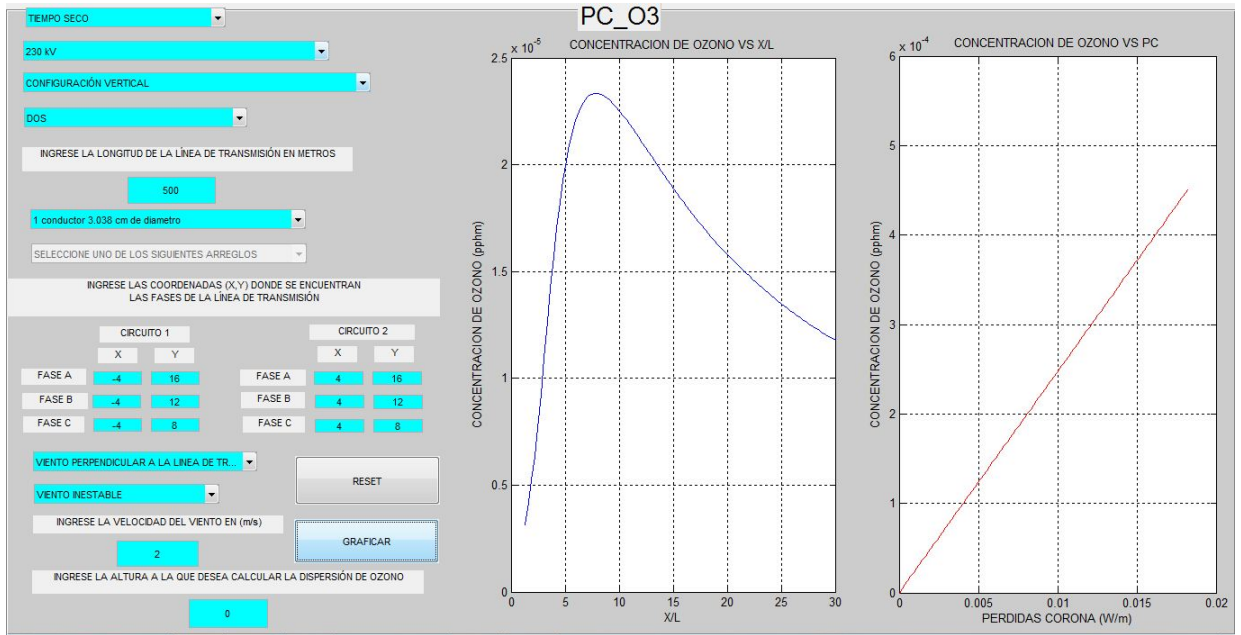


Figura 87: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso tres, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima seco

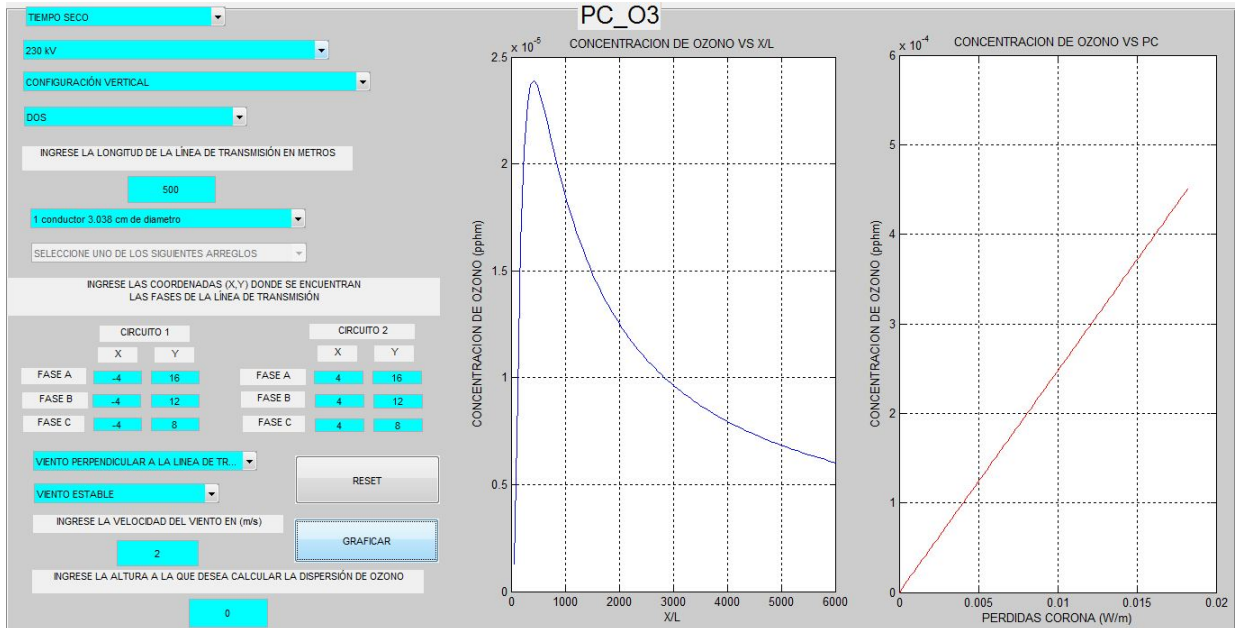


Figura 88: Concentración de ozono al nivel de línea para caso tres, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima seco

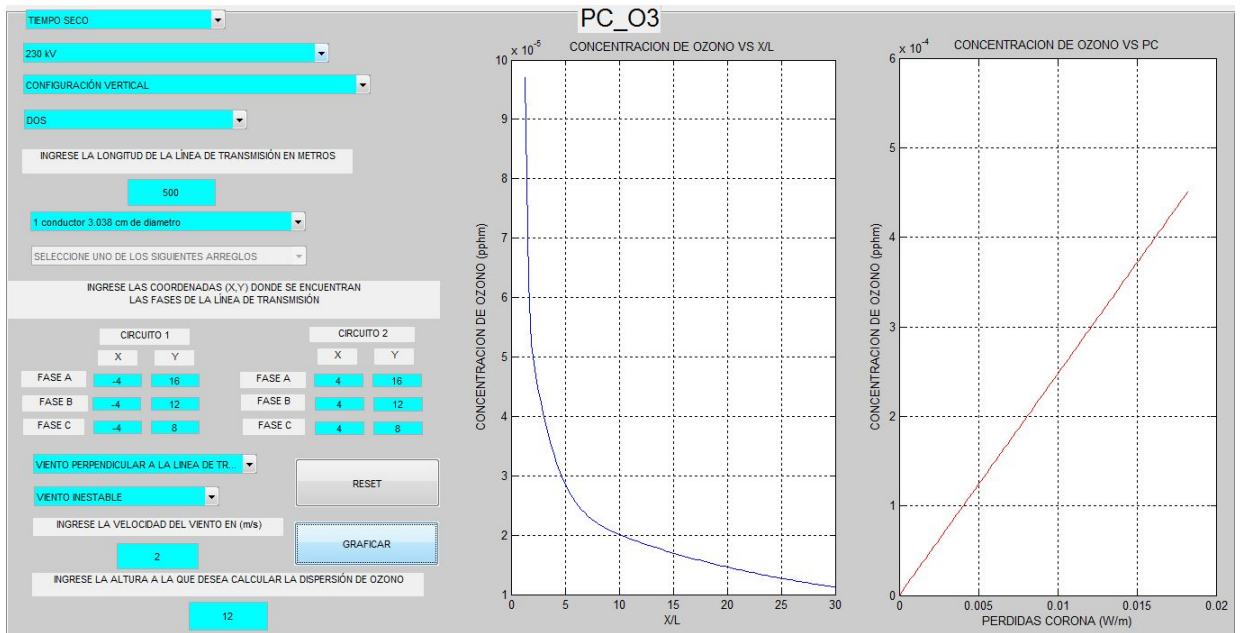


Figura 89: Concentración de ozono al nivel de línea para caso tres, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima seco

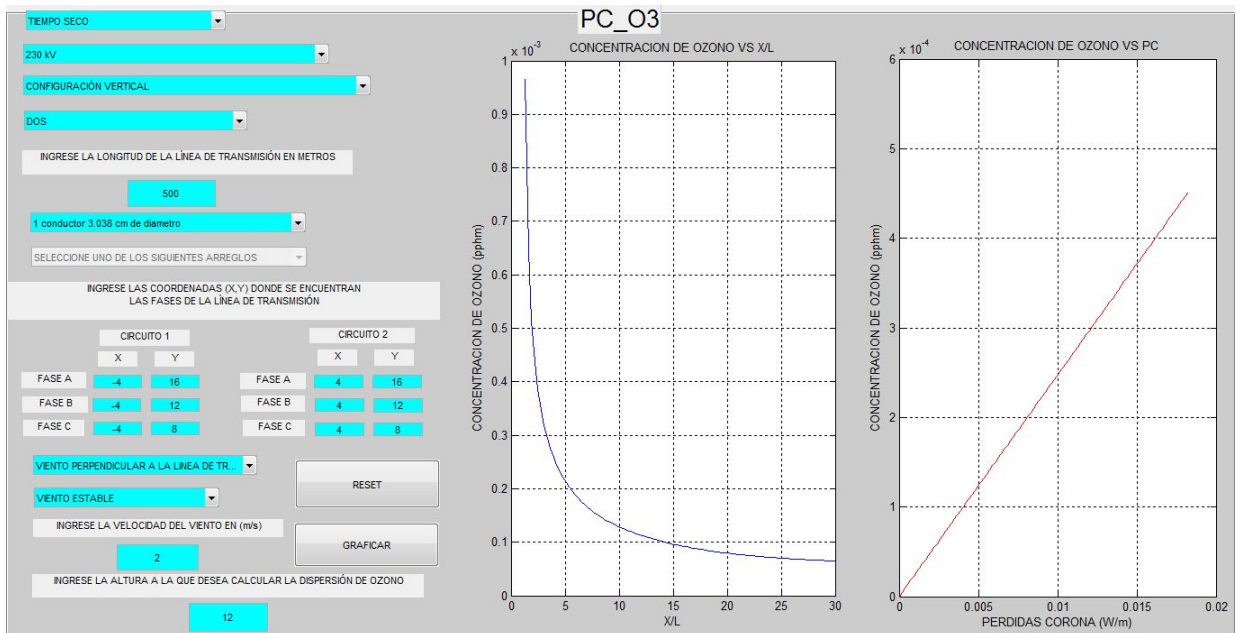


Figura 90: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso tres, bajo viento paralelo e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

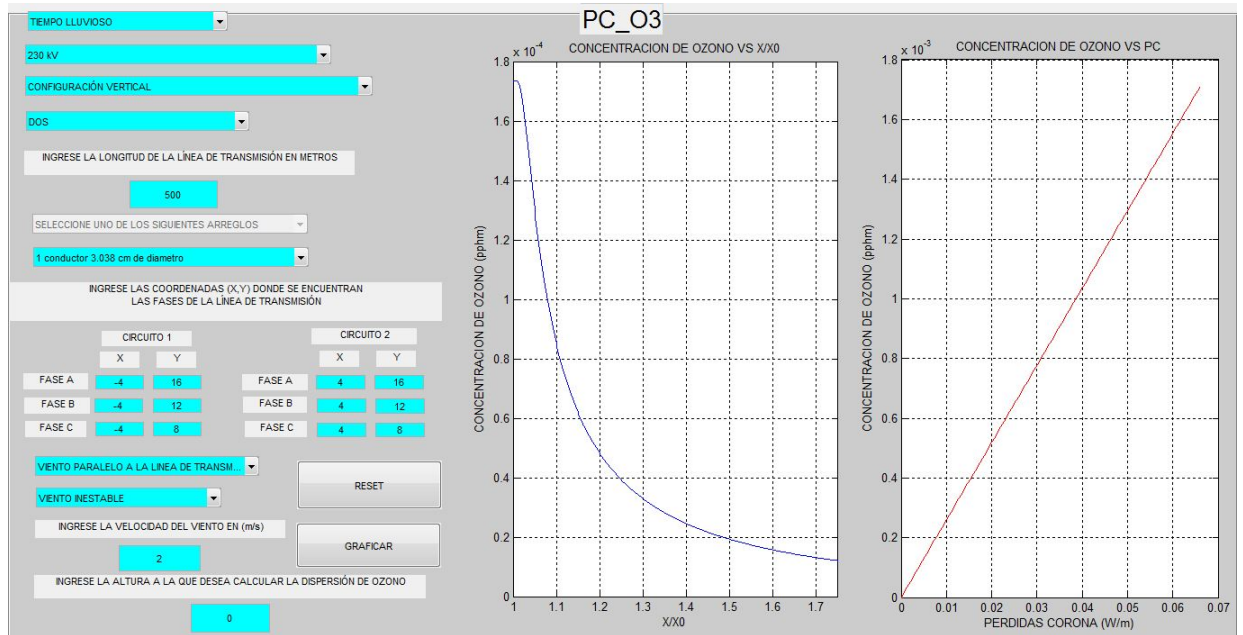


Figura 91: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso tres, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

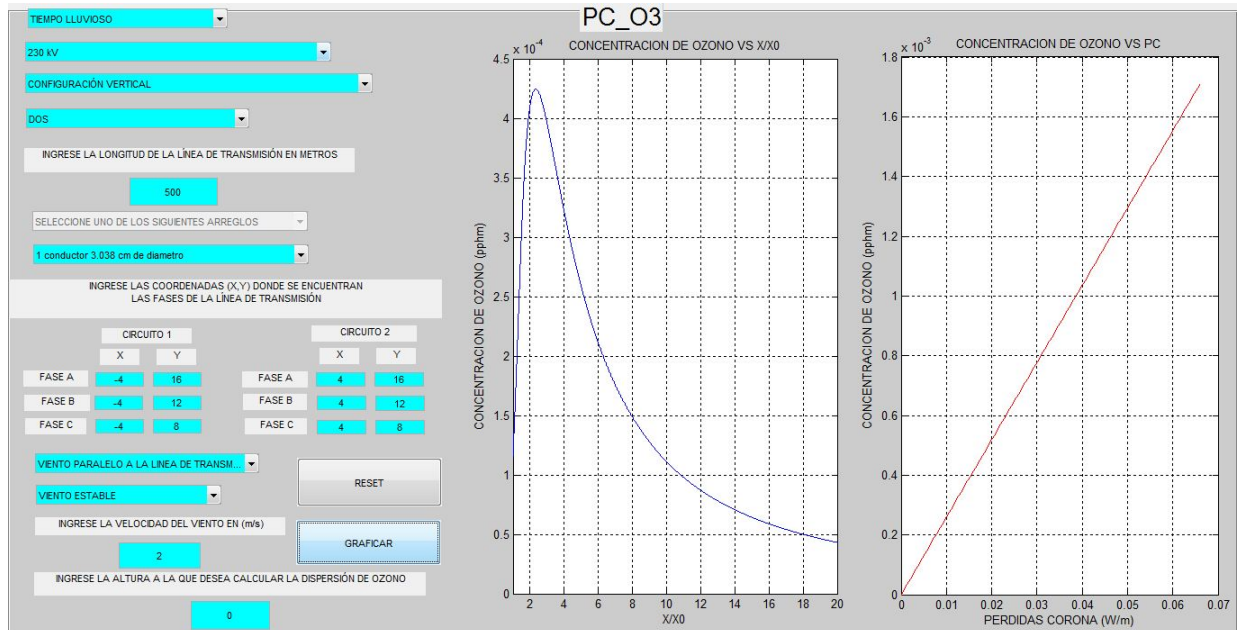


Figura 92: Concentración de ozono al nivel de línea para caso tres, bajo viento paralelo y inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

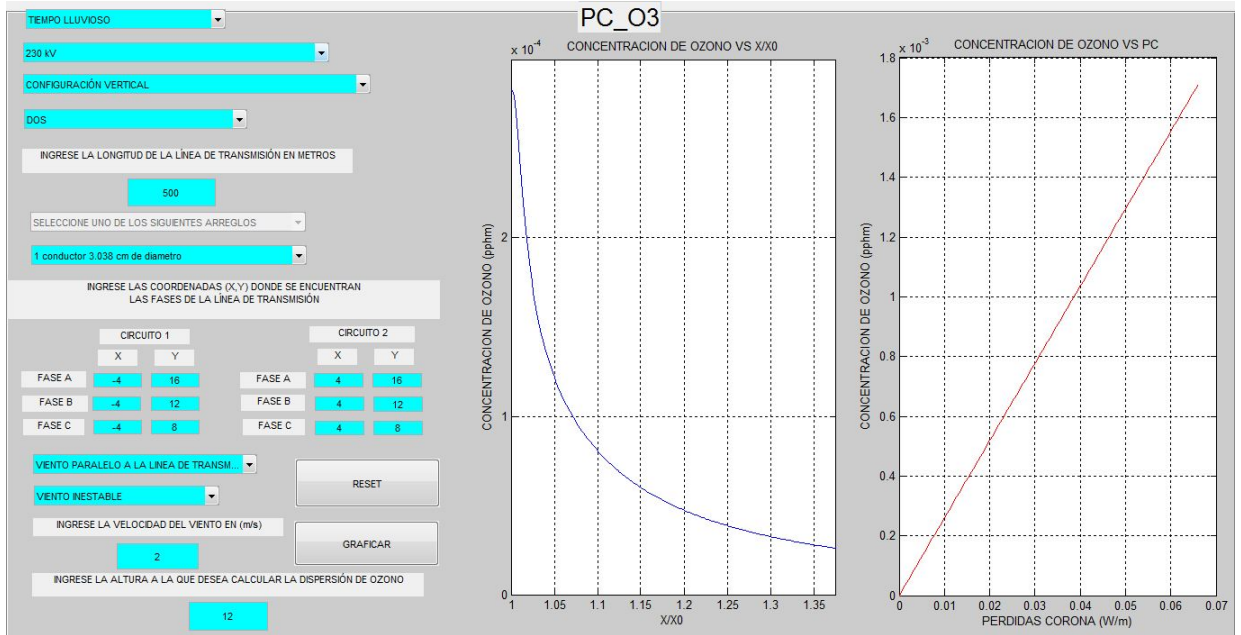


Figura 93: Concentración de ozono al nivel de línea para caso tres, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

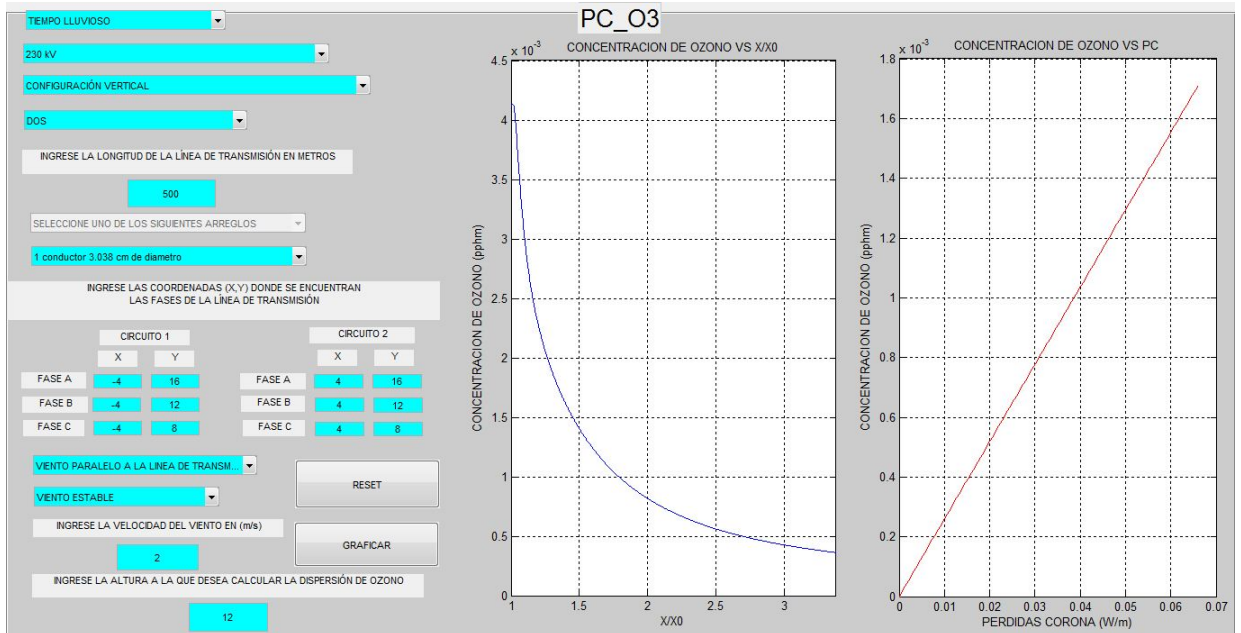


Figura 94: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso tres, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

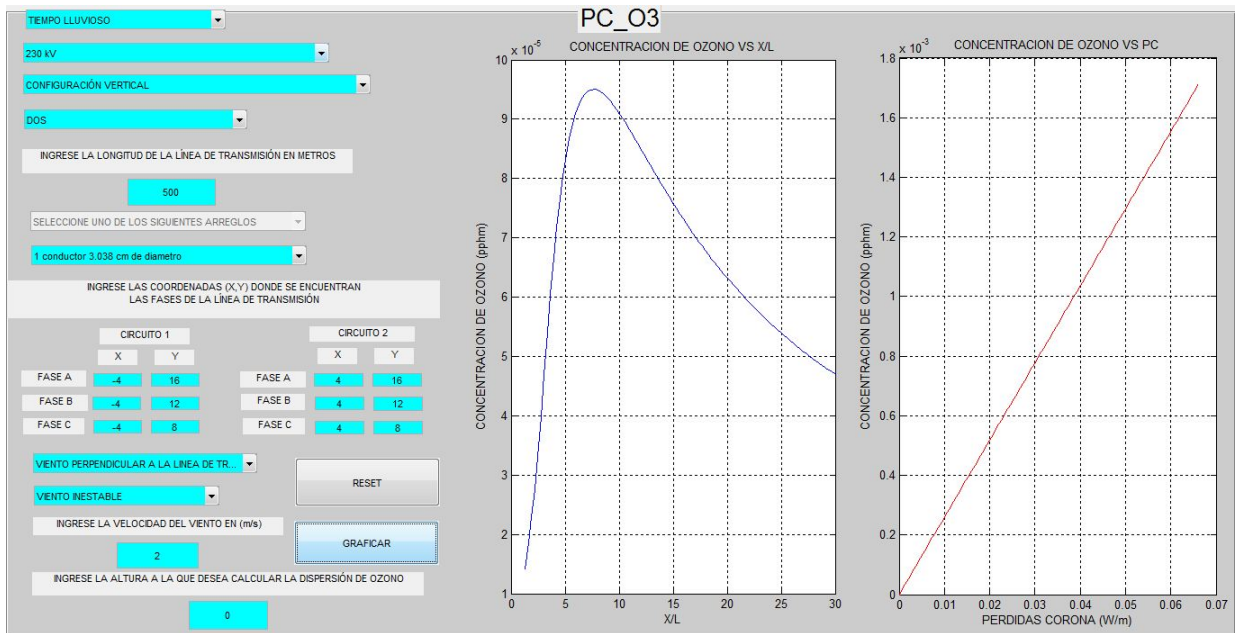


Figura 95: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso tres, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

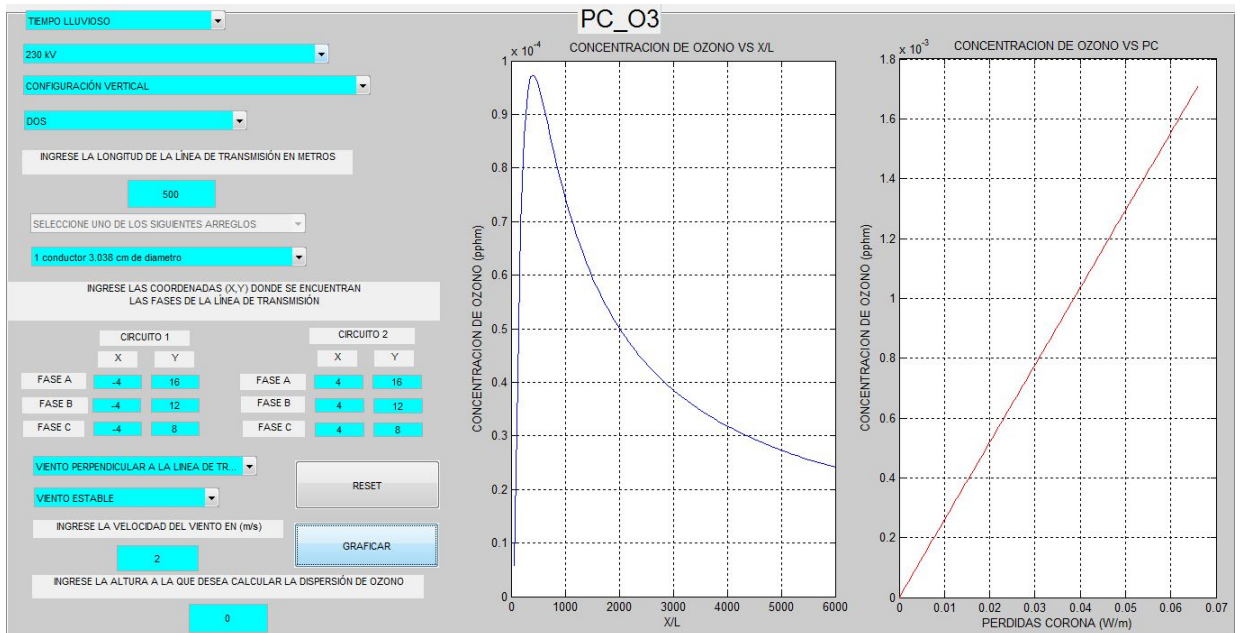


Figura 96: Concentración de ozono al nivel de línea para caso tres, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

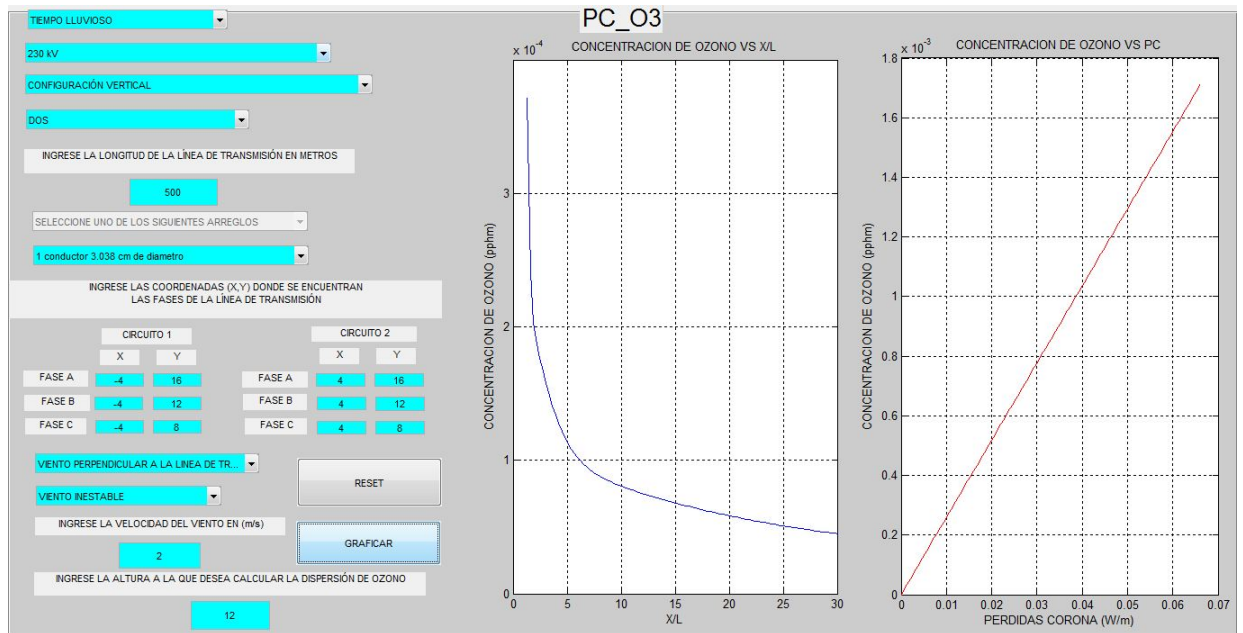
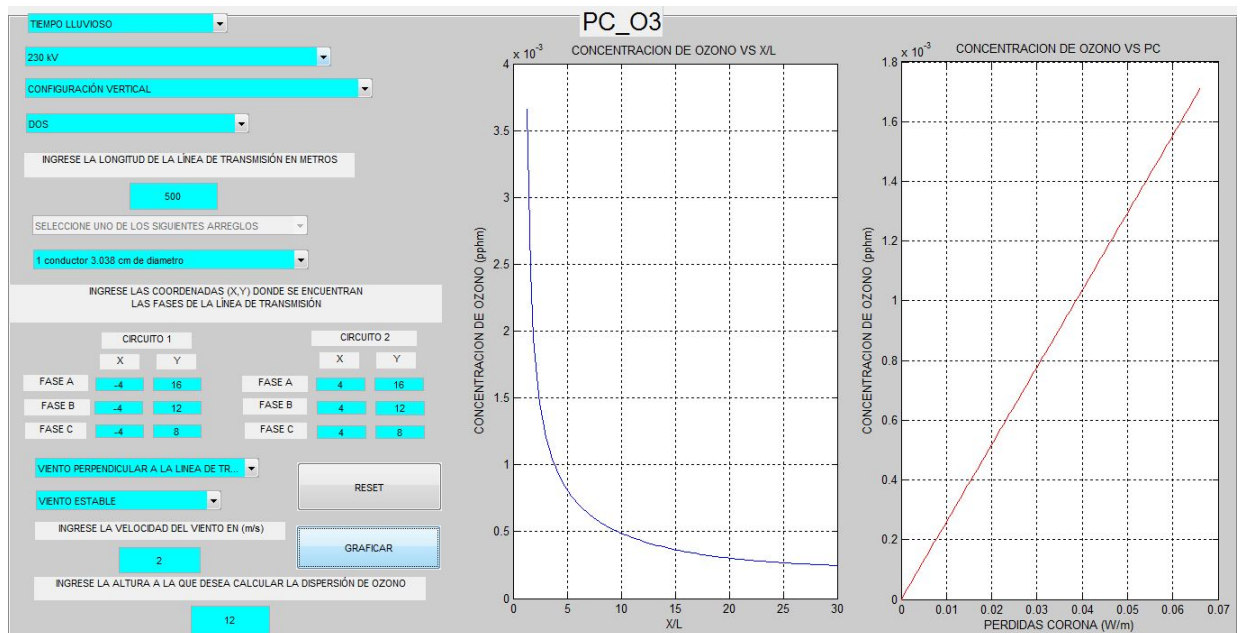


Figura 97: Concentración de ozono al nivel de línea para caso tres, bajo viento perpendicular e estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso



## RESULTADOS LÍNEA DE 230kV, CONF. VERTICAL DOBLE CIRCUITO CASO CUATRO

---

---

Para evaluar la configuración vertical doble circuito, se tomó el caso estipulado en la Tabla 20. Los valores obtenidos para los valores máximos de concentración de ozono y la distancia a la cual esta se presenta, se consignan en la Tabla 21.

Tabla 20: CASO CUATRO

CONFIGURACIÓN VERTICAL DOBLE CIRCUITO							
1 conductores x 3,038 cm de diámetro							
velocidad del viento= 8(m/s)							
CLIMA SECO				CLIMA LLUVIOSO			
nivel de tierra		nivel de línea		nivel de tierra		nivel de línea	
dirección del viento	tipo de viento	dirección del viento	tipo de viento	dirección del viento	tipo de viento	dirección del viento	tipo de viento
paralelo	inestable	paralelo	inestable	paralelo	inestable	paralelo	inestable
	estable		estable		estable		estable
perpendicular	inestable	perpendicular	inestable	perpendicular	inestable	perpendicular	inestable
	estable		estable		estable		estable

Tabla 21: Resumen de valores de concentración de ozono máximo par el caso cuatro

CASO CUATRO											
Clima Seco						Clima Lluvioso					
dirección del viento: PARALELO											
Nivel de tierra			Nivel de línea			Nivel de tierra			Nivel de línea		
Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/ $X_0$		Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/ $X_0$		Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/ $X_0$		Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/ $X_0$	
viento estable	$4,6 \cdot 10^{-8}$	5	$9,8 \cdot 10^{-6}$	1		$1,1 \cdot 10^{-5}$	5		$2,7 \cdot 10^{-3}$	1	
viento inestable	$6,1 \cdot 10^{-8}$	1,1	$0,95 \cdot 10^{-6}$	1		$1,5 \cdot 10^{-5}$	1,1		$2,5 \cdot 10^{-4}$	1	
dirección del viento: PERPENDICULAR											
Nivel de tierra			Nivel de línea			Nivel de tierra			Nivel de línea		
Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/L		Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/L		Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/L		Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/L	
viento estable	$1,9 \cdot 10^{-8}$	450	$2,25 \cdot 10^{-6}$	1		$4,6 \cdot 10^{-6}$	450		$5 \cdot 10^{-4}$	1	
viento inestable	$1,9 \cdot 10^{-8}$	18	$3,85 \cdot 10^{-7}$	1		$4,6 \cdot 10^{-6}$	18		$8,8 \cdot 10^{-5}$	1	

Figura 98: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso cuatro, bajo viento paralelo e inestable, originada por pérdida corona en clima seco

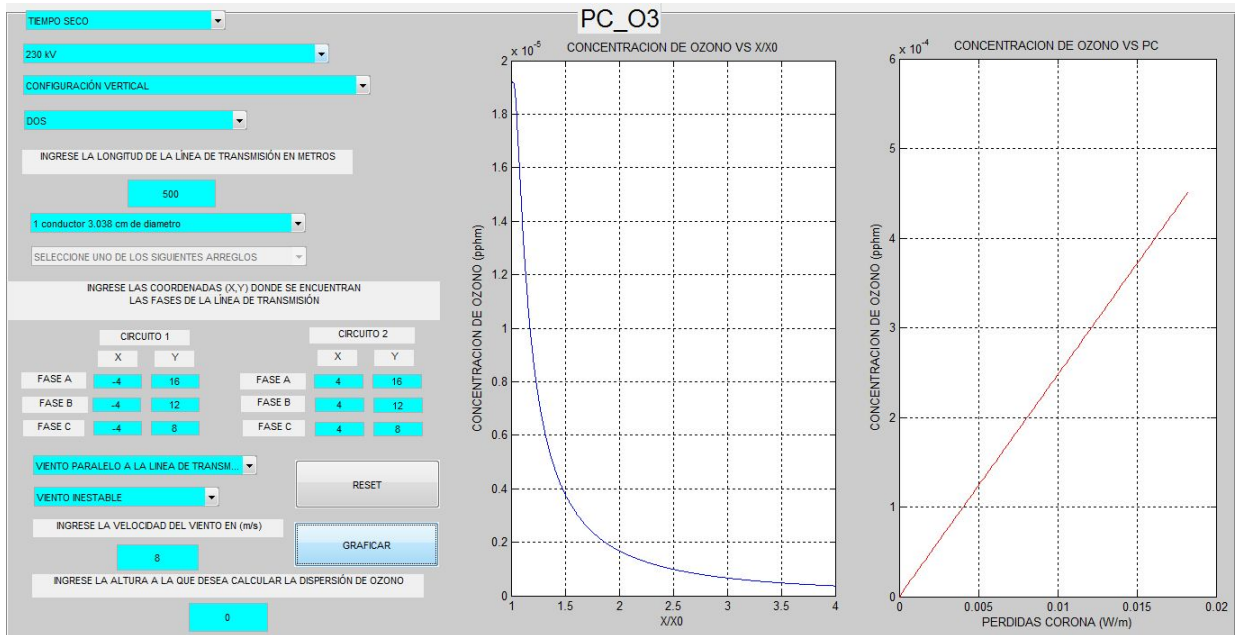


Figura 99: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso cuatro, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima seco

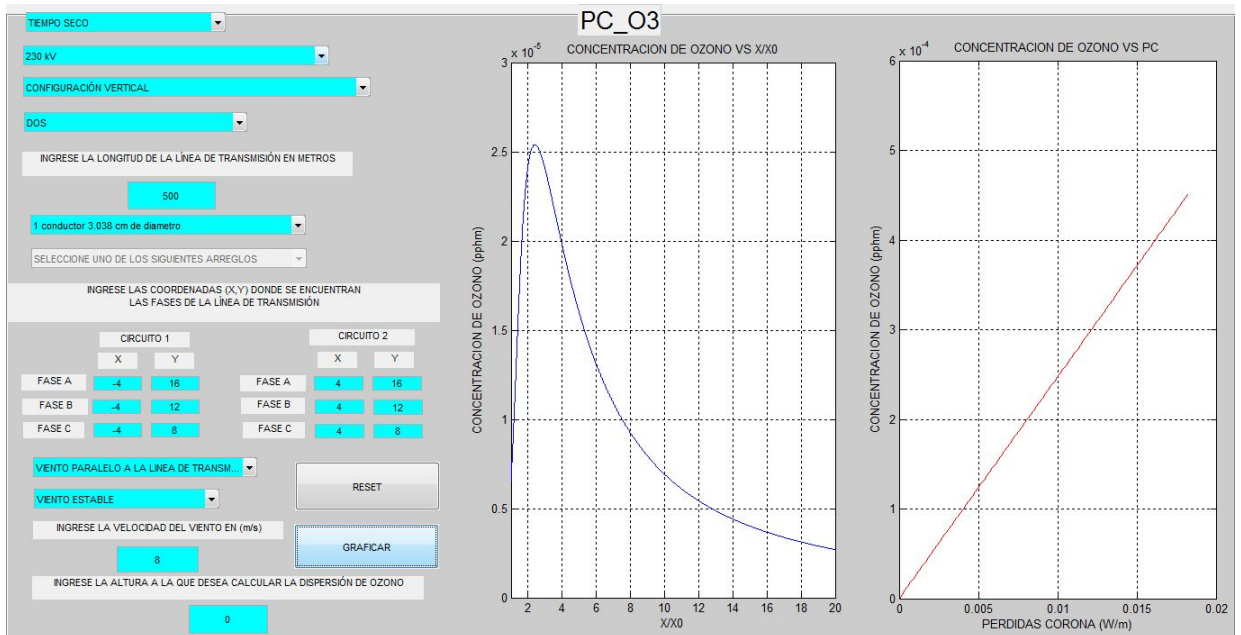


Figura 100: Concentración de ozono al nivel de línea para caso cuatro, bajo viento paralelo e inestable, originada por pérdida corona en clima seco

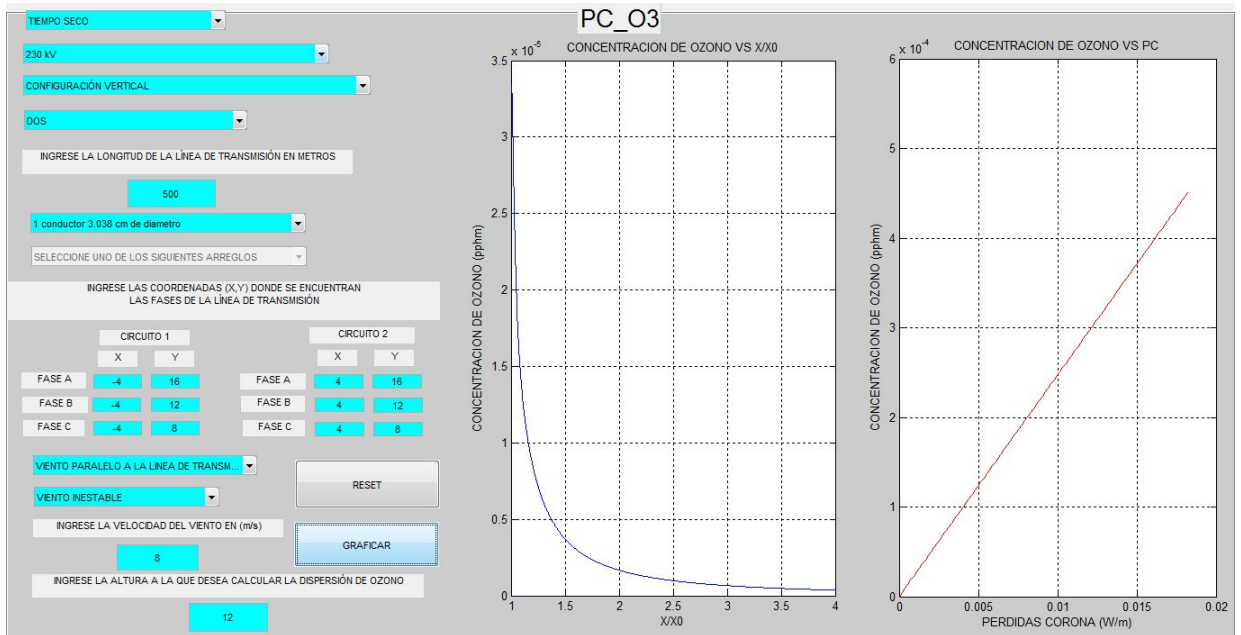


Figura 101: Concentración de ozono al nivel de línea para caso cuatro, bajo viento paralelo e estable, originada por pérdida corona en clima seco

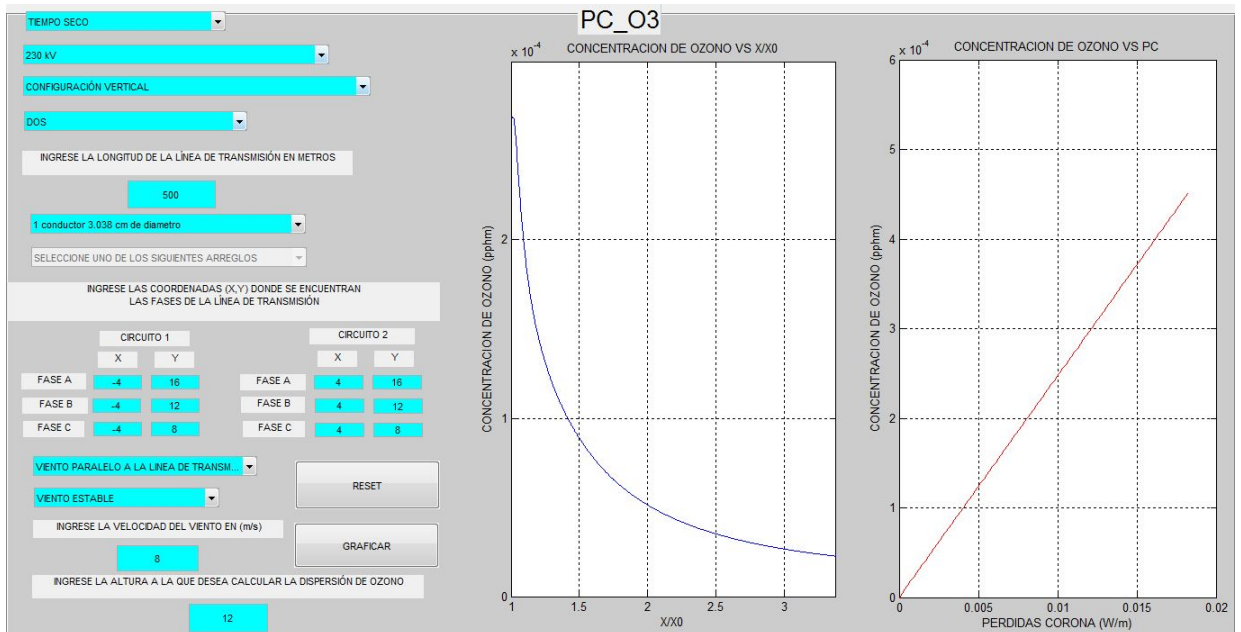


Figura 102: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso cuatro, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima seco

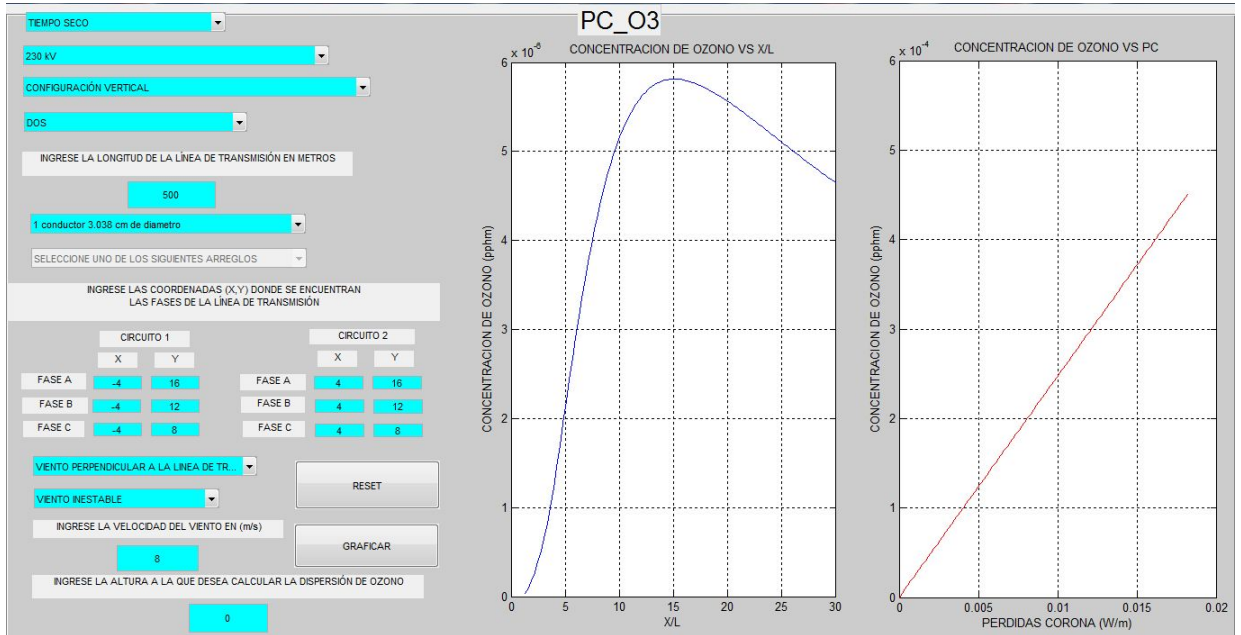


Figura 103: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso cuatro, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima seco

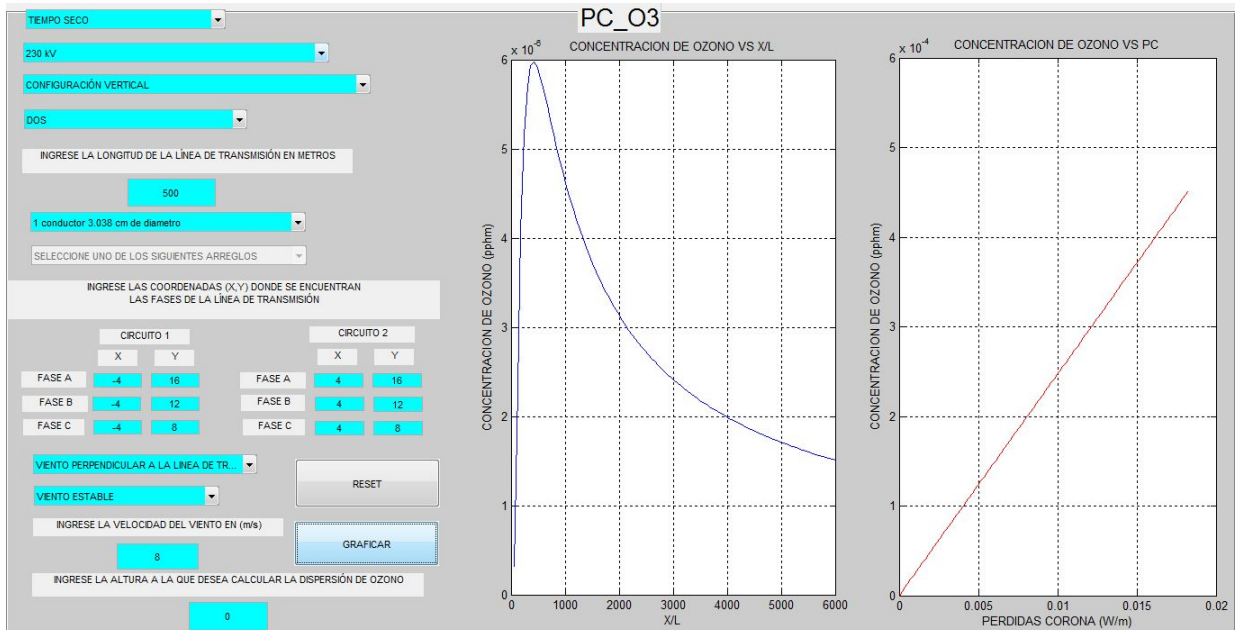


Figura 104: Concentración de ozono al nivel de línea para caso cuatro, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima seco

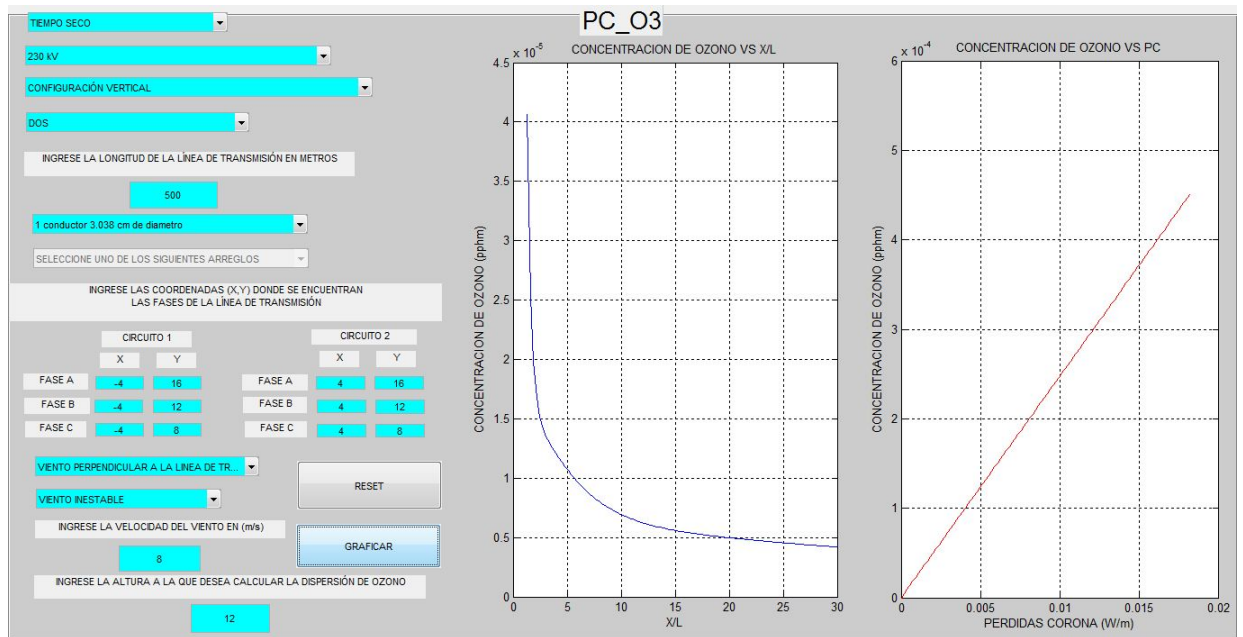


Figura 105: Concentración de ozono al nivel de línea para caso cuatro, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima seco

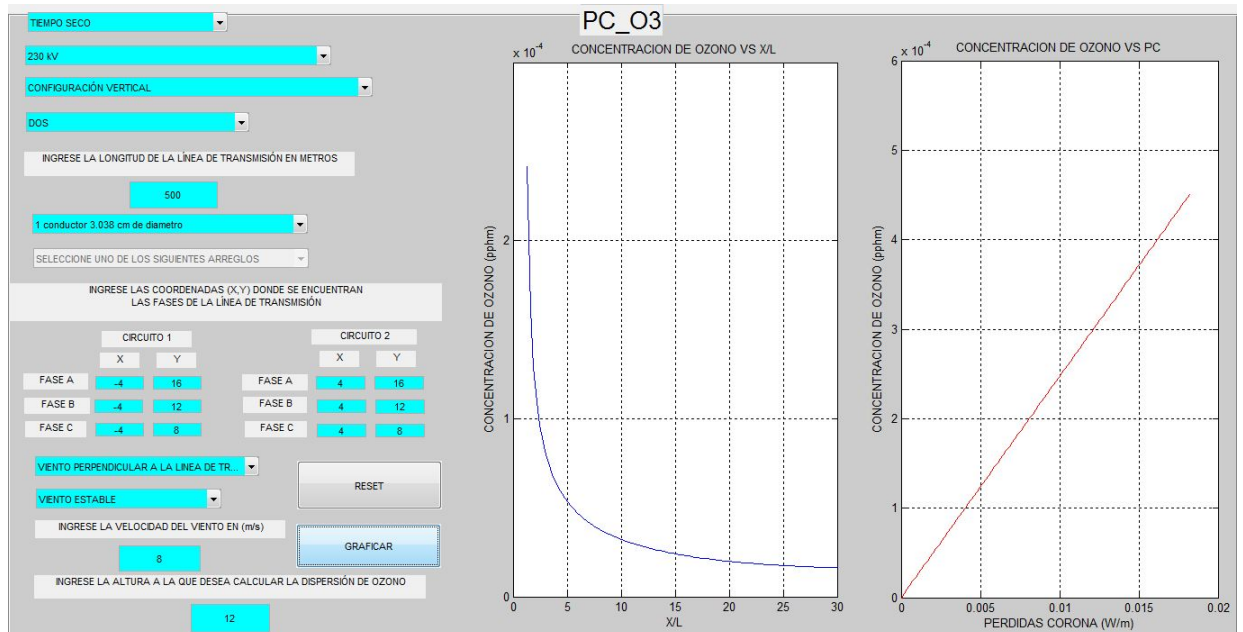


Figura 106: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso cuatro, bajo viento paralelo e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

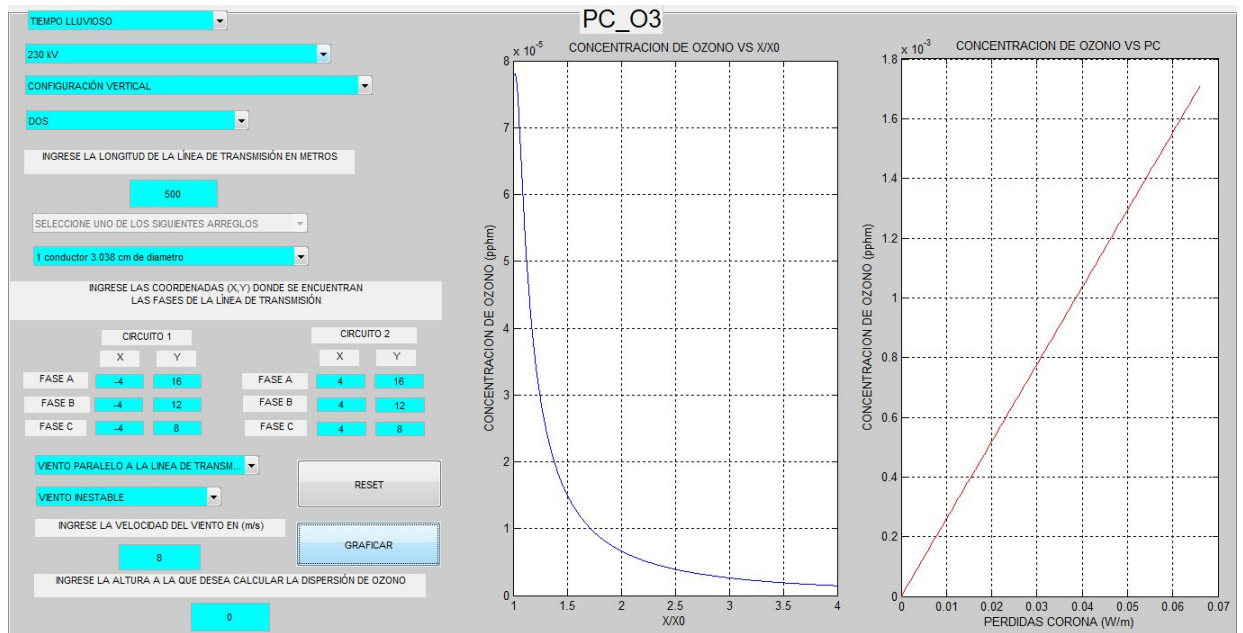


Figura 107: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso cuatro, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

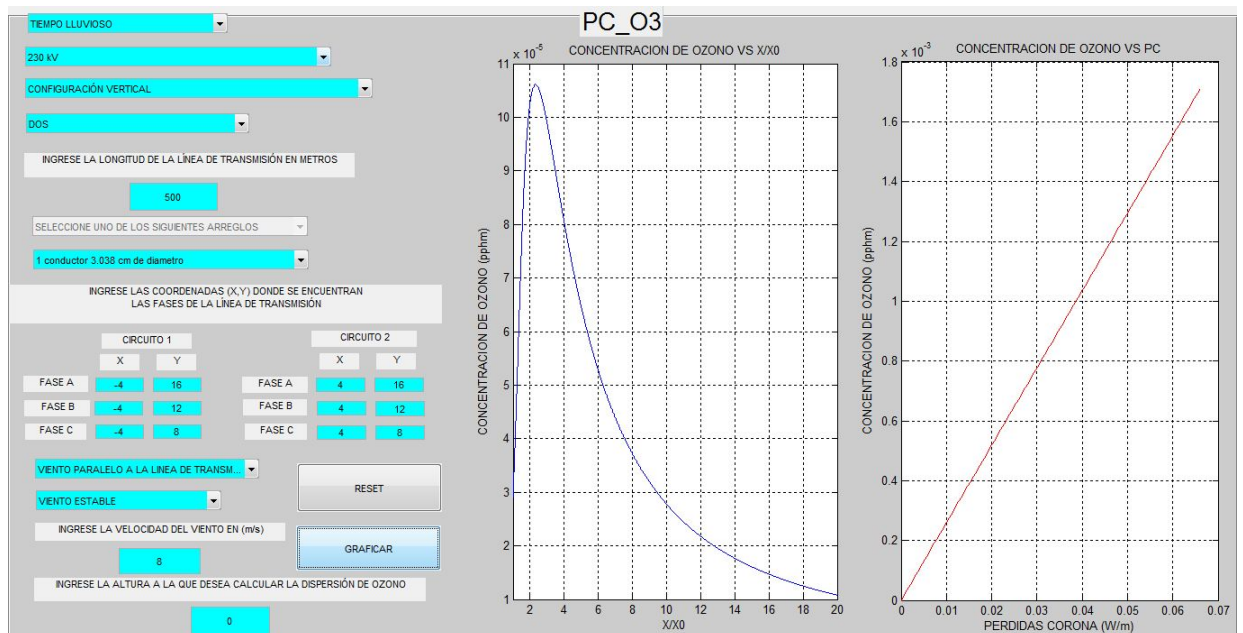


Figura 108: Concentración de ozono al nivel de línea para caso cuatro, bajo viento paralelo e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

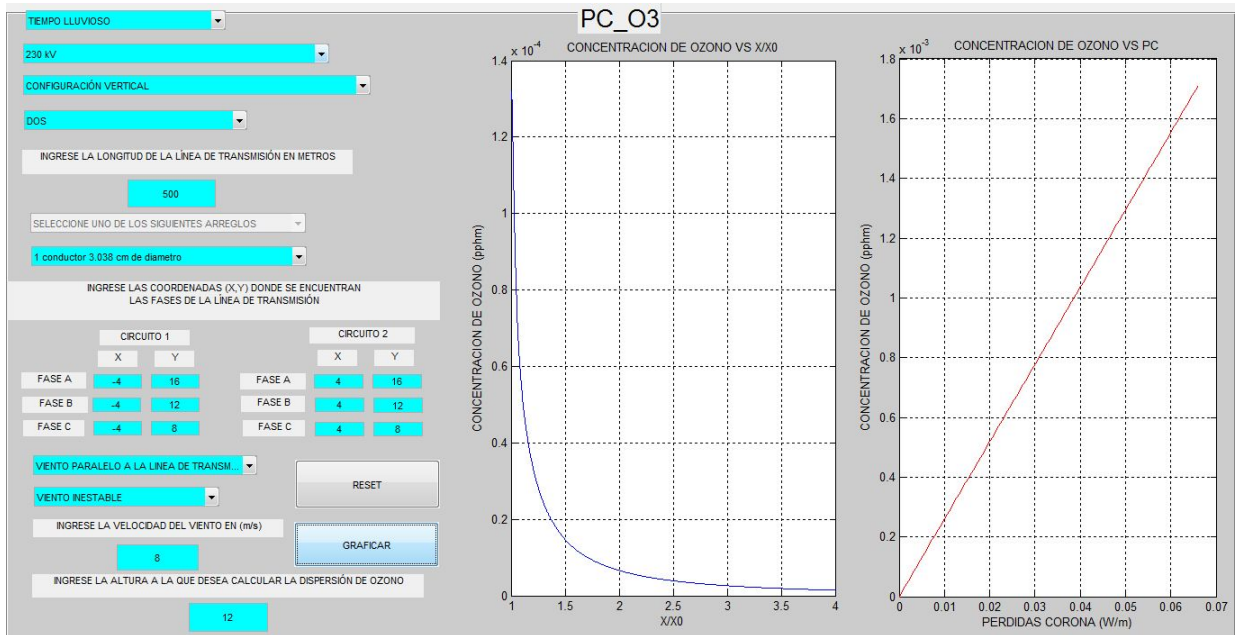


Figura 109: Concentración de ozono al nivel de línea para caso cuatro, bajo viento paralelo e estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

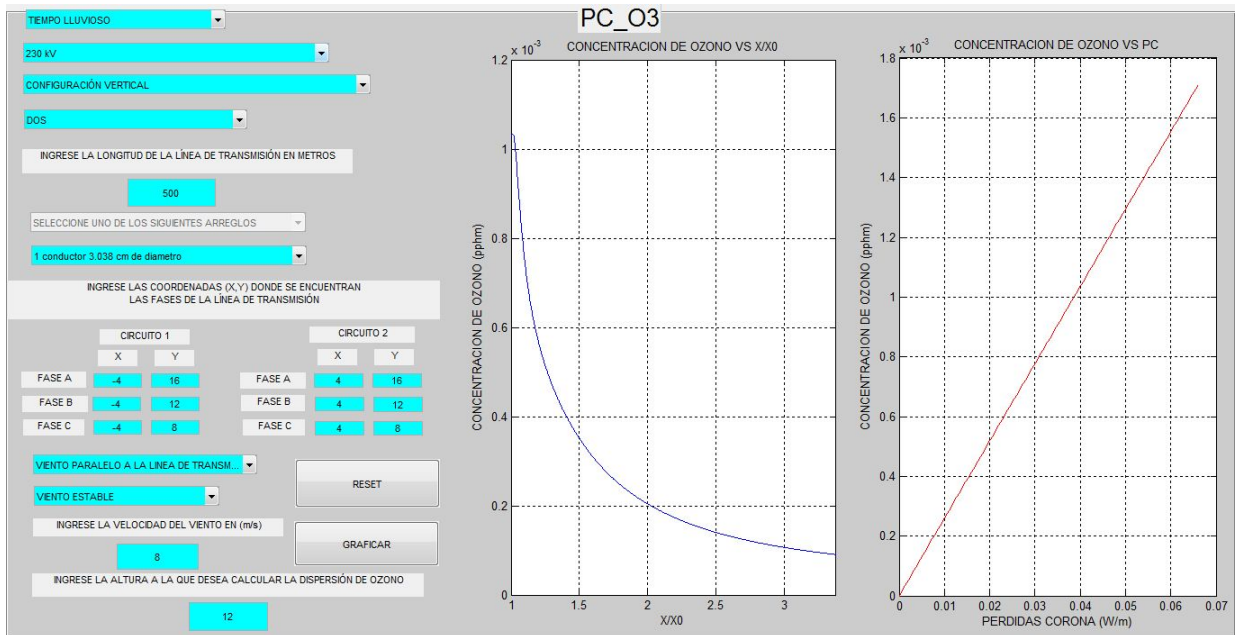


Figura 110: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso cuatro, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

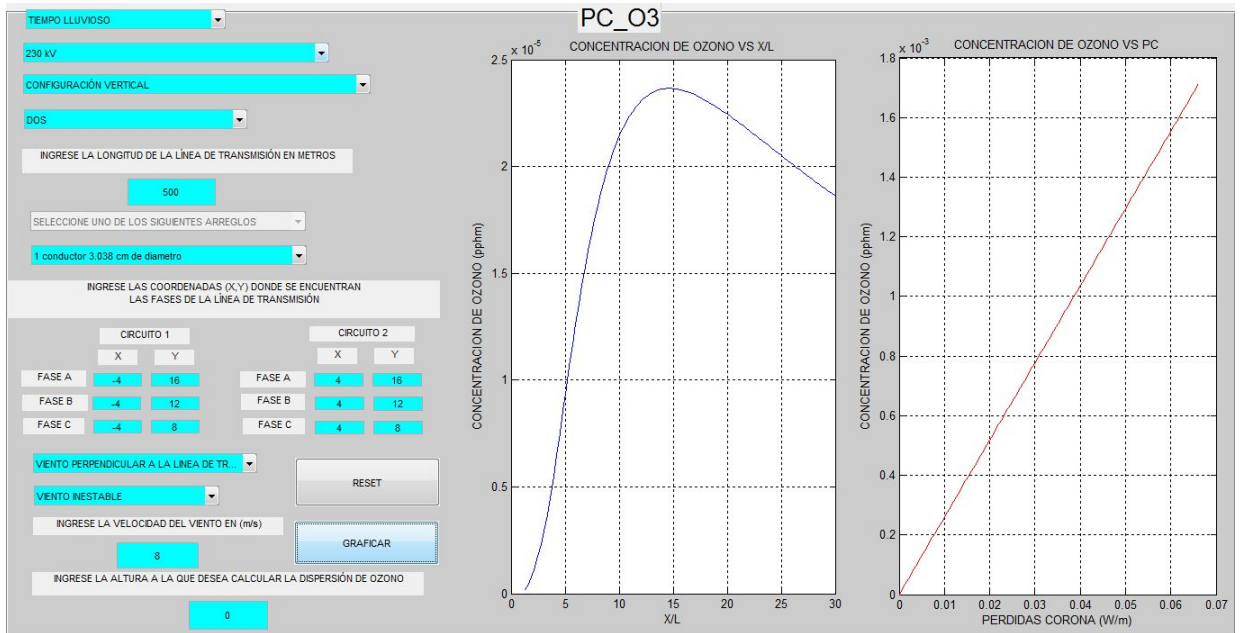


Figura 111: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso cuatro, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

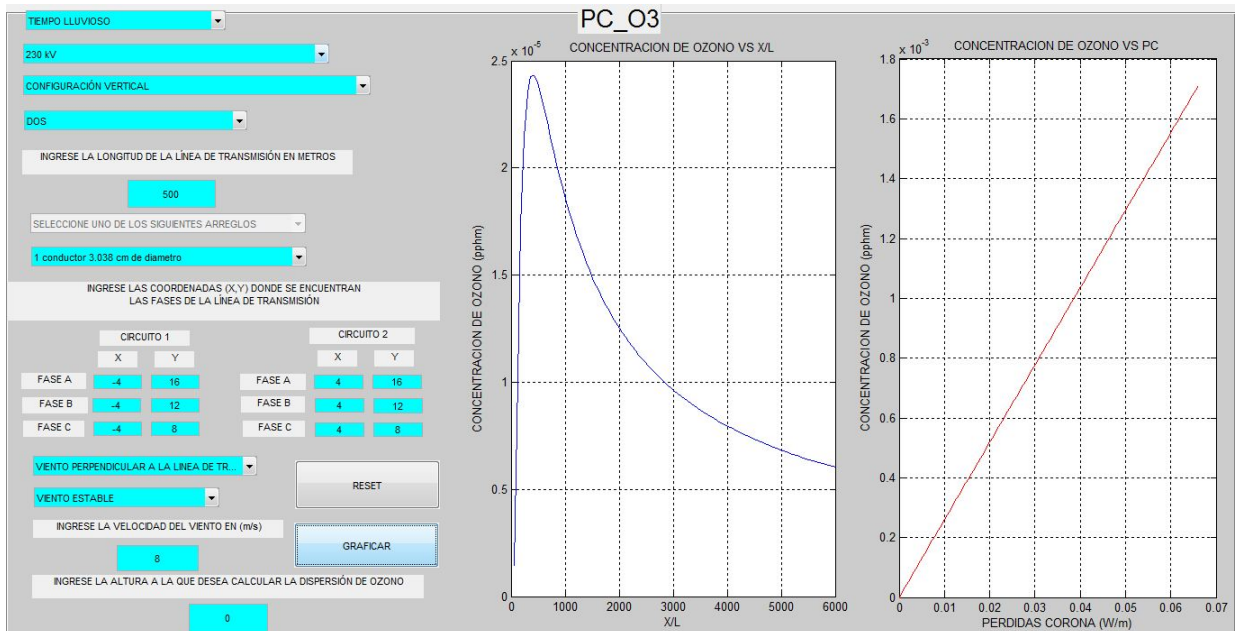


Figura 112: Concentración de ozono al nivel de línea para caso cuatro, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

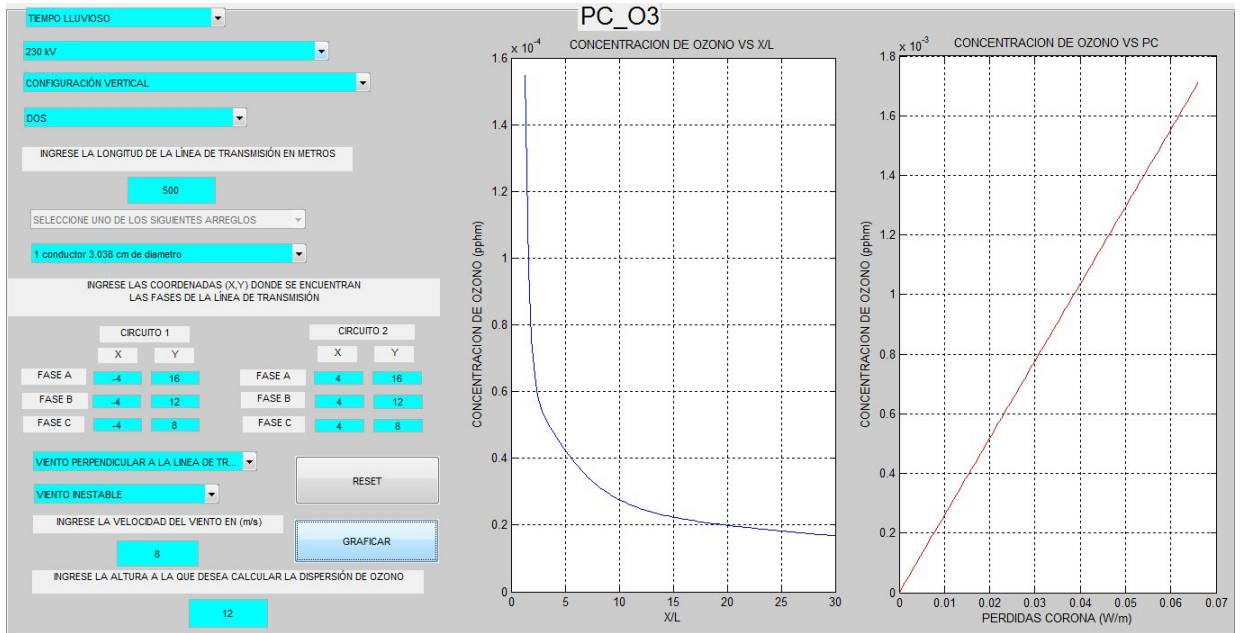
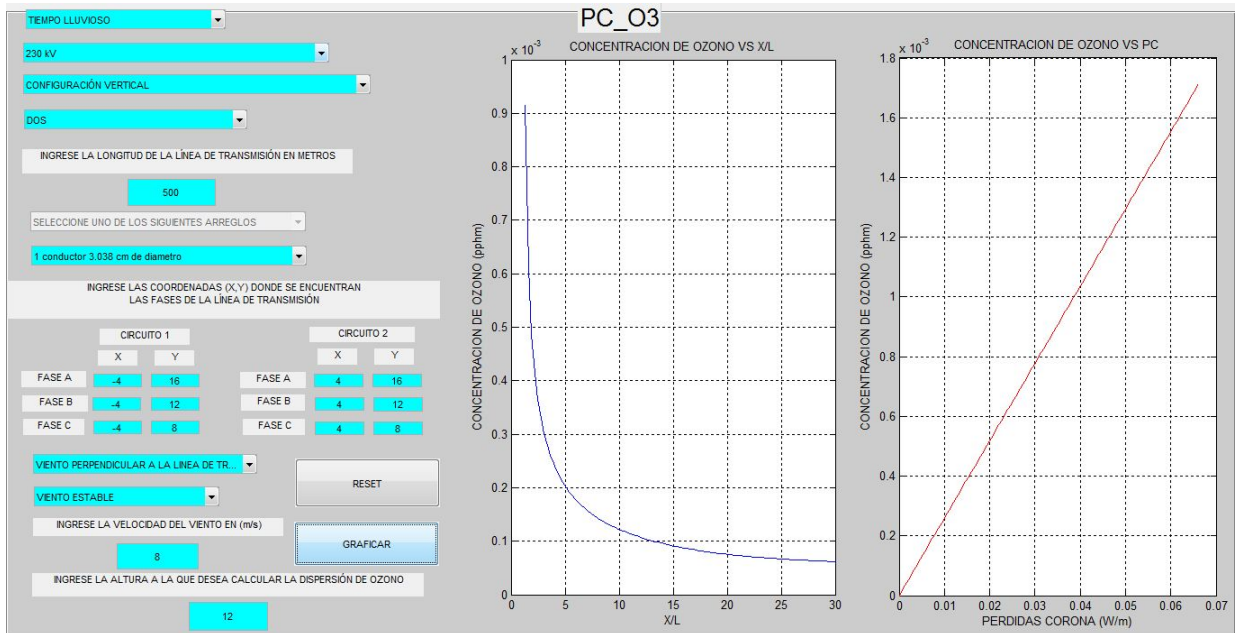


Figura 113: Concentración de ozono al nivel de línea para caso cuatro, bajo viento perpendicular e estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso



---

# F

## RESULTADOS LÍNEA DE 220kV, CONFIGURACIÓN DELTA CASO CINCO

---

---

Para evaluar la configuración vertical doble circuito, se tomó el caso estipulado en la Tabla [22](#). Los valores obtenidos para los valores máximos de concentración de ozono y la distancia a la cual esta se presenta, se consignan en la Tabla [23](#).

Tabla 22: CASO CINCO

CONFIGURACIÓN DELTA							
1 conductores x 1,626 cm de diámetro							
velocidad del viento= 2(m/s)							
CLIMA SECO				CLIMA LLUVIOSO			
nivel de tierra		nivel de línea		nivel de tierra		nivel de línea	
dirección del viento	tipo de viento	dirección del viento	tipo de viento	dirección del viento	tipo de viento	dirección del viento	tipo de viento
paralelo	inestable	paralelo	inestable	paralelo	inestable	paralelo	inestable
	estable		estable		estable		estable
perpendicular	inestable	perpendicular	inestable	perpendicular	inestable	perpendicular	inestable
	estable		estable		estable		estable

Tabla 23: Resumen de valores de concentración de ozono máximo par el caso cinco

CASO CINCO											
Clima Seco						Clima Lluvioso					
dirección del viento: PARALELO											
Nivel de tierra			Nivel de línea			Nivel de tierra			Nivel de línea		
Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/ $X_0$		Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/ $X_0$		Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/ $X_0$		Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/ $X_0$	
viento estable	$5,8 \cdot 10^{-5}$	4,5	$2 \cdot 10^{-3}$	1		$1 \cdot 10^{-3}$	4		0,027	1	
viento inestable	$4,25 \cdot 10^{-5}$	1	$1,1 \cdot 10^{-4}$	1		$6,8 \cdot 10^{-4}$	1		$1,8 \cdot 10^{-3}$	1	
dirección del viento: PERPENDICULAR											
Nivel de tierra			Nivel de línea			Nivel de tierra			Nivel de línea		
Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/L		Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/L		Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/L		Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/L	
viento estable	$2,25 \cdot 10^{-5}$	600	$2 \cdot 10^{-3}$	1		$3,5 \cdot 10^{-4}$	750		0,03	1	
viento inestable	$2,25 \cdot 10^{-5}$	12,5	$1,9 \cdot 10^{-4}$	1		$3,5 \cdot 10^{-5}$	12,5		$3 \cdot 10^{-3}$	1	

Figura 114: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso cinco, bajo viento paralelo e inestable, originada por pérdida corona en clima seco

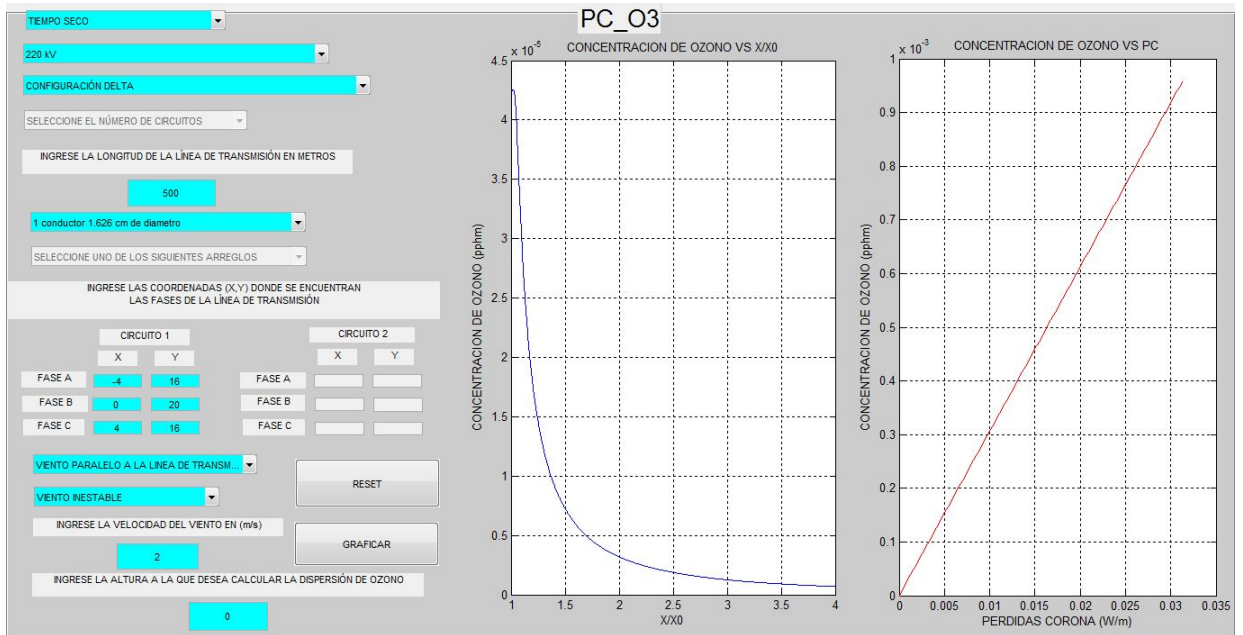


Figura 115: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso cinco, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima seco

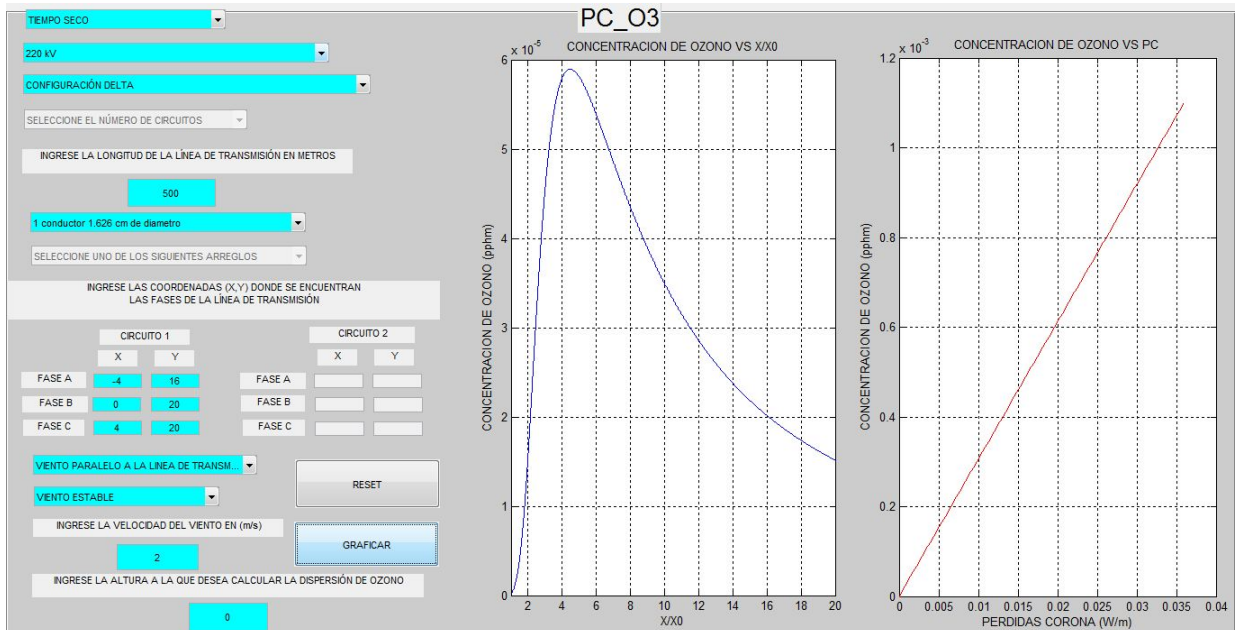


Figura 116: Concentración de ozono al nivel de línea para caso cinco, bajo viento paralelo y inestable, originada por pérdida corona en clima seco

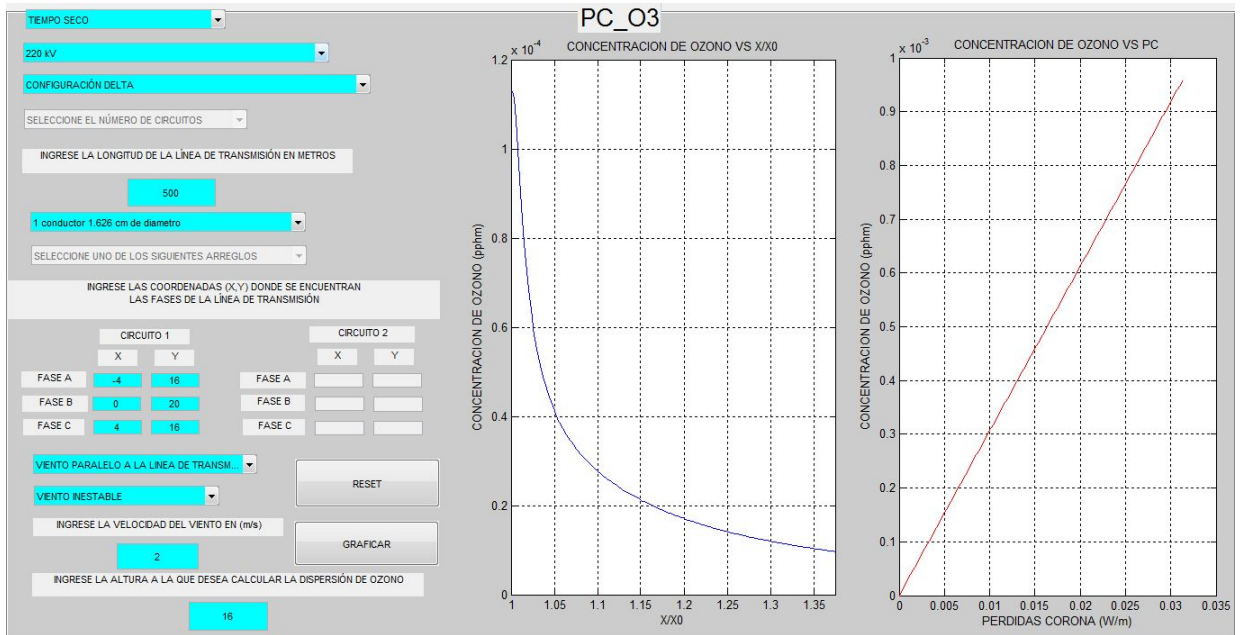


Figura 117: Concentración de ozono al nivel de línea para caso cinco, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima seco

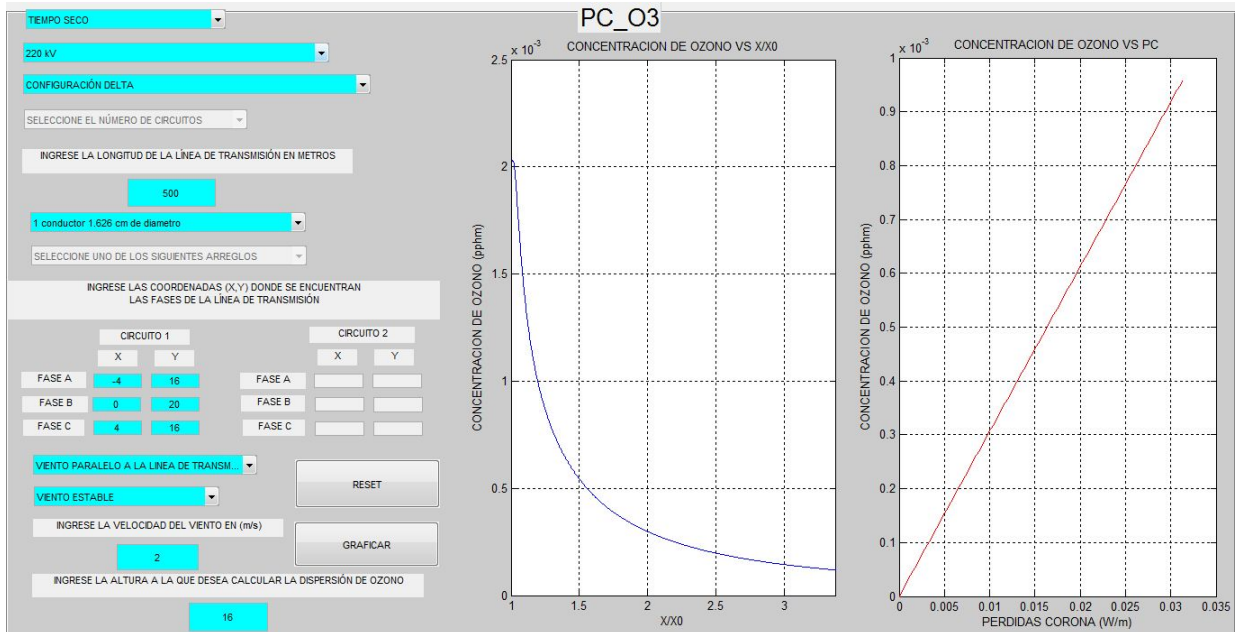


Figura 118: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso cinco, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima seco

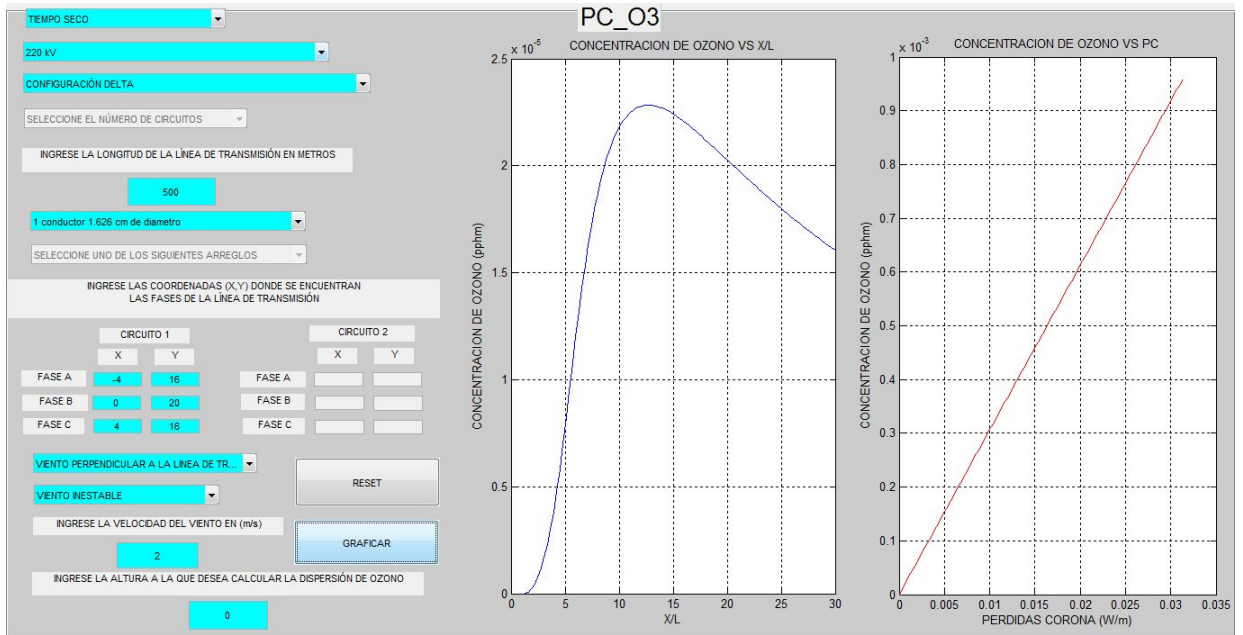


Figura 119: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso cinco, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima seco

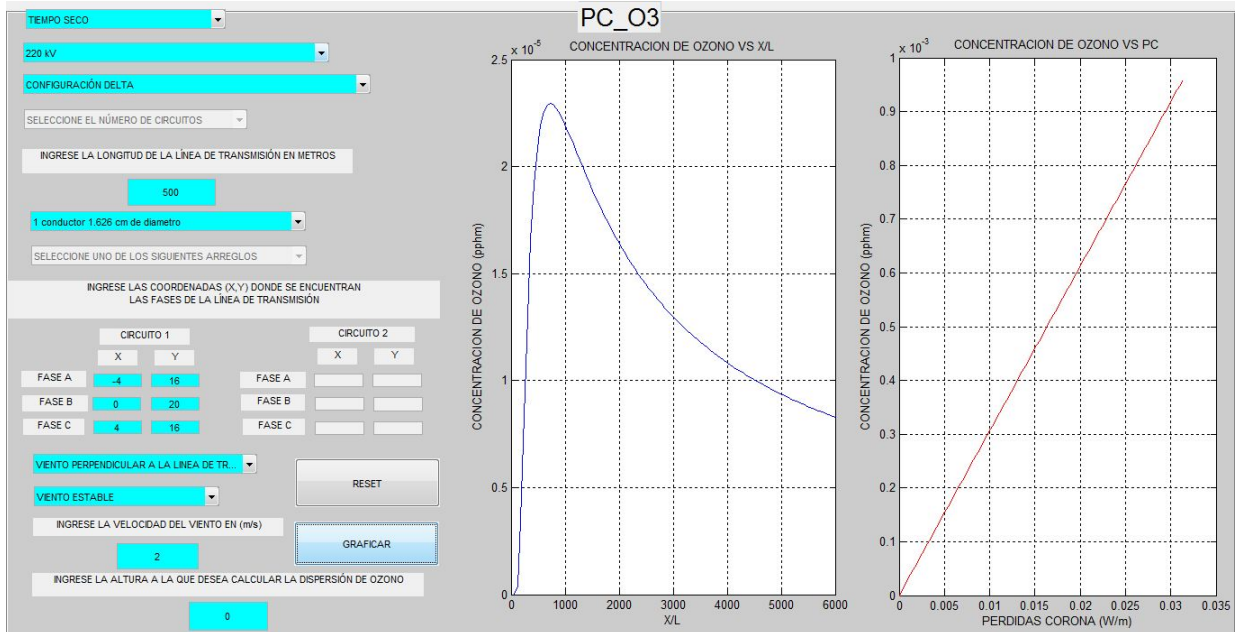


Figura 120: Concentración de ozono al nivel de línea para caso cinco, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima seco

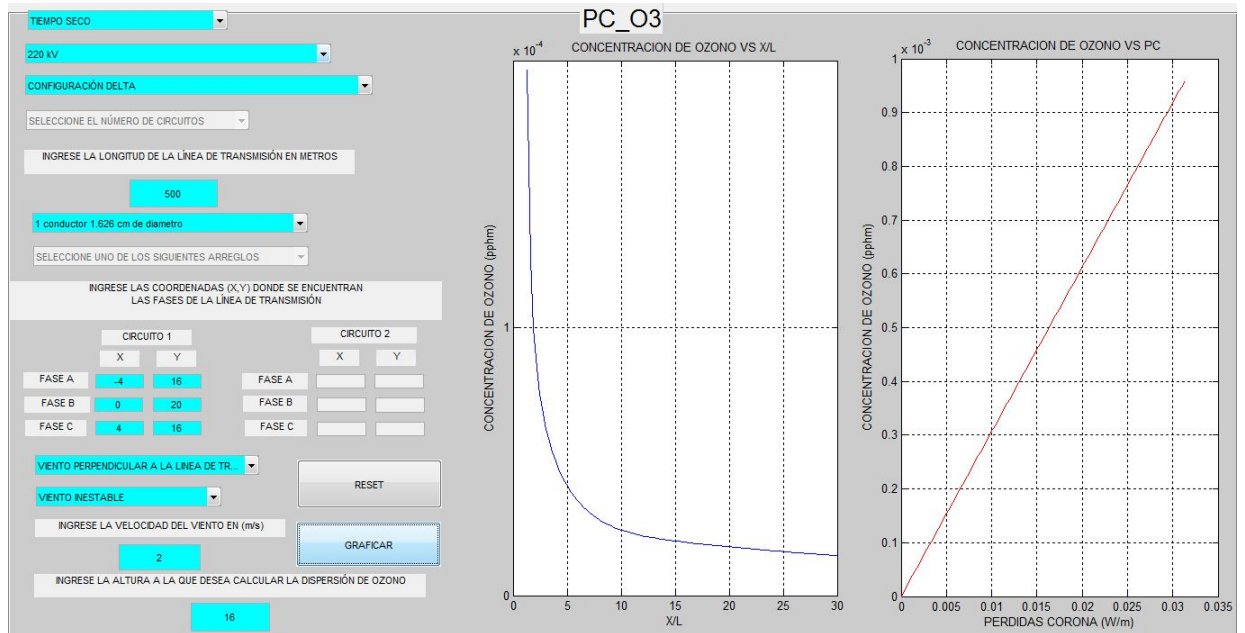


Figura 121: Concentración de ozono al nivel de línea para caso cinco, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima seco

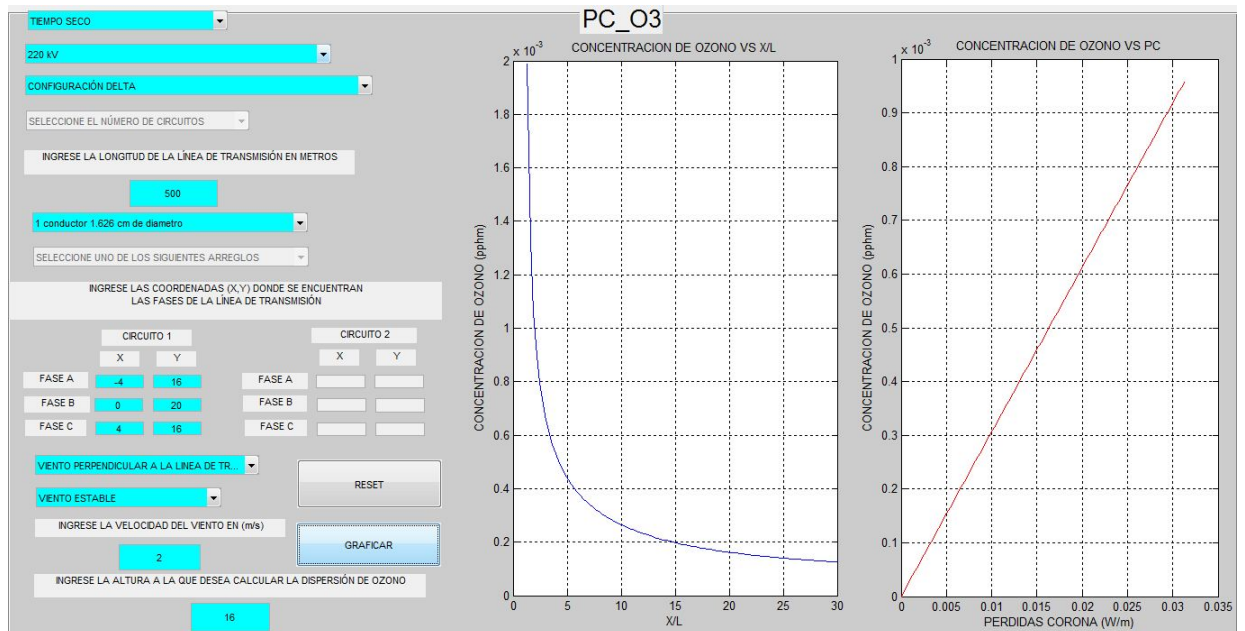


Figura 122: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso cinco, bajo viento paralelo e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

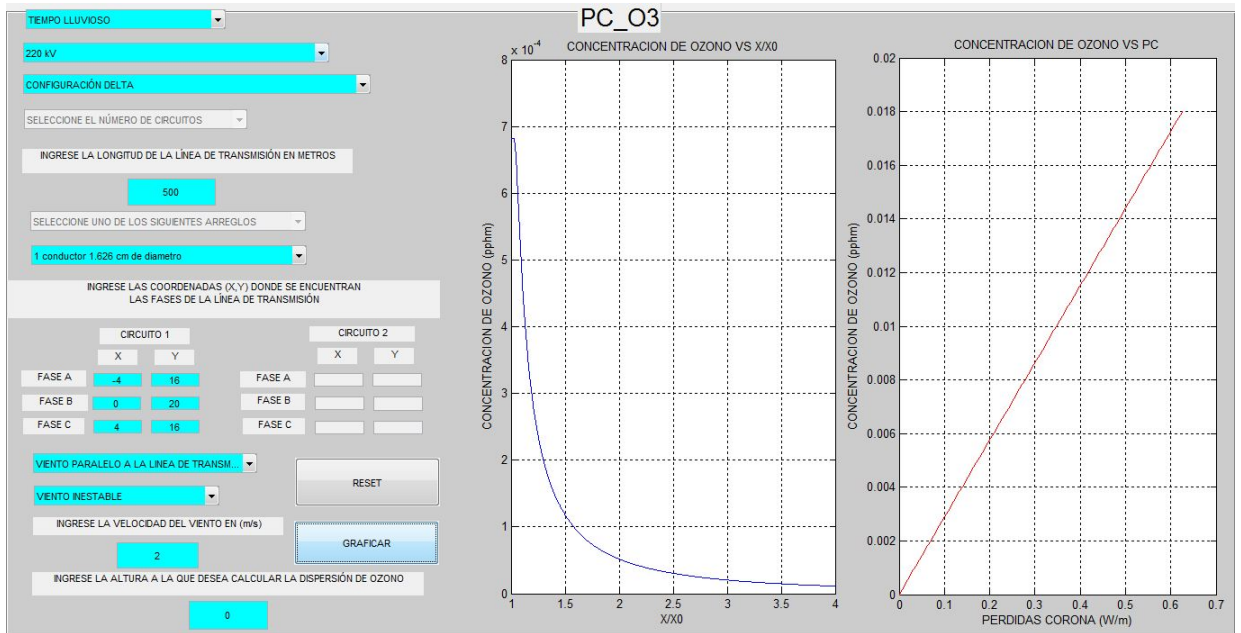


Figura 123: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso cinco, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

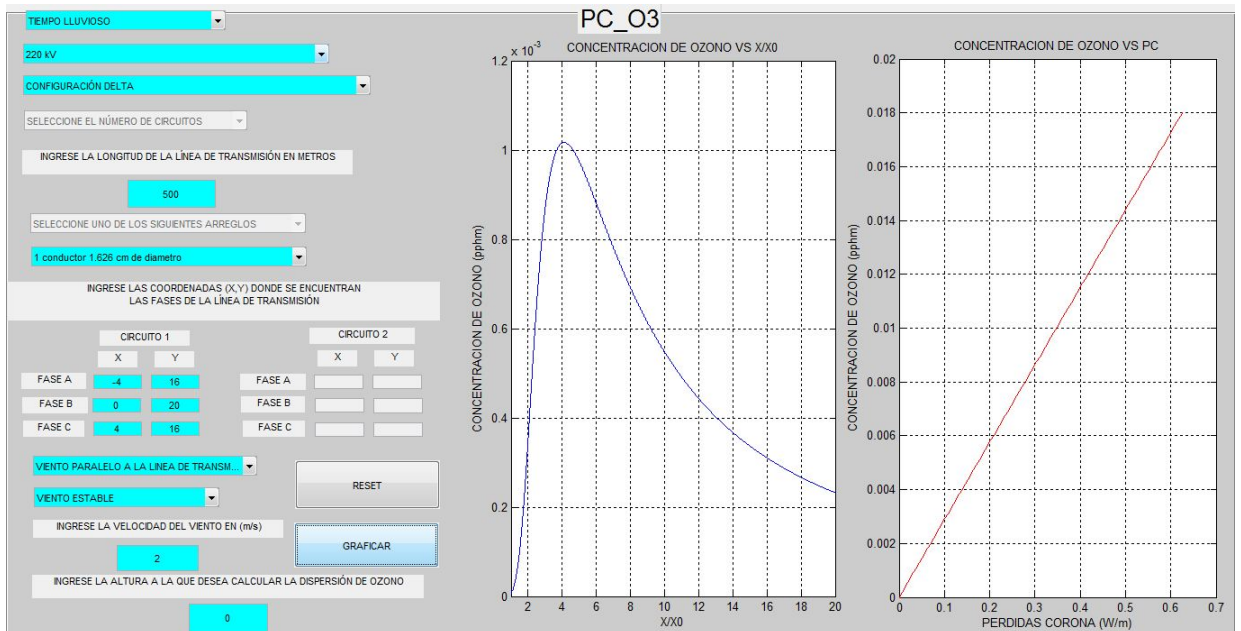


Figura 124: Concentración de ozono al nivel de línea para caso cinco, bajo viento paralelo y inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

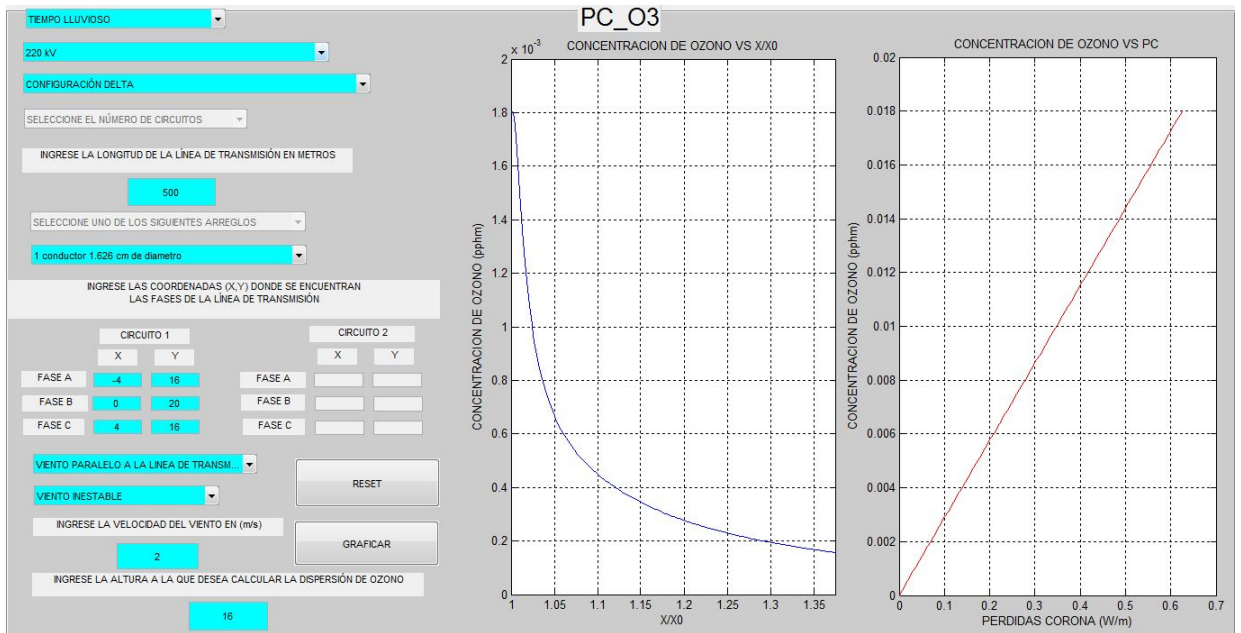


Figura 125: Concentración de ozono al nivel de línea para caso cinco, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

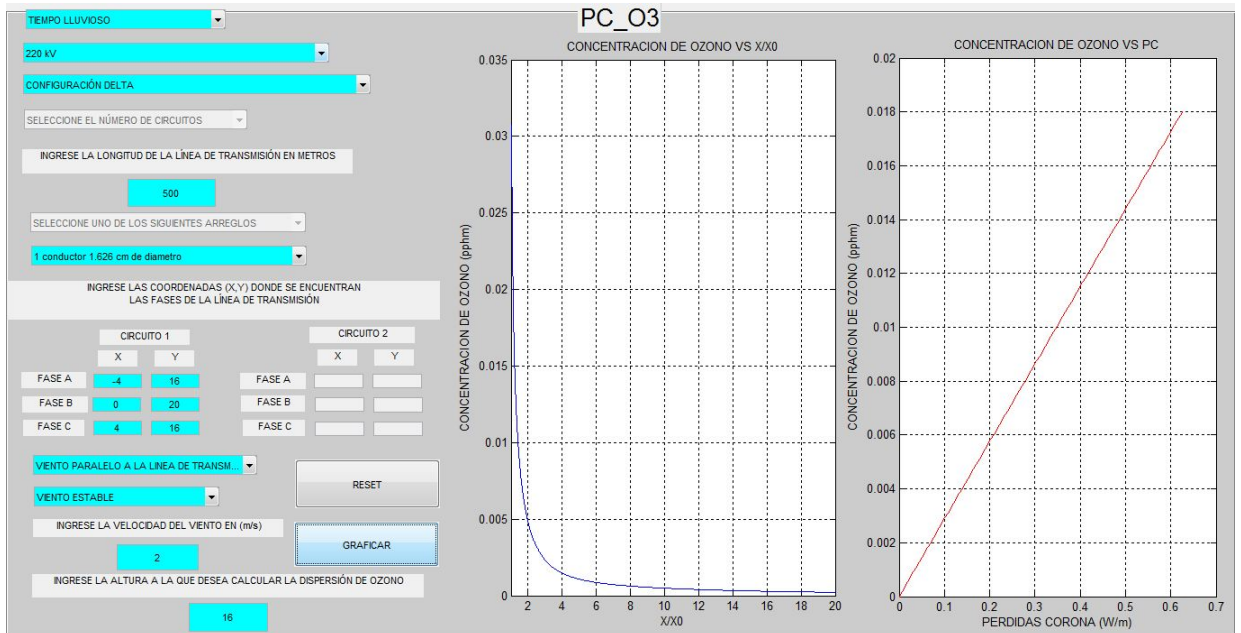


Figura 126: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso cinco, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

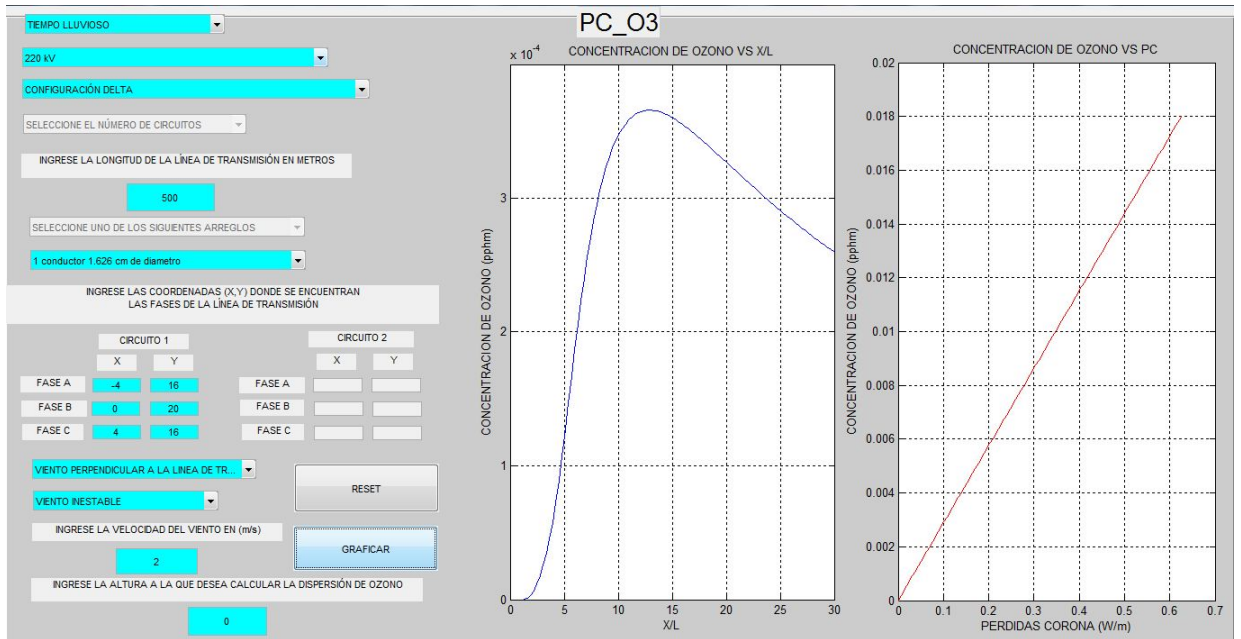


Figura 127: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso cinco, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

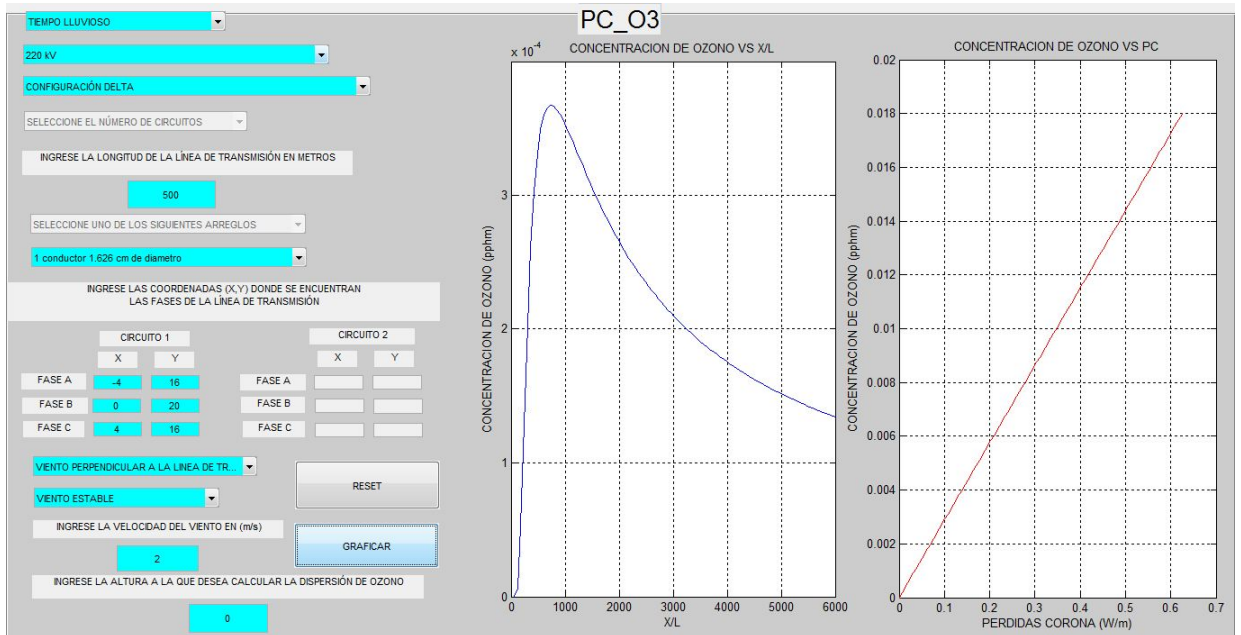


Figura 128: Concentración de ozono al nivel de línea para caso cinco, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

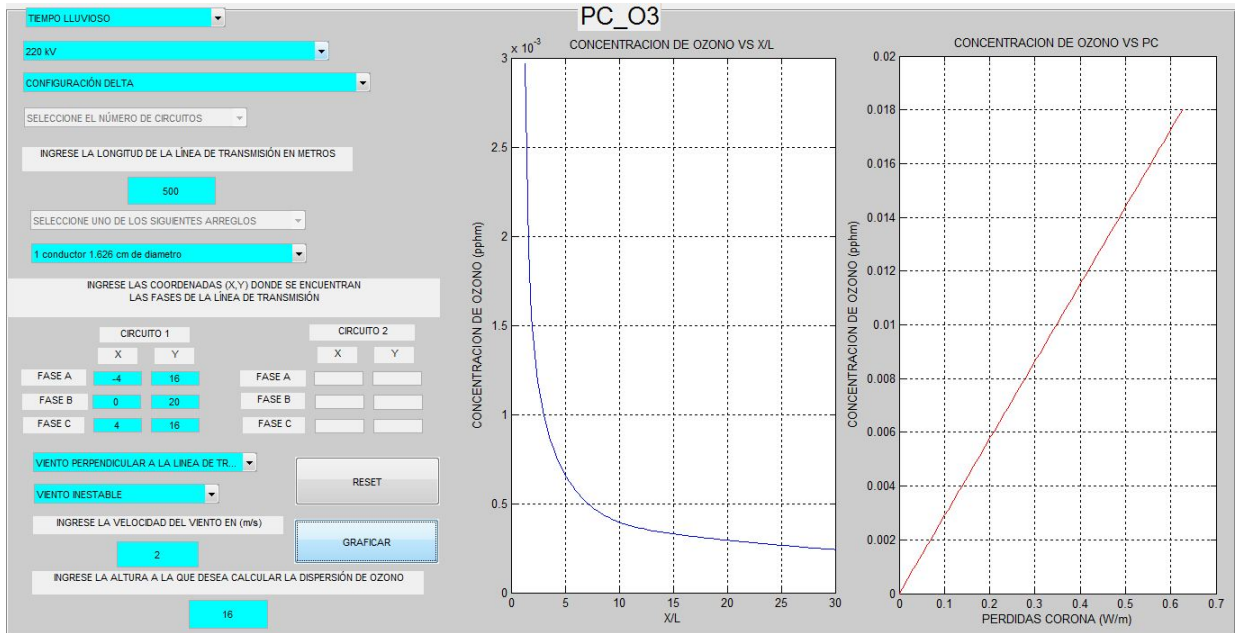
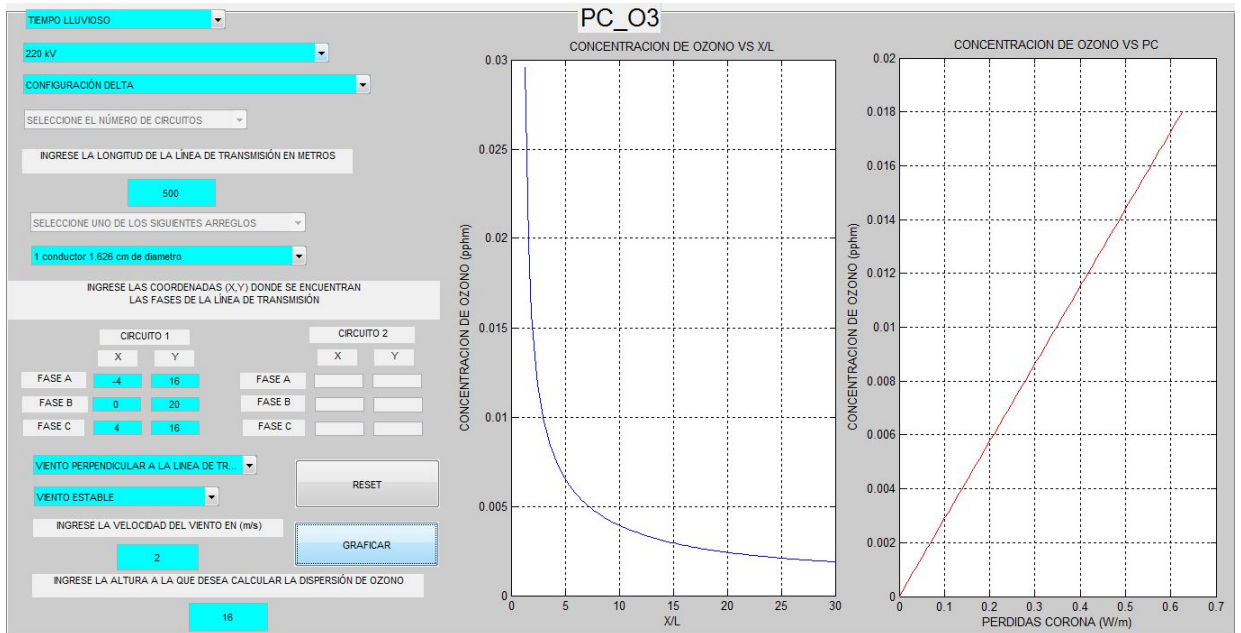


Figura 129: Concentración de ozono al nivel de línea para caso cinco, bajo viento perpendicular e estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso



---

# G

## RESULTADOS LÍNEA DE 220kV, CONFIGURACIÓN DELTA CASO SEIS

---

Para evaluar la configuración vertical doble circuito, se tomó el caso estipulado en la Tabla [24](#). Los valores obtenidos para los valores máximos de concentración de ozono y la distancia a la cual esta se presenta, se consignan en la Tabla [25](#).

Tabla 24: CASO SEIS

CONFIGURACIÓN DELTA							
1 conductores x 1,626 cm de diámetro							
velocidad del viento= 8(m/s)							
CLIMA SECO				CLIMA LLUVIOSO			
nivel de tierra		nivel de línea		nivel de tierra		nivel de línea	
dirección del viento	tipo de viento	dirección del viento	tipo de viento	dirección del viento	tipo de viento	dirección del viento	tipo de viento
paralelo	inestable	paralelo	inestable	paralelo	inestable	paralelo	inestable
	estable		estable		estable		estable
perpendicular	inestable	perpendicular	inestable	perpendicular	inestable	perpendicular	inestable
	estable		estable		estable		estable

Tabla 25: Resumen de valores de concentración de ozono máximo par el caso seis

CASO SEIS											
Clima Seco						Clima Lluvioso					
dirección del viento: PARALELO											
Nivel de tierra			Nivel de línea			Nivel de tierra			Nivel de línea		
Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/ $X_0$		Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/ $X_0$		Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/ $X_0$		Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/ $X_0$	
viento estable	$1,7 \cdot 10^{-5}$	4	$5 \cdot 10^{-4}$	1		$2,5 \cdot 10^{-4}$	4		$7,6 \cdot 10^{-3}$	1	
viento inestable	$1,9 \cdot 10^{-5}$	1	$5,5 \cdot 10^{-5}$	1		$3 \cdot 10^{-4}$	1		$0,85 \cdot 10^{-3}$	1	
dirección del viento: PERPENDICULAR											
Nivel de tierra			Nivel de línea			Nivel de tierra			Nivel de línea		
Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/L		Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/L		Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/L		Concentración máx. $O_3$ [pphm]	distancia X/L	
viento estable	$5,6 \cdot 10^{-6}$	750	$3,6 \cdot 10^{-4}$	1		$0,9 \cdot 10^{-4}$	750		$5,5 \cdot 10^{-3}$	1	
viento inestable	$5,6 \cdot 10^{-6}$	25	$5,8 \cdot 10^{-5}$	1		$0,9 \cdot 10^{-4}$	25		$0,85 \cdot 10^{-3}$	1	

Figura 130: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso seis, bajo viento paralelo e inestable, originada por pérdida corona en clima seco

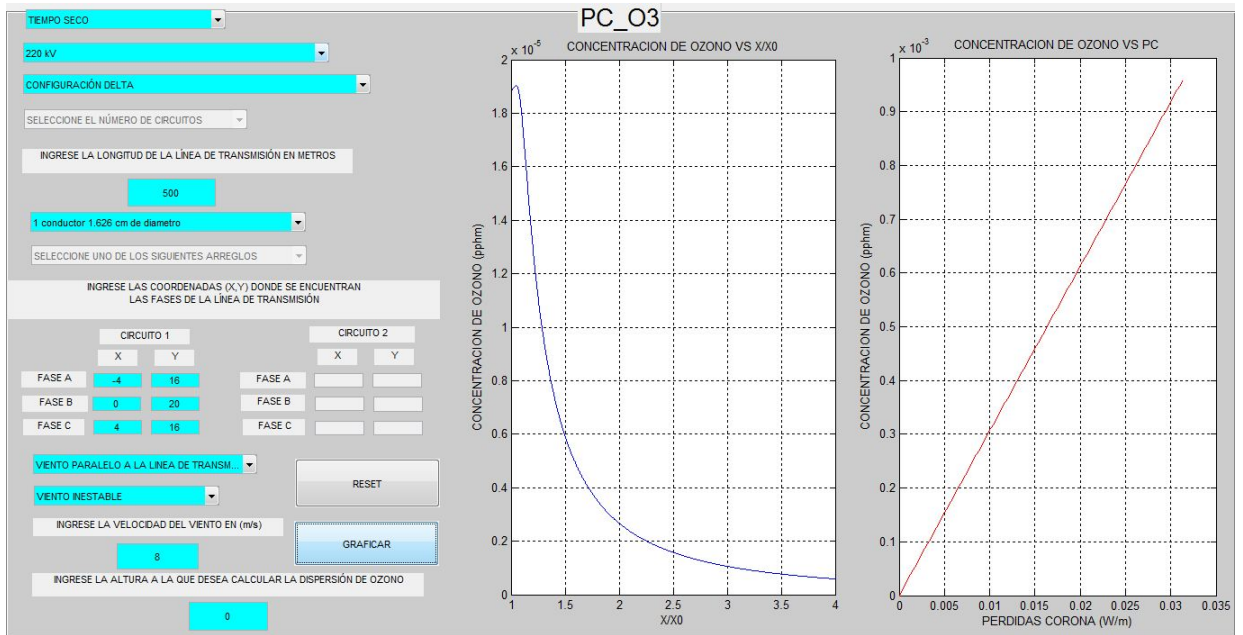


Figura 131: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso seis, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima seco

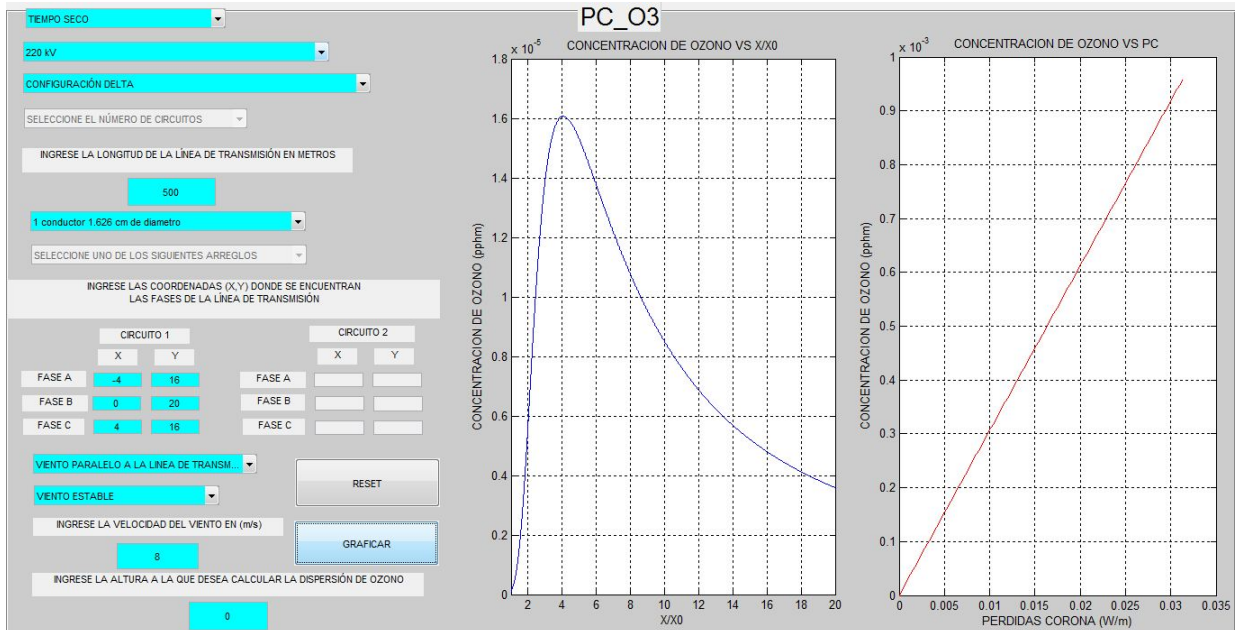


Figura 132: Concentración de ozono al nivel de línea para caso seis, bajo viento paralelo y inestable, originada por pérdida corona en clima seco

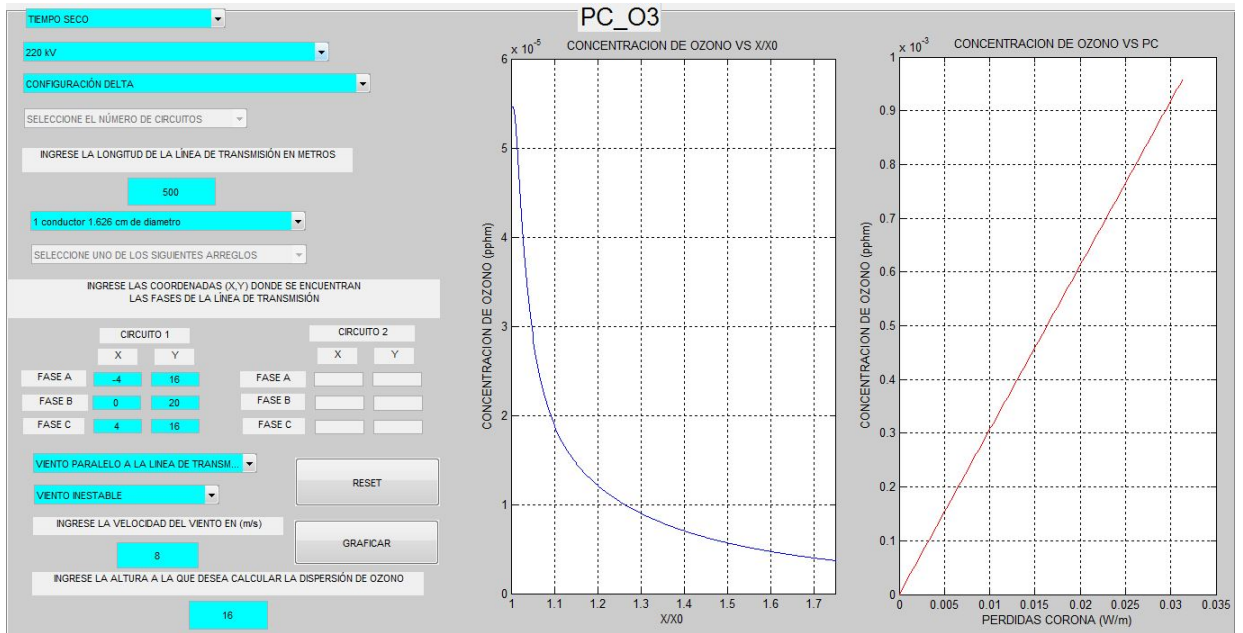


Figura 133: Concentración de ozono al nivel de línea para caso seis, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima seco

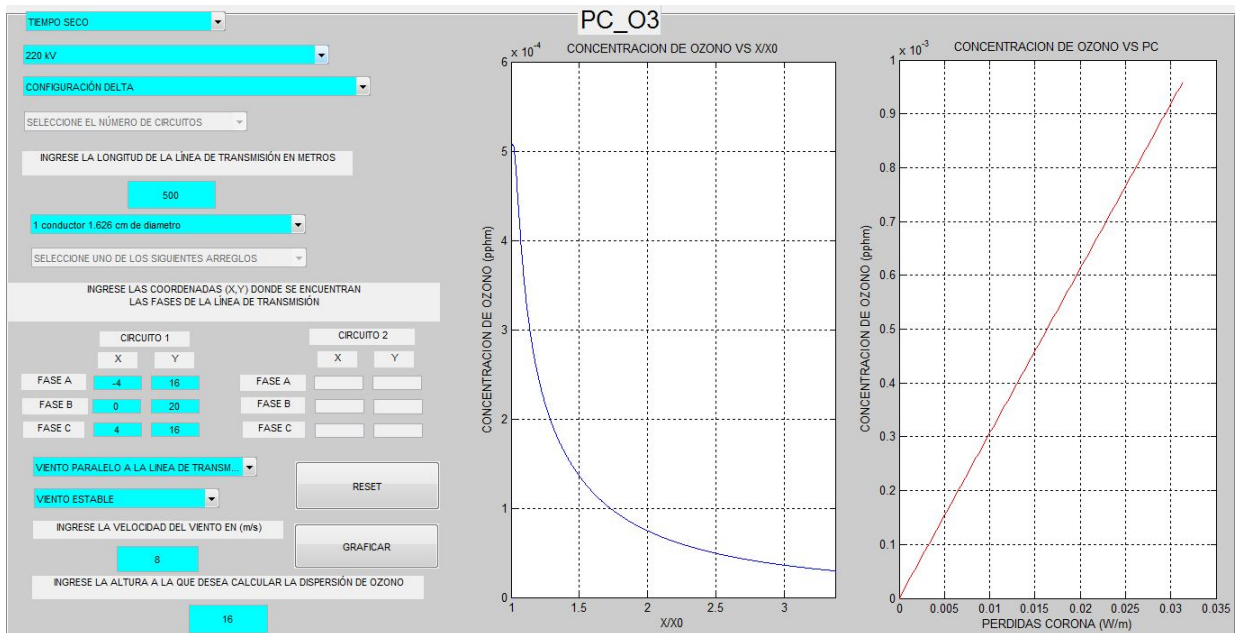


Figura 134: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso seis, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima seco

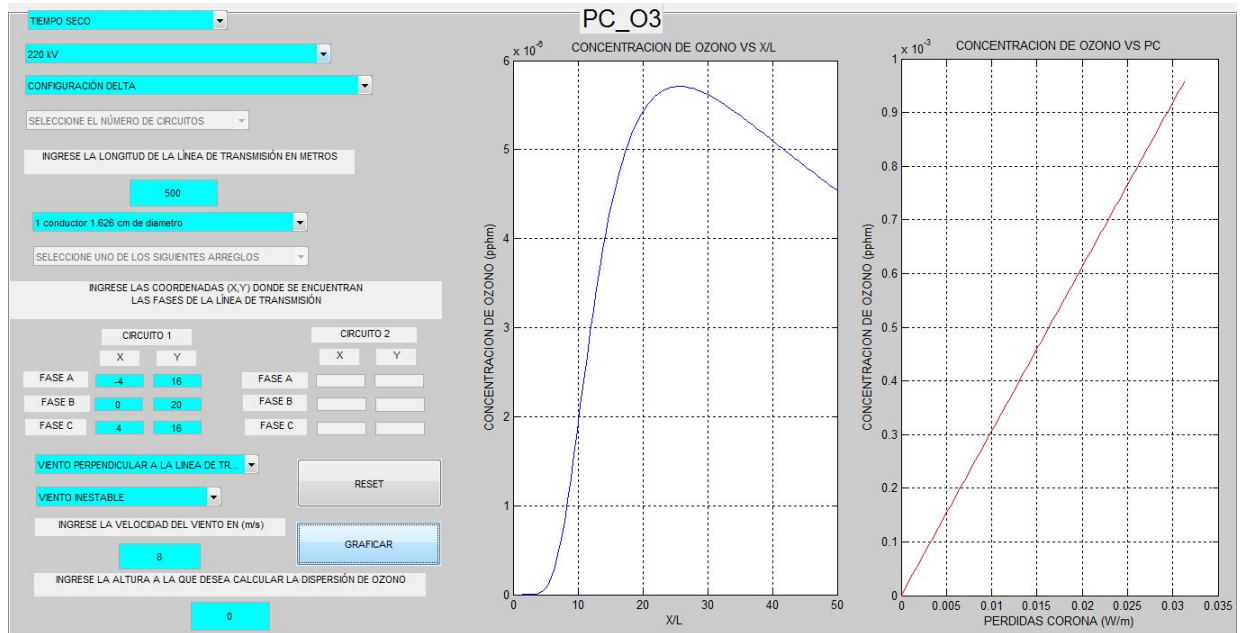


Figura 135: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso seis, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima seco

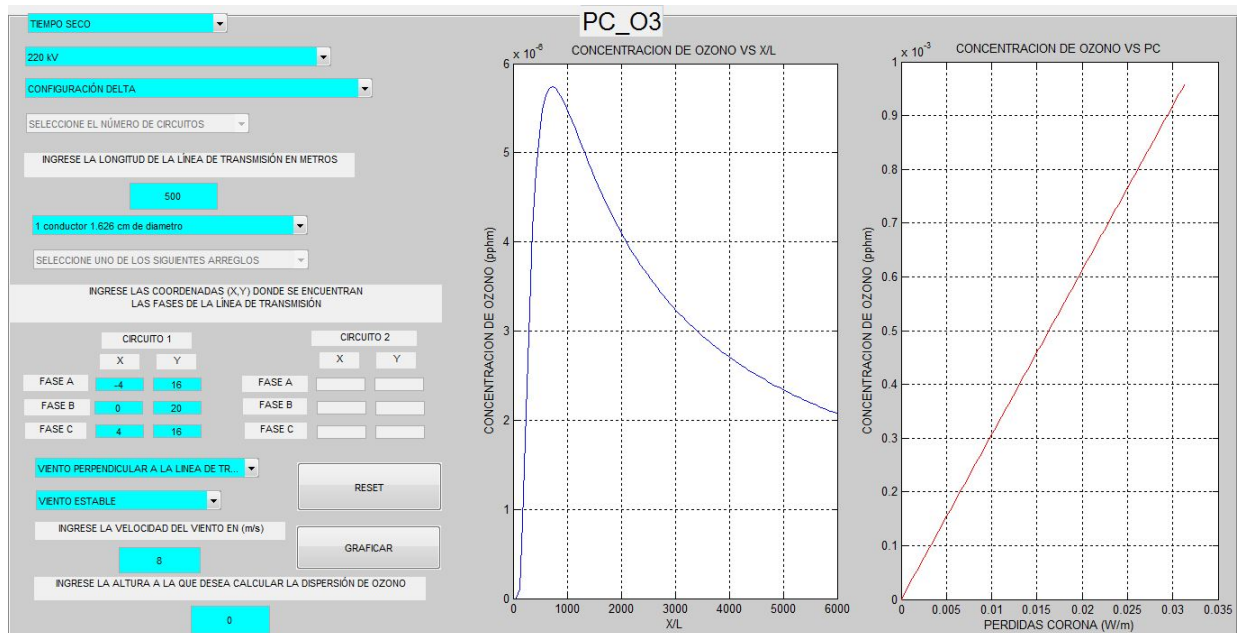


Figura 136: Concentración de ozono al nivel de línea para caso seis, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima seco

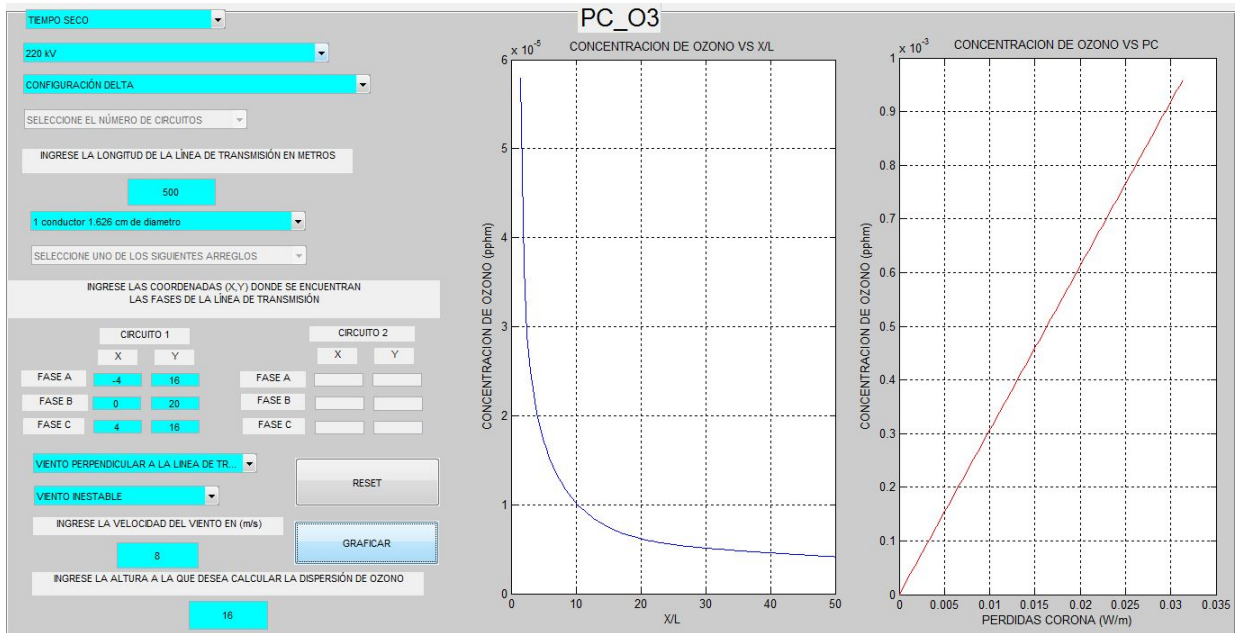


Figura 137: Concentración de ozono al nivel de línea para caso seis, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima seco

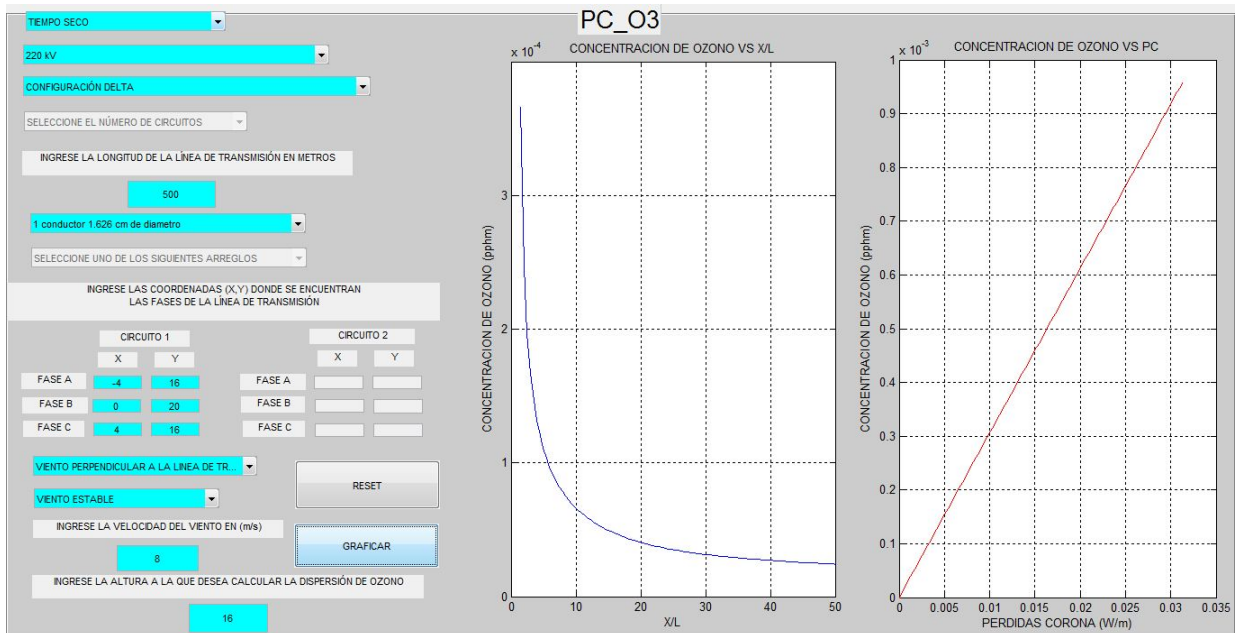


Figura 138: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso seis, bajo viento paralelo e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

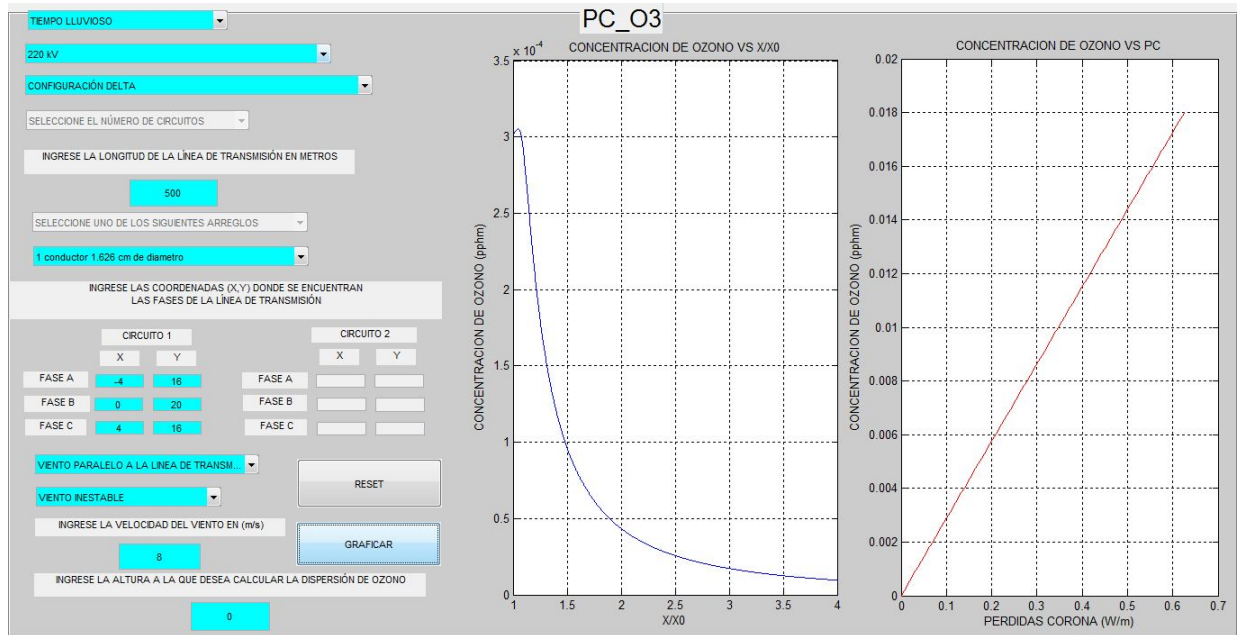


Figura 139: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso seis, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

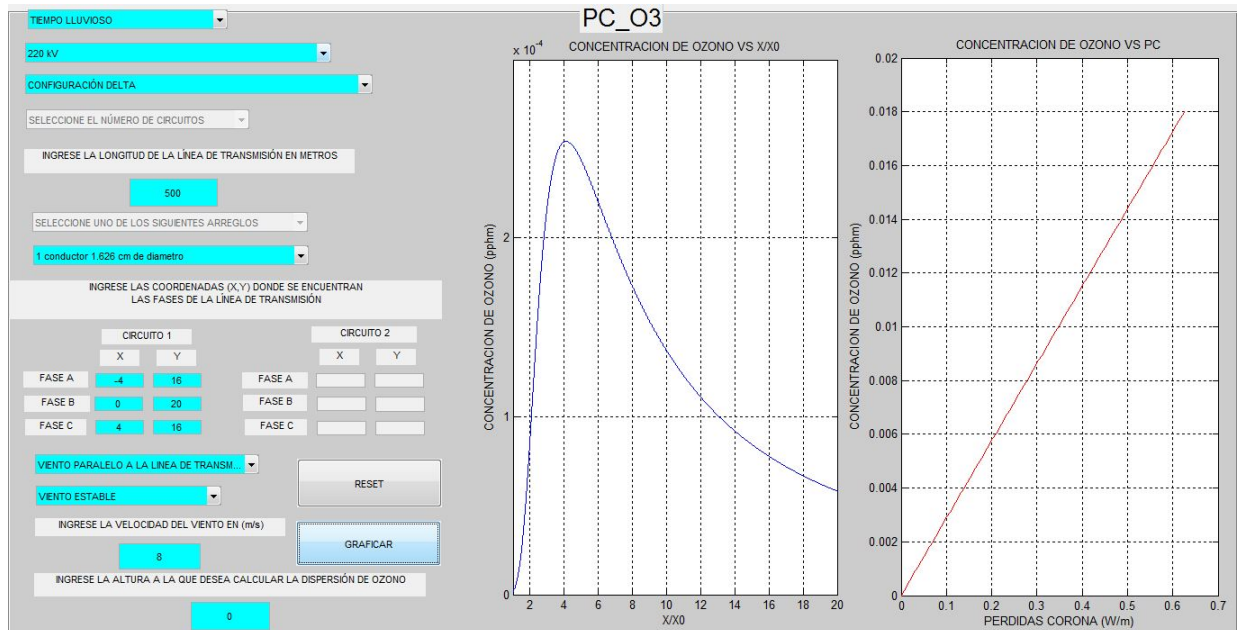


Figura 140: Concentración de ozono al nivel de línea para caso seis, bajo viento paralelo y inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

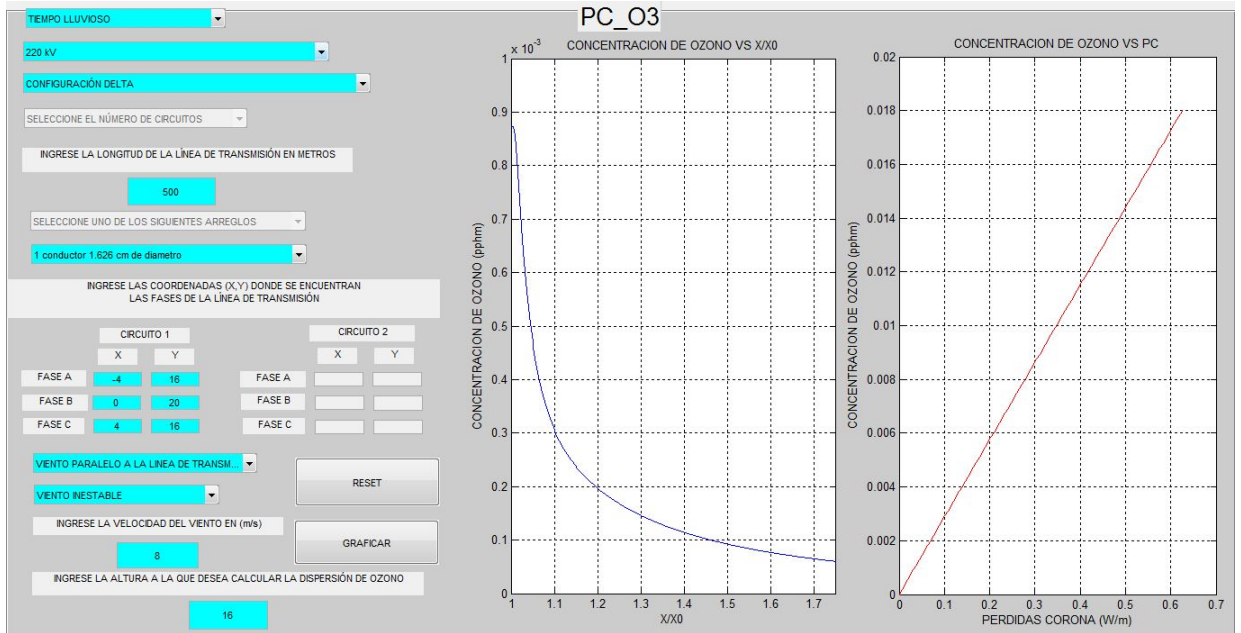


Figura 141: Concentración de ozono al nivel de línea para caso seis, bajo viento paralelo y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

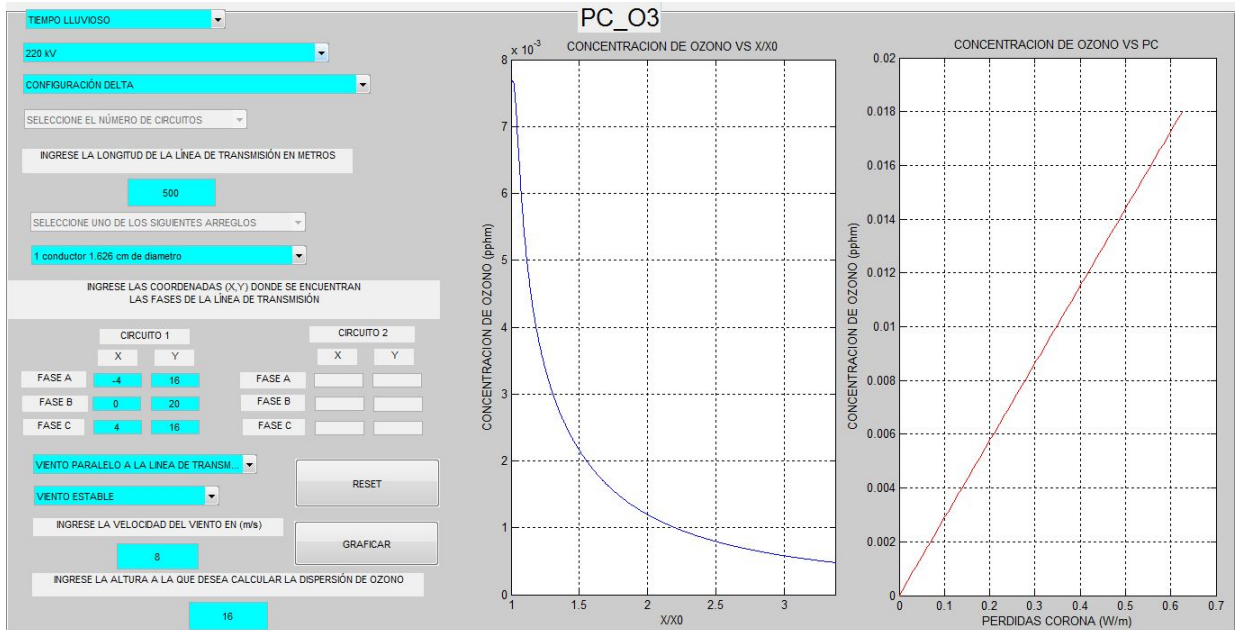


Figura 142: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso seis, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

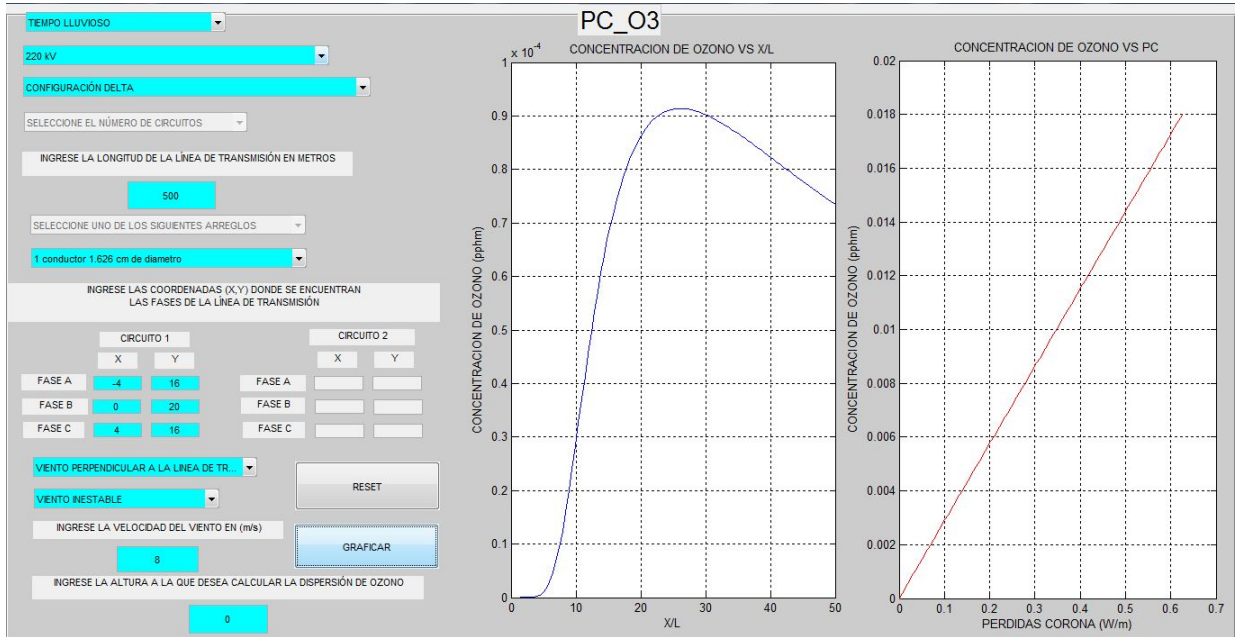


Figura 143: Concentración de ozono al nivel del suelo para caso seis, bajo viento perpendicular y estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

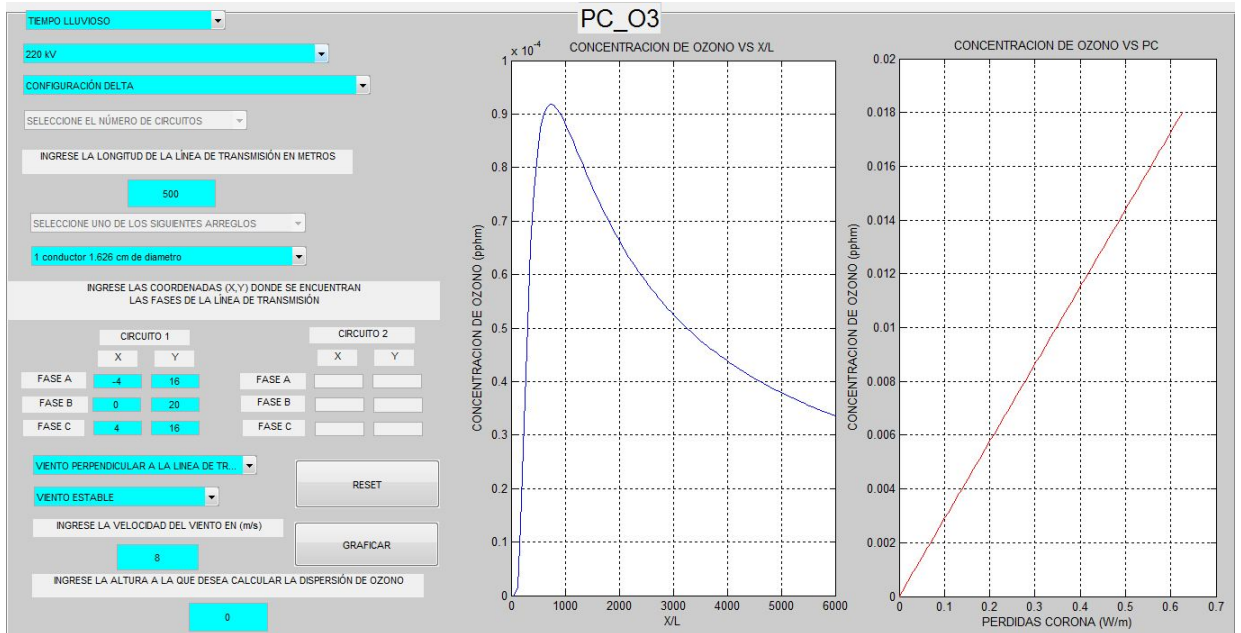


Figura 144: Concentración de ozono al nivel de línea para caso seis, bajo viento perpendicular e inestable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

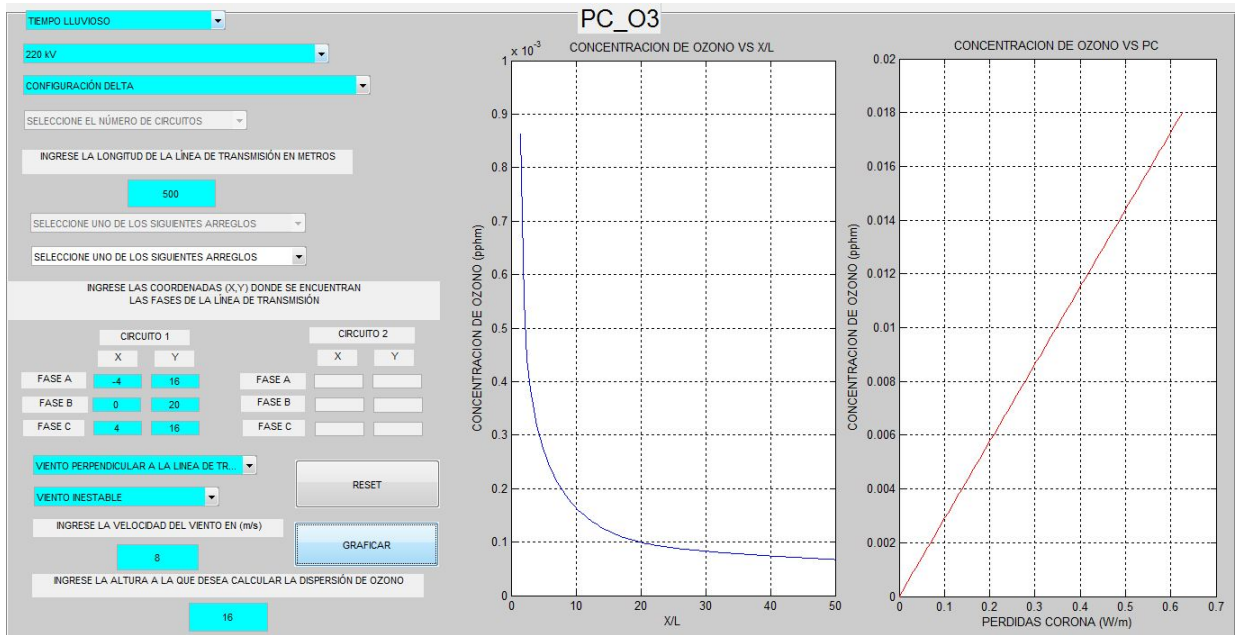


Figura 145: Concentración de ozono al nivel de línea para caso seis, bajo viento perpendicular e estable, originada por pérdida corona en clima lluvioso

