



LA ATENUACIÓN DE LAS GUÍAS DE ONDAS CIRCULARES CON DIELECTRICO DE AIRE

LOSSES IN AIR-FILLED CIRCULAR WAVEGUIDES

**Víctor Cruz Ornetta¹, Harold Cruz Salas²,
Vanessa Vásquez Garro²**

RECEPCIÓN: 10 DE OCTUBRE DEL 2019
ACEPTACIÓN: 06 DE NOVIEMBRE DEL 2019

RESUMEN

Las guías de ondas son elementos importantes de los sistemas de transmisión por microondas, pero también son poco conocidas, especialmente, en el caso de las atenuaciones de las guías de ondas circulares. Por ello, el objetivo de este artículo es presentar, de manera clara y detallada, los cálculos para la obtención de las atenuaciones en las guías de onda circulares, de tal manera que contribuya a la sólida formación de alumnos de las carreras involucradas en estos temas. Para el desarrollo de este estudio, se recurrió a los libros de texto de campos electromagnéticos más reconocidos y a algunos papers. Asimismo, los cálculos se realizaron mediante Excel versión 1909 de Microsoft Office 365 Pro Plus. Como resultado, se encontró que las atenuaciones provocadas por estas guías son de pequeña magnitud. Por otro lado, se mostró que las fórmulas utilizadas son las correctas, ya que los resultados coinciden, casi en su totalidad, con aquellos alcanzados por científicos reconocidos a nivel mundial.

Palabras clave: guías de ondas; guías de ondas circulares; guías de ondas cilíndricas; atenuaciones de guías de ondas; pérdidas de guías de ondas.

ABSTRACT

Waveguides are important components of microwave transmission systems, but they are mostly unknown specially about circular waveguide losses. That is the reason why the objective of this study is to present very well detailed the computations to obtain the losses for circular microwaves to contribute to a better formation of the students of the careers involved in this subject. To develop this study we have used the most classic books for electromagnetic fields and some papers and the computations were carried out with the software Excel versión 1909 de Microsoft Office 365 Pro Plus. As a result it was found that losses of circular waveguides are small and our computations gave our similar outputs as the computations done by very well known scientists.

Keywords: waveguides; circular waveguides; cilidrical waveguides; waveguide attenuations; waveguide losses.

1 Universidad Ricardo Palma. Facultad de Ingeniería. Email: vcruzor@gmail.com

2 Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Email harold.cruz@unmsm.edu.pe, vaneevasquezg@gmail.com

INTRODUCCIÓN

Las guías de ondas circulares ocasionalmente son utilizadas como una alternativa a las guías de onda rectangulares. Estas guías son construidas con base en un conductor único cilíndrico.

En los libros de texto normalmente se presentan las ecuaciones de atenuación, pero no las curvas de atenuación [1, 2, 3, 6, 7]. Por el contrario, en algunos artículos científicos, se presentan las curvas de atenuación [4, 5]; sin embargo, no se presentan los cálculos detallados. Por esa razón, el alumno no sabe cómo aplicarlas e incurre en serios errores, debido a que no son claras las unidades que utilizan. Es por ello que el objetivo de este artículo es presentar de manera clara y detallada los cálculos para la obtención de las pérdidas en las guías de onda circulares, de tal manera que contribuya a la sólida formación de alumnos de las carreras involucradas en estos temas.

MARCO TEÓRICO

De acuerdo a la literatura consultada para el artículo, la atenuación en las guías de ondas circulares con dieléctrico de aire está dada, principalmente, por las pérdidas en el conductor. Por ello, deben despreciarse las pérdidas en el dieléctrico.

En este caso, las pérdidas para los modos transversales eléctricos, de manera general, están expresadas de la siguiente manera:

$$\alpha_{c_{mn}}^{TE} = \frac{R_s}{\alpha\eta} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c_{mn}}}{f}\right)^2}} \left[\left(\frac{f_{c_{11}}}{f}\right)^2 + \frac{m^2}{(\chi'_{mn})^2 - m^2} \right] \dots Np/m \quad (1)$$

Particularmente, para los modos transversales eléctricos TE01, TE02, TE11 y TE21, están expresadas las siguientes ecuaciones:

$$\alpha_{c_{02}}^{TE} = \frac{R_s \left(\frac{f_{c_{TE02}}}{f}\right)^2}{\alpha\eta \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c_{TE02}}}{f}\right)^2}} \dots Np/m \quad (2)$$

$$\alpha_{c_{02}}^{TE} = \frac{R_s \left(\frac{f_{c_{TE02}}}{f}\right)^2}{\alpha\eta \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c_{TE02}}}{f}\right)^2}} \dots Np/m \quad (3)$$

$$\alpha_{c_{11}}^{TE} = \frac{R_s}{\alpha\eta} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c_{TE11}}}{f}\right)^2}} \left[\left(\frac{f_{c_{TE11}}}{f}\right)^2 + \frac{1}{(1.8412)^2 - 1} \right] \dots Np/m \quad (4)$$

$$\alpha_{c_{21}}^{TE} = \frac{R_s}{\alpha\eta} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c_{TE21}}}{f}\right)^2}} \left[\left(\frac{f_{c_{TE21}}}{f}\right)^2 + \frac{4}{(3.0542)^2 - 4} \right] \dots Np/m \quad (5)$$

En el caso de los modos transversales magnéticos, la atenuación, de manera general, está expresada por:

$$\alpha_{c_{mn}}^{TM} = \frac{R_s}{a\eta \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c_{mn}}}{f}\right)^2}} \dots Np/m \quad (6)$$

En los casos particulares de los modos TM01 y TM11, las pérdidas se expresan por las ecuaciones siguientes:

$$\alpha_{c_{01}}^{TM} = \frac{R_s}{a\eta \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c_{TM01}}}{f}\right)^2}} \dots Np/m \quad (7)$$

$$\alpha_{c_{11}}^{TM} = \frac{R_s}{a\eta \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c_{TM11}}}{f}\right)^2}} \dots Np/m \quad (8)$$

Dado que la solución de las guías de ondas circulares está dada en términos de las funciones de Bessel, en las tablas 1 y 2 presentamos los ceros de la función de Bessel y su primera derivada.

	$m=0$	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=4$	$m=5$	$m=6$	$m=7$	$m=8$	$m=9$	$m=10$	$m=11$
$n=1$	2,405	3,832	5,136	6,380	7,588	8,772	9,936	11,086	12,225	13,354	14,476	12,826
$n=2$	5,520	7,106	8,417	9,761	11,065	12,339	13,589	14,821	16,038	17,241	18,434	19,616
$n=3$	8,654	10,174	11,620	13,015	14,373	15,700	17,004	18,288	19,555	20,807	22,047	23,276
$n=4$	11,792	13,324	14,796	16,224	17,616	18,980	20,321	21,642	22,945	24,234	25,510	26,773
$n=5$	14,931	16,471	17,960	19,409	20,827	22,218	23,586	24,935	26,267	27,584	28,887	30,179

Tabla 1. Ceros X_{mn} de la función de Bessel $J_m(X_{mn})=0$ ($n=1,2,3\dots$).
Elaboración propia.

	$m=0$	$m=1$	$m=2$	$m=3$	$m=4$	$m=5$	$m=6$	$m=7$	$m=8$	$m=9$	$m=10$	$m=11$
$n=1$	3,832	1,841	3,054	4,201	5,318	6,416	7,501	8,578	9,647	10,711	11,771	12,826
$n=2$	7,016	5,332	6,706	8,015	9,282	10,520	11,735	12,932	14,116	15,287	16,448	17,600
$n=3$	10,174	8,536	9,970	11,346	12,682	13,987	15,268	16,529	17,774	19,005	20,223	21,431
$n=4$	13,324	11,706	13,170	14,586	15,964	17,313	18,638	19,942	21,229	22,501	23,761	25,009
$n=5$	16,471	14,864	16,348	17,789	19,196	20,576	21,932	23,268	24,587	25,891	27,182	28,461

Tabla 2. Ceros X'_{mn} de la derivada $J'_m(X'_{mn})=0$ ($n=1,2,3\dots$) de la función de Bessel $J_m(X)$.
Elaboración propia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización de este estudio, se revisaron los libros de texto de campos electromagnéticos más reconocidos y algunos papers, y los cálculos se realizaron mediante Excel versión 1909 de Microsoft Office 365 Pro Plus.

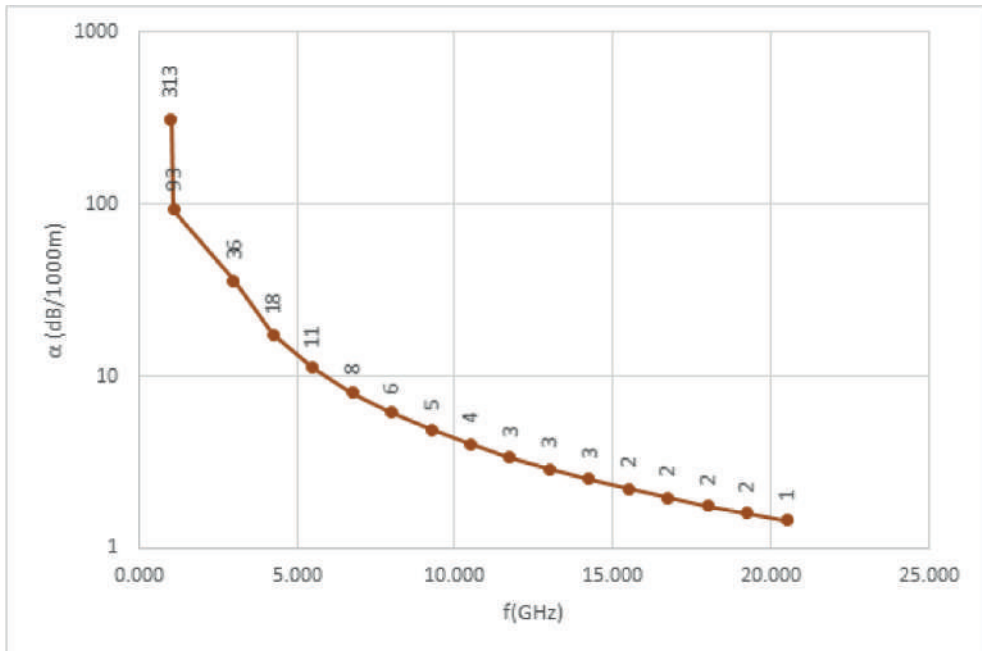
RESULTADOS

Desde la tabla 3 hasta la 16, se presentan los cálculos de las atenuaciones para guías de ondas circulares de 1.5 y 3 cm de diámetro para el modo TE01, TE02, TE11, TE21, TM01 y TM11. De la misma manera, en los cuadros 1 al 6 y 8 al 13, se presentan las gráficas de las atenuaciones individuales para los modos TE01, TE02, TE11, TE21, TM01 y TM11 de las guías de ondas circulares de 1.5 y 3 cm, mientras que los cuadros 7 y 14 muestran la comparación de atenuaciones para las guías de ondas circulares de 1.5 y 3 cm, respectivamente.

	f (GHz)	R_s (Ohmios/m ²)	f_{cTE01} (GHz)	(Np/m)	α (dB/m)	(dB/1000m)
1,005 f_{cTE01}	12,26	0,03	12,20	0,0512	0,4448	444,7653
1,010 f_{cTE01}	12,32	0,03	12,20	0,0361	0,3133	313,3267
1,100 f_{cTE01}	13,42	0,03	12,20	0,0107	0,0929	92,8860
3,000 f_{cTE11}	17,58	0,03	12,20	0,0041	0,0000	35,8132
4,250 f_{cTE11}	24,91	0,04	12,20	0,0020	0,0175	17,5452
5,500 f_{cTE11}	32,23	0,05	12,20	0,0013	0,0112	11,2259
6,750 f_{cTE11}	39,56	0,05	12,20	0,0009	0,0080	8,0342
8,000 f_{cTE11}	46,89	0,06	12,20	0,0007	0,0061	6,1347
9,250 f_{cTE11}	54,21	0,06	12,20	0,0006	0,0049	4,8896
10,500 f_{cTE11}	61,54	0,07	12,20	0,0005	0,0040	4,0191
11,750 f_{cTE11}	68,86	0,07	12,20	0,0004	0,0034	3,3812
13,000 f_{cTE11}	76,19	0,07	12,20	0,0003	0,0029	2,8969
14,250 f_{cTE11}	83,52	0,08	12,20	0,0003	0,0025	2,5187
15,500 f_{cTE11}	90,84	0,08	12,20	0,0003	0,0022	2,2165
16,750 f_{cTE11}	98,17	0,08	12,20	0,0002	0,0020	1,9704
18,000 f_{cTE11}	105,49	0,09	12,20	0,0002	0,0018	1,7669
19,250 f_{cTE11}	112,82	0,09	12,20	0,0002	0,0016	1,5963
20,500 f_{cTE11}	120,14	0,09	12,20	0,0002	0,0015	1,4515

Tabla 3. Atenuación para guía de onda circular llena de aire de 1.5 cm de radio en el modo TE01.
Elaboración propia.

CUADRO 1. Curva de atenuación para la guía de onda de 1.5 cm de radio en el modo TE01

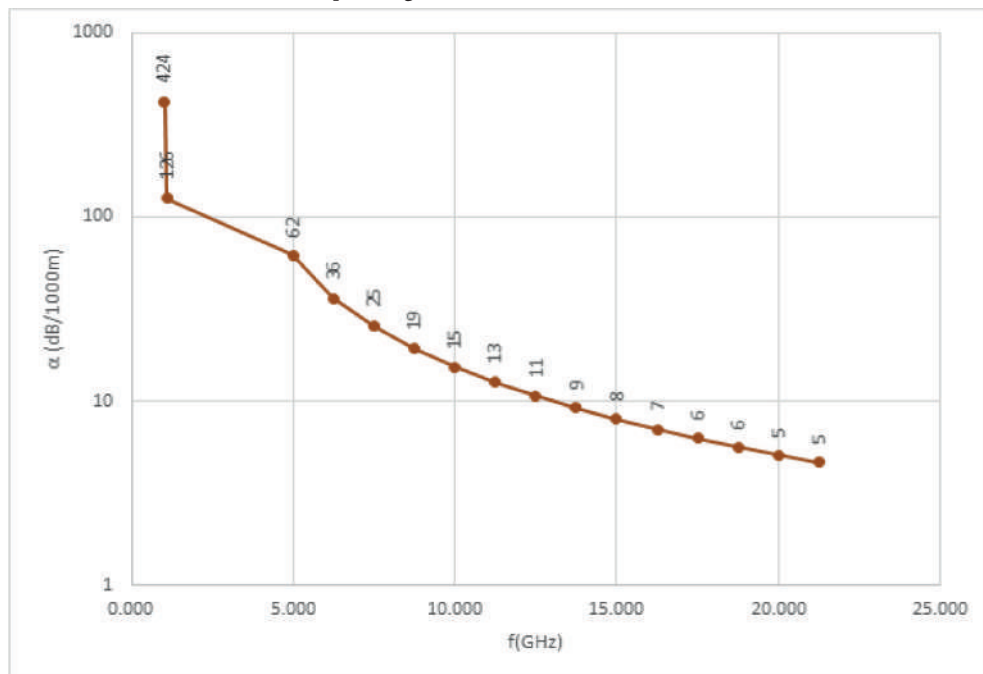


Fuente: Elaboración propia

	f (GHz)	R_s (Ohmios/m ²)	f_{CTE01} (GHz)	(Np/m)	α (GHz)	(Ohmios/m ²)
1,005 f_{CTE02}	22,44	0,04	22,33	0,0693	0,6018	601,8135
1,010 f_{CTE02}	22,55	0,04	22,33	0,0488	0,4240	423,9634
1,100 f_{CTE02}	24,56	0,04	22,33	0,0145	0,1257	125,6843
5,000 f_{CTE11}	29,30	0,05	22,33	0,0071	0,0621	62,0641
6,250 f_{CTE11}	36,63	0,05	22,33	0,0042	0,0363	36,2762
7,500 f_{CTE11}	43,96	0,06	22,33	0,0029	0,0254	25,3964
8,750 f_{CTE11}	51,28	0,06	22,33	0,0022	0,0193	19,2832
10,000 f_{CTE11}	58,61	0,06	22,33	0,0018	0,0154	15,3673
11,250 f_{CTE11}	65,93	0,07	22,33	0,0015	0,0127	12,6550
12,500 f_{CTE11}	73,26	0,07	22,33	0,0012	0,0107	10,6744
13,750 f_{CTE11}	80,58	0,07	22,33	0,0011	0,0092	9,1713
15,000 f_{CTE11}	87,91	0,08	22,33	0,0009	0,0080	7,9961
16,250 f_{CTE11}	95,24	0,08	22,33	0,0008	0,0071	7,0556
17,500 f_{CTE11}	102,56	0,08	22,33	0,0007	0,0063	6,2881
18,750 f_{CTE11}	109,89	0,09	22,33	0,0007	0,0057	5,6518
20,000 f_{CTE11}	117,21	0,09	22,33	0,0006	0,0051	5,1170
21,250 f_{CTE11}	124,54	0,09	22,33	0,0005	0,0047	4,6622

Tabla 4. Atenuación para guía de onda circular llena de aire, de 1.5 cm de radio, en el modo TE02.
Elaboración propia.

CUADRO 2. Curva de atenuación para la guía de onda de 1.5 cm de radio en el modo TE02

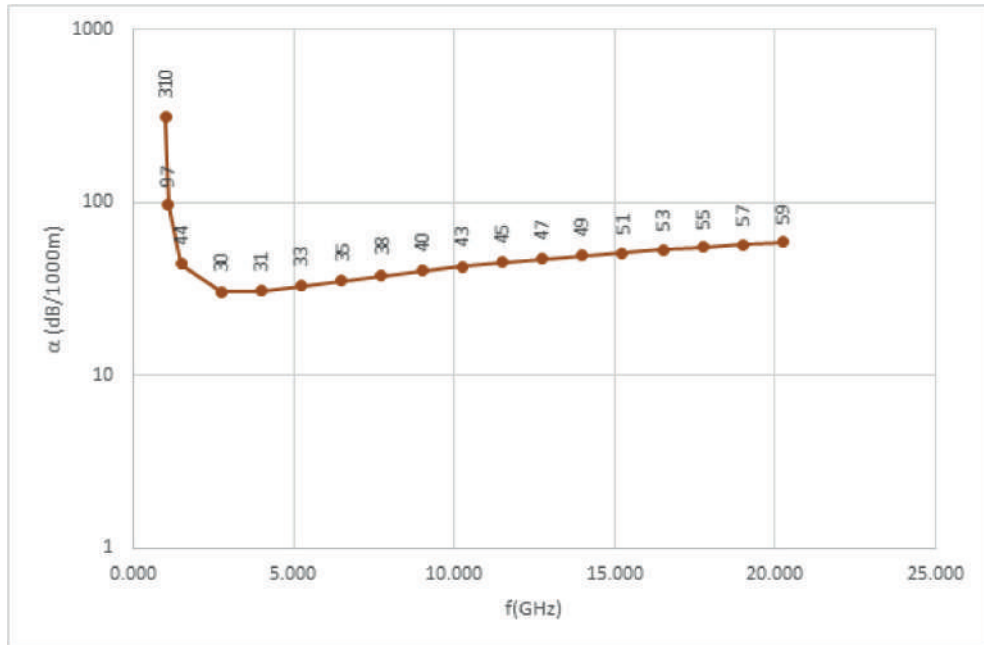


Fuente: Elaboración propia.

	f (GHz)	R_s (Ohmios/m ²)	f_{cTE01} (GHz)	(Np/m)	α (GHz)	(Ohmios/m ²)
1,010 _{cTE11}	5,92	0,02	5,86	0,0357	0,3099	309,8951
1,100 _{cTE11}	6,45	0,02	5,86	0,0112	0,0970	96,9846
1,500 _{cTE11}	8,79	0,02	5,86	0,0051	0,0439	43,8756
2,750 _{cTE11}	16,12	0,03	5,86	0,0035	0,0303	30,3344
4,000 _{cTE11}	23,44	0,04	5,86	0,0035	0,0307	30,7405
5,250 _{cTE11}	30,77	0,05	5,86	0,0038	0,0328	32,8415
6,500 _{cTE11}	38,09	0,05	5,86	0,0041	0,0353	35,2988
7,750 _{cTE11}	45,42	0,06	5,86	0,0044	0,0378	37,7961
9,000 _{cTE11}	52,75	0,06	5,86	0,0046	0,0402	40,2394
10,250 _{cTE11}	60,07	0,06	5,86	0,0049	0,0426	42,6002
11,500 _{cTE11}	67,40	0,07	5,86	0,0052	0,0449	44,8724
12,750 _{cTE11}	74,72	0,07	5,86	0,0054	0,0471	47,0585
14,000 _{cTE11}	82,05	0,08	5,86	0,0057	0,0492	49,1635
15,250 _{cTE11}	89,38	0,08	5,86	0,0059	0,0512	51,1935
16,500 _{cTE11}	96,70	0,08	5,86	0,0061	0,0532	53,1546
17,750 _{cTE11}	104,03	0,08	5,86	0,0063	0,0551	55,0523
19,000 _{cTE11}	111,35	0,09	5,86	0,0065	0,0569	56,8917
20,250 _{cTE11}	118,68	0,09	5,86	0,0068	0,0587	58,6774

Tabla 5. Atenuación para guía de onda circular llena de aire de 1.5 cm de radio en el modo TE11. Elaboración propia.

CUADRO 3. Curva de atenuación para la guía de onda de 1.5 cm de radio en el modo TE11

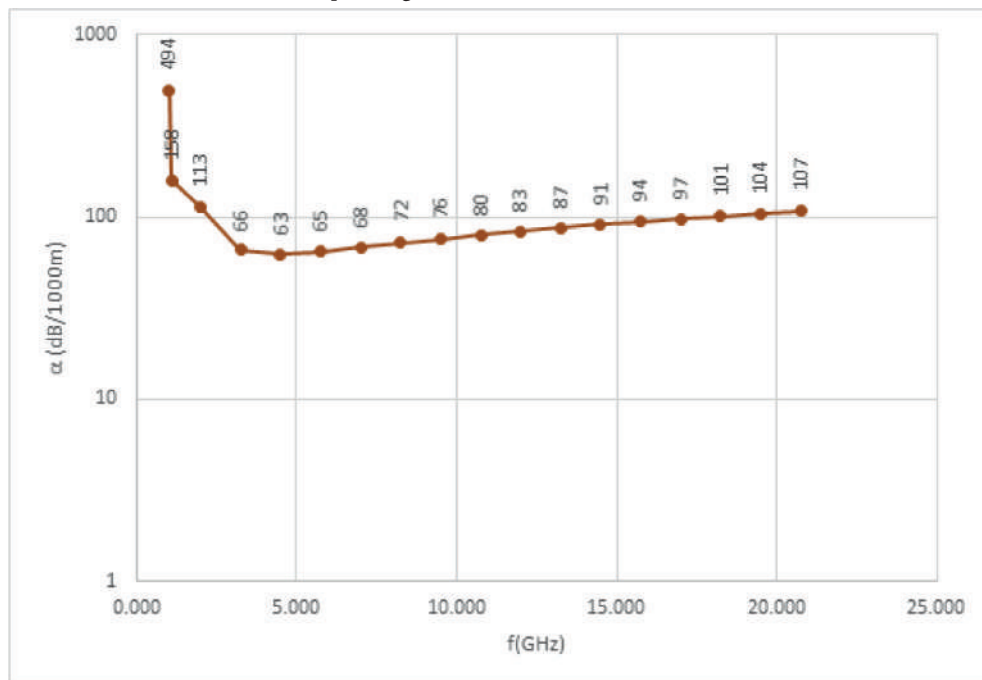


Fuente: Elaboración propia.

	f (GHz)	R_s (Ohmios/m ²)	f_{cTE01} (GHz)	(Np/m)	α (GHz)	(Ohmios/m ²)
1,001 _{cTE21}	9,73	0,03	9,72	0,1797	1,5605	1560,4680
1,010 _{cTE21}	9,82	0,03	9,72	0,0569	0,4940	493,9596
1,100 _{cTE21}	10,69	0,03	9,72	0,0182	0,1583	158,2572
2,000 _{cTE11}	11,72	0,03	9,72	0,0130	0,1127	112,7029
3,250 _{cTE11}	19,05	0,04	9,72	0,0076	0,0656	65,6049
4,500 _{cTE11}	26,37	0,04	9,72	0,0072	0,0626	62,6124
5,750 _{cTE11}	33,70	0,05	9,72	0,0074	0,0646	64,6326
7,000 _{cTE11}	41,03	0,05	9,72	0,0078	0,0680	68,0013
8,250 _{cTE11}	48,35	0,06	9,72	0,0083	0,0718	71,7889
9,500 _{cTE11}	55,68	0,06	9,72	0,0087	0,0757	75,6771
10,750 _{cTE11}	63,00	0,07	9,72	0,0092	0,0795	79,5404
12,000 _{cTE11}	70,33	0,07	9,72	0,0096	0,0833	83,3270
13,250 _{cTE11}	77,65	0,07	9,72	0,0100	0,0870	87,0165
14,500 _{cTE11}	84,98	0,08	9,72	0,0104	0,0906	90,6025
15,750 _{cTE11}	92,31	0,08	9,72	0,0108	0,0941	94,0854
17,000 _{cTE11}	99,63	0,08	9,72	0,0112	0,0975	97,4687
18,250 _{cTE11}	106,96	0,09	9,72	0,0116	0,1008	100,7571
19,500 _{cTE11}	114,28	0,09	9,72	0,0120	0,1040	103,9562
20,750 _{cTE11}	121,61	0,09	9,72	0,0123	0,1071	107,0711

Tabla 6. Atenuación para guía de onda circular llena de aire de 1.5 cm de radio en el modo TE21.
Elaboración propia.

CUADRO 4. Curva de atenuación para la guía de onda de 1.5 cm de radio en el modo TE21

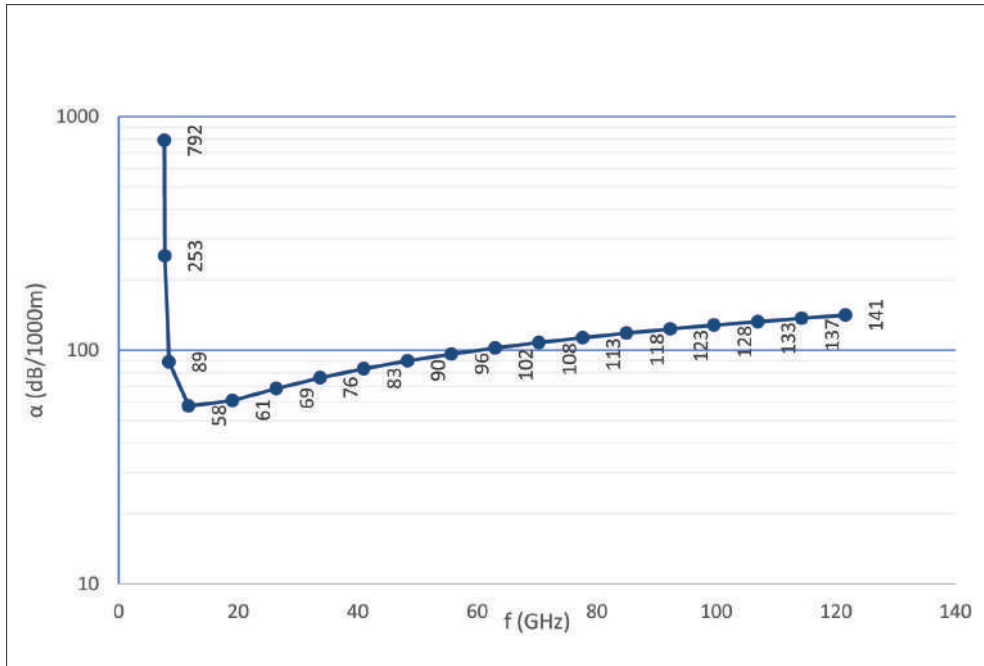


Fuente: Elaboración propia.

	f (GHz)	R_c (Ohmios/m ²)	f_{cTE01} (GHz)	(Np/m)	α (GHz)	(Ohmios/m ²)
1,001 _{cTM01}	7,66	0,02	7,66	0,0912	0,7918	791,8279
1,010 _{cTM01}	7,73	0,02	7,66	0,0292	0,2532	253,2137
1,100 _{cTM01}	8,42	0,02	7,66	0,0103	0,0890	89,0395
2,000 _{cTE11}	11,72	0,03	7,66	0,0067	0,0578	57,7908
3,250 _{cTE11}	19,05	0,04	7,66	0,0070	0,0609	60,9257
4,500 _{cTE11}	26,37	0,04	7,66	0,0079	0,0686	68,5998
5,750 _{cTE11}	33,70	0,05	7,66	0,0088	0,0762	76,1980
7,000 _{cTE11}	41,03	0,05	7,66	0,0096	0,0833	83,3392
8,250 _{cTE11}	48,35	0,06	7,66	0,0104	0,0900	90,0212
9,500 _{cTE11}	55,68	0,06	7,66	0,0111	0,0963	96,2966
10,750 _{cTE11}	63,00	0,07	7,66	0,0118	0,1022	102,2208
12,000 _{cTE11}	70,33	0,07	7,66	0,0124	0,1078	107,8410
13,250 _{cTE11}	77,65	0,07	7,66	0,0130	0,1132	113,1967
14,500 _{cTE11}	84,98	0,08	7,66	0,0136	0,1183	118,3201
15,750 _{cTE11}	92,31	0,08	7,66	0,0142	0,1232	123,2378
17,000 _{cTE11}	99,63	0,08	7,66	0,0147	0,1280	127,9721
18,250 _{cTE11}	106,96	0,09	7,66	0,0153	0,1325	132,5415
19,500 _{cTE11}	114,28	0,09	7,66	0,0158	0,1370	136,9616
20,750 _{cTE11}	121,61	0,09	7,66	0,0163	0,1412	141,2461

Tabla 7. Atenuación para guía de onda circular llena de aire de 1.5 cm de radio en el modo TM01. Elaboración propia.

CUADRO 5. Curva de atenuación para la guía de onda de 1.5 cm de radio en el modo TM01



Fuente: Elaboración propia.

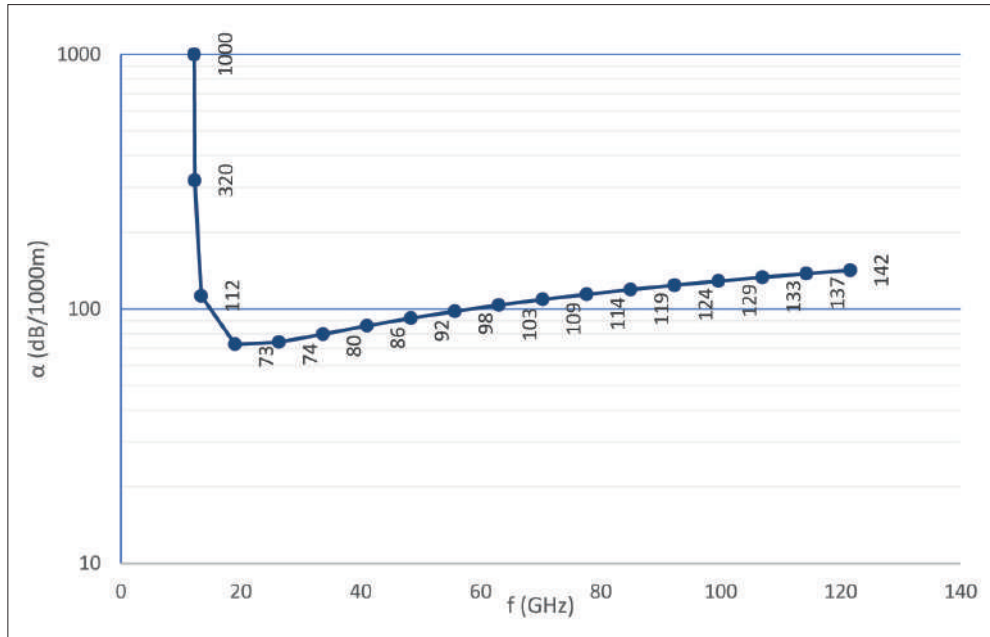
	f (GHz)	R_s (Ohmios/m ²)	f_{cTE01} (GHz)	N_p/m	α (GHz)	α (Ohmios/m ²)
1,001 _{cTM11}	12,21	0,03	12,20	0,1151	0,9995	999,5021
1,010 _{cTM11}	12,32	0,03	12,20	0,0368	0,3196	319,6246
1,100 _{cTM11}	13,42	0,03	12,20	0,0129	0,1124	112,3920
3,250 _{cTE11}	19,05	0,04	12,20	0,0084	0,0726	72,6339
4,500 _{cTE11}	26,37	0,04	12,20	0,0085	0,0740	74,0403
5,750 _{cTE11}	33,70	0,05	12,20	0,0092	0,0796	79,6029
7,000 _{cTE11}	41,03	0,05	12,20	0,0099	0,0858	85,7531
8,250 _{cTE11}	48,35	0,06	12,20	0,0106	0,0919	91,8564
9,500 _{cTE11}	55,68	0,06	12,20	0,0113	0,0978	97,7567
10,750 _{cTE11}	63,00	0,07	12,20	0,0119	0,1034	103,4199
12,000 _{cTE11}	70,33	0,07	12,20	0,0125	0,1088	108,8497
13,250 _{cTE11}	77,65	0,07	12,20	0,0131	0,1141	114,0611
14,500 _{cTE11}	84,98	0,08	12,20	0,0137	0,1191	119,0719
15,750 _{cTE11}	92,31	0,08	12,20	0,0143	0,1239	123,8997
17,000 _{cTE11}	99,63	0,08	12,20	0,0148	0,1286	128,5608
18,250 _{cTE11}	106,96	0,09	12,20	0,0153	0,1331	133,0696
19,500 _{cTE11}	114,28	0,09	12,20	0,0158	0,1374	137,4390
20,750 _{cTE11}	121,61	0,09	12,20	0,0163	0,1417	141,6804

Tabla 8. Atenuación para guía de onda circular llena de aire de 1.5 cm de radio en el modo TM11. Elaboración propia.

$f/f_{c_{TE11}}$	α_{TE01} (dB/1000m)	α_{TE02} (dB/1000m)	α_{TE11} (dB/1000m)	α_{TE21} (dB/1000m)	α_{TM01} (dB/1000m)	α_{TM11} (dB/1000m)
2.00			33.7777	112.7029	57.7908	
2.50			30.8794	77.8921	57.3850	88.3070
3.00	35.8132		30.1039	67.9613	59.5396	74.4187
3.50	25.4592		30.2089	64.1278	62.4030	72.0073
4.00	19.6185	184.5786	30.7405	62.7595	65.4816	72.4738
4.50	15.8361	88.4708	31.4963	62.6124	68.5998	74.0403
5.00	13.1846	62.0641	32.3747	63.1411	71.6867	76.1031
5.50	11.2259	48.3025	33.3204	64.0694	74.7123	78.4046
6.00	9.7234	39.5756	34.3015	65.2439	77.6646	80.8195
6.50	8.5374	33.4650	35.2988	66.5734	80.5401	83.2813
7.00	7.5798	28.9196	36.3006	68.0013	83.3392	85.7531
7.50	6.7923	25.3964	37.2994	69.4907	86.0645	88.2134
8.00	6.1347	22.5823	38.2906	71.0172	88.7191	90.6497
8.50	5.5783	20.2823	39.2712	72.5642	91.3069	93.0547
9.00	5.1024	18.3680	40.2394	74.1202	93.8316	95.4244
9.50	4.6914	16.7507	41.1943	75.6771	96.2966	97.7567
10.00	4.3333	15.3673	42.1351	77.2293	98.7056	100.0507
10.50	4.0191	14.1714	43.0617	78.7728	101.0616	102.3063
11.00	3.7414	13.1280	43.9741	80.3048	103.3677	104.5242
11.50	3.4946	12.2106	44.8724	81.8233	105.6267	106.7050
12.00	3.2739	11.3983	45.7569	83.3270	107.8410	108.8497
12.50	3.0757	10.6744	46.6279	84.8150	110.0131	110.9595
13.00	2.8969	10.0259	47.4858	86.2868	112.1451	113.0354
13.50	2.7348	9.4419	48.3308	87.7420	114.2390	115.0787
14.00	2.5874	8.9136	49.1635	89.1806	116.2968	117.0905
14.50	2.4529	8.4337	49.9842	90.6025	118.3201	119.0719
15.00	2.3297	7.9961	50.7932	92.0079	120.3105	121.0240
15.50	2.2165	7.5958	51.5911	93.3969	122.2696	122.9480
16.00	2.1122	7.2282	52.3781	94.7699	124.1987	124.8448
16.50	2.0159	6.8898	53.1546	96.1270	126.0992	126.7154
17.00	1.9267	6.5774	53.9210	97.4687	127.9721	128.5608
17.50	1.8439	6.2881	54.6776	98.7951	129.8187	130.3819
18.00	1.7669	6.0198	55.4247	100.1068	131.6400	132.1794
18.50	1.6952	5.7702	56.1627	101.4039	133.4370	133.9543
19.00	1.6282	5.5375	56.8917	102.6870	135.2106	135.7072
19.50	1.5655	5.3203	57.6122	103.9562	136.9616	137.4390
20.00	1.5067	5.1170	58.3243	105.2120	138.6910	139.1503

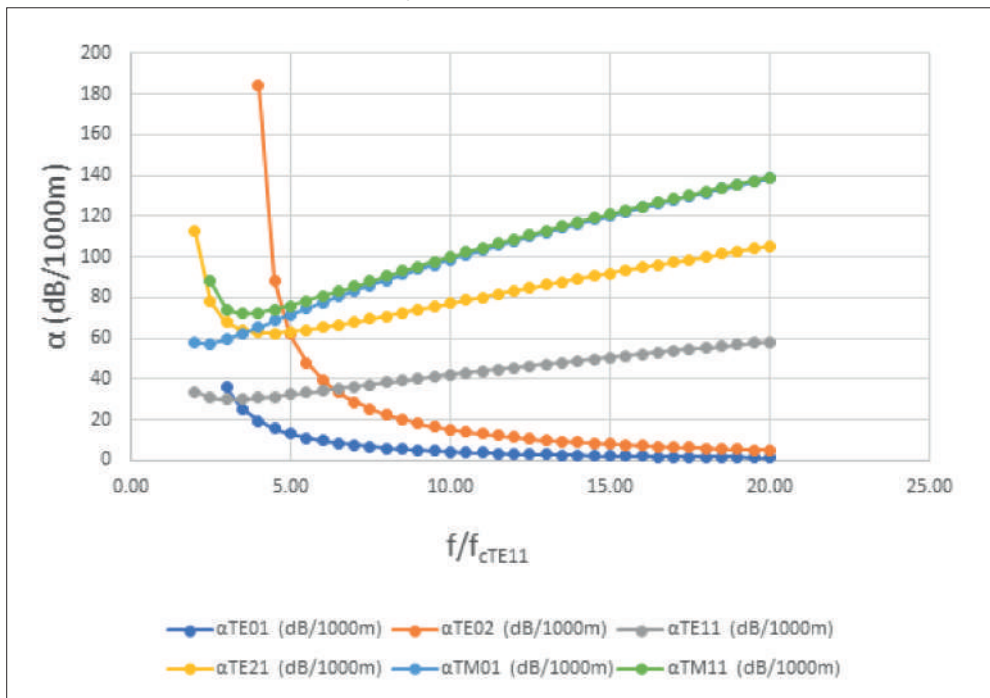
Tabla 9. Comparación entre las atenuaciones de diversos modos de transmisión TE y TM para guía de onda circular llena de aire de 3 cm de radio. Elaboración propia.

CUADRO 6. Curva de atenuación para la guía de onda de 1.5 cm de radio en el modo TM11



Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 7. Curva de atenuación para la guía de onda de 1.5 cm de radio

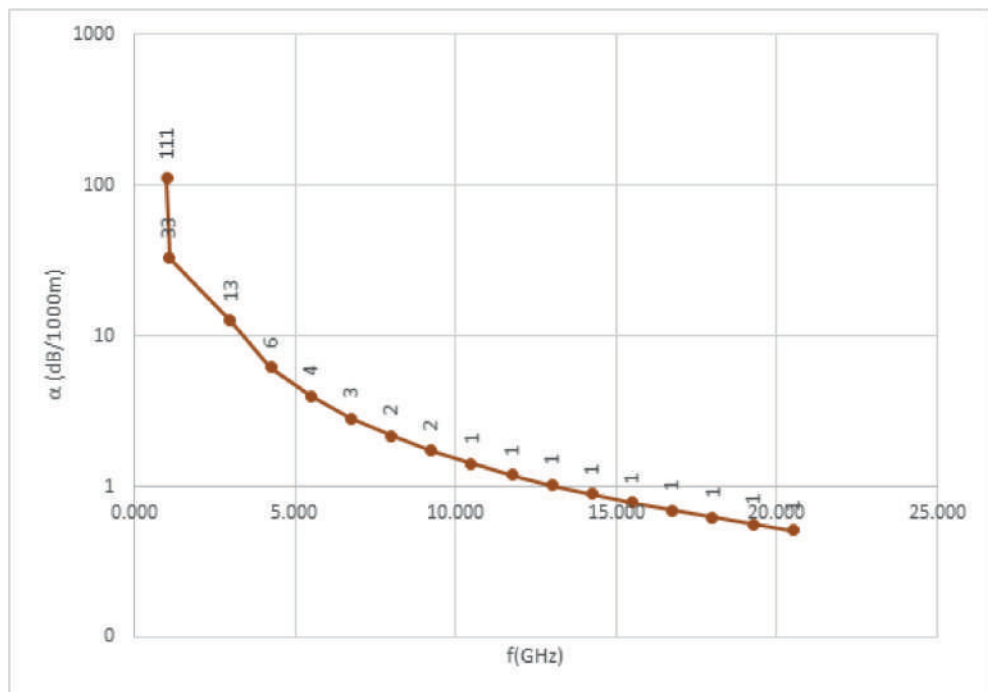


Fuente: Elaboración propia.

	f (GHz)	R_s (Ohmios/m ²)	$f_{c_{TE01}}$ (GHz)	(Np/m)	α (GHz)	(Ohmios/m ²)
1,005 _{c_{TE01}}	6,13	0,02	6,10	0,0181	0,1572	157,2483
1,010 _{c_{TE01}}	6,16	0,02	6,10	0,0128	0,1108	110,7777
1,100 _{c_{TE01}}	6,71	0,02	6,10	0,0038	0,0328	32,8402
3,000 _{c_{TE11}}	8,79	0,02	6,10	0,0015	0,0127	12,6619
4,250 _{c_{TE11}}	12,45	0,03	6,10	0,0007	0,0062	6,2032
5,500 _{c_{TE11}}	16,12	0,03	6,10	0,0005	0,0040	3,9689
6,750 _{c_{TE11}}	19,78	0,04	6,10	0,0003	0,0028	2,8405
8,000 _{c_{TE11}}	23,44	0,04	6,10	0,0002	0,0022	2,1689
9,250 _{c_{TE11}}	27,11	0,04	6,10	0,0002	0,0017	1,7287
10,500 _{c_{TE11}}	30,77	0,05	6,10	0,0002	0,0014	1,4210
11,750 _{c_{TE11}}	34,43	0,05	6,10	0,0001	0,0012	1,1954
13,000 _{c_{TE11}}	38,09	0,05	6,10	0,0001	0,0010	1,0242
14,250 _{c_{TE11}}	41,76	0,05	6,10	0,0001	0,0009	0,8905
15,500 _{c_{TE11}}	45,42	0,06	6,10	0,0001	0,0008	0,7836
16,750 _{c_{TE11}}	49,08	0,06	6,10	0,0001	0,0007	0,6967
18,000 _{c_{TE11}}	52,75	0,06	6,10	0,0001	0,0006	0,6247
19,250 _{c_{TE11}}	56,41	0,06	6,10	0,0001	0,0006	0,5644
20,500 _{c_{TE11}}	60,07	0,06	6,10	0,0001	0,0005	0,5132

Tabla 10. Atenuación para guía de onda circular llena de aire de 3 cm de radio en el modo TE01.
Elaboración propia.

CUADRO 8. Curva de atenuación para la guía de onda de 3 cm de radio en el modo TE01

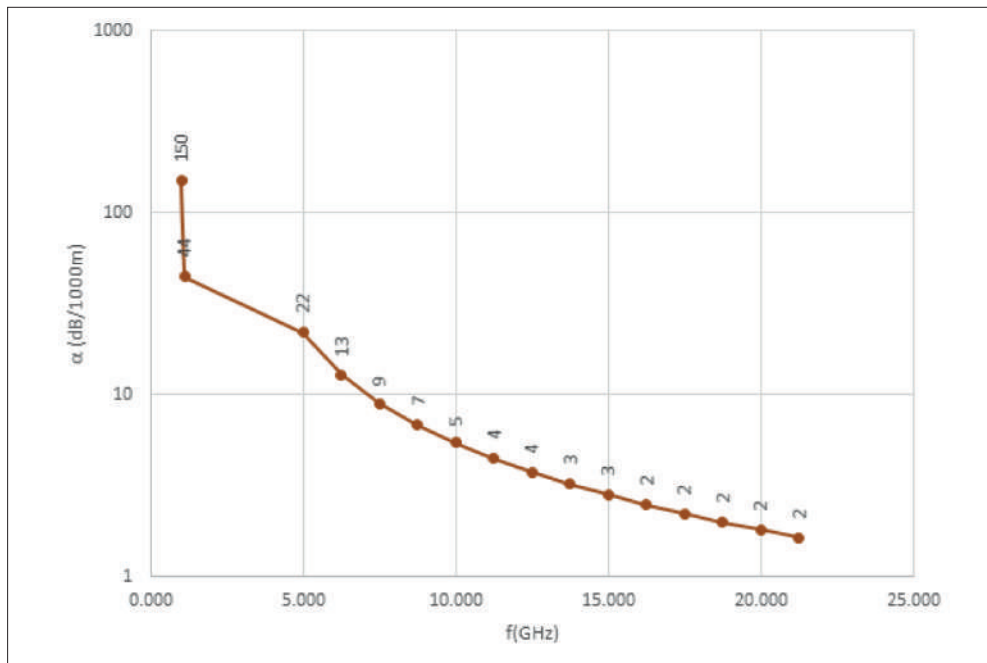


Fuente: Elaboración propia.

	f (GHz)	R_s (Ohmios/m ²)	f_{cTE01} (GHz)	(Np/m)	α (GHz)	(Ohmios/m ²)
1,005 _{cTE02}	11,22	0,03	11,17	0,0245	0,2128	212,7732
1,010 _{cTE02}	11,28	0,03	11,17	0,0173	0,1499	149,8937
1,100 _{cTE02}	12,28	0,03	11,17	0,0051	0,0444	44,4361
5,000 _{cTE11}	14,65	0,03	11,17	0,0025	0,0219	21,9430
6,250 _{cTE11}	18,31	0,04	11,17	0,0015	0,0128	12,8256
7,500 _{cTE11}	21,98	0,04	11,17	0,0010	0,0090	8,9790
8,750 _{cTE11}	25,64	0,04	11,17	0,0008	0,0068	6,8176
10,000 _{cTE11}	29,30	0,05	11,17	0,0006	0,0054	5,4332
11,250 _{cTE11}	32,97	0,05	11,17	0,0005	0,0045	4,4742
12,500 _{cTE11}	36,63	0,05	11,17	0,0004	0,0038	3,7740
13,750 _{cTE11}	40,29	0,05	11,17	0,0004	0,0032	3,2425
15,000 _{cTE11}	43,96	0,06	11,17	0,0003	0,0028	2,8271
16,250 _{cTE11}	47,62	0,06	11,17	0,0003	0,0025	2,4945
17,500 _{cTE11}	51,28	0,06	11,17	0,0003	0,0022	2,2232
18,750 _{cTE11}	54,94	0,06	11,17	0,0002	0,0020	1,9982
20,000 _{cTE11}	58,61	0,06	11,17	0,0002	0,0018	1,8091
21,250 _{cTE11}	62,27	0,07	11,17	0,0002	0,0016	1,6483

Tabla 11. Atenuación para guía de onda circular llena de aire de 3 cm de radio en el modo TE02.
Elaboración propia.

CUADRO 9. Curva de atenuación para la guía de onda de 3 cm de radio en el modo TE02

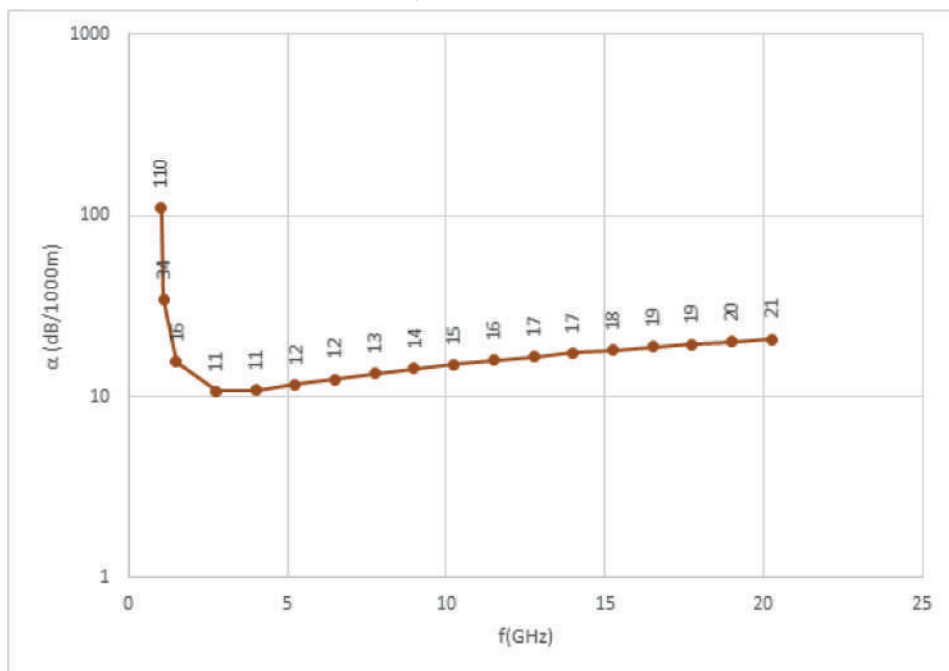


Fuente: Elaboración propia.

	f (GHz)	R _s (Ohmios/m ²)	f _{cTE01} (GHz)	(Np/m)	α (GHz)	(Ohmios/m ²)
1,010 _{cTE11}	2,96	0,01	2,93	0,0126	0,1096	109,5645
1,100 _{cTE11}	3,22	0,01	2,93	0,0039	0,0343	34,2892
1,500 _{cTE11}	4,40	0,02	2,93	0,0018	0,0155	15,5124
2,750 _{cTE11}	8,06	0,02	2,93	0,0012	0,0107	10,7248
4,000 _{cTE11}	11,72	0,03	2,93	0,0013	0,0109	10,8684
5,250 _{cTE11}	15,38	0,03	2,93	0,0013	0,0116	11,6112
6,500 _{cTE11}	19,05	0,04	2,93	0,0014	0,0125	12,4800
7,750 _{cTE11}	22,71	0,04	2,93	0,0015	0,0134	13,3629
9,000 _{cTE11}	26,37	0,04	2,93	0,0016	0,0142	14,2268
10,250 _{cTE11}	30,04	0,05	2,93	0,0017	0,0151	15,0614
11,500 _{cTE11}	33,70	0,05	2,93	0,0018	0,0159	15,8648
12,750 _{cTE11}	37,36	0,05	2,93	0,0019	0,0166	16,6377
14,000 _{cTE11}	41,03	0,05	2,93	0,0020	0,0174	17,3819
15,250 _{cTE11}	44,69	0,06	2,93	0,0021	0,0181	18,0997
16,500 _{cTE11}	48,35	0,06	2,93	0,0022	0,0188	18,7930
17,750 _{cTE11}	52,01	0,06	2,93	0,0022	0,0195	19,4639
19,000 _{cTE11}	55,68	0,06	2,93	0,0023	0,0201	20,1143
20,250 _{cTE11}	59,34	0,06	2,93	0,0024	0,0207	20,7456

Tabla 12. Atenuación para guía de onda circular llena de aire de 3 cm de radio en el modo TE11.
Elaboración propia.

CUADRO 10. Curva de atenuación para la guía de onda de 3 cm de radio en el modo TE11

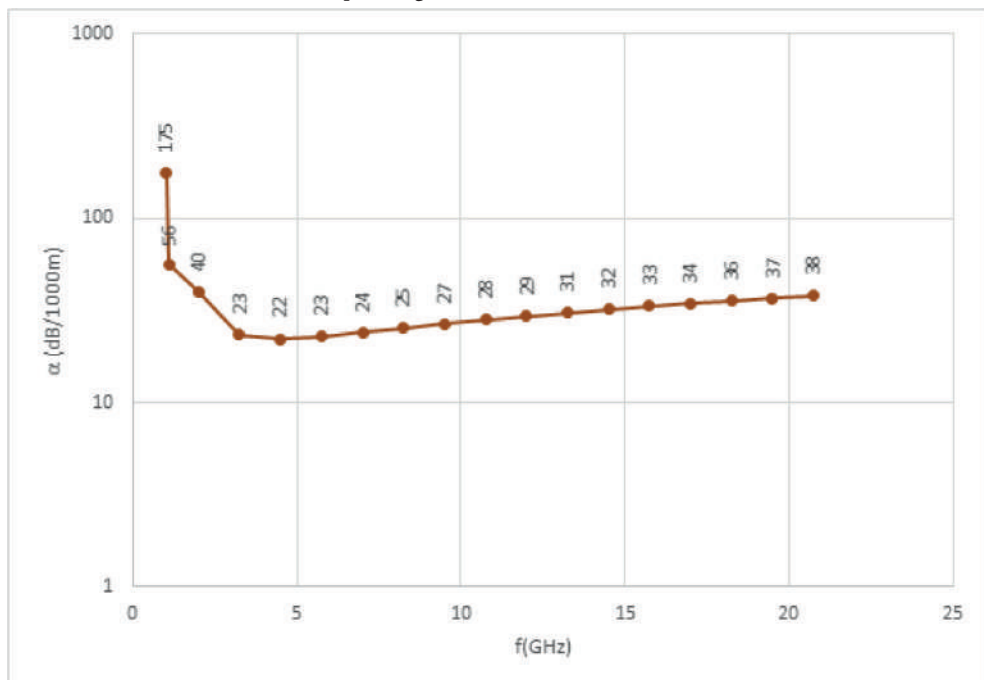


Fuente: Elaboración propia.

	f (GHz)	R_s (Ohmios/m ²)	f_{cTE01} (GHz)	(Np/m)	α (GHz)	(Ohmios/m ²)
1,001 _{cTE21}	4,87	0,02	4,86	0,0635	0,5517	551,7088
1,010 _{cTE21}	4,91	0,02	4,86	0,0201	0,1746	174,6411
1,100 _{cTE21}	5,35	0,02	4,86	0,0064	0,0560	55,9524
2,000 _{cTE11}	5,86	0,02	4,86	0,0046	0,0398	39,8465
3,250 _{cTE11}	9,52	0,03	4,86	0,0027	0,0232	23,1948
4,500 _{cTE11}	13,19	0,03	4,86	0,0025	0,0221	22,1368
5,750 _{cTE11}	16,85	0,03	4,86	0,0026	0,0229	22,8511
7,000 _{cTE11}	20,51	0,04	4,86	0,0028	0,0240	24,0421
8,250 _{cTE11}	24,18	0,04	4,86	0,0029	0,0254	25,3812
9,500 _{cTE11}	27,84	0,04	4,86	0,0031	0,0268	26,7559
10,750 _{cTE11}	31,50	0,05	4,86	0,0032	0,0281	28,1218
12,000 _{cTE11}	35,16	0,05	4,86	0,0034	0,0295	29,4606
13,250 _{cTE11}	38,83	0,05	4,86	0,0035	0,0308	30,7650
14,500 _{cTE11}	42,49	0,05	4,86	0,0037	0,0320	32,0328
15,750 _{cTE11}	46,15	0,06	4,86	0,0038	0,0333	33,2642
17,000 _{cTE11}	49,82	0,06	4,86	0,0040	0,0345	34,4604
18,250 _{cTE11}	53,48	0,06	4,86	0,0041	0,0356	35,6230
19,500 _{cTE11}	57,14	0,06	4,86	0,0042	0,0368	36,7541
20,750 _{cTE11}	60,80	0,06	4,86	0,0044	0,0379	37,8554

Tabla 13. Atenuación para guía de onda circular llena de aire de 3 cm de radio en el modo TE21.
Elaboración propia.

CUADRO 11. Curva de atenuación para la guía de onda de 3 cm de radio en el modo TE21

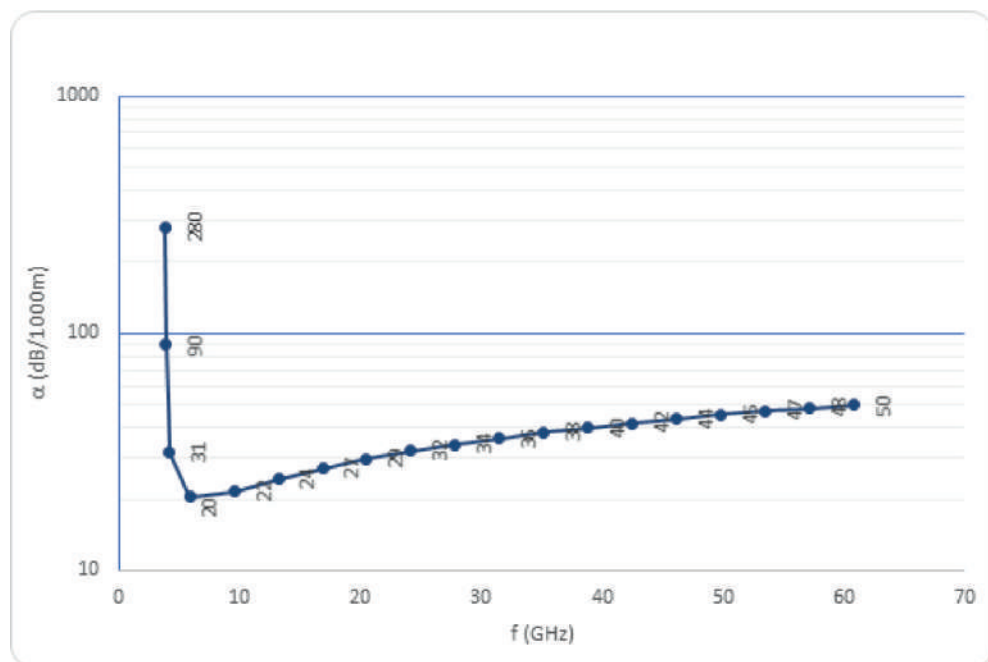


Fuente: Elaboración propia.

	f (GHz)	R _s (Ohmios/m ²)	f _{cTE01} (GHz)	(Np/m)	α (GHz)	(Ohmios/m ²)
1,001 _{cTM01}	3,83	0,02	3,83	0,0322	0,2800	279,9534
1,010 _{cTM01}	3,87	0,02	3,83	0,0103	0,0895	89,5246
1,100 _{cTM01}	4,21	0,02	3,83	0,0036	0,0315	31,4802
2,000 _{cTE11}	5,86	0,02	3,83	0,0024	0,0204	20,4321
3,250 _{cTE11}	9,52	0,03	3,83	0,0025	0,0215	21,5405
4,500 _{cTE11}	13,19	0,03	3,83	0,0028	0,0243	24,2537
5,750 _{cTE11}	16,85	0,03	3,83	0,0031	0,0269	26,9401
7,000 _{cTE11}	20,51	0,04	3,83	0,0034	0,0295	29,4649
8,250 _{cTE11}	24,18	0,04	3,83	0,0037	0,0318	31,8273
9,500 _{cTE11}	27,84	0,04	3,83	0,0039	0,0340	34,0460
10,750 _{cTE11}	31,50	0,05	3,83	0,0042	0,0361	36,1405
12,000 _{cTE11}	35,16	0,05	3,83	0,0044	0,0381	38,1275
13,250 _{cTE11}	38,83	0,05	3,83	0,0046	0,0400	40,0211
14,500 _{cTE11}	42,49	0,05	3,83	0,0048	0,0418	41,8325
15,750 _{cTE11}	46,15	0,06	3,83	0,0050	0,0436	43,5712
17,000 _{cTE11}	49,82	0,06	3,83	0,0052	0,0452	45,2450
18,250 _{cTE11}	53,48	0,06	3,83	0,0054	0,0469	46,8605
19,500 _{cTE11}	57,14	0,06	3,83	0,0056	0,0484	48,4233
20,750 _{cTE11}	60,80	0,06	3,83	0,0057	0,0499	49,9380

Tabla 14. Atenuación para guía de onda circular llena de aire de 3 cm de radio en el modo TM01.
Elaboración propia.

CUADRO 12. Curva de atenuación para la guía de onda de 3 cm de radio en el modo TM01

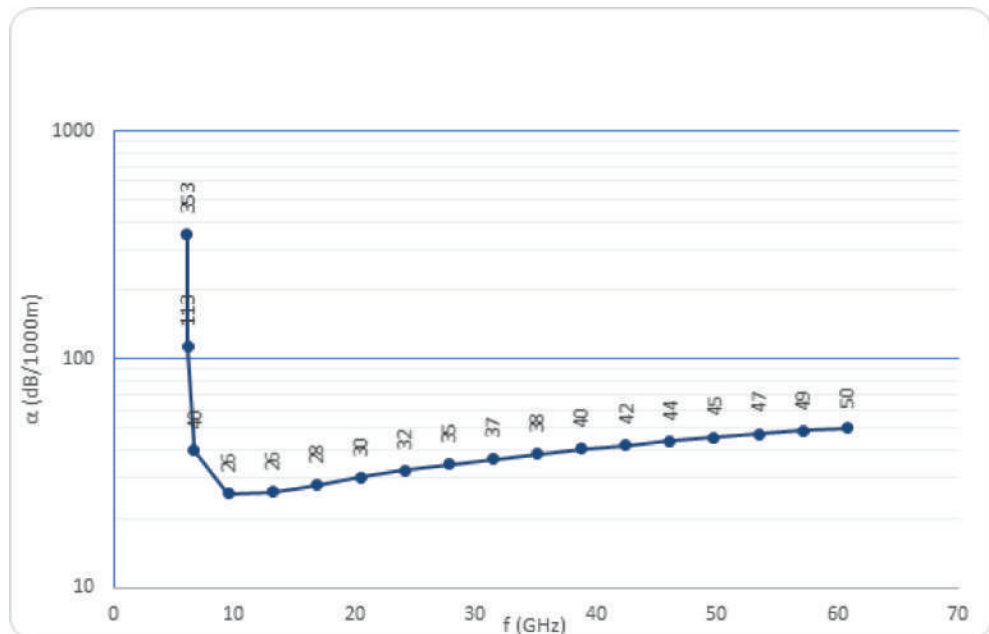


Fuente: Elaboración propia.

	f (GHz)	R _s (Ohmios/m ²)	f _{cTE01} (GHz)	(Np/m)	α (GHz)	(Ohmios/m ²)
1,001 _{cTM11}	6,10	0,02	6,10	0,0407	0,3534	353,3774
1,010 _{cTM11}	6,16	0,02	6,10	0,0130	0,1130	113,0044
1,100 _{cTM11}	6,71	0,02	6,10	0,0046	0,0397	39,7366
3,250 _{cTE11}	9,52	0,03	6,10	0,0030	0,0257	25,6800
4,500 _{cTE11}	13,19	0,03	6,10	0,0030	0,0262	26,1772
5,750 _{cTE11}	16,85	0,03	6,10	0,0032	0,0281	28,1439
7,000 _{cTE11}	20,51	0,04	6,10	0,0035	0,0303	30,3183
8,250 _{cTE11}	24,18	0,04	6,10	0,0037	0,0325	32,4762
9,500 _{cTE11}	27,84	0,04	6,10	0,0040	0,0346	34,5622
10,750 _{cTE11}	31,50	0,05	6,10	0,0042	0,0366	36,5645
12,000 _{cTE11}	35,16	0,05	6,10	0,0044	0,0385	38,4842
13,250 _{cTE11}	38,83	0,05	6,10	0,0046	0,0403	40,3267
14,500 _{cTE11}	42,49	0,05	6,10	0,0048	0,0421	42,0983
15,750 _{cTE11}	46,15	0,06	6,10	0,0050	0,0438	43,8052
17,000 _{cTE11}	49,82	0,06	6,10	0,0052	0,0455	45,4531
18,250 _{cTE11}	53,48	0,06	6,10	0,0054	0,0470	47,0472
19,500 _{cTE11}	57,14	0,06	6,10	0,0056	0,0486	48,5920
20,750 _{cTE11}	60,80	0,06	6,10	0,0058	0,0501	50,0916

Tabla 15. Atenuación para guía de onda circular llena de aire de 3 cm de radio en el modo TM11.
Elaboración propia.

CUADRO 13. Curva de atenuación para la guía de onda de 3 cm de radio en el modo TM11

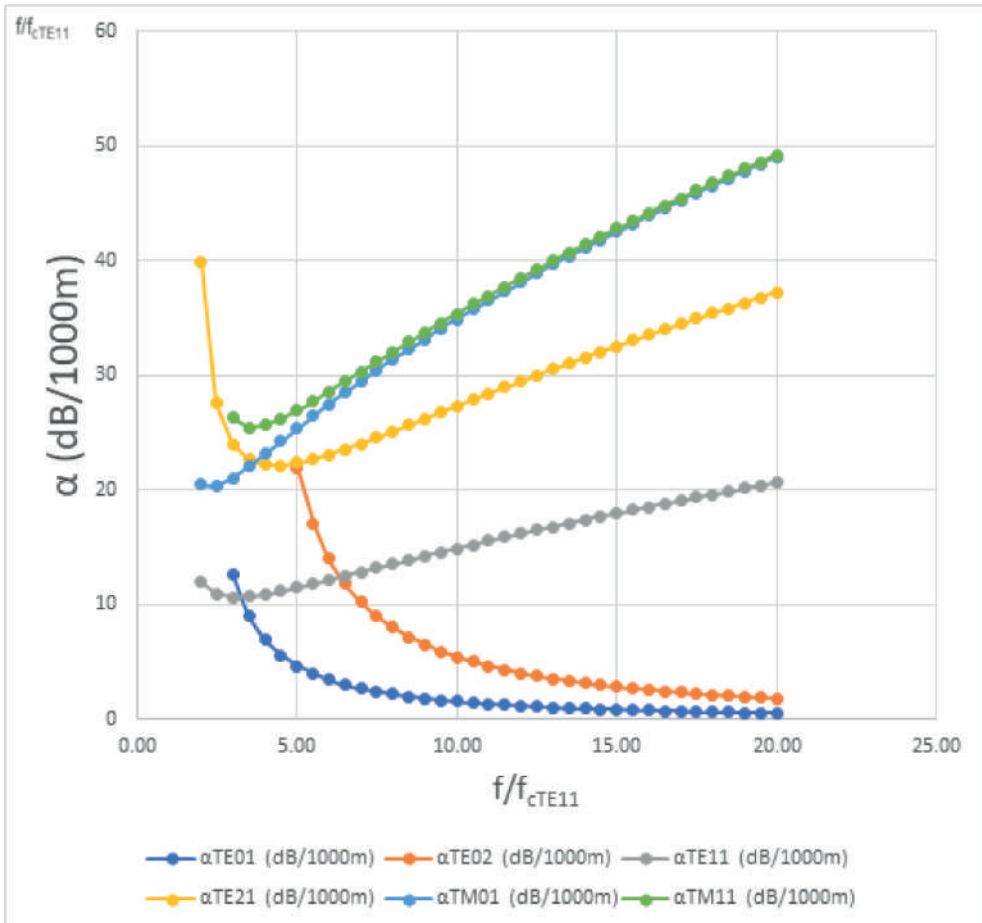


Fuente: Elaboración propia.

f/f_{cTE11}	α_{TE01} (dB/1000m)	α_{TE02} (dB/1000m)	α_{TE11} (dB/1000m)	α_{TE21} (dB/1000m)	α_{TM01} (dB/1000m)	α_{TM11} (dB/1000m)
2.00			11.9422	39.8465	20.4321	
2.50			10.9175	27.5390	20.2887	
3.00	12.6619		10.6433	24.0279	21.0504	26.3110
3.50	9.0012		10.6805	22.6726	22.0628	25.4584
4.00	6.9362		10.8684	22.1888	23.1512	25.6234
4.50	5.5989		11.1356	22.1368	24.2537	26.1772
5.00	4.6614	21.9430	11.4462	22.3238	25.3451	26.9065
5.50	3.9689	17.0775	11.7805	22.6520	26.4148	27.7202
6.00	3.4377	13.9921	12.1274	23.0672	27.4586	28.5740
6.50	3.0184	11.8317	12.4800	23.5373	28.4752	29.4444
7.00	2.6799	10.2246	12.8342	24.0421	29.4649	30.3183
7.50	2.4014	8.9790	13.1873	24.5687	30.4284	31.1881
8.00	2.1689	7.9840	13.5378	25.1084	31.3669	32.0495
8.50	1.9722	7.1709	13.8845	25.6553	32.2819	32.8998
9.00	1.8040	6.4941	14.2268	26.2054	33.1745	33.7376
9.50	1.6587	5.9223	14.5644	26.7559	34.0460	34.5622
10.00	1.5321	5.4332	14.8970	27.3047	34.8977	35.3732
10.50	1.4210	5.0103	15.2246	27.8504	35.7307	36.1708
11.00	1.3228	4.6415	15.5472	28.3920	36.5460	36.9549
11.50	1.2355	4.3171	15.8648	28.9289	37.3447	37.7259
12.00	1.1575	4.0299	16.1775	29.4606	38.1275	38.4842
12.50	1.0874	3.7740	16.4855	29.9866	38.8955	39.2301
13.00	1.0242	3.5447	16.7887	30.5070	39.6493	39.9641
13.50	0.9669	3.3382	17.0875	31.0215	40.3896	40.6865
14.00	0.9148	3.1514	17.3819	31.5301	41.1171	41.3977
14.50	0.8672	2.9818	17.6721	32.0328	41.8325	42.0983
15.00	0.8237	2.8271	17.9581	32.5297	42.5362	42.7885
15.50	0.7836	2.6855	18.2402	33.0208	43.2288	43.4687
16.00	0.7468	2.5556	18.5185	33.5062	43.9109	44.1393
16.50	0.7127	2.4359	18.7930	33.9860	44.5828	44.8007
17.00	0.6812	2.3255	19.0640	34.4604	45.2450	45.4531
17.50	0.6519	2.2232	19.3315	34.9294	45.8978	46.0969
18.00	0.6247	2.1283	19.5956	35.3931	46.5418	46.7325
18.50	0.5993	2.0401	19.8565	35.8517	47.1771	47.3600
19.00	0.5756	1.9578	20.1143	36.3053	47.8042	47.9798
19.50	0.5535	1.8810	20.3690	36.7541	48.4233	48.5920
20.00	0.5327	1.8091	20.6208	37.1980	49.0347	49.1971

Tabla 16. Comparación entre las atenuaciones de diversos modos de transmisión TE y TM para guía de onda circular llena de aire de 3 cm de radio. Elaboración propia.

CUADRO 14. Curva de atenuación para la guía de onda de 3 cm de radio



Fuente: Elaboración propia.

DISCUSIÓN

Al comparar las gráficas resultantes de los cálculos mostradas por Balanis [4], en todos los casos hay coincidencia, a excepción de la guía de onda circular TM21.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J.D. Kraus y D.A. Fleis, *Electromagnetismo: con aplicaciones*. Ciudad de México, México: McGraw-Hill Interamericana, 2000.
- [2] M. Sadiku, *Elementos de electromagnetismo*. Oxford University Press Inc, Nueva York, USA: Editorial Alfa Omega para América Latina, 2000.
- [3] R E Collin, *Foundations for microwave engineering*. Wiley-IEEE Press, Nueva York, USA: Editorial John Wiley & Sons, Inc., 2001.

- [4] C. A. Balanis, «Circular waveguides 1». *Int. J. Electron* 1996.5 (1996), pp. 551-564.
- [5] C. S. Lee, S. W. Lee, and S. L. Chuang, «Plot of modal field distribution in rectangular and circular waveguides, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* MTT-33(3):271–274 (marzo 1985).
- [6] S. Ramo, J. R. Whinnery, and T. Van Duzer, *Fields and Waves in Communication Electronics*, Nueva York, USA: Wiley, 1965.
- [7] R. Gómez Martín, *Campo Electromagnético: Propagación y Radiación*. Granada, España: Univ. de Granada, 1984 [En línea]. Disponible en: <http://maxwell.ugr.es/innov/visua0506/librorgomez/librorgomez.htm>