

MEDICION DE LA RESISTENCIA DE TIERRA DE GRANDES ELECTRODOS.

Por: Ing. Ramón Rivero de la Torre

Introducción.

Un gran electrodo lo forman extensas redes de varillas y cables construidas generalmente en subestaciones industriales y de potencia de gran capacidad.

La distancia **L** a la que se hincará el electrodo de corriente **C2** es aproximadamente **4D**, siendo **D** el diámetro equivalente de la superficie de la red de tierras; generalmente las mallas son rectangulares, por lo que:

$A_r = l \times a$; donde:

A_r = Area de la red; l = Largo; a = ancho

Luego: $A_r = A_c$, (área de un círculo equivalente)

$$l \times a = \frac{\pi D^2}{4} \therefore D = 2 \sqrt{\frac{l \times a}{\pi}}$$

Siendo la distancia **L** igual a: $L = 4 D$

Pudiendo ser **L** menor o mayor a **4D**. En la práctica se recomienda encontrar la parte plana de la curva para evitar cometer errores.

Guía de localización aproximada de los electrodos **P2** y **C2**, (ver tabla 1):

Diagonal de la malla en m	Distancia a P2 en m	Distancia a C2 en m	Diagonal de la malla en m	Distancia a P2 en m	Distancia a C2 en m
0	0	0	6.0	42	66
0.6	12	21	12	60	96
1.2	18	30	18	72	117
1.8	24	37.5	24	84	135
2.4	27	42	30	91	150
3.0	30	48	36	102	165
3.6	31.5	51	42	109.5	177
4.2	36	57	48	120	192
4.8	37.5	60	54	126	204
5.4	39	63	60	132	213

TABLA 1

NOTA:

EN TODAS LAS MEDICIONES DE LOS ELECTRODOS GRANDES NO SE DEBEN PUENTEAR **C1** Y **P1** YA QUE NORMALMENTE LA MEDICIÓN ES DEL ORDEN DE LOS MILIOHMS, Y AFECTARA LA MEDICION.

Algunos Metodos Utilizados

1. Método de caída de potencial:

Es el método usado en la medición de la resistencia de tierra de pequeños electrodos. Se recomienda utilizarlo cuando la distancia entre electrodos **C1** y **C2** sea hasta de algunos cientos de metros por el trabajo que hay que realizar para extender los cables y recogerlos.

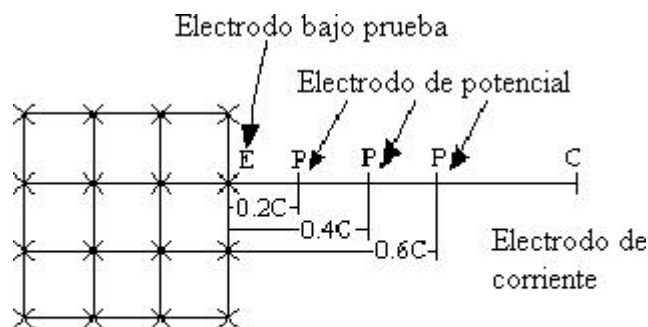
En estos sistemas de tierra conviene trazar la curva **R - D** (resistencia-distancia), hasta obtener la parte plana y a los demás electrodos tomar mediciones al 61.8% de **C1-C2**.

2. Método de la pendiente:

Se utiliza en sistemas de grandes electrodos o donde la posición del centro geométrico de la malla es desconocido o se encuentra debajo de un edificio.

También se utiliza donde el área disponible para colocar los electrodos de prueba es restringida. Se puede intentar este método si otros han sido insatisfactorios.

El equipo se instala como se indica en la figura 2.



El electrodo C se coloca a 50 m o más de E.

No se puentean C1 y P1 del terrómetro.

FIGURA 2.

Los pasos a seguir son:

1. Escoja un electrodo de la malla (cualquiera) (**E**).
2. Coloque el electrodo **C2** a una distancia de 2 a 3 veces la diagonal de la malla.
3. Coloque el electrodo **P2** en varios puntos **0.2C**, **0.4C** y **0.6C**.
4. Mida la resistencia de la tierra en cada punto de **P2**; si los valores son **R1**, **R2** y **R3** respectivamente, calcule:

$$\mu = \frac{R_3 - R_2}{R_2 - R_1}$$

5. Valor conocido como μ y representa el cambio de pendiente de la curva resistencia – distancia.
6. Vea la tabla n° 3 y encuentre el valor de **PT / C** para μ .
7. Como la distancia de **C2** es conocida, calcule **PT** y coloque un electrodo de potencial a esta distancia de **E**.
8. Mida la resistencia real de tierra, la cual debe ser la del electrodo bajo prueba **E**.

9. Si el valor de μ es mayor que en la tabla n° 3 habrá que colocar el electrodo C2 a mayor distancia y volver a repetir el proceso.
10. Se pueden realizar más pruebas a diferentes distancias y graficar los resultados como en la figura 4.
11. A lo máximo se toman 6 lecturas.

TABLA 3
Valores de PT / C para valores de μ

μ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.40	0.6432	6431	6429	6428	6426	6425	6423	6422	6420	6419
0.41	0.6418	6416	6415	6413	6412	6410	6409	6408	6406	6405
0.42	0.6403	6402	6400	6399	6397	6396	6395	6393	6392	6390
0.43	0.6389	6387	6386	6384	6383	6382	6380	6379	6377	6376
0.44	0.6374	6373	6372	6370	6369	6367	6366	6364	6363	6361
0.45	0.6360	6359	6357	6356	6354	6353	6351	6350	6348	6347
0.46	0.6346	6344	6343	6341	6340	6338	6337	6336	6334	6333
0.47	0.6331	6330	6328	6327	6325	6324	6323	6321	6320	6318
0.48	0.6317	6315	6314	6312	6311	6310	6308	6307	6305	6304
0.49	0.6302	6301	6300	6298	6297	6295	6294	6292	6291	6289
0.50	0.6288	6286	6285	6283	6282	6280	6279	6277	6276	6274
0.51	0.6273	6271	6270	6268	6267	6265	6264	6262	6261	6259
0.52	0.6258	6256	6255	6253	6252	6252	6248	6247	6245	6244
0.53	0.6242	6241	6239	6238	6236	6235	6233	6232	6230	6229
0.54	0.6227	6226	6224	6223	6221	6220	6218	6217	6215	6214
0.55	0.6212	6210	6209	6207	6206	6204	6203	6201	6200	6198
0.56	0.6197	6195	6194	6192	6191	6189	6188	6186	6185	6183
0.57	0.6182	6180	6179	6177	6176	9174	6172	6171	6169	6168
0.58	0.6166	6165	6163	6162	6160	6159	6157	6156	6154	6153
0.59	0.6151	6150	6148	6147	6145	6144	6142	6141	6139	6138
0.60	0.6136	6134	6133	6131	6130	6128	6126	6125	6123	6121
0.61	0.6120	6118	6117	6115	6113	6112	6110	6108	6107	6105
0.62	0.6104	6102	6100	6099	6097	6096	6094	6092	6091	6089
0.63	0.6087	6086	6084	6083	6081	6079	6076	6076	6074	6073
0.64	0.6071	6070	6068	6066	6065	6063	6061	6060	6058	6067
0.65	0.6055	6053	6052	6050	6049	6047	6045	6044	6042	6040
0.66	0.6039	6037	6036	6034	6032	6031	6029	6027	6026	6024
0.67	0.6023	6021	6019	6018	6016	6015	6013	6011	6010	6008
0.68	0.6006	6005	6003	6002	6000	5998	5997	5995	5993	5992
0.69	0.5990	5989	5987	5985	5984	5982	5980	5979	5977	5976
0.70	0.5974	5973	5971	5969	5967	5965	5964	5962	5960	5959
0.71	0.5957	5955	5953	5952	5950	5948	5947	5945	5943	5942
0.72	0.5940	5938	5936	5935	5933	5931	5930	5928	5926	5924
0.73	0.5923	5921	5920	5918	5916	5914	5912	5911	5909	5907
0.74	0.5906	5904	5902	5900	5899	5897	5895	5894	5892	5890
0.75	0.5889	5887	5885	5883	5882	5880	5878	5877	5875	5873
0.76	0.5871	5870	5868	5866	5865	5863	5861	5859	5858	5856
0.77	0.5854	5853	5851	5849	5847	5846	5844	5842	5841	5839
0.78	0.5837	5835	5834	5832	5830	5829	5827	5825	5824	5822

TABLA 3
Valores de PT / C para valores de μ

μ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.79	0.5820	5818	5817	5815	5813	5812	5810	5808	5806	5805
0.80	0.5803	5801	5799	5797	5796	5794	5792	5790	5788	5786
0.81	0.5785	5783	5781	5779	5777	5775	5773	5772	5770	5768
0.82	0.5766	5764	5762	5760	5759	5757	5755	5753	5751	5749
0.83	0.5748	5746	5744	5742	5740	5738	5736	5735	5733	5731
0.84	0.5729	5727	5725	5723	5722	5720	5718	5716	5714	5712
0.85	0.5711	5709	5707	5705	5702	5701	5699	5698	5696	5691
0.86	0.5692	5690	5688	5686	5685	5683	5681	5679	5677	5675
0.87	0.5674	5672	5670	5668	5666	5664	5662	5661	5659	5657
0.88	0.5655	5653	5651	5650	5648	5646	5644	5642	5640	5638
0.89	0.5637	5635	5633	5631	5629	5627	5625	5624	5622	5620
0.90	0.5618	5616	5614	5612	5610	5608	5606	5604	5602	5600
0.91	0.5598	5596	5594	5592	5590	5588	5586	5584	5582	5580
0.92	0.5578	5576	5574	5572	5570	5568	8865	5563	5561	5559
0.93	0.5557	5555	5553	5551	5549	5547	5545	5543	5541	5539
0.94	0.5537	5535	5533	5531	5529	5527	5525	5523	5521	5519
0.95	0.5517	5515	5513	5511	5509	5507	5505	5503	5501	5499
0.96	0.5497	5495	5493	5491	5489	5487	5485	5483	5481	5479
0.97	0.5477	5475	5473	5471	5469	5467	5464	5462	5460	5458
0.98	0.5456	5454	5452	5450	5448	5446	5444	5442	5440	5438
0.99	0.5436	5434	5432	5430	5428	5426	5424	5422	5420	5418
1.00	0.5416	5414	5412	5409	5407	5405	5403	5400	5398	5396
1.01	0.5394	5391	5389	5387	5385	5383	5380	5378	5376	5374
1.02	0.5371	5369	5367	5365	5362	5360	5358	5356	5354	5351
1.03	0.5349	5347	5345	5344	5340	5338	5336	5333	5331	5329
1.04	0.5327	5325	5322	5320	5318	5316	5313	5311	5309	5307
1.05	0.5305	5302	5300	5298	5296	5293	5291	5289	5287	5284
1.06	0.5252	5280	5278	5276	5273	5271	5269	5267	5264	5262
1.07	0.5260	5258	5255	5253	5251	5249	5247	5244	5242	5240
1.08	0.5238	5235	5233	5231	5229	5229	5224	5222	5219	5217
1.09	0.5215	5213	5211	5209	5206	5204	5202	5200	5197	5195
1.10	0.5193	5190	5188	5185	5183	5180	5178	5175	5173	5170
1.11	0.5168	5165	5163	5160	5158	5155	5153	5150	5148	5145
1.12	0.5143	5140	5137	5135	5132	5130	5127	5125	5122	5120
1.13	0.5118	5115	5113	5110	5108	5105	5103	5100	5098	5095
1.14	0.5093	5090	5088	5085	5083	5080	5078	5075	5073	5070
1.15	0.5068	5065	5062	5060	5057	5055	5052	5050	5047	5045
1.16	0.5042	5040	5037	5035	5032	5030	5027	5025	5022	5020
1.17	0.5017	5015	5012	5010	5007	5005	5002	5000	4997	4995
1.18	0.4992	4990	4987	4985	4982	4980	4977	4975	4972	4970
1.19	0.4967	4965	4962	4960	4957	4955	4952	4950	4947	4945
1.20	0.4942	4939	4936	4933	4930	4928	4925	4922	4919	4916
1.21	0.4913	4910	4907	4904	4901	4899	4896	4893	4890	4887
1.22	0.4884	4881	4878	4875	4872	4870	4867	4864	4861	4858

TABLA 3
Valores de PT / C para valores de μ

μ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.23	0.4855	4852	4849	4846	4843	4841	4838	4835	4832	4829
1.24	0.4826	4823	4820	4817	4814	4812	4809	4806	4803	4800
1.25	0.4797	4794	4791	4788	4785	4783	4780	4777	4774	4771
1.26	0.4768	4765	4762	4759	4756	4754	4751	4748	4745	4742
1.27	0.4739	4736	4733	4730	4727	4725	4722	4719	4716	4713
1.28	0.4710	4707	4704	4701	4698	4696	4693	4690	4687	4684
1.29	0.4681	4678	4675	4672	4669	4667	4664	4661	4658	4655
1.30	0.4652	4649	4645	4642	4638	4635	4631	4628	4625	4621
1.31	0.4618	4614	4611	4607	4604	4601	4597	4594	4590	4586
1.32	0.4583	4580	4577	4573	4570	4566	4563	4559	4556	4553
1.33	0.4549	4546	4542	4539	4535	4532	4529	4525	4522	4518
1.34	0.4515	4511	4508	4505	4501	4498	4494	4491	4487	4484
1.35	0.4481	4477	4474	4470	4467	4463	4460	4457	4453	4450
1.36	0.4446	4443	4439	4436	4432	4429	4426	4422	4419	4415
1.37	0.4412	4408	4405	4402	4398	4395	4391	4388	4384	4381
1.38	0.4378	4374	4371	4367	4364	4360	4357	4354	4350	4347
1.39	0.4343	4340	4336	4333	4330	4326	4323	4319	4316	4312
1.40	0.4309	4305	4301	4296	4292	4288	4284	4280	4275	4271
1.41	0.4267	4263	4258	4254	4250	4246	4242	4237	4233	4229
1.42	0.4225	4221	4216	4212	4208	4204	4200	4195	4191	4187
1.43	0.4183	4178	4174	4170	4166	4162	4157	4153	4149	4145
1.44	0.4141	4136	4132	4128	4124	4120	4115	4111	4107	4103
1.45	0.4099	4094	4090	4086	4082	4077	4073	4069	4065	4061
1.46	0.4056	4052	4048	4044	4040	4035	4031	4027	4023	4018
1.47	0.4014	4010	4005	4001	3997	3993	3989	3985	3980	3976
1.48	0.3972	3968	3964	3959	3955	3951	3947	3943	3938	3934
1.49	0.3930	3926	3921	3917	3913	3909	3905	3900	3896	3892
1.50	0.3888	3883	3878	3874	3869	3864	3859	3854	3850	3845
1.51	0.3840	3835	3830	3825	3820	3816	3811	3806	3801	3796
1.52	0.3791	3786	3781	3776	3771	3766	3760	3755	3750	3745
1.53	0.3740	3735	3730	3724	3719	3714	3709	3704	3698	3693
1.54	0.3688	3683	3677	3672	3667	3662	3656	3651	3646	3640
1.55	0.3635	3630	3624	3619	3613	3608	3602	3597	3591	3586
1.56	0.3580	3574	3569	3563	3557	3552	3546	3540	3534	3528
1.57	0.3523	3517	3511	3506	3500	3494	3488	3482	3477	3471
1.58	0.3465	3459	3453	3447	3441	3435	3429	3423	3417	3411
1.59	0.3405	3399	3393	3386	3380	3374	3368	3362	3355	3349

Nota: Todos los valores indicados en la tabla llevan al principio punto decimal.

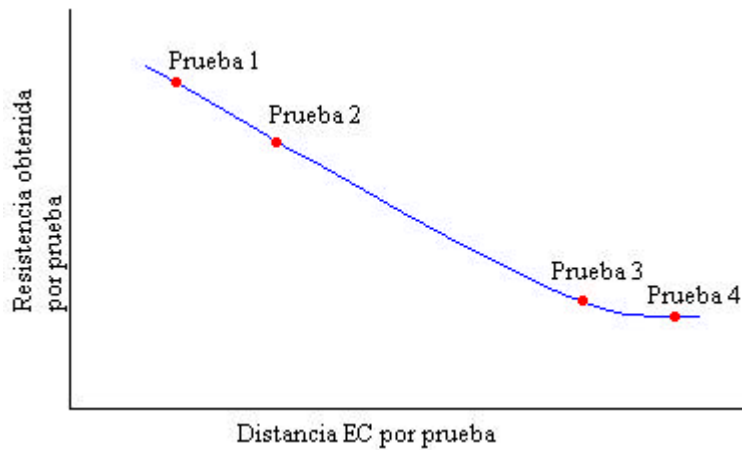


FIGURA 4

La curva indica que las distancias 1 y 2 no fueron lo suficientemente largas mientras que las 3 y 4 sí son adecuadas para obtener un valor más correcto. Este método tiene un margen de error del 5 % aproximadamente.

3.- Método de la intersección de curvas.

Cuando se tienen grandes subestaciones en donde la distancia del electrodo bajo prueba y el de corriente es de varios cientos de metros (cerca de mil metros a más), se aplica este método, en el cual no es necesario usar grandes longitudes de cables, ya que el trabajo de cableado de los electrodos es muy laborioso.

El principio básico es obtener curvas de resistencia de tierra para distintas longitudes de C y asumir un número sucesivo de posiciones del centro eléctrico del sistema lo que producirá la intersección de curvas que dará la resistencia de tierra y la posición del centro eléctrico de la malla.

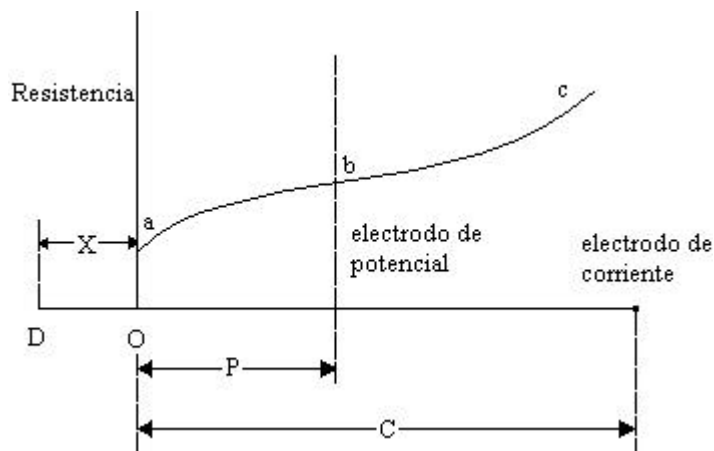


FIGURA 5

Supóngase en la figura 5 que todas las mediciones son hechas arbitrariamente a partir del punto O. Se miden las distancia **C** y la **P** a partir de este punto y se obtiene una curva como la **abc** en donde se observan los valores de **R** contra los de **P**. Se trazan las curvas a varias longitudes de **C**.

Supóngase que el centro eléctrico del gran electrodo está actualmente en **D** a una distancia **X** de **O**. La distancia del centro eléctrico al electrodo **C** es $(C + X)$ y la resistencia se obtiene cuando el electrodo **P** está a una distancia de $0.618 (C + X)$. Esto indica que el valor de **P** medido de **O**, es $0.618 (C + X) - X$. Dando valores a **X** se pueden calcular los valores correspondientes de **P** para así leer el valor de la resistencia en la curva. La resistencia se traza contra los valores de **X** en otra curva; cuando este proceso se repite para diferentes valores de **C**, es obtenida otra curva de resistencia contra **X**; las dos curvas se cruzarán siendo este punto el valor de la resistencia. Este procedimiento puede ser repetido para otro valor de **C** como un chequeo.

Ejemplo:

PRUEBA A UN GRAN ELECTRODO. (SUBESTACION DE CENTRAL GENERADORA).

Usando el método de la intersección de curvas fueron realizadas pruebas en una subestación de 800' x 800'. Se tomó un electrodo aproximadamente a la mitad de un lado de la malla y los electrodos de corriente fueron colocados a 400, 600, 800 y 1000 pies del electrodo bajo prueba. Esto se indica en la figura 6. La intersección de curvas está indicada en la figura 7 y da el valor final de la resistencia del electrodo bajo prueba. Este método tiene un porcentaje mayor de error que el de la pendiente.

El propósito de este método es reducir la distancia al electrodo de corriente para lograr medir la resistencia de tierra de un gran electrodo. Sin embargo hay ciertos límites acerca de la distancia del electrodo de corriente.

Para complementar el método, si el gran electrodo es de forma cuadrada, la mínima distancia del electrodo de corriente no debe de ser menor que la de una lado de la malla. Por otro lado, la máxima distancia no debe ser muy grande ya que la curva resultante se vuelve asintótica, por lo que dicha distancia no debe exceder el doble del lado de la malla.

Para otra forma de malla, es necesario establecer los valores mínimos y máximos de la distancia del electrodo de corriente.

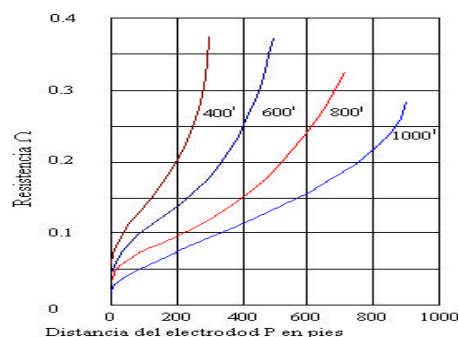


FIGURA 6

Curvas de resistencia de tierra de una subestación

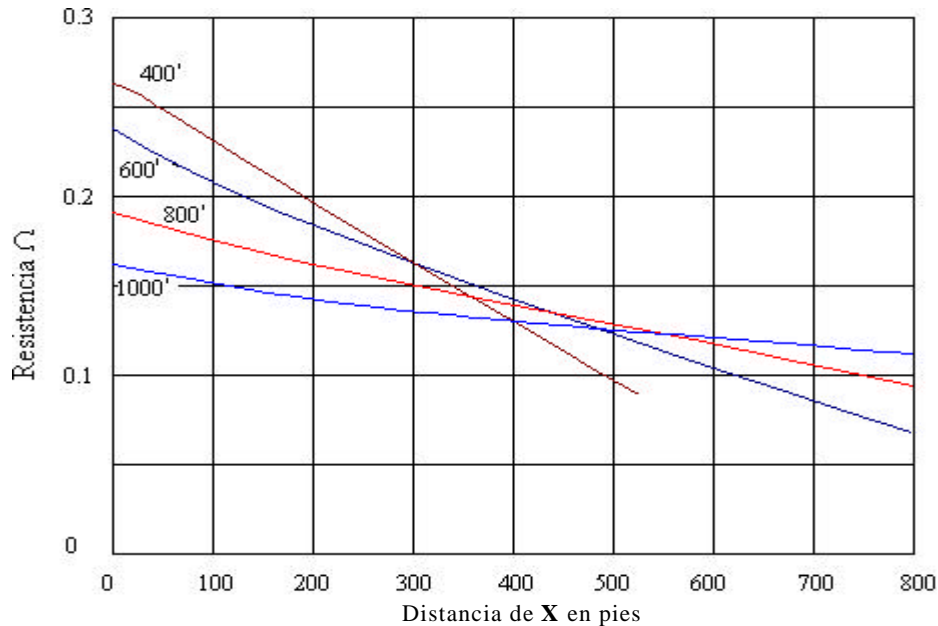


FIGURA 7

Intersección de las curvas X-R en donde la resistencia de tierra es de 0.146 Ω

BIBLIOGRAFIA

- 1.- ANSI-IEEE STD 80-1986 IEEE GUIDE FOR SAFETY IN AC SUBSTATION GROUNDING.
- 2.- CURSO SISTEMAS DE TIERRAY COORDINACION DE AISLAMIENTO EN LA CD. DE TAMPICO, TAMAULIPAS IMPARTIDO POR EL DR. RAUL VELAZQUEZ SANCHEZ.
- 3.- CURSO DE SUBESTACIONES, SISTEMAS DE TIERRA Y SOBRETENSIONES EN LA CD. DE MATEHUALA, S.L.P., IMPARTIDO POR EL DR. VICTOR MANUEL CABRERA MORELOS.
- 4.- CURSO SOBRE PUESTA A TIERRA, SOBRETENSIONES Y APLICACIÓN DE APARTARRAYOS EN LA CD. DE TORREON, COAHUILA, IMPARTIDO POR EL DR. VICTOR MANUEL CABRERA.
- 5.- LA PUESTA A TIERRA DE INSTALACIONES ELECTRICAS DEL ING. ROGELIO GARCIA MARQUEZ.
- 6.- INSTRUCTIVO DEL MEGGER DE TIERRA DIGITAL EARTH TESTERS MEGGER DET 3/2, DET 5/2 Y DET 5/2D.
- 7.- GETTING DOWN TO EARTH POR BIDDLE INSTRUMENTS.
- 8.- INTERNET SISTEMAS DE TIERRA.
- 9.- NORMA OFICIAL MEXICANA 1999
- 10.-CURSO DE SUBESTACIONES Y SISTEMAS DE TIERRA DE LAS UVIES EN TAMPICO.

11.-81-1983 IEEE GUIDE FOR MEASURING EARTH RESISTIVITY, GROUND
MPEDANCE, AND EARTH SURFACE POTENTIALS OF A GROUND SYSTEM
PART 1 NORMAL MEASUREMENTS 1983.

Ing. Ramón Rivero de la Torre.

E-mail: rivero@interxcable.net.mx

Tel: (833) 215-37-87

Instituto Tecnológico de Cd. Madero, Tams.