

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
Calle 24 y 25 y 26 y 27 y 28 y 29 y 30 y 31 y 32 y 33 y 34 y 35 y 36 y 37 y 38 y 39 y 40 y 41 y 42 y 43 y 44 y 45 y 46 y 47 y 48 y 49 y 50 y 51 y 52 y 53 y 54 y 55 y 56 y 57 y 58 y 59 y 60 y 61 y 62 y 63 y 64 y 65 y 66 y 67 y 68 y 69 y 70 y 71 y 72 y 73 y 74 y 75 y 76 y 77 y 78 y 79 y 80 y 81 y 82 y 83 y 84 y 85 y 86 y 87 y 88 y 89 y 90 y 91 y 92 y 93 y 94 y 95 y 96 y 97 y 98 y 99 y 100 y 101 y 102 y 103 y 104 y 105 y 106 y 107 y 108 y 109 y 110 y 111 y 112 y 113 y 114 y 115 y 116 y 117 y 118 y 119 y 120 y 121 y 122 y 123 y 124 y 125 y 126 y 127 y 128 y 129 y 130 y 131 y 132 y 133 y 134 y 135 y 136 y 137 y 138 y 139 y 140 y 141 y 142 y 143 y 144 y 145 y 146 y 147 y 148 y 149 y 150 y 151 y 152 y 153 y 154 y 155 y 156 y 157 y 158 y 159 y 160 y 161 y 162 y 163 y 164 y 165 y 166 y 167 y 168 y 169 y 170 y 171 y 172 y 173 y 174 y 175 y 176 y 177 y 178 y 179 y 180 y 181 y 182 y 183 y 184 y 185 y 186 y 187 y 188 y 189 y 190 y 191 y 192 y 193 y 194 y 195 y 196 y 197 y 198 y 199 y 200 y 201 y 202 y 203 y 204 y 205 y 206 y 207 y 208 y 209 y 210 y 211 y 212 y 213 y 214 y 215 y 216 y 217 y 218 y 219 y 220 y 221 y 222 y 223 y 224 y 225 y 226 y 227 y 228 y 229 y 230 y 231 y 232 y 233 y 234 y 235 y 236 y 237 y 238 y 239 y 240 y 241 y 242 y 243 y 244 y 245 y 246 y 247 y 248 y 249 y 250 y 251 y 252 y 253 y 254 y 255 y 256 y 257 y 258 y 259 y 260 y 261 y 262 y 263 y 264 y 265 y 266 y 267 y 268 y 269 y 270 y 271 y 272 y 273 y 274 y 275 y 276 y 277 y 278 y 279 y 280 y 281 y 282 y 283 y 284 y 285 y 286 y 287 y 288 y 289 y 290 y 291 y 292 y 293 y 294 y 295 y 296 y 297 y 298 y 299 y 300 y 301 y 302 y 303 y 304 y 305 y 306 y 307 y 308 y 309 y 310 y 311 y 312 y 313 y 314 y 315 y 316 y 317 y 318 y 319 y 320 y 321 y 322 y 323 y 324 y 325 y 326 y 327 y 328 y 329 y 330 y 331 y 332 y 333 y 334 y 335 y 336 y 337 y 338 y 339 y 340 y 341 y 342 y 343 y 344 y 345 y 346 y 347 y 348 y 349 y 350 y 351 y 352 y 353 y 354 y 355 y 356 y 357 y 358 y 359 y 360 y 361 y 362 y 363 y 364 y 365 y 366 y 367 y 368 y 369 y 370 y 371 y 372 y 373 y 374 y 375 y 376 y 377 y 378 y 379 y 380 y 381 y 382 y 383 y 384 y 385 y 386 y 387 y 388 y 389 y 390 y 391 y 392 y 393 y 394 y 395 y 396 y 397 y 398 y 399 y 400 y 401 y 402 y 403 y 404 y 405 y 406 y 407 y 408 y 409 y 410 y 411 y 412 y 413 y 414 y 415 y 416 y 417 y 418 y 419 y 420 y 421 y 422 y 423 y 424 y 425 y 426 y 427 y 428 y 429 y 430 y 431 y 432 y 433 y 434 y 435 y 436 y 437 y 438 y 439 y 440 y 441 y 442 y 443 y 444 y 445 y 446 y 447 y 448 y 449 y 450 y 451 y 452 y 453 y 454 y 455 y 456 y 457 y 458 y 459 y 460 y 461 y 462 y 463 y 464 y 465 y 466 y 467 y 468 y 469 y 470 y 471 y 472 y 473 y 474 y 475 y 476 y 477 y 478 y 479 y 480 y 481 y 482 y 483 y 484 y 485 y 486 y 487 y 488 y 489 y 490 y 491 y 492 y 493 y 494 y 495 y 496 y 497 y 498 y 499 y 500 y 501 y 502 y 503 y 504 y 505 y 506 y 507 y 508 y 509 y 510 y 511 y 512 y 513 y 514 y 515 y 516 y 517 y 518 y 519 y 520 y 521 y 522 y 523 y 524 y 525 y 526 y 527 y 528 y 529 y 530 y 531 y 532 y 533 y 534 y 535 y 536 y 537 y 538 y 539 y 540 y 541 y 542 y 543 y 544 y 545 y 546 y 547 y 548 y 549 y 550 y 551 y 552 y 553 y 554 y 555 y 556 y 557 y 558 y 559 y 560 y 561 y 562 y 563 y 564 y 565 y 566 y 567 y 568 y 569 y 570 y 571 y 572 y 573 y 574 y 575 y 576 y 577 y 578 y 579 y 580 y 581 y 582 y 583 y 584 y 585 y 586 y 587 y 588 y 589 y 590 y 591 y 592 y 593 y 594 y 595 y 596 y 597 y 598 y 599 y 600 y 601 y 602 y 603 y 604 y 605 y 606 y 607 y 608 y 609 y 610 y 611 y 612 y 613 y 614 y 615 y 616 y 617 y 618 y 619 y 620 y 621 y 622 y 623 y 624 y 625 y 626 y 627 y 628 y 629 y 630 y 631 y 632 y 633 y 634 y 635 y 636 y 637 y 638 y 639 y 640 y 641 y 642 y 643 y 644 y 645 y 646 y 647 y 648 y 649 y 650 y 651 y 652 y 653 y 654 y 655 y 656 y 657 y 658 y 659 y 660 y 661 y 662 y 663 y 664 y 665 y 666 y 667 y 668 y 669 y 670 y 671 y 672 y 673 y 674 y 675 y 676 y 677 y 678 y 679 y 680 y 681 y 682 y 683 y 684 y 685 y 686 y 687 y 688 y 689 y 690 y 691 y 692 y 693 y 694 y 695 y 696 y 697 y 698 y 699 y 700 y 701 y 702 y 703 y 704 y 705 y 706 y 707 y 708 y 709 y 710 y 711 y 712 y 713 y 714 y 715 y 716 y 717 y 718 y 719 y 720 y 721 y 722 y 723 y 724 y 725 y 726 y 727 y 728 y 729 y 730 y 731 y 732 y 733 y 734 y 735 y 736 y 737 y 738 y 739 y 740 y 741 y 742 y 743 y 744 y 745 y 746 y 747 y 748 y 749 y 750 y 751 y 752 y 753 y 754 y 755 y 756 y 757 y 758 y 759 y 760 y 761 y 762 y 763 y 764 y 765 y 766 y 767 y 768 y 769 y 770 y 771 y 772 y 773 y 774 y 775 y 776 y 777 y 778 y 779 y 780 y 781 y 782 y 783 y 784 y 785 y 786 y 787 y 788 y 789 y 790 y 791 y 792 y 793 y 794 y 795 y 796 y 797 y 798 y 799 y 800 y 801 y 802 y 803 y 804 y 805 y 806 y 807 y 808 y 809 y 810 y 811 y 812 y 813 y 814 y 815 y 816 y 817 y 818 y 819 y 820 y 821 y 822 y 823 y 824 y 825 y 826 y 827 y 828 y 829 y 830 y 831 y 832 y 833 y 834 y 835 y 836 y 837 y 838 y 839 y 840 y 841 y 842 y 843 y 844 y 845 y 846 y 847 y 848 y 849 y 850 y 851 y 852 y 853 y 854 y 855 y 856 y 857 y 858 y 859 y 860 y 861 y 862 y 863 y 864 y 865 y 866 y 867 y 868 y 869 y 870 y 871 y 872 y 873 y 874 y 875 y 876 y 877 y 878 y 879 y 880 y 881 y 882 y 883 y 884 y 885 y 886 y 887 y 888 y 889 y 890 y 891 y 892 y 893 y 894 y 895 y 896 y 897 y 898 y 899 y 900 y 901 y 902 y 903 y 904 y 905 y 906 y 907 y 908 y 909 y 910 y 911 y 912 y 913 y 914 y 915 y 916 y 917 y 918 y 919 y 920 y 921 y 922 y 923 y 924 y 925 y 926 y 927 y 928 y 929 y 930 y 931 y 932 y 933 y 934 y 935 y 936 y 937 y 938 y 939 y 940 y 941 y 942 y 943 y 944 y 945 y 946 y 947 y 948 y 949 y 950 y 951 y 952 y 953 y 954 y 955 y 956 y 957 y 958 y 959 y 960 y 961 y 962 y 963 y 964 y 965 y 966 y 967 y 968 y 969 y 970 y 971 y 972 y 973 y 974 y 975 y 976 y 977 y 978 y 979 y 980 y 981 y 982 y 983 y 984 y 985 y 986 y 987 y 988 y 989 y 990 y 991 y 992 y 993 y 994 y 995 y 996 y 997 y 998 y 999 y 1000

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

"USOS Y APLICACIONES DEL MODELO DE LINEAS DE TRANSMISION DEL
LABORATORIO DE SISTEMAS DE POTENCIA"

TESIS DE GRADO

PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE :

INGENIERO EN ELECTRICIDAD

ESPECIALIZACION: POTENCIA

PRESENTADA POR:

LUIS FERNANDO AGUIRRE ROMERO

GUAYAQUIL - ECUADOR

1.985

ESCUELA DE INGENIERIA DE SISTEMAS DE INFORMACION
Fecha de entrega del trabajo
1988-01-10
Inv. No. POT-060

AGRADECIMIENTO

AL ING. JORGE CHIRIBOGA,
DIRECTOR DE TESIS, POR SU
AYUDA Y COLABORACION PA
RA LA REALIZACION DE ES
TE TRABAJO.

DEDICATORIA

- A MIS PADRES

- A MI ESPOSA

- A MIS HIJAS



ING. GUSTAVO BERMUDEZ FLORES
SUB-DECANO DE LA FACULTAD DE
INGENIERIA ELECTRICA



ING. JORGE ENRIQUEZ VASQUEZ
DIRECTOR DE TESIS



ING. JORGE FLORES MACIAS
MIEMBRO PRINCIPAL



ING. CRISTOBAL MERA G.
MIEMBRO PRINCIPAL

DECLARACION EXPRESA

"LA RESPONSABILIDAD POR LOS HECHOS, IDEAS Y DOCTRINAS
EXPUESTOS EN ESTA TESIS, ME CORRESPONDEN EXCLUSIVAMENTE;
Y, EL PATRIMONIO INTELECTUAL DE LA MISMA, A LA
ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de
1a ESPOL).



LUIS FERNANDO AGUIRRE ROMERO

R E S U M E N

El presente estudio trata sobre el comportamiento de los sistemas de potencia bajo diferentes condiciones de operación, para lo cual se utiliza EL MODELO DE LINEA DE TRANSMISION del Laboratorio de Sistemas de Potencia.

Para efectuar este trabajo se ha creído conveniente presentar primeramente las características principales de los Sistemas de Potencia, dando especial énfasis a una de las partes más importantes de ellos, ésto es las líneas de transmisión anotando las tres técnicas de análisis de las líneas; la de la Teoría Electromagnética, poco utilizada; la de los Circuitos Concentrados para análisis de líneas cortas y, la de los circuitos distribuidos para el análisis de las líneas largas; también se trata sobre los diferentes parámetros de las líneas, puntualizando el nivel de importancia e influencia en la transmisión de energía eléctrica; por último se establece una clasificación de las líneas de transmisión de acuerdo a su longitud.

Una vez que se han establecido las bases teóricas, se entra al análisis experimental del comportamiento de las líneas de

transmisión; varias prácticas de laboratorio se presentan, en las cuales como queda expuesto en líneas anteriores se utilizará el modelo de líneas de transmisión del Laboratorio de Sistemas de Potencia.

De los resultados que se obtienen en las prácticas de laboratorio, se presentarán las Conclusiones y Recomendaciones.

Finalmente este trabajo servirá para ser utilizado en el programa de la materia Laboratorio de Sistemas de Potencia.

INDICE GENERAL

	<u>PAGS.</u>
RESUMEN -----	VI
INDICE GENERAL -----	VIII
INDICE DE FIGURAS -----	XI
INTRODUCCION -----	15
CAPITULO I	
LA ESTRUCTURA DE LOS SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA	17
1.1. NIVEL DE DISTRIBUCION -----	18
1.2. NIVEL DE SUBTRANSMISION -----	19
1.3. NIVEL DE TRANSMISION -----	20
CAPITULO II	
ANALISIS DE LOS SISTEMAS ELECTRICOS -----	24
2.1. TECNICA DE ANALISIS DE LA TEORIA ELECTROMAGNETICA -----	24
2.2. TECNICA DE ANALISIS POR CONCENTRACION DE ELEMENTOS DEL CIRCUITO -----	24
2.3. TECNICA DE ANALISIS DE CIRCUITOS DISTRIBUIDOS--	25
CAPITULO III	
PARAMETROS DE LAS LINEAS -----	27

3.1. RESISTENCIA Y CONDUCTANCIA EN PARALELO DE LAS LINEAS ---	28
3.2. INDUCTANCIA DE LAS LINEAS -----	30
3.3. CAPACITANCIA DE LAS LINEAS -----	36

CAPITULO IV

REPRESENTACION DE LINEAS -----	40
4.1. LINEAS CORTAS -----	40
4.2. LINEAS MEDIAS -----	44
4.3. LINEAS LARGAS -----	46
4.4. PROPOSITOS DE LAS LINEAS DE TRANSMISION -----	57

CAPITULO V

MODELO DE LINEAS DE TRANSMISION A UTILIZARSE PARA INVESTIGACION EN EL LABORATORIO -----	58
5.1. COMPONENTES -----	58
5.2. DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LOS PARAMETROS DE LOS MODU LOS INDIVIDUALES -----	66
5.3. CARACTERISTICAS NOMINALES DE LOS COMPONENTES -----	82
5.4. DIAGRAMA UNIFILAR DEL MODELO -----	91

CAPITULO VI

COMPORTAMIENTO DE LAS LINEAS DE TRANSMISION PARA DIFERENTES - CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO -----	94
6.1. EXPERIMENTOS -----	94
6.1.1. Pruebas en un modelo de línea de transmisión. De terminación de parámetros y constantes relevantes del modelo y probar el comportamiento de la lí nea-----	94

6.1.2. Análisis de las ondas viajeras en las líneas de transmisión: Aplicación del método del Diagrama Bewley - Lattice.-----	119
6.1.3. Control de voltaje en líneas de transmisión largas cuando conducen cargas mínimas -----	149
6.1.4. Máxima transferencia de potencia: Curvas ángulo - potencia para sistemas interconectados; la línea infinita-----	164
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES -----	175
BIBLIOGRAFIA -----	179

INDICE DE FIGURAS

	<u>PAGS.</u>
CAPITULO III	
3.1. CONDUCTOR FORMADO POR UN HAZ DE 4 CABLES--	33
3.2. TRANSPOSICION DE CONDUCTORES -----	36
CAPITULO IV	
4.1. REPRESENTACION DE UNA LINEA CON CONSTANTES DISTRIBUIDAS -----	41
4.2. CIRCUITO EQUIVALENTE DE LINEAS CORTAS <u>RE</u> PRESENTACION BAJO CONDICIONES BALANCEADAS-	41
4.3. DIAGRAMAS VECTORIALES DE UNA LINEA <u>COR</u> TA, TODOS ELLOS SON PARA LOS MISMOS V_r al I_r -----	43
4.4. (a) CIRCUITO EQUIVALENTE π DE UNA LINEA - DE LONGITUD MEDIA; (b) CIRCUITO EQUIVALEN- TE DE UNA LINEA DE LONGITUD MEDIA -----	45
4.5. ELEMENTO DIFERENCIAL DE LINEA -----	49
4.6. CIRCUITO EQUIVALENTE DE UNA LINEA LARGA --	54
CAPITULO V	
5.1. MODELO DE LINEA DE TRANSMISION -----	60

	<u>PAGS.</u>
5.2. DIAGRAMAS BASICO DEL MODELO DE SISTEMAS DE POTENCIA -----	65
5.3. CIRCUITO ELECTRICO PARA DETERMINAR LA IMPEDANCIA DE UN MODULO π -----	67
5.4. CIRCUITO ELECTRICO PARA DETERMINAR EL VALOR RESISTIVO DE UN MODULO π -----	69
5.5. CIRCUITO EQUIVALENTE π DE CADA ANGULO	73
5.6. AUTOTRANSFORMADOR TRIFASICO VARIABLE PA RA SIMULACION DE CONTROL DE VOLTAJE - FUENTE GENERACION -----	83 ⁸³
5.7. TRANSFORMADOR CAMBIADOR DE FASE, PASOS DE 10°-----	85
5.8. TRANSFORMADOR CAMBIADOR DE FASE EN PA SOS DE 5°-----	88
5.9. BOBINA DE FUENTE CON SUS COMPONENTES Y ALTERNATIVAS DE CONEXION -----	90
5.10. METODOS PROPUESTOS DE SIMULACION DE OPE RACION CON FUENTES DE POTENCIA EN CADA EXTREMO DE LA LINEA -----	92
5.11. DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA DE POTEN- CIA A SER REPRESENTADO POR EL MODELO - DEL LABORATORIO -----	93

CAPITULO VI

6.1. ONDA DE VOLTAJE APLICADA AL TERMINAL DE	
---	--

	<u>PAGS.</u>
LA LINEA DE TRANSMISION EN ESTUDIO (OBTENIDA DEL OSCILOSCOPIO)-----	134
6.2. ONDA DE VOLTAJE TRANSMITIDA EN EL TERMINAL DE RECEPCION (OBTENIDA DEL OSCILOSCOPIO)---	135
6.3. SUPERPOSICION DE LAS ONDAS DE VOLTAJE TRANSMITIDO AL INCIDENTE EN EL TERMINAL DE RECEPCION DE UNA LINEA EN CIRCUITO ABIERTO-----	137
6.4. FORMA DE ONDA DEL VOLTAJE REFLEJADO EN EL TERMINAL DE RECEPCION PARA UNA LINEA EN CIRCUITO ABIERTO -----	137
6.5. ONDA DE CORRIENTE EN EL TERMINAL DE ENVIO RESULTANTE DE APLICAR UN PULSO DE VOLTAJE SIMILAR AL DE LA PRIMERA FIGURA Y CORTOCIRCUITO DE LINEAS EN EL TERMINAL -----	139
6.6. ONDA DE CORRIENTE EN EL TERMINAL DE RECEPCION DE LA LINEA EN CORTOCIRCUITO -----	139
6.7. (a) ONDA DE VOLTAJE INCIDENTE -----	141
(b) ONDA DE VOLTAJE TRANSMITIDO -----	141
(c) ONDA DE CORRIENTE INCIDENTE -----	142
(d) ONDA DE CORRIENTE TRANSMITIDA -----	142
6.8. (a) DIAGRAMA BEWLEY - LATTICE PARA LA LINEA EN CIRCUITO ABIERTO -----	146
(b) ONDA DE VOLTAJE APLICADA EN EL TERMINAL DE ENVIO -----	146
(c) ONDA DE VOLTAJE EN EL TERMINAL DE RECEPCION -----	147

	<u>PAGS.</u>	
6.9.	VARIACION DE VOLTAJE A TRAVES DE UNA LINEA LARGA -----	151
6.10.	CURVA ANGULO - POTENCIA PARA UNA LINEA DE 1.500 KMS. EN 3 SECCIONES -----	152
6.11.	REACTOR SATURADO PARA CONTROL DE VOLTAJE (a) CIRCUITO EQUIVALENTE-----	154
	(b) CARACTERISTICAS V-Q -----	154
6.12.	DIAGRAMA VECTORIAL DE TENSIONES EN UNA LI NEA CORTA.-----	166
6.13.	DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA EN ESTUDIO-	170

INTRODUCCION

Si efectuamos una mirada hacia los diferentes componentes de un sistema de potencia, podemos establecer que desde el punto de vista económico, uno de los rublos más altos constituye el costo de la construcción de las líneas de transmisión, más aún que las fuentes de energía que es pecialmente en nuestro país son del tipo hidroeléctricos se encuentran muy alejadas de los principales centros de carga.

El constante crecimiento de la demanda de energía, producto de la creación de nuevas industrias, hace necesario re diseñar alimentadoras y líneas de transmisión, las que con el tiempo pasan a convertirse en líneas de subtransmisión. Esto demuestra que las necesidades de transmisión de energía, siempre requerirán un continuo estudio de es tado actual de la carga que fluye por las líneas de trans misión, con la finalidad de establecer si el diseño ori ginal es aplicable aún a las condiciones actuales.

Este enfoque dado a las líneas de transmisión, lleva a dar una importancia mayor al estudio de las mismas y es por este motivo que en la presente TESIS, se trata de abarcar en mayor proporción temas relacionados espe

cialmente al comportamiento de las líneas de transmisión.

Con lo expuesto en líneas anteriores se quiere demostrar a breves rasgos que un estudio sobre sistemas de potencia y sobre líneas de transmisión específicamente nunca perderá actualidad y más bien constituirá un aporte positivo para la utilización más efectiva de los recursos disponibles.

CAPITULO I

LA ESTRUCTURA DE LOS SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Un sistema eléctrico de potencia rara vez se encuentra formado de una manera tan simple digamos por un generador, carga y la línea de transmisión. Aún los pequeños sistemas constituyen una red de bastante complejidad. El factor que determina la estructura de un sistema más que cualquier otro es su TAMAÑO. No se entrará en una discusión sobre las razones económicas, políticas o históricas que pueden influenciar a más del tamaño de la red. Además de la gran diversidad de la magnitud de los sistemas, deseamos dejar claro que no hay reglas generales en lo relativo a la estructura del sistema que se pueda aplicar a TODOS los sistemas. Es posible, sin embargo, establecer ciertas características similares en la mayoría de estos.

En todos los sistemas hay una característica que es común: funcionan a distintos niveles de voltaje separados por transformadores. Comenzando con el

nivel más bajo, podemos distinguir las siguientes etapas:

- Nivel de distribución
- Nivel de subtransmisión
- Nivel de transmisión

1.1. NIVEL DE DISTRIBUCION

Los circuitos de distribución constituyen las redes finales de una línea aérea. Generalmente se utilizan dos niveles de voltajes:

- Voltaje primario o de alimentadora (por ejemplo 13.2 KV).
- Voltaje secundario o del consumidor (por ejemplo 120/240 V).

Los circuitos de distribución que se alimentan desde Sub-estaciones de Distribución proveen energía a pequeños consumidores (domésticos), o de tamaño medio (pequeñas industrias o comercios).

La ingeniería de distribución es en sí una rama de la Ingeniería Eléctrica de considerable importancia y

variabilidad, cubriendo servicios, medición, co ne xio nes y desconexiones, fusibles en líneas aé re as y subterráneas. Un sistema típico puede tener la mitad de su capital invertido en circuitos de distribución.

1.2. NIVEL DE SUBTRANSMISION

Los circuitos de subtransmisión distribuyen - en er gía a las subestaciones de distribución en una determinada área geográfica a niveles de - vo lt a j e que generalmente varían entre 11 y 138 KV. Recibe la energía directamente desde - las ba rr as de los generadores en una estación - de ge ne ra ci ó n o por medio de una subestación de potencia. Grandes consumidores son servidos dí re ct a m e n te desde estas estaciones.

El papel de un sistema de subtransmisión es - pr ac t i c a m e n te el mismo que el de un sistema de distribución excepto que cubre extensas áreas - ge o gr á f i c a s y distribuye la energía en grandes bloques a mayores niveles de voltaje y potencia. Hay que dejar anotado que en la mayoría de los sistemas no existe una separación clara entre -

lo que es subtransmisión y lo que es transmisión. Un incremento en la densidad de carga hace necesario y económico seleccionar un nuevo y mayor nivel de voltaje. En esta forma, las líneas de transmisión del presente llegarán a ser las líneas de subtransmisión del futuro.

1.3. NIVEL DE TRANSMISION

Un sistema de transmisión es marcadamente diferente tanto en características como en operación a los sistemas de distribución y subtransmisión. Mientras que los dos últimos llevan la energía desde una fuente individual y la transmiten a cargas igualmente individuales, la función del sistema de transmisión es completamente diferente. No solamente que conduce grandes bloques de potencia sino que también interconecta todas las estaciones de generación, así como también, los grandes centros de carga.

La energía puede ser transmitida en cualquier dirección deseada en los varios anillos del sistema de potencia, buscando la manera más económica o que sirva al mejor objetivo técnico.

La diferencia fundamental en el propósito del sistema de transmisión comparado con el de subtransmisión o distribución se puede observar en la estructura de la red. Mientras que los dos últimos generalmente (pero no siempre), son estructuras radiales, la tendencia es obtener estructuras en anillo. Una red de tipo radial es la solución obvia mientras la energía sea transmitida en una sola dirección. Los sistemas en anillo dan mayores combinaciones de trayectorias y por lo tanto satisface de mejor forma los propósitos del nivel de transmisión.

Puesto que, como se ha mencionado, el sistema de transmisión es capaz de conducir grandes bloques de energía, se puede comprender fácilmente que sus componentes (generadores, transformadores, líneas y disyuntores) no son solamente los más importantes sino también los de mayor interés desde el punto de vista de sistemas de ingeniería.

El diseño de un sistema de ingeniería de energía eléctrica tiene algunas similitudes con

el diseño de cualquier otro sistema de transporte, por ejemplo con un sistema de caminos. Muchas consideraciones deben ser tomadas en cuenta de las cuales las más importantes son:

- Los sistemas de excitación.
- La localización geográfica de los centros de carga presentes y futuros.
- La apropiada localización geográfica de las estaciones de generación. En particular se debe considerar la disponibilidad de combustible y agua de enfriamiento para los condensadores.

Se debe señalar que el desarrollo del sistema de transmisión de potencia es un proceso de avance gradual. En el diseño de nuevas derivaciones para el sistema se debe siempre guiarse en modelos de crecimiento de densidad de población y las industrias en el área prevista.

Con las consideraciones mencionadas y después

que se han tomado las decisiones de carácter po-
lítico y económico para la expansión del siste-
ma, es la ingeniería de sistemas de energía la
que desarrolla los diseños que son sólidos
y confiables desde el punto de vista técnico
y económico.

CAPITULO II

ANALISIS DE LOS SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Existen tres técnicas que sirven para realizar un análisis de los sistemas eléctricos de potencia:

- Técnica de la Teoría Electromagnética
- Técnica de análisis de circuitos concentrados (lumped circuits).
- Técnica de análisis de circuitos distribuidos.

2.1. TECNICA DE ANALISIS DE LA TEORIA ELECTROMAGNETICA

Los análisis de cualquier problema eléctrico que utiliza señales que varían con el tiempo, se puede efectuar utilizando la Teoría Electromagnética expresada por las Ecuaciones de Maxwell, conociendo que los campos eléctricos y magnético son las variables físicas primarias.

2.2. TECNICA DE ANALISIS DE LOS CIRCUITOS CONCENTRADOS

Un método de análisis básico en programas de in

geniería Eléctrica ha sido desde un principio el análisis de elementos de circuitos concentrados y no el de la Teoría Electromagnética. En trabajos con circuitos ordinarios se considera que la resistencia del ramal de un circuito puede ser concentrada en un punto, aún cuando de hecho conocemos que se encuentra distribuída a lo largo de la línea. La misma asunción simplificadora es aplicable a la inductancia y a la capacitancia cuyas funciones son las de almacenar (capacitancia) y disipar (inductancia) energía.

Es conveniente y permitido concentrar elementos serie con resistencia e inductancia, si la misma energía o mejor dicho corriente circula en cada parte del circuito.

El concepto de elementos concentrados es útil en la visualización de los circuitos.

2.3. TECNICA DE ANALISIS DE LOS CIRCUITOS DISTRIBUIDOS

Las líneas o cables son circuitos de constantes distribuídas, esto es, sus resistencias, inductancia, capacitancia y conductancia en paralelo

distribuidas a lo largo de la línea de cuyo análisis nos ocuparemos en capítulos posteriores - al tratar sobre líneas de transmisión largas.

CAPITULO III

PARAMETROS DE LINEAS

Desde el punto de vista de un sistema, nuestro interés inicial está fijado en las características de las líneas de transmisión. Se puede demostrar que estas pueden ser expresadas en términos de los cuatro parámetros de líneas siguientes, enumerados en orden de importancia:

- Inductancia de la línea (L), (H/m)
- Capacitancia en paralelo de la línea (C), (farad/m)
- Resistencia de la línea (R), (ohms/m)
- Conductancia en paralelo de la línea (G), (mhos/m)

Estos parámetros son expresados por unidad de longitud y por fase de la línea de transmisión. Si ésta no es simétrica (no transpuesta), es teóricamente imposible expresar algunos de estos parámetros por fase; sin embargo, si se toleran pequeñas aproximaciones se pueden hacer conveniencias prácticas.

3.1. RESISTENCIA Y CONDUCTANCIA EN PARALELO DE LAS LINEAS

La razón por la cual se clasifica a la resistencia y a la conductancia en paralelo como menos importantes es que ellas afectan en un grado relativamente menos importante a la impedancia de la línea equivalente y por lo tanto a su capacidad de transmisión. Estos parámetros por supuesto son los que determinan completamente las PERDIDAS de transmisión reales y en caso - que estemos interesados en la ECONOMIA de transmisión debemos considerar su presencia.

La resistencia efectiva de un conductor viene - dada por:

$$R = \frac{\text{pérdidas de potencia en el conductor}}{I^2} \quad (\text{Ohms})$$

La resistencia efectiva es igual a la resistencia del conductor a la corriente continua solo en aquellos casos en que la distribución de corriente sea uniforme.

A la frecuencia de 60 Hz e inferiores la diferencia entre la resistencia efectiva a la corriente continua es menor que el 1% para los conductores de cobre cuyo calibre sea menor a 350 MCM.

La resistencia de un conductor de sección uniforme se puede calcular utilizando la siguiente fórmula:

$$R_T = \rho \frac{l}{A} \quad (3.1.)$$

En donde:

- R_T resistencia del conductor en ohms
- ρ resistividad del conductor en ohmsxmt.
- l longitud del conductor en la dirección de la corriente en metros.
- A área de la sección transversal normal a la dirección de la corriente en metros²

A medida que aumenta la frecuencia de la corriente alterna se hace más pronunciada la diferencia entre las densidades de corriente en las distintas zonas de una sección transversal. Este fenómeno se conoce como efecto PIEL (skin). En un conductor de sección circular generalmente la densidad de corriente

aumenta del interior al exterior. Sin embargo en los conductores de radio suficientemente grande, se puede presentar una corriente oscilante a lo largo del radio.

Para la conductancia en paralelo no hay fórmula disponible; este elemento considera la corriente de dispersión (leakage) entre fase y tierra y ésta dispersión varía principalmente con el agua, la humedad atmosférica y el contenido de sal. Es costumbre despreciar su presencia bajo condiciones de operación normales, debido en parte a que usualmente tiene una magnitud despreciable y parte debido a su desconocimiento.

3.2. INDUCTANCIA DE LAS LINEAS

La inductancia es por muchos aspectos el parámetro más importante desde el punto de vista de sistemas de ingeniería. Para líneas de diseño normal, la reactancia ($X = w \times L$), es el elemento dominante en la impedancia, además la reactancia afecta directamente la capacidad de transmisión de la línea. Es importante por lo tanto que se dé a estos parámetros la atención apropiada; en particular estamos interesados en los medios posibles que tengamos a nuestra dispo-

sición para reducir su magnitud.

La inductancia total de una línea monofásica por unidad de longitud (mts) se puede calcular utilizando la siguiente fórmula:

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \left\{ \frac{\mu_r}{4} + \ln \left(\frac{D}{R} \right) \right\} \quad \text{H/m} \quad (3.2.)$$

En donde:

- L inductancia total (H/m)
- μ_0 permeabilidad magnética de vacío = $4\pi \times 10^{-7}$ H/m
- μ_r permeabilidad relativa del medio en cuestión = μ / μ_0
- D distancia entre centros de los conductores (mts)
- R radio del conductor (mts)

Debido a que $D \gg R$ la ecuación (3.2) se simplifica a:

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \left\{ \frac{\mu_r}{4} + \ln \frac{D}{R} \right\} \quad \text{H/m} \quad (3.3)$$

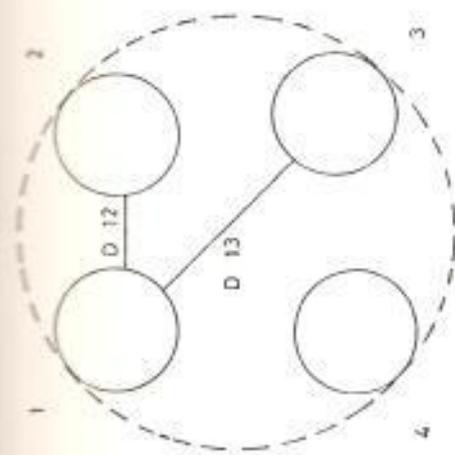
Para una línea trifásica con espaciamiento equilateral la inductancia con respecto a un conductor neutro hipotético es utilizada y se puede demostrar que es igual a mitad de la línea monofásica.

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left\{ \frac{\mu_r}{4} + \ln \frac{D}{R} \right\} \quad \text{H/m} \quad (3.4)$$

$$L = 2 \times 10^{-7} \left(\frac{\mu_r}{4} + \ln \frac{D}{R} \right) \quad \text{H/m}$$

En la práctica los conductores rara vez se encuentran espaciados en forma equilateral y puede mostrarse que el valor promedio de la inductancia para cualquier configuración de los conductores puede ser obtenida representando el sistema por un espaciamiento equilateral equivalente D_{eq} entre los conductores, dado por:

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12} \times D_{23} \times D_{31}} \quad (3.5)$$



$$RMGeq = \sqrt[n]{RMG \cdot D_{12} \cdot D_{13} \cdot \dots \cdot D_{1n}} \quad (3.6)$$

$$r_{eq} = \sqrt[n]{r_1 \cdot D_{12} \cdot D_{13} \cdot \dots \cdot D_{1n}} \quad (3.7)$$

RMGeq = radio medio geométrico equivalente

r_{eq} = radio equivalente

FIGURA N° 3.1. CONDUCTOR FORMADO POR UN HA. DE 4 CABLES

En las líneas de ultra-alta tensión (UHV) cada uno de los conductores a,b,c, pueden estar formados por varios cables, como se muestra en la figura N° 3.1. Este tipo de construcción se conoce con el nombre de conductores en HAZ.

Si todos estos pequeños cables son idénticos y están simétricamente dispuestos en una circunferencia concéntrica, como se indica en la figura, es posible calcular un radio de conductor equivalente.

El cálculo de la inductancia para líneas trifásicas en este caso se efectúa utilizando las siguientes fórmulas:

$$L = 0.741 \times 10^{-3} \log \frac{D}{RMG} \text{ (H/m)} \quad (3.8)$$

ó

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{RMG} \text{ (H/m)}$$

que son similares a las fórmulas 3.4.

Muchas veces dos circuitos trifásicos están eléctricamente en paralelo; si están físicamente alejados - lo suficiente el uno del otro, las reactancias de las líneas son idénticas. Sin embargo cuando los dos circuitos están situados en la misma torre, la interacción magnética entre ellos debe ser tomada en consideración. El uso de conductores múltiples, es decir más de un conductor por cadena de aisladores reduce la reactancia y también reduce la gradiente de voltaje en la superficie del conductor, disminuyendo así las pérdidas por efecto corona y radio interferencia. Espaciamientos asimétricos entre conductores produce inductancias diferentes para cada fase lo cual causa una caída de voltaje desbalanceada - aún cuando las corrientes de carga estén balanceadas. El voltaje o la corriente residual o resultante induce voltajes indeseables en las líneas de comunicación. Esto puede ser contrarrestado mediante el intercambio de posición de los conductores a intervalos regulares a lo largo de la trayectoria de la línea, conocido como TRANSPOSICION (Figura N° 3.2.). En la práctica las líneas son raramente transpuestas a intervalos regulares y la transposición se efectúa más bien donde se presentan condiciones físicas favorables, como por ejemplo en las subestaciones. En líneas cortas (definidas más adelante), el grado de

desbalanceo existente sin transposición es pequeño y puede ser despreciado en los cálculos.

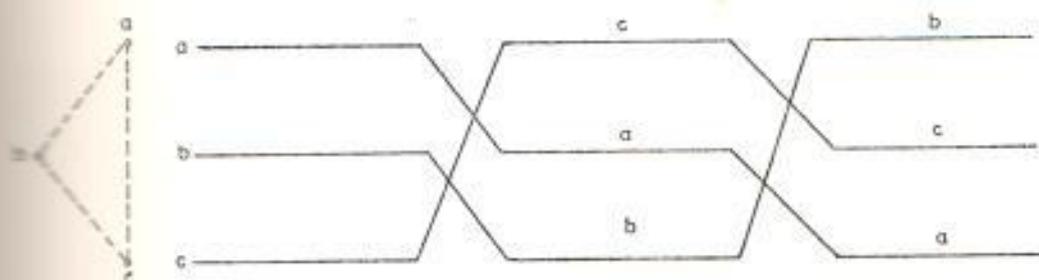


FIGURA N°3.2. TRANSPOSICION DE CONDUCTORES

3.3. CAPACITANCIA DE LAS LINEAS

La resistencia y la inductancia de la línea constituyen los elementos que forman la impedancia serie de la línea de transmisión.

La capacitancia que discutiremos ahora, conjuntamente con la conductancia forma la admitancia en paralelo (shunt) de la línea.

Los elementos serie, de los cuales la inductancia es el elemento dominante como se mencionó anteriormente, son los que imponen un límite a la corriente que puede circular a través de la línea y por lo tanto determina físicamente la transmisión de potencia. Los elementos en paralelo de los cuales la capacitancia es el elemento dominante representan la trayectoria de DISPERSIÓN para la corriente de línea. Estas corrientes de dispersión son proporcionales al voltaje de línea y la importancia de estos elementos en paralelo incrementa por lo tanto con la magnitud del voltaje de operación. Para voltajes de operación del orden de 300 a 500 KV. y longitudes de líneas superiores a 200 millas, la influencia de estos elementos en paralelo llega a ser de interés primario para los ingenieros de sistemas de potencia. En cables de alto voltaje, donde la proximidad de los conductores dá como resultado una capacitancia por milla elevada, se hace prácticamente imposible transmitir grandes cantidades de energía más allá de 20 a 30 millas, sin compensaciones especiales.

La capacitancia de una línea monofásica viene dada por la formula:

$$C = \frac{\pi \epsilon_0}{\ln\left(\frac{D-R}{R}\right)} \quad \text{Farad/m} \quad (3.9)$$

en donde:

C capacitancia de la línea en farad/m.

ϵ_0 capacitancia dieléctrica del vacío = $\frac{10^{-9}}{36\pi}$

D distancia entre centros de los conductores en mts.

R radio del conductor en mts.

Los conductores trifásicos espaciados en forma equi-
latera tienen una capacitancia de línea con respec-
to a un neutro hipotético equivalente al doble de
la capacitancia para circuitos monofásicos.

$$C = \frac{2\pi \epsilon_0}{\ln\left(\frac{D-R}{R}\right)} \quad \text{Farad/m con respecto al neutro} \quad (3.10)$$

puesto que $D \gg R$.

$$C = \frac{2\pi \epsilon_0}{\ln \frac{D}{R}} \quad \text{Farad/m respecto al neutro} \quad (3.11)$$

$$C = \frac{0.0388}{\log. \frac{D}{R}} \quad \text{uf/milla, respecto al neutro} \quad (3.12)$$

Para una línea trifásica con disposición asimétrica las fórmulas anteriores son aplicables con la diferencia de que en lugar de D se utiliza una distancia equivalente (DEQ).

CAPITULO IV

REPRESENTACION DE LINEAS

La forma mediante la cual las líneas y cables son representados depende en mucho de su longitud y de la seguridad requerida. Hay una clasificación de las líneas de acuerdo a su longitud, así tenemos líneas cortas, medias y largas. La línea o cable REAL es un circuito de constantes distribuidas, es decir que tiene las resistencias, inductancias, capacitancias y conductancias, distribuidas igualmente a lo largo de su longitud como se muestra en la figura N° 4.1.

Excepto para líneas largas la resistencia, inductancia, capacitancia y conductancia totales de la línea son concentradas para representar un circuito de constantes concentradas. Las distancias especificadas solamente constituyen una guía aproximada.

4.1. LINEAS CORTAS (Hasta 80 kms.)

Su circuito es mostrado en la figura N° 4.2., y se notará que tanto la capacitancia como la inductancia han sido despreciadas.

Las cuatro constantes de la red de dos puertos pue

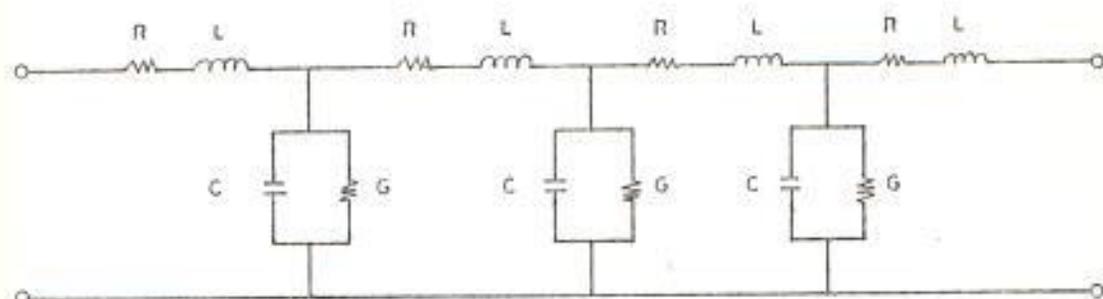


FIGURA N^o 4.1. REPRESENTACION DE UNA LINEA CON CONSTANTES DISTRIBUIDAS

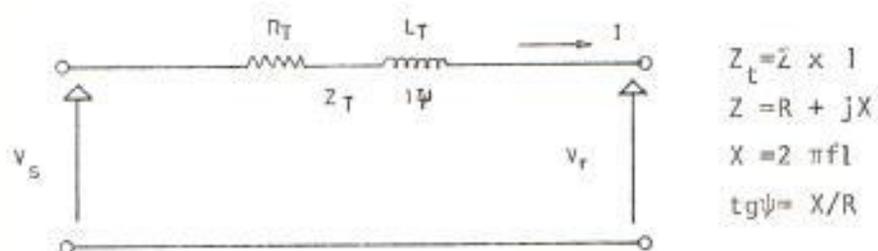


FIGURA N^o 4.2. CIRCUITO EQUIVALENTE DE LINEAS CORTAS, REPRESENTACION BAJO CONDICIONES BALANCEADAS.

den ser deducidas de las siguientes ecuaciones:

$$V_s = V_r + Z_T \cdot I \quad (4.1)$$

$$I_s = I_r \quad (4.2)$$

$$A = 1 \quad B = Z_T \quad C = 0 \quad D = 1$$

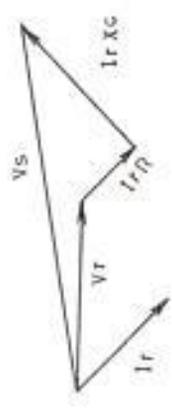
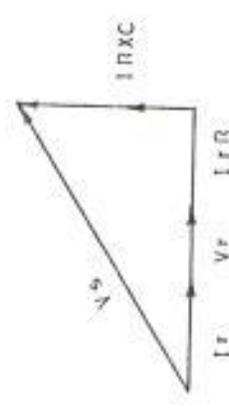
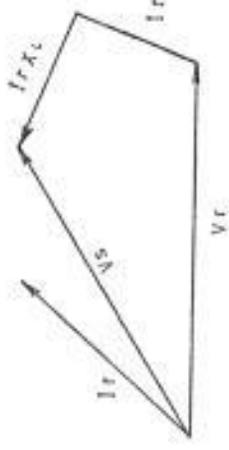
El efecto de la variación del factor de potencia de la carga sobre el factor de regulación de tensión de una línea se comprenderá mejor en las líneas cortas; por lo tanto se tratará en ellas:

$$\% \text{ Regulación} = \frac{|V_{NL}| - |V_{FL}|}{|V_{FL}|} \times 100 \quad (4.3)$$

Donde:

$|V_{NL}|$ valor absoluto de la tensión en el extremo - receptor en vacío.

$|V_{FL}|$ valor absoluto de la tensión en el extremo receptor a plena carga.



- a) f.p. de la carga = 70% en retardo
- b) f.p. de la carga = 100 %
- c) f.p. de la carga = carga 70% en adelanto

FIGURA N° 4.3. DIAGRAMAS VECTORIALES DE UNA LINEA CORTA, TODOS ELLOS SON PARA

LOS MISMOS V_r e I_r .

En los diagramas la caída de tensión en la impedancia es la misma en todos los casos, pero debido a los diferentes valores del factor de potencia se suman al voltaje V_r , con un ángulo diferente en cada caso.

El factor de regulación es máximo con factor de potencia en retardo y mínimo e incluso negativo con factor de potencia en adelanto.

4.2. LINEAS MEDIAS

Debido al incremento de la longitud de la línea, la capacitancia en paralelo es ahora incluida para formar el circuito equivalente π o T como se muestra en la figura N° 4.4.

De estas dos versiones la representación π tiende a ser la más utilizada, habiendo alguna pequeña diferencia en la exactitud entre ellos.

Ecuaciones para el circuito equivalente π .

$$V_s = V_r + I \cdot Z \quad (4.3)$$

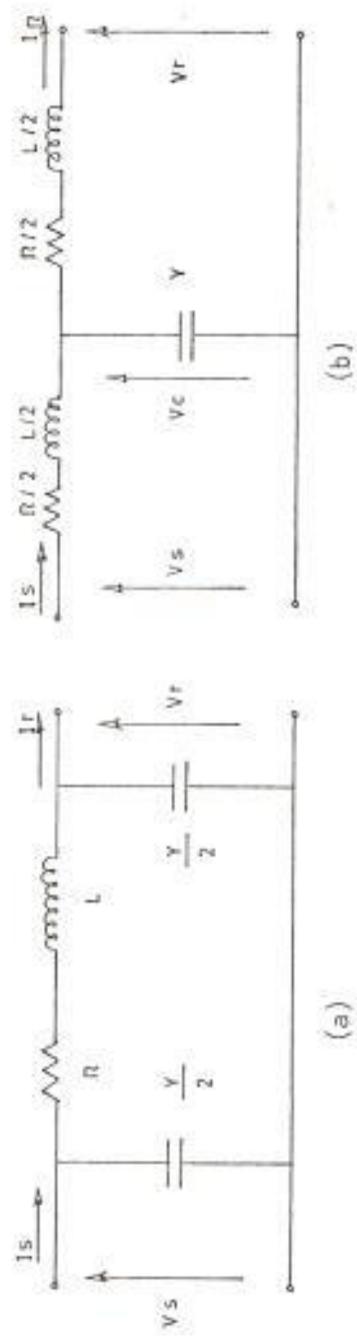


FIGURA N° 4.4. (a) CIRCUITO EQUIVALENTE π DE UNA LINEA DE LONGITUD MEDIA; (b) CIRCUITO EQUIVALENTE T DE UNA LINEA DE LONGITUD MEDIA.

$$I = I_r + V_r \cdot \frac{Y}{2} \quad (4.6)$$

$$I_s = I + V_s \cdot \frac{Y}{2} \quad (4.7)$$

$$A = D = 1 + \frac{Z \cdot Y}{2} \quad B = Z \quad C = \left(1 + \frac{Z \cdot Y}{4}\right) \cdot Y$$

Similarmente la red T

$$V_s = V_c + \frac{Z \cdot I_s}{2} \quad (4.8)$$

$$V_c = V_r + \frac{Z \cdot I_r}{2} \quad (4.9)$$

$$I_s = I_r + V_c \cdot Y \quad (4.10)$$

Donde:

$$A = D = 1 + \frac{Z \cdot Y}{2} \quad B = \left(1 + \frac{Z \cdot Y}{4}\right) \cdot Z \quad C = Y$$

4.3. LINEAS LARGAS

Los parámetros de líneas presentados en las seccioo

nes anteriores fueron derivados en base a valores por fase y por unidad de longitud sea esta metros o millas. Parecería razonable, por lo tanto, si nosotros estuviéramos interesados en el comportamiento de una línea de longitud específica l , simplemente multiplicar estos parámetros por la longitud de la línea con el fin de obtener los valores de los parámetros totales para la línea. Esto puede realmente efectuarse hasta cierto valor límite de l ; más allá de este valor la exactitud del procedimiento llega a ser cuestionada, debido al desconocimiento del efecto de los parámetros DISTRIBUIDOS.

En esta sección estudiaremos los efectos de distribución de la línea. Debemos desarrollar modelos exactos para líneas de longitud arbitraria y también modelos aproximados válidos dentro de condiciones específicas. Comenzaremos con las asunciones utilizadas en los análisis subsiguientes:

- Se asume que la línea de transmisión es transpuesta. Las fórmulas y modelos derivados, sin embargo, pueden ser usados aún para líneas no transpuestas, si se toleran ciertas aproximaciones.
- Se asume que la línea opera con voltajes y corrientes

tes satisfaciendo las siguientes condiciones $\sum_{v=1}^3 V_v = 0$
 y $\sum_{v=1}^3 I_v = 0$, respectivamente.

- Todas las variaciones de las variables con el tiempo son sinusoidales.

La razón para la primera asunción es que ellas permiten realizar un análisis en base de valores por fase. Como se recordará, solamente si las dos primeras condiciones son cumplidas es posible definir con exactitud los valores de inductancia y capacitancia por fase.

Ecuaciones de la línea larga

La figura N° 4.5., describe una sección de nuestra línea de transmisión. En base a las asunciones realizadas anteriormente, consideraremos una fase de la línea y concluimos que la sección tiene una impedancia serie de:

$$dZ = (R + j\omega L) \cdot dx \quad \text{Ohms/fase} \quad (4.11)$$

y una admitancia en paralelo de:

$$dY = (G + j\omega C) \cdot dx \quad \text{Mhos/fase.} \quad (4.12)$$

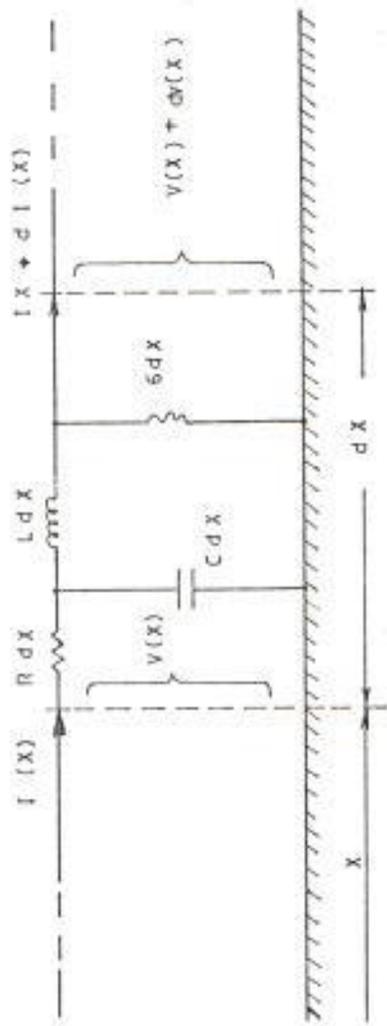


FIGURA N° 4.5. ELEMENTO DIFERENCIAL DE LINEA

El voltaje (medido de fase a tierra) y la corriente a la distancia x son $V(x)$ e $I(x)$, respectivamente. Al otro lado del elemento diferencial, ellos han crecido a $V(x)+dV(x)$ e $I(x) + dI(x)$, respectivamente. La diferencia en el voltaje y la corriente se debe a la caída de voltaje en dZ y a la corriente de dispersión através de dY , respectivamente, lo cual expresado matematicamente da:

$$V(x) - \{V(x) + dV(x)\} = dZI(x) \quad (4.13)$$

$$I(x) - \{I(x) + dI(x)\} = dYV(x) \quad (4.14)$$

o sustituyendo los valores de dZ y dY .

$$\frac{dV(x)}{dx} = -(R + j\omega L)I(x) \quad (4.15)$$

$$\frac{dI(x)}{dx} = -(G + j\omega C)V(x). \quad (4.16)$$

Separando las variables obtenemos las siguientes ecuaciones diferenciales para una línea larga:

$$\frac{d^2 V(x)}{dx^2} = (R + j\omega L)(G + j\omega C)V(x) \quad (4.17)$$

$$\frac{d^2 I(x)}{dx^2} = (R + j\omega L)(G + j\omega C)I(x) \quad (4.18)$$

En esta sección introduciremos la CONSTANTE DE PROPAGACION γ que representa los cambios que ocurren en la onda transmitida conforme progresas la longitud de la línea; la parte real de esta constante, (α) mide la atenuación y la parte imaginaria (β) mide los cambios de fase de la mencionada onda; también utilizaremos la IMPEDANCIA CARACTERISTICA Z_0 de la línea, definidas de la siguiente forma:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (\text{Ohms}) \quad (4.19)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (\text{m}^{-1}) \quad (4.20)$$

Con estas constantes reemplazadas en las ecua

ciones diferenciales obtenemos:

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = \gamma^2 V \quad \frac{d^2 I}{dx^2} = -\gamma^2 I \quad (4.21)$$

estas ecuaciones pueden ser fácilmente integra
das, siendo su solución general de la forma

$$V(x) = A \cosh \gamma x + B \sinh \gamma x \quad (4.22)$$

$$I(x) = C \cosh \gamma x + D \sinh \gamma x \quad (4.23)$$

De las constantes de integración A,B,C,D, sola
mente dos pueden ser escogidas independientemen
te, así sí $x = 0$

$$V(0) = A \cdot 1 + B \cdot 0$$

$$I(0) = C \cdot 1 + D \cdot 0$$

Por lo tanto

$$A = V(0)$$

$$C = I(0)$$

También se pueden encontrar los valores de las constantes B y D sustituyendo los valores de $V(x)$ e $I(x)$ en las ecuaciones diferenciales de segundo orden y luego haciendo $x = 0$, esta operación da como resultado:

$$B = -Z_0 I(0) \quad D = -\frac{V(0)}{Z_0}$$

En términos de $V(0)$ e $I(0)$ nuestras soluciones son:

$$V(x) = V(0) \cdot \cosh \gamma x - Z_0 I(0) \cdot \sinh \gamma x$$

$$I(x) = I(0) \cdot \cosh \gamma x - \frac{V(0)}{Z_0} \cdot \sinh \gamma x$$

Si $V(0)$ e $I(0)$ son conocidas, entonces estas ecuaciones permiten calcular las corrientes y voltajes, así como la potencia real y reactiva en cualquier sección de la línea.

Circuito equivalente de la línea larga

Consideremos el circuito π de la figura N^o

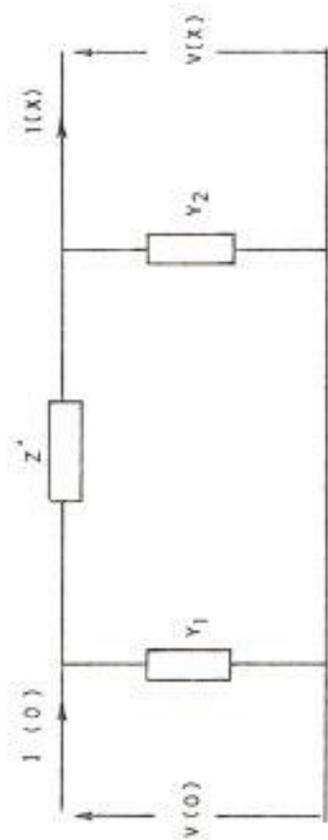


FIGURA N° 4.6. CIRCUITO EQUIVALENTE DE UNA LINEA LARGA

4.6., el mismo que consiste de un ramal serie Z y dos ramales en paralelo Y_1 y Y_2 . Podemos escribir las siguientes relaciones entre los voltajes y corrientes terminales

$$V(x) = V(0) - Z' I(0) - Y_1 \cdot V(0) \quad (4.24)$$

$$I(x) = I(0) - Y_1 \cdot V(0) - Y_2 \cdot V(x) \quad (4.25)$$

reordenando la primera ecuación:

$$V(x) = V(0) (1 + Z \cdot Y_1) - Z \cdot I(0)$$

$$I(x) = I(0) (1 + Z' \cdot Y_2) - V(0) (Y_1 + Y_2 + Z' \cdot Y_1 \cdot Y_2)$$

Comparando estas ecuaciones con las soluciones encontradas anteriormente podemos obtener:

$$1 + Z' \cdot Y_1 = 1 + Z' \cdot Y_2 = \cosh \gamma x$$

$$Z' = Z_0 \cdot \operatorname{senh} \gamma x$$

$$Y_1 + Y_2 + Z' \cdot Y_1 \cdot Y_2 = \frac{1}{Z_0} \cdot \operatorname{senh} \gamma x$$

Facilmente se puede comprobar que estas ecuaciones serán satisfechas escogiendo:

$$Z' = Z_0 \cdot \text{sen } h\gamma x \quad (4.26)$$

$$Y_1 = Y_2 = \frac{1}{Z_0} \frac{\text{Cos } h\gamma x - 1}{\text{Sen } h\gamma x} = \frac{1}{Z_0} \tan h \frac{\gamma x}{2} \quad (4.27)$$

Sustituyendo los valores de Z_0 .

$$Z' = \sqrt{\frac{Z'}{y}} \text{ Sen } h\gamma x \cdot \sqrt{\frac{Z}{z}} \frac{1}{1}$$

$$Z' = \frac{z1}{\sqrt{zy} \cdot 1} \text{ Sen } h\gamma x$$

$$Z' = \frac{Z \text{ Sen } h\gamma x}{Y1} \quad (4.28)$$

$$Y_1 = Y_2 = \frac{Y'}{2} = \frac{1}{Z_0} \tan h \frac{\gamma x}{2}$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{1}{\sqrt{\frac{Z}{y}}} \text{ tg } h \frac{\gamma l}{2} \cdot \sqrt{\frac{y}{y}} \frac{1}{1}$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{y1}{\sqrt{zy}} \text{ tg } h \frac{\gamma l}{2}$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{Y}{Yl} \operatorname{tg} h \frac{Yl}{2} ; Y,$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{Y}{2} \frac{\operatorname{tg} h \frac{Yl}{2}}{Yl/2} \quad \cdot \quad (4.29)$$

4.4. PROPOSITO DE LAS LINEAS DE TRANSMISION

Los propósitos fundamentales de las líneas de transmisión se pueden sintetizar en los siguientes puntos:

- Proporcionar un medio de transporte de energía eléctrica - desde la fuente de generación hasta los centros de carga a un nivel de voltaje adecuado.
- Transmitir dicha energía con la menor cantidad de pérdidas posibles.

CAPITULO V

MODELO DE LINEAS DE TRANSMISION UTILIZADO PARA INVESTI GACION EN EL LABORATORIO

5.1. COMPONENTES

El propósito del modelo de líneas de transmisión es proveer un circuito práctico que represente un sistema de potencia típico para experimentos en el laboratorio.

Los componentes del modelo están montados e instalados en un tablero, en el cual los terminales de cada elemento, son de fácil acceso; la construcción del tablero fue efectuada íntegramente en el taller del Laboratorio de Sistemas de Potencia de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la ESPOL.

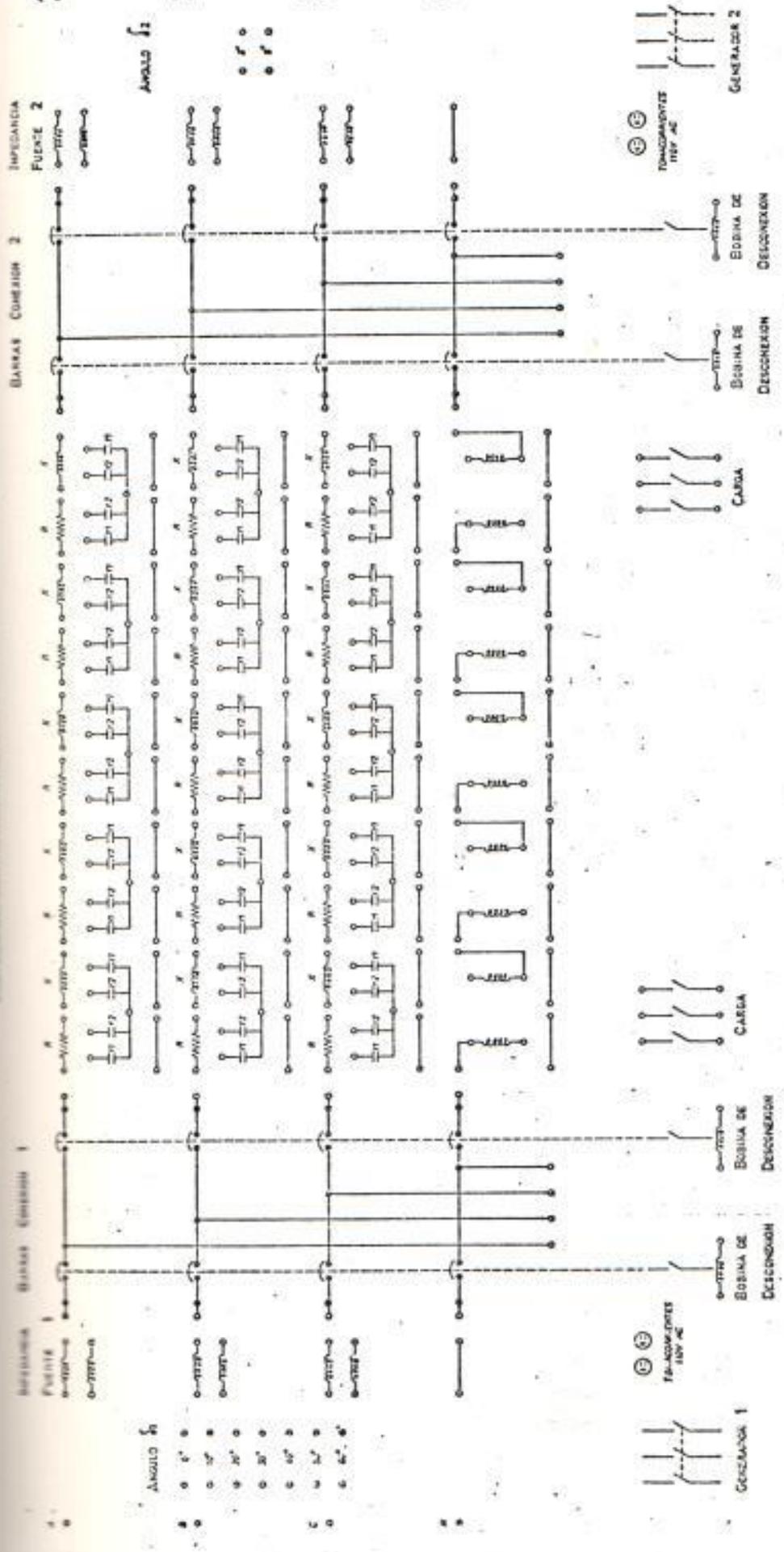
Para su funcionamiento necesita de una fuente de alimentación trifásica de 208 voltios.

El modelo en sí se puede dividir en tres secciones (Ver figura N°5.1).

Generación

La simulación de la fuente de generación, a cada lado de la línea se efectúa utilizando dos autotransformadores variables trifásicos de 0 -208 voltios, con ellos se logra el control de voltaje de operación del sistema y puede considerarse como el "control de campo" del generador representado por la combinación del transformador variable y del transformador cambiador de fase. Este último componente es un transformador trifásico conexión $\Delta - Y$, con derivaciones, (taps) en el secundario que permiten obtener cambios de fase hasta de 60° , en pasos de 10° para el instalado en el terminal de envío y en pasos de 5° para el instalado en el terminal de recepción. Con estos transformadores se pueden simular cambios de fase entre las dos fuentes de generación y puede considerarse como el control de la entrada de potencia al primomotor.

MODELO DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN



IMPEDANCIA

FUENTE 2

BARRAS CONEXION 2

IMPEDANCIA

FUENTE 1

BARRAS CONEXION 1

IMPEDANCIA

FUENTE 2

BARRAS CONEXION 2

IMPEDANCIA

ANGULO S₂

ANGULO S₁

○ r' ○
○ r'' ○

TRANSFORMADORES
100V AC

TRANSFORMADORES
100V AC

GENERADOR 2

GENERADOR 1

BOBINA DE DESCONECHO

BOBINA DE DESCONECHO

BOBINA DE DESCONECHO

BOBINA DE DESCONECHO

CARGA

CARGA

Interiormente están conectados el secundario del autotransformador variable al primario del transformador cambiador de fase, quedando accesible al panel los terminales del primario (A-B-C-N) y las fases a y b del secundario de este último transformador.

En la parte inferior del panel se encuentran localizadas las perillas para la variación del voltaje de los autotransformadores.

Para energizar cualquiera de las dos fuentes habrá necesidad de accionar los disyuntores trifásicos de 15 amperios ubicados en los costados inferiores del panel.

A continuación encontramos las bobinas que representan la impedancia de la fuente; existen dos bobinas por fase las que pueden conectarse en serie o en paralelo. Como se mencionó al principio de este capítulo, el modelo trata de ser lo más representativo posible de un sistema real y con estas bobinas de fuente se consigue un control de voltaje en la línea misma y es de importancia cuando se efectúan

pruebas con relés de distancia

Si trabajamos en sistemas por unidad, inclusi
ve esta impedancia puede representar la suma
de la impedancia de la fuente generadora más
la impedancia de los transformadores de poten
cia que elevan la tensión de generación a una
tensión de transmisión.

Barras de Conexión

Esta sección está equipada con dos disyuntores
de cuatro polos de 5 amperios con bobina de
desconexión la que al recibir una señal mo
mentánea que puede provenir de un relé de
protección, produce el disparo del disyuntor; -
con esto simulamos desconexiones automáticas -
del sistema por fallas en el mismo.

El propósito de colocar dos disyuntores en és
tas barras de conexión, es que el uno desconecta
el sistema para fallas en la línea y el
otro lo hace para fallas en barras o en lí
neas de transmisión paralelas si las hubiera.

Comparando el modelo con sistemas reales, es tos disyuntores representan a grandes disyuntores, cuya acción está supeditada a la actuación de relés de protección; además el disyuntor ubicado más cercano a la generación debe proporcionar protección de respaldo al otro.

En esta sección se ubican también tres interruptores monofásicos para conectar a través de ellos cargas locales.

Existe la posibilidad de conectar otras líneas de transmisión en paralelo con la existente, siempre y cuando se tengan los elementos dísponibles para simular la línea.

Estas barras de conexión están ubicadas tanto en el terminal de envío como en el terminal de recepción.

Los terminales marcados \emptyset son puntos de prueba para medición de magnitudes de voltaje o corriente en barras, para lo cual se utiliza un conector especial.

Línea de Transmisión

Esta sección está formada por cinco módulos π por fase, los mismos que permiten realizar estudios de líneas con parámetros distribuidos además en el neutro del sistema van colocadas 5 bobinas utilizadas para simular condiciones trifásicas desbalanceadas, con ello se logra, representar correctamente la impedancia de secuencia cero.

Los módulos π representan alternativas de conexión de dos grupos de capacitores por cada ramal paralelo, con esto se puede representar voltajes de operación reales de diferente magnitud.

La resistencia del ramal serie de cada módulo, como se demostrará más adelante, es pequeña; por tal motivo, se han colocado independientemente los terminales de resistencias en serie con la inductancia del modelo. El valor de estas resistencias serán escogidas para cada práctica en particular ya que esta alternativa facilita el seleccionar el valor más adecuado de la relación X/R de la línea en estudio.

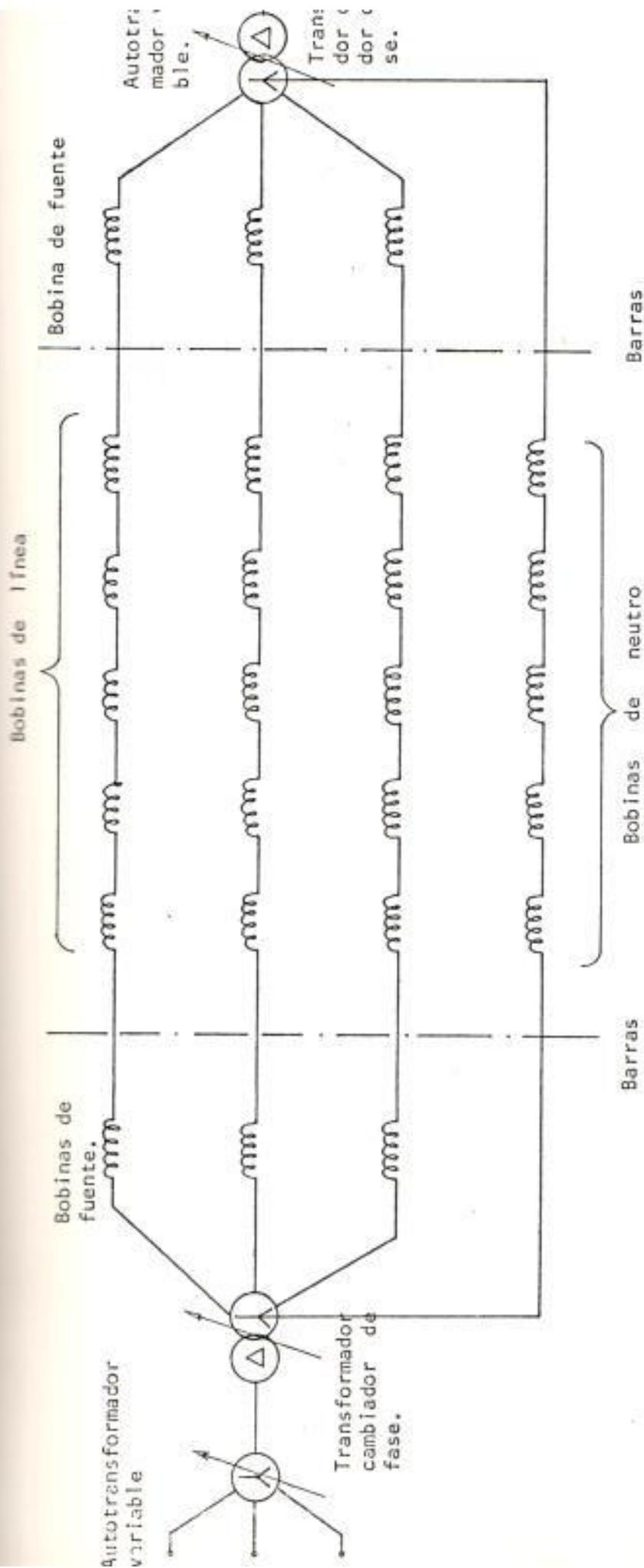


FIGURA N° 5.2.: DIAGRAMA BASICO DEL MODELO DE SISTEMAS DE POTENCIA

Para propósitos de representar líneas de transmisión cortas en las cuales no se toma en consideración los ramales paralelo, se provee líneas de conexión en las 3 fases para representar el neutro.

Adicionalmente en el tablero existen cuatro tomacorrientes polarizada de 110 voltios para conexión de equipos de medición a utilizarse en las prácticas.

Un esquema del circuito eléctrico real se muestra en la figura N° 5.2.

5.2. DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LOS PARAMETROS DE LOS MODULOS INDIVIDUALES

Para obtener los valores de los parámetros de los módulos π de la línea se procede de la siguiente forma:

IMPEDANCIA (Z)

Con una fuente de voltaje variable se aplica una tensión al módulo π tomando mediciones de voltaje y co

riente de acuerdo al circuito de la figura N° 5.3.
los resultados se presentan en la tabla N° 1.

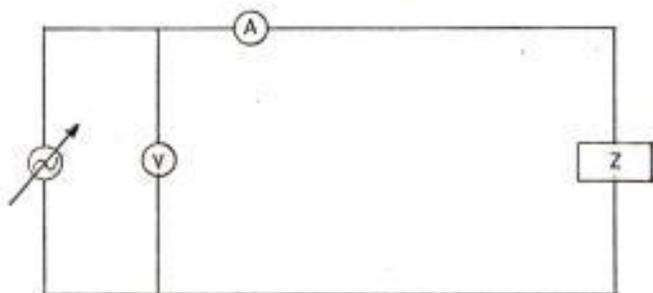


FIGURA N°5.3. CIRCUITO ELECTRICO PARA DETERMINAR LA IMPEDANCIA
DE UN MODULO π

El valor de la impedancia (Z) se obtiene de la fórmula $Z = V/I$.

De los valores de Z para diferentes valores de V calculamos un valor promedio que es el que se tomará como definitivo.

$$\bar{Z} = 4.820 \Omega$$

TABLA N° 1

MEDICIONES OBTENIDAS DEL CIRCUITO DE LA FIGURA N° 3

V(Voltios)	I (Amperios)	Z(Ohms)
0.685	0.142	4.824
1.370	0.283	4.841
2.060	0.429	4.802
4.180	0.870	4.805
6.270	1.305	4.805
8.380	1.742	4.811
9.210	1.914	4.812
12.120	2.500	4.848
14.170	2.920	4.853
39.200	8.100	4.840
48.400	10.080	4.802
58.600	12.120	4.835
71.700	15.060	4.761

RESISTENCIA (R)

Para encontrar el valor de la resistencia del módulo π se aplica el método de corriente continua utilizando el circuito de la figura N° 5.4, para diferentes valores de voltaje de entrada se registran los respectivos valores de corriente y en base a estos se obtiene el valor de R ($R = V/I$), Tabla N° 2

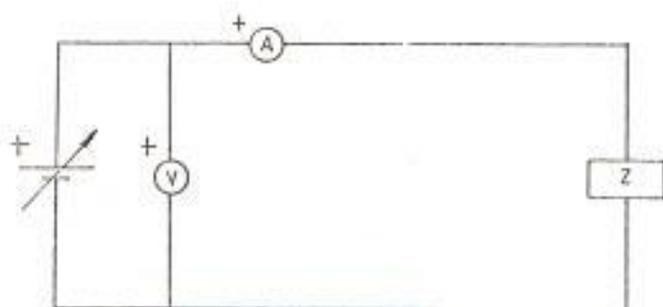


FIGURA N° 5.4. CIRCUITO ELECTRICO PARA DETERMINAR EL VALOR RESISTIVO DE UN MODULO π

Al circular corriente continua através de una inductancia, ésta se comporta como un cortocircuito y el único elemento que presenta oposición a la corriente es la resistencia.

TABLA N° 2.
 MEDICIONES DEL CIRCUITO DE LA FIGURA N° 4

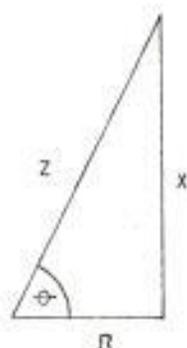
V (Voltios)	I (Amperios)	R (Ohms)
0.100	0.522	0.192
0.435	1.900	0.230
0.506	2.200	0.230
0.839	3.620	0.231
1.000	4.350	0.230
1.920	8.180	0.235

Al igual que con la impedancia, de todos los valores de R obtenemos un promedio que será el que se utilice como definitivo

$$\bar{R} = 0.2312 \text{ } (\Omega).$$

ANGULO DE LA IMPEDANCIA

De los valores obtenidos se calcula el ángulo θ de los módulos π



$$X = \sqrt{(4.820)^2 - (0.2312)^2}$$

$$X = 4.814 \text{ } \Omega$$

$$\theta = \text{tg}^{-1} \frac{4.814}{0.2312}$$

$$\theta = 87.25^\circ$$

CAPACITORES DE LOS RAMALES PARALELOS

De los valores de placa de los capacitores de los módulos π se tiene:

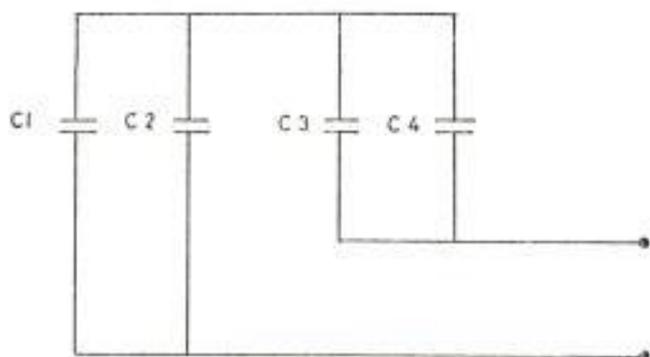
$$C_1 = C_2 = 0.022 \text{ } \mu\text{F } 600 \text{ V}_{\text{DC}}$$

$$C_3 = C_4 = 0.47 \text{ } \mu\text{F } 600 \text{ V}_{\text{DC}}$$

$$C_1 // C_2 = 0.044 \text{ uf}$$

$$C_3 // C_4 = 0.94 \text{ uf}$$

$$C_1 // C_2 // C_3 // C_4 = 0.984 \text{ uf}$$



En el modelo los ramales paralelos están representados por Y_1 , Y_2 , siendo sus valores:

$$Y_1 = 2\pi f(C_1 // C_2)$$

$$Y_1 = 16.59 \times 10^{-6} \text{ Mhos}$$

$$Y_2 = 2\pi f(C_3 // C_4)$$

$$Y_2 = 354.37 \times 10^{-6} \text{ Mhos}$$

CIRCUITO EQUIVALENTE π

Luego de haber obtenido los valores de los módulos π individuales el circuito equivalente es el siguiente:

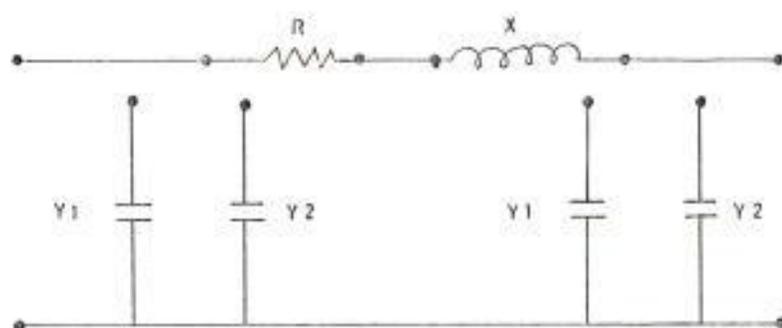


FIGURA N^o 5.5. CIRCUITO EQUIVALENTE π DE CADA MÓDULO

Siendo sus valores:

$$X = 4.814 \Omega$$

$$Y_1 = 16.59 \times 10^{-6} \text{ Mhos}$$

$$Y_2 = 354.37 \times 10^{-6} \text{ Mhos}$$

El valor de R como se explicó anteriormente será seleccionado de acuerdo con los objetivos de cada práctica en particular.

Una vez obtenidos los valores de los módulos π individuales se determinará el valor de la impedancia de la línea formada por los 15 módulos conectados para una representación monofásica de una línea real.

Aplicando un voltaje de 110 voltios A.C. de la entrada de los 15 módulos, con la salida en cortocircuito se mide la corriente de entrada y de la relación V/I se obtiene el valor de la impedancia de la línea (Z_L).

a) Para el modelo utilizando los ramales Y_1, Y_2 en paralelo.

$$Z_L = 73.046 \angle 87^\circ \Omega$$

$$X/R = 19.08$$

b) Para el modelo utilizando el ramal Y_2 únicamente

$$Z_L = 64.18 \angle 87.3^\circ \Omega$$

$$X/R = 21.20$$

c) Para el modelo utilizando el ramal Y_1 únicamente

$$Z_L = 65.40 \angle 87^\circ \Omega$$

$$X/R = 19.08$$

En vista de que los valores de la relación X/R de la línea representada por los módulos π son altos, el mismo que es adecuado para representar sistemas reales de muy alto voltaje, para simular un sistema real existente en nuestro medio (230 KV), se presenta en el modelo la opción de conectar en serie con la inductancia de cada módulo, resistencias exteriores con el fin de llevar el valor de R a cantidades razonables dentro de la práctica.

En la tabla N^o 3 se presentan valores de parámetros de líneas de transmisión reales a fin de comparar con los valores del modelo.

Comparando los valores de la relación X/R del modelo y los de la tabla que viene a continuación, observamos que el más aproximado corresponde a una línea de 400 KV de 4 haces de conductores, cuyo calibre es 500 MCM, es decir que el modelo tal como se presenta puede ser la representación de un sistema de alto voltaje, además de tener una configuración de haces de conductores.

TABLA N° 3

PARAMETROS DE LINEAS DE TRANSMISION REALES

Voltaje	132 KV		275 KV		400 KV	
	Nº y área Conductores (mm ²)	1x258 (500 MCM)	2x113 (223 MCM)	2x258 (500 MCM)	2x258 (500 MCM)	4x258 (500 MCM)
R (Ω/Km)	0.115	0.068	0.034	0.034	0.034	0.017
Xl (Ω/Km)	0.410	0.404	0.335	0.323	0.323	0.270
1/Xc (μU)	7.59	7.59	9.52	9.52	9.52	10.58
Zo (Ω)	373	371	302	296	296	258
X _L /R	2.6	5.9	4.3	9.5	9.5	15.8

Como se había señalado con anterioridad, para poder representar sistemas a voltajes de operación de 230Kv y 138 Kv y con disposición de un conductor por fase, como es el caso de las líneas de transmisión existentes en nuestro país habrá necesidad de variar por algún método el valor de R y consiguientemente el valor de X/R del modelo.

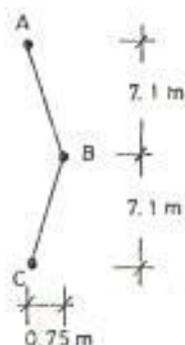
Para encontrar el valor de la resistencia que debe añadirse en cada módulo, se presenta a continuación un ejemplo tomando valores reales de la línea de transmisión Quito - Guayaquil.

LINEA DE TRANSMISION QUITO - GUAYAQUIL

- Calibre del conductor: 1113 MCM

El espaciamento equivalente para líneas de uno y doble circuito será calculado a continuación:

a) Un solo circuito:



$$X = \sqrt{7.10^2 + 0.75^2} = 7.1395 \text{ m}$$

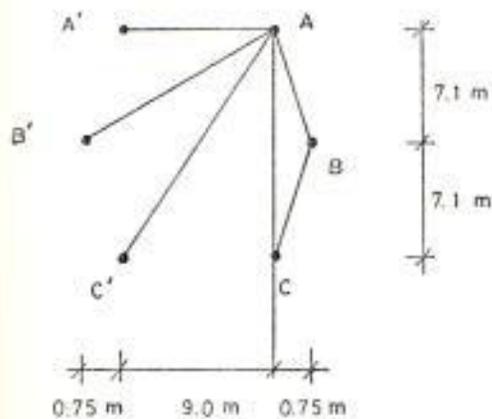
$$D_s = \sqrt{7.1395^2 \times 14.2}$$

$$D_s = 8.9786 \text{ m.}$$

$$D_s = 29.457'$$

$$D_s = 29'5.48''$$

b) Doble circuito



$$AA' = CC' = 9.0 \text{ m.}$$

$$AB' = BA' = BC' = CB' = 12.06 \text{ m.}$$

$$AC' = CA' = 16.81 \text{ m.}$$

$$AC = A'C' = 14.20 \text{ m.}$$

$$AB = BC = A'B' = B'C' = 7.1395 \text{ m.}$$

$$BB' = 10.5 \text{ m.}$$

$$D_s = \sqrt[5]{AA'^2 \times AB'^2 \times AC'^2 \times AC^2 \times AB^4 \times BB'}$$

$$D_s = \sqrt[5]{9.0^2 \times 12.06^2 \times 16.81^2 \times 14.2^2 \times 7.1395^2 \times 10.5}$$

$$D_s = \sqrt[5]{75.2253 \times 10^{13}}$$

$$D_s = 8.2137 \text{ m.}$$

$$D_s = 26.947953'$$

$$D_s = 26' 11.375''$$

De las tablas respectivas

- Conductor 1113 MCM ACSR (doble circuito) para

$$D_s = 26' 11.375''$$

$R = 0.0844 \Omega/\text{milla} (60\text{Hz}, 25^\circ\text{C})$ corrientes pequeñas

$R = 0.0969 \Omega/\text{milla}$ (60 Hz, 50°C) corrientes 75% capacidad

$$X_1 = X_d + X_a$$

$X_d = 0.38 \Omega/\text{milla}$ (a un pie de separación)

X_a para $26'$ $11.375''$ o $26.947953'$

$$26' - 0.3953$$

$$27' - \underline{0.3999}$$

$$0.0046$$

$$4.6 \times 10^{-3} - 1'$$

$$X - 0.947953'$$

$$X = 4.36058 \times 10^{-3}$$

$X_a = 0.39966 \Omega/\text{milla}$

$$X_1 = 0.38 + 0.39966$$

$$X_1 = 0.77966 \Omega/\text{milla}$$

$$X_c = X_d' + X_a'$$

$X_d' = 0.0867 \text{ M } \Omega/\text{Milla}$ (a un pie de separación)

X_a' para $26.947953'$

$$26' - 0.0967$$

$$27' - \underline{0.0978}$$

$$0.0011$$

$$1' - 0.0011$$

$$0.947953' - X$$

$$X = 1.04274 \times 10^{-3}$$

$$Xa' = 0.0967 + 1.04274 \times 10^{-3}$$

$$Xa' = 0.0977427 \text{ M } \Omega/\text{milla}$$

$$Xc = 0.0867 + 0.0977427$$

$$Xc = 0.18444 \text{ M}\Omega/\text{milla}$$

$$Yc = 5.4218 \times 10^{-6} \text{ U/milla}$$

Relación X/R:

$$X_1/R = \frac{0.77966}{0.0844} = 9.2377 \text{ (25}^\circ\text{C)}$$

$$X_1/R = \frac{0.77966}{0.0909} = 8.046 \text{ (50}^\circ\text{C)}$$

De la línea de transmisión experimental

$$X_1 = 72.946 \text{ } \Omega \text{ (se mantiene fijo)}$$

$$R = 3.823 \text{ } \Omega \text{ (varía)}$$

$$X/R = 8.046 \text{ (valor deseado)}$$

$$R_T = \frac{X}{8.046} = \frac{72.946}{8.046} = 9.066 \text{ } \Omega$$

$$R_T = R + R_{AN}$$

$$R_{AN} = R_T - R \text{ (Resistencia por añadirse)}$$

$$R_{AN} = 5.243 \Omega$$

Este valor de $R_{AN} = 5.243 \Omega$ es el que debe añadirse a los módulos π para tener en el modelo experimental una relación $X/R = 8.046$ y poder representar la línea de transmisión Quito - Guayaquil.

El valor de la resistencia por añadirse a cada módulo es:

$$R = \frac{R_{AN}}{15} = 0.349 \Omega$$

$$R = 0.349 \Omega$$

Sumando al valor de la resistencia del ramal serie de cada módulo π tenemos un valor total de R de 0.5802Ω .

Los valores modificados de la impedancia de línea son:

$$Z_L = 9.066 + j 72.946$$

$$Z_L = 73.507 \angle 82.915^\circ \Omega$$

$$Z_{pu} = 0.969 + j 0.77966$$

$$Z_{pu} = 0.78566 \angle 32.915^\circ \Omega/\text{milla}$$

$$Z_L = Z_{pu} \times l$$

$$l = Z_L / Z_{pu}$$

$$l = 73.507 / 0.78566$$

$$l = 93.56 \text{ millas}$$

Con estas adecuaciones tenemos el modelo para representar una línea de aproximadamente 160 Km de longitud a 230 Kv, doble circuito, conductor 1113 MCM.

Para propósitos de prácticas en el laboratorio no fue posible localizar las resistencias de 0.349Ω en número de 15, por lo cual se optó por colocar una sola resistencia de 5.243Ω al comienzo de la línea.

5.3. CARACTERÍSTICAS NOMINALES DE LOS COMPONENTES

Dos autotransformadores trifásicos variables

Para simulación de las fuentes de generación a los dos lados de la línea, con lo cual se si

mula el control de voltaje de la fuente.

VARIABLE TRANSFORMER SV 274

TYPE:YIG 0-208 voltios

THE ZENITH ELECTRONIC Co. LTDA.

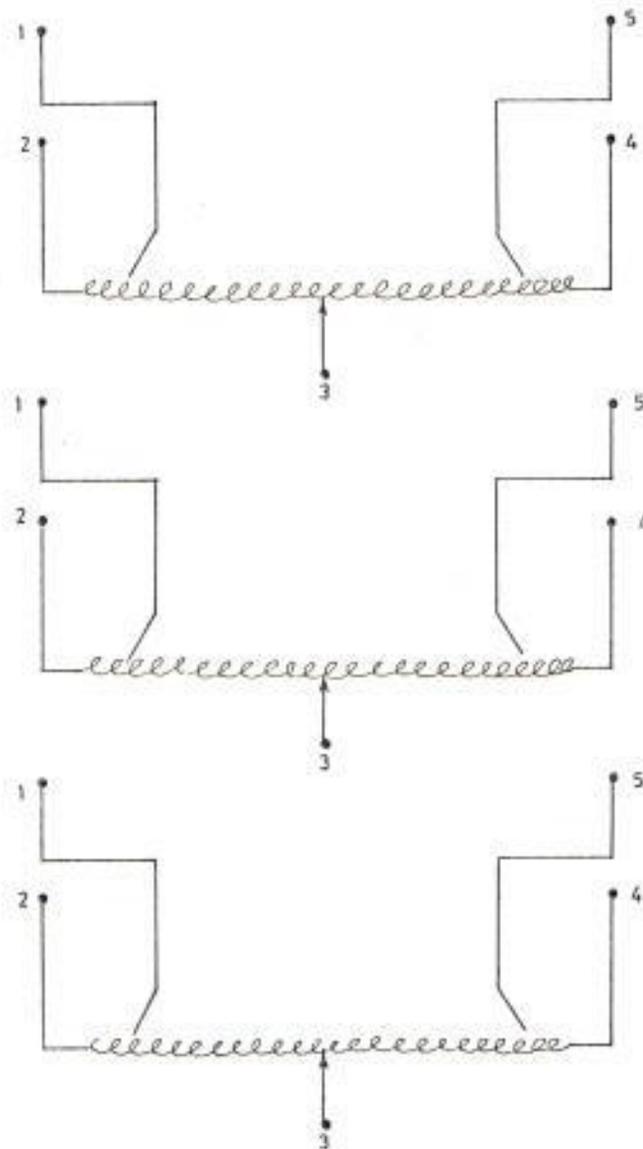


FIGURA N°5.6. AUTOTRANSFORMADOR TRIFASICO VARIABLE PARA SIMULACION DE CONTROL DE VOLTAJE FUENTE GENERACION.

Como se observa en la figura N° 5.6., en realidad son 3 autotransformadores monofásicos a los cuales se les conecta como un autotransformador trifásico en estrella.

El terminal 3 es móvil y por medio de una perilla simultáneamente se accionan las tres fases, obteniendo de esta forma un voltaje trifásico variable de 0 - 208 voltios.

Transformadores trifásicos con variaciones del ángulo de fase en su salida

Para simulación del control de entrada de combustible en el primomotor de la fuente de generación.

VARIACIONES DE FASE EN PASOS DE 10°, TRANSFORMADOR INSTALADO EN EL TERMINAL DE ENVÍO:

STURDY TRANSFORMER

SERIAL N° L710/1 TYPE: AN

INPUT: 208 V 60 Hz 3 PHASE

OUTPUT: 3 x 120 V 20 Amps.

STUDY TRANSFORMER Co. LTD.

HAMSTERLEY COLLIERY NEW CASTLE - ON - TYNE

El secundario aunque lógicamente es trifásico se lo usa para alimentación netamente monofásica.

Como se observa el esquema de este transformador en la figura N° 5.7. las fases del secundario tienen derivaciones (taps) para dar cambios de fase entre 10° y 60° , aproximadamente, en pasos de 10° .

El diseño del transformador ha reducido la densidad del flujo para dar aproximadamente 1 % de corriente de magnetización. Está conectado en $\Delta - Y$ con el punto neutro del devanado estrella llevado al exterior.

Este transformador es del tipo abierto con todos los terminales llevados al panel colocado en la armazón del mismo.

Las variaciones del ángulo de fase se obtienen entre dos fases de la siguiente manera:

$$a_7^n = 0$$

$$a_5b_3 = 40^\circ$$

$$a_6b_2 = 10^\circ$$

$$a_6b_2 = 50^\circ$$

$$a_5b_3 = 20^\circ$$

$$\eta b_7 = 60^\circ$$

$$a_4b_4 = 30^\circ$$

Entre las fases b-c se obtienen 60° más de desfase y entre c-a otros 60° en total 180° ; invirtiendo las fases se obtienen 180° ; en total tomando las tres bobinas se produce un desfase de 360°

VARIACIONES DE FASE EN PASOS DE 5°
TRANSFORMADOR INSTALADO EN EL TERMINAL
DE RECEPCION:

Sturdy Transformer

Serial N^o 6710/2 Type: An

Input: 208 V. 60 Hz 3 Phase

Output: 3 x 120 V 20 Amps.

Sturdy Electric Co. Ltd.

Hamsterley Colliery New Castle - on - tyne.

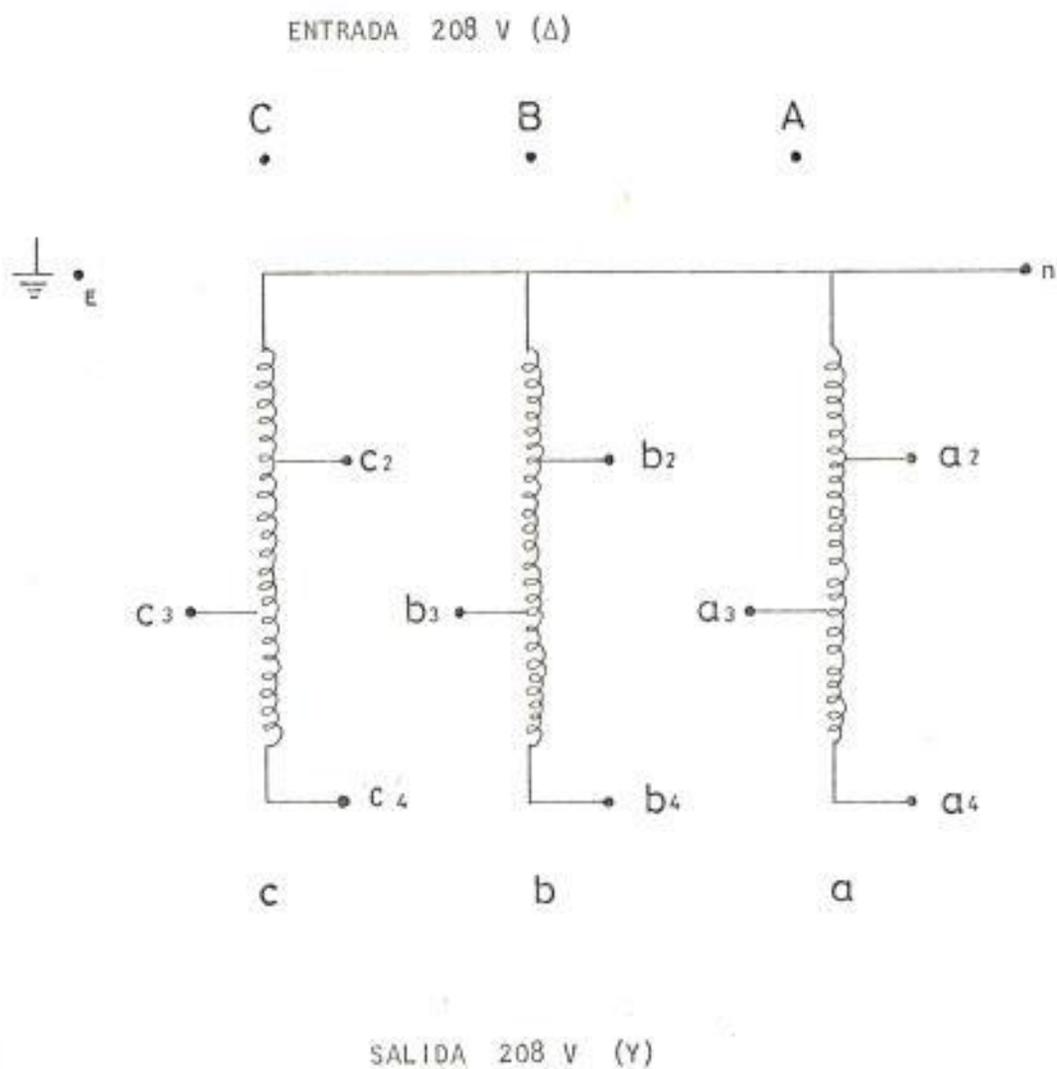


FIGURA N°5.8. TRANSFORMADOR CAMBIADOR DE FASE EN PASOS DE 5°

Posee las mismas características del transformador descrito en 5.3.2.1., con la diferencia que los devanados de salida tienen derivaciones para producir cambios de fase en pasos de 5° solamente.

Así, tomando las fases a - b tenemos:

$$a_4b_1 = 0^\circ$$

$$a_3b_2 = 5^\circ$$

$$a_2b_3 = 10^\circ$$

$$a_1b_4 = 15^\circ$$

Este transformador está ubicado en el terminal de recepción del modelo.

Bobinas de Fuente

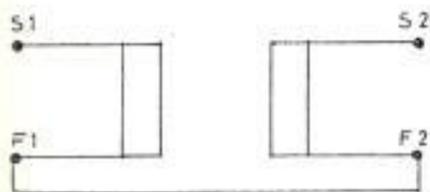
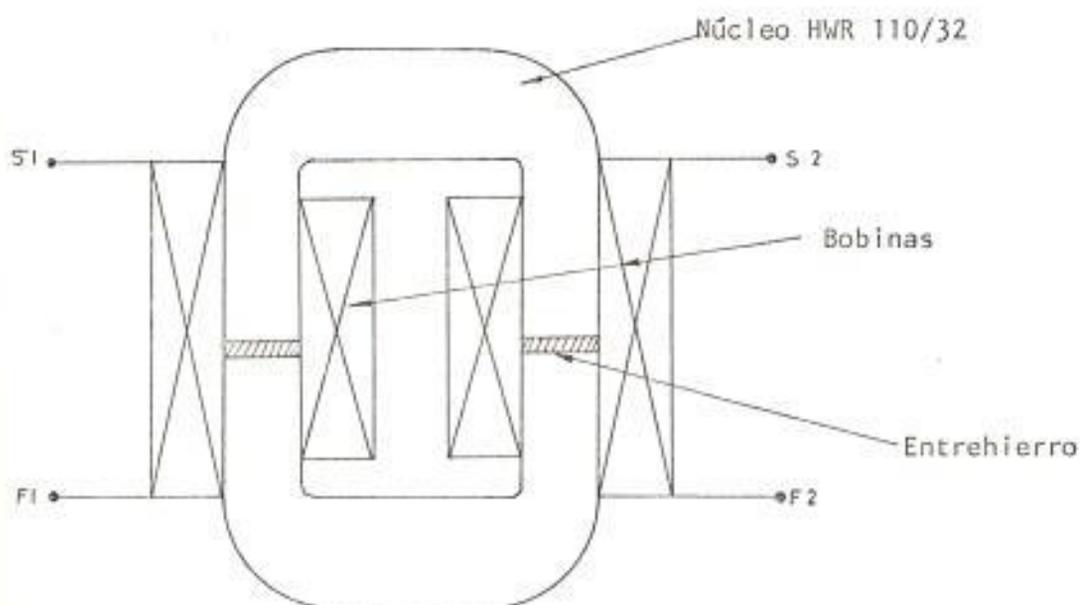
Reactancia inductiva a 60 Hz:

a) conectadas en serie 16.2 Ω

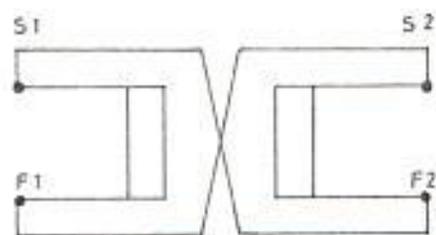
b) conectadas en paralelo 4.05 Ω

Resistencia del devanado : 0,205 Ω

Núcleo: De un sólo lazo de núcleo
HWR 110/32.



a) Conexión Serie



b) Conexión Paralelo

FIGURA N^o 5.9.: BOBINA DE FUENTE CON SUS COMPONENTES Y ALTERNATIVAS DE CONEXION

5.4. DIAGRAMAS UNIFILARES DEL MODELO

Modelo de simulación

En la figura N° 5.10, se representa un Diagrama Esquemático del modelo, mediante el cual se simulan los diferentes componentes de un sistema de potencia real.

Sistema de Potencia que puede ser representado

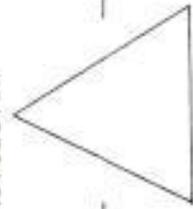
Para el futuro se puede construir, nuevos módulos π con la finalidad de representar sistemas de potencia con líneas de transmisión a doble circuito; en la figura N° 5.11., se presenta un Diagrama unifilar del modelo con la alternativa de esta nueva línea, además de la posibilidad de interconectar fuentes separadas.

Simulación de la generación en el terminal 1



Autotransformador variable 3 ϕ .

Control de excitación



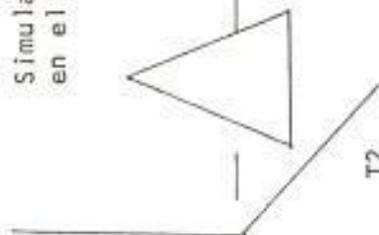
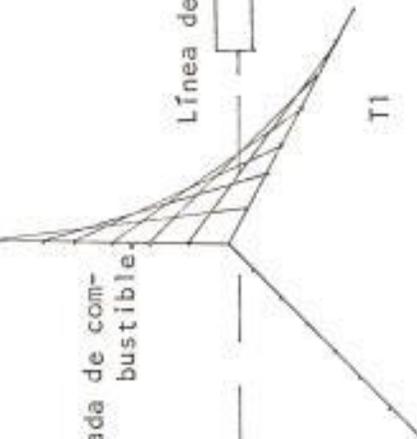
Transformador en Δ -Y con derivaciones para obtener cambios de fase en la salida monofásica (pasos de 10°).

Entrada de combustible



Línea de transmisión exc.

T1



T2

Como T₂ pero con derivaciones de 5° .



Autotransformador variable 3 ϕ

Simulación de generación en el terminal 2

FIGURA N° 5.10. METODOS PROPUESTOS DE SIMULACION DE OPERACION CON FUENTES DE POTENCIA EN CADA EXTREMO DE LA LINEA

CIRCUITOS LOCALES

- a. Cargas 3Ø Balanceadas
- b. Cargas inductivas para fenómenos transientes.

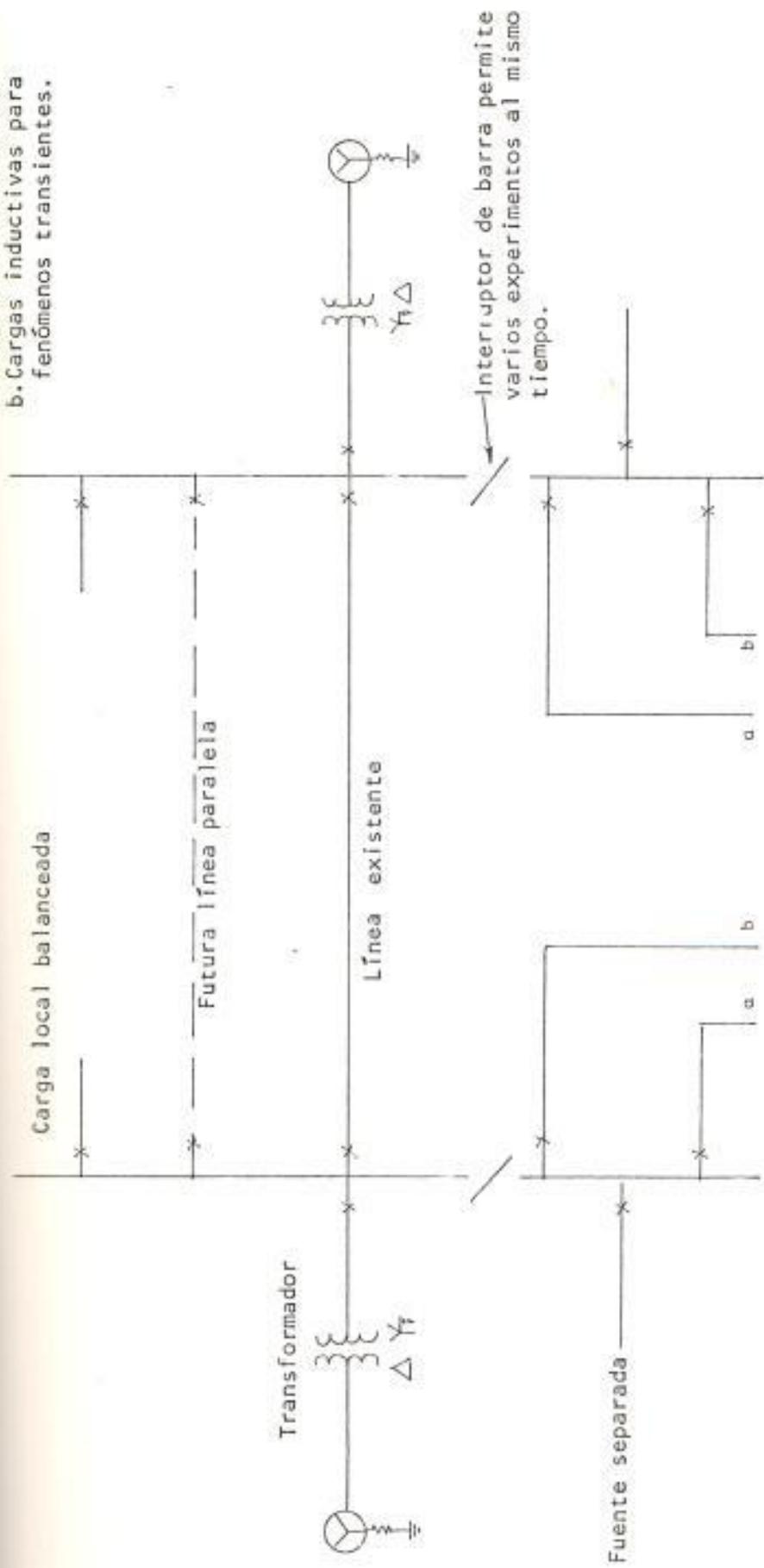


FIGURA N° 5.11. DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA DE POTENCIA A SER REPRESENTADO POR EL MODELO DEL LABORATORIO.

CAPITULO VI

COMPORTAMIENTO DE LAS LINEAS DE TRANSMISION PARA DIFERENTES CONDI- CIONES DE FUNCIONAMIENTO

6.1. EXPERIMENTOS

A continuación se presentan una serie de prácticas efectuadas en el Laboratorio de Sistemas de Potencia utilizando el modelo de líneas de transmisión en estudio.

6.1.1. Pruebas en un modelo de línea de transmisión monofásico Determinación de parámetros y constantes relevantes del modelo y probar el comportamiento de la línea

Objetivo:

Determinar los parámetros y constantes relevantes del modelo de líneas de transmisión y probar el comportamiento bajo diferentes condiciones.

Equipo a utilizarse:

- Modelo de línea de transmisión
- Amperímetro A.C.
- Multímetro digital
- Medidor de ángulo de fase

Teoría:

Como se explicó en el Capítulo V, al conectar -

en serie los 15 módulos π tenemos una representación unifilar de una línea de transmisión a doble circuito, conductor 1113 MCM, con una longitud aproximada de 160 Km., con la adición al modelo de un ramal resistivo serie de 5.243ohms. Además para efectos de esta práctica se utilizará el ramal paralelo Y_1 de cada módulo π .

Procedimiento

PRUEBAS PARA DETERMINAR LA IMPEDANCIA CARACTERISTICA DE LA LINEA:

Usar las 15 secciones π conjuntamente con la resistencia añadida tratada en el Capítulo V.

Con la salida en circuito abierto, obtener el voltaje de entrada (V_{in}) voltaje de salida (V_{out}) y la corriente de entrada (I_n).

De estos resultados calcular la inductancia vista en la entrada con la salida en circuito abierto es decir,

$$Z_{in_{o.c}} = \frac{V_{in}}{I_{in}} \text{ (salida en circuito abierto).}$$

Con la salida en cortocircuito (s.c), obtener el voltaje de entrada (V_{in}) y la corriente de entrada (I_{in}), luego calcular.

$$Z_{in_{s.c}} = \frac{V_{in}}{I_{in}} \text{ (salida en cortocircuito).}$$

Obtener la impedancia característica de la línea

$$Z_0 = \sqrt{Z_{in_{o.c}} \times Z_{in_{s.c}}}$$

Comparar con el resultado obtenido usando las constantes de la línea encontradas en el Capítulo V.

RESULTADOS

Prueba de Circuito Abierto:

$$V_{in} = 100 \angle 0^\circ \text{V}$$

$$I_{in} = 0.111 \angle 87^\circ \text{ A}$$

$$V_{out} = 103.2 \angle 359.2^\circ \text{ V}$$

$$Z_{in_{o.c}} = \frac{100 \angle 0^\circ}{0.111 \angle 87^\circ}$$

$$Z_{in_{o.c}} = 900.0 \angle -87.0^\circ \text{ Ohms}$$

Prueba de Cortocircuito:

$$V_{in} = 100 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$I_{in} = 1.0309 \angle 276.7^\circ \text{ A}$$

$$Z_{in_{s.c}} = \frac{100 \angle 0^\circ}{1.0309 \angle 276.7^\circ}$$

$$Z_{in_{s.c}} = 76.394 \angle 83.3^\circ \text{ Ohms}$$

Cálculo de la Impedancia Característica:

$$Z_o = \sqrt{900.0 \times 76.394} \angle \frac{-87.0 + 83.3}{2}$$

$$Z_o = 262.393 \angle -1.85^\circ \text{ Ohms}$$

Cálculo de la impedancia característica a partir de las constantes de la línea:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{0.78566 \angle 82.915^\circ}{5.4218 \times 10^{-4} \angle 90^\circ}}$$

$$Z_0 = 380.667 \angle -3.54^\circ \text{ Ohms}$$

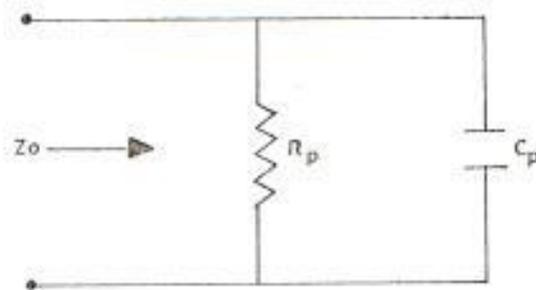
Comparando con el valor experimental, se nota que existe una diferencia considerable, la misma que se puede explicar por el valor de Y_c bastante diferente al de nuestro modelo, pero, que en todo caso se utilizó para darle un sentido más práctico al modelo.

CON LOS ELEMENTOS EXISTENTES EN EL LABORATORIO CONSTRUIR EL CIRCUITO EQUIVALENTE A LA IMPEDANCIA CARACTERISTICA DE LA LINEA COMO SE MUESTRA EN LA FIGURA:

Terminar la línea en Z_0 y confirmar que la impedancia de entrada también es Z_0 . Medir el voltaje a la entrada y

cada cinco secciones. Establecer el cam
 bio de fase existente por cada 5 sec
 ciones y sobre toda la longitud de la
 línea.

Determinar el valor de la constante de
 propagación de la línea.



RESULTADOS

$$Z_o = 262.342 \angle -1.85^\circ \text{ Ohms.}$$

$$\frac{1}{Z_o} = \frac{1}{R_p} + Y_{cp}$$

$$= \frac{1}{R_p} + j\omega C_p$$

$$\frac{1}{262.342 \angle -1.850} = \frac{1}{R_p} + j\omega C_p$$

$$3.812 \times 10^{-3} \angle 1.85^\circ = \frac{1}{R_p} + j\omega C_p$$

$$3.810 \times 10^{-3} + j1.231 \times 10^{-4} = \frac{1}{R_p} + j120\pi C_p$$

$$R_p = \frac{1}{3.810 \times 10^{-3}}$$

$$R_p = 262.467 \text{ Ohms.}$$

$$C_p = \frac{1.231 \times 10^{-4}}{120 \pi}$$

$$C_p = 0.3265 \text{ uf}$$

Por lo tanto los valores del circuito equivalente a la impedancia característica Z_o son:

$$R_p = 262.467 \text{ Ohms.} \quad C_p = 0.3265 \text{ uf}$$

Para una corriente de entrada de :

$$I_{in} = 0.371 \angle 1.5^\circ \text{ Amp}$$

Se midieron los siguientes valores de voltaje y ángulo de fase.

De los resultados de la tabla siguiente se obtiene el valor de la impedancia de entra-

da.

Punto del Modelo	VOLTAJE		Cambio de Fase
	Modulo	Angulo	
V _{in}	100	0	-
V _{5π}	98.1	356.4	3.6
V _{10π}	97.7	351.0	5.4
V _{15π}	97.2	345.5	5.5

$$Z_{in} = 269.54 \angle -1.5 \text{ Ohms} \approx Z_0$$

Se ha comprobado de esta manera que al conectar una carga equivalente a la impedancia característica en los terminales de recepción de una línea, la relación entre corriente y voltaje en cualquier sección de la misma es idéntica y aproximadamente igual a Z_0 .

Por otro lado, si bien existe una variación del ángulo del voltaje, a medida que se avanza hacia el terminal de recepción, ésta variación es también -

acompañada por un cambio en el ángulo de la corriente, de manera que el desfase entre V e I es constante.

CALCULO DE LA CONSTANTE DE PROPAGACION DE LA LINEA

$$\gamma = \sqrt{ZY}$$

$$\gamma = \sqrt{(0.78566) (5.4218 \times 10^{-6})} \left| \frac{82.915+90}{2} \right|$$

$$\gamma = 2.0639 \times 10^{-3} \left| 86.4075^\circ \right|$$

$$\gamma = 1.2932 \times 10^{-4} + j2.0598 \times 10^{-3}$$

$$\alpha = 1.2932 \times 10^{-3} \text{ constante de amortiguación (neper/milla)}$$

$$\beta = 2.0598 \times 10^{-3} \text{ constante de fase (neper/milla)}$$

Comparando estos valores con constantes de líneas de transmisión reales se concluye que están dentro de límites aceptables, lo cual amerita aún más nuestro modelo.

CALCULO DE LOS PARAMETROS DE UNA LINEA COM-
PLETA:

Utilizando los resultados de 6.1.1.4.1., se obtendrán los parámetros de la línea (A, D, y C pueden fácilmente encontrarse, B se puede calcular de: $A^2 - BC = 1$, o por la realización de una prueba adicional utilizando una pequeña resistencia en la salida, con lo cual se puede obtener la corriente de salida).

Comparar estos valores usando:

$$A = D = \cos h\gamma l$$

$$B = Z_0 \operatorname{Sen} h\gamma l$$

$$C = \frac{1}{Z_0} \operatorname{Sen} h\gamma l$$

RESULTADOS:

$$A = \frac{V_s}{V_r} \mid \text{O.C.}$$

$$A = \frac{100}{103.2} \mid \underline{359.2^\circ}$$

$$A = 0.969 | \underline{0.8}$$

$$B = \frac{V_s}{I_r} | \text{ s.c.}$$

$$B = \frac{100}{1.347} | \underline{-276.5^\circ}$$

$$B = 74.239 | \underline{83.50} \text{ Ohms.}$$

$$C = \frac{I_s}{V_r} | \text{ o.c.}$$

$$C = \frac{0.111 | 87^\circ}{103.2 | \underline{-359.2^\circ}}$$

$$C = 1.076 \times 10^{-3} | \underline{87.80^\circ} \text{ Mhos}$$

$$D = A = 0.969 | \underline{0.8^\circ}$$

CALCULO DE LAS CONSTANTES GENERALIZADAS A
PARTIR DE LAS FUNCIONES HIPERBOLICAS DE γl .

$$A = D = \text{Cos } \gamma l$$

$$= 2.0639 \times 10^{-3} | \underline{86.4075^\circ} \quad l = 93.56 \text{ millas.}$$

$$\gamma l = (2.0639 \times 10^{-3}) (93.56) | \underline{86.4075^\circ}$$

$$\gamma l = 0.1931 | \underline{86.4075^\circ}$$

$$\gamma_l = 0.0121 + j0.1927$$

$$\cos h\gamma_l = \cos h(\alpha_l + j\beta_l)$$

$$\cos h\gamma_l = \cos h\alpha_l \cos \beta_l + j \operatorname{Sen} h\alpha_l \operatorname{Sen} \beta_l.$$

$$\cos h\gamma_l = \cos h 0.0121 \cos 0.1927 + j \operatorname{Sen} h 0.0121 \operatorname{Sen} 0.1927$$

$$\cos h\gamma_l = (1.000815) (0.9815) + j(0.01121) (0.1915)$$

$$\cos h\gamma_l = 0.9815799 + j2.1467 \times 10^{-3}$$

$$\cos h\gamma_l = 0.9816 \angle 0.125^\circ$$

$$A = \cos h\gamma_l = 0.9816 \angle 0.125^\circ \quad \text{Valor te\u00f3rico}$$

$$A = 0.9691 \angle 0.8^\circ \quad \text{Valor experimental}$$

$$B = Z_0 \operatorname{Sen} h\gamma_l.$$

$$\operatorname{Sen} h\gamma_l = \operatorname{Sen} h\alpha_l \cos \beta_l + j \cos h\alpha_l \operatorname{Sen} \beta_l$$

$$\operatorname{Sen} h\gamma_l = \operatorname{Sen} h 0.0121 \cos 0.1927 + j \cos h 0.0121 \operatorname{Sen} 0.1927$$

$$\operatorname{Sen} h\gamma_l = (0.01121) (0.9815) + j(1.0000815) (0.1915)$$

$$\text{Sen } \theta = 0.1918 \angle 86.71^\circ$$

$$B = (262.342 \angle -1.85^\circ) (0.1918 \angle 86.71^\circ)$$

$$B = 50.317 \angle 84.89^\circ \text{ Ohms valor te\u00f3rico}$$

$$B = 74.239 \angle 83.5^\circ \text{ Ohms valor experimental}$$

$$C = \frac{1}{Z_0} \text{ Sen } \theta$$

$$C = \frac{0.1918 \angle 86.71^\circ}{262.342 \angle -1.85^\circ}$$

$$C = 0.7311 \times 10^{-3} \angle 80.56^\circ \text{ Mhos}$$

valor te\u00f3rico.

$$C = 1.076 \times 10^{-3} \angle 87.8^\circ \text{ Mhos}$$

valor experimental

Como se puede observar, luego de haber obtenido las constantes generalizadas de la l\u00ednea de transmisi\u00f3n experimental tanto en forma te\u00f3rica como tambi\u00e9n a partir de datos de laboratorio, sus valores mantienen una similitud con un margen de error

aceptable, influenciado principalmente por errores de apreciación en la medición.

EFFECTOS DEL CAMBIO DE CARGA SOBRE LAS CARACTERISTICAS DE LA LINEA

Con respecto a la figura, variar R_L a valores de:

$$R_L = Z_0 \quad R_L = \frac{Z_0}{2} \quad R_L = 2 Z_0$$



Ajustar R_v para dar $V_R = 4V$. Anotar los valores de V_s y V_R para cada caso.

DAIOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS DEL MODELO PARA DIFERENTES VALORES DE CARGA

VALOR CARGA	VOLTAJE GENERACION (VOLT)	VOLTAJE ENVIO (VOLTS)	VOLTAJE RECCION (VOLTS)	CAMBIO FASE (O)
$R_L = Z_0$	$17.2 \angle 0^\circ$	$4.0 \angle 0^\circ$	$4.0 \angle 346.2^\circ$	-13.8°
$R_L = 2Z_0$	$17.2 \angle 0^\circ$	$4.0 \angle 0^\circ$	$4.0 \angle 352.8^\circ$	7.2
$R_L = \frac{Z_0}{2}$	$17.1 \angle 0^\circ$	$4.6 \angle 0^\circ$	$4.0 \angle 334.7^\circ$	25.3

a) $R_v = 860 \text{ Ohms.}$

b) $R_v = 1514 \text{ Ohms}$

c) $R_v = 417 \text{ Ohms.}$

Como se anotó anteriormente al terminar una línea en su impedancia característica, la relación voltaje corriente, en cualquier punto es la misma; además, la tensión en el extremo receptor es de $I_R \times Z_0$ y no existe onda reflejada de tensión ni de corriente.

Una línea terminada en su impedancia característica se llama "LINEA INFINITA". Este nombre deriva del hecho que una línea de longitud infinita no puede tener onda reflejada.

También se puede comprobar que las condiciones para Z_0 son empleadas para múltiplos de este valor.

CONSTRUCCION DE LA CARTA DE LA LINEA:

Asumiendo que el modelo de la línea está destinado a representar una línea práctica cuyo voltaje de operación es 230 Kv y su corriente de carga 1110 amperios. Tomar los siguientes valores para el modelo.

$$V = \frac{230}{\sqrt{3}} = 132.8 \text{ Kv} \quad \text{valor para el}$$

modelo = 13.3 V

$$I = 1110 \text{ Amps.} \quad \text{Valor para el modelo =}$$

0.111 Amps.

Para obtener valores prácticos adaptables al modelo se ha considerado un factor reductor de 10^4 , tanto para el voltaje como para la corriente; este factor puede ser distinto con la condición que imponen los valores limitantes del modelo, es decir 220 V y 12 Amps.

Asumiendo que el factor de potencia de la carga es 0.8 en retraso, lo cual se consigue con una carga de $Z_L = 119.82 \angle 36.87^\circ$

Refiriéndonos al circuito de la figura, ajustar R_v hasta que $V_R = 13.3 \text{ V}$. Anotar los valores exactos de V_R , V_S , I_R , I_S .

Utilizando esta información y los pa

rámetros encontrados anteriormente, construir a escala una carta de la línea.



Resultados:

$$V_R = 13.3 \angle 0^\circ \text{ V} \quad V_G = 64.8 \angle 343.1^\circ \text{ V.}$$

$$I_R = 0.11 \angle 36.8^\circ \text{ Amps.} \quad R_v = 457 \text{ Ohms.}$$

$$V_S = 19.1 \angle 17.0^\circ \text{ V}$$

$$I_S = 0.100 \angle 330.4^\circ \text{ Amps.}$$

CONSTRUCCION DE LA CARTA DE LA LINEA

$$A = 0.969 \angle 0.8^\circ$$

$$B = 74.239 \angle 83.5^\circ \text{ Ohms}$$

$$C = 1.076 \times 10^{-3} \quad | \underline{87.8^\circ} \text{ Mhos}$$

$$\frac{A V_R^2}{B} = \frac{(0.969)(13.3)^2}{74.239} = 2.309$$

$$\frac{V_S V_R}{B} = \frac{(19.1)(13.3)}{74.239} = 3.422$$

$$V_R \cdot I_R = (13.3)(0.11) = 1.463$$

$$\frac{V_R^2}{B} = \frac{(13.3)^2}{74.239} = 2.383$$

$$\theta_R = 36.87^\circ \quad \alpha = 0.8^\circ \quad \beta = 83.5^\circ$$

$$\beta - \alpha = 82.7^\circ$$

ANALISIS GRAFICO N° 1

A partir de los resultados experimentales obtenidos en esta sección se construyen los gráficos N° 1 y N° 2, que representan la carta de la línea, a partir de la cual se pueden lograr algunos rasgos característicos.

$$B = 74.239 \quad | \underline{83.5}$$

$$V_R = 13.3 \quad | \underline{0^\circ}$$

$$I_R = 0.11 \quad | \underline{36.8^\circ}$$

$$V_S = 19.1 \quad | \underline{19^\circ}$$

$$V_R I_R = 1.463 \quad | \underline{-36.87}$$

$$\frac{V_S V_R}{B} = 3.42 \quad | \underline{66.5}$$

$$\frac{AV_R^2}{B} = 2.309 \quad | \underline{82.7}$$

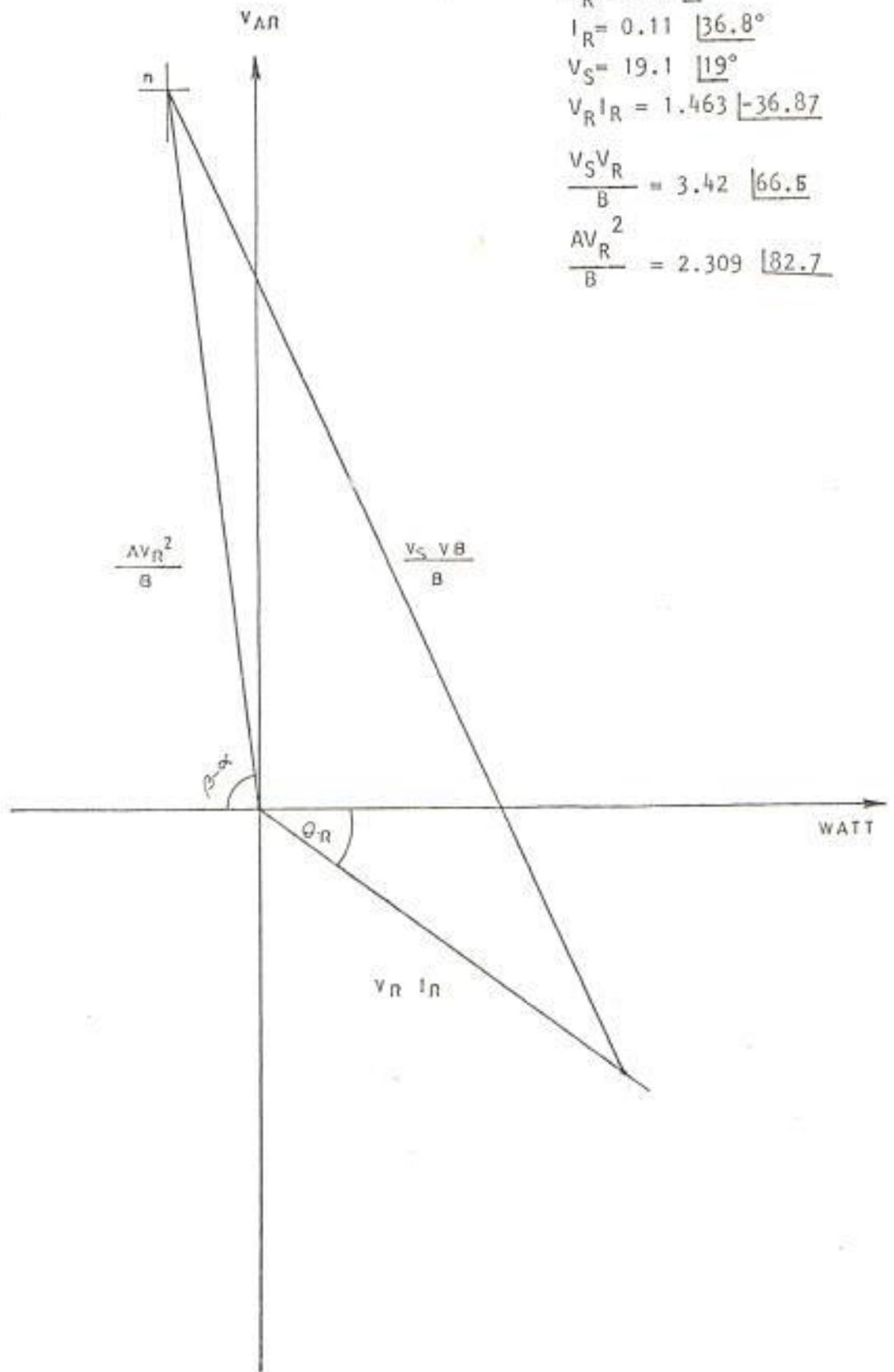


GRAFICO N° 1 : CARTA DE LA LINEA EXPERIMENTAL PARA UNA CARGA INDUCTIVA ($f_p = 0.8$)

De la carta de la línea del gráfico N° 1, podemos obtener la potencia en el extremo receptor para diferentes valores de V_R e I_R y un mismo valor del factor de potencia.

Así, el componente horizontal del vector $V_R I_R$ es la componente activa de la potencia en el extremo receptor, en tanto que la componente vertical representa la potencia reactiva en el mismo extremo.

Del gráfico también se ve que la potencia reactiva consumida por la carga inductiva, es negativa, lo cual no es tan común en la práctica, aunque solamente son convenios o criterios en el que uno u otro son valederos.

Es común sin embargo considerar que una carga inductiva consume VARS positivos, así como también que una carga capacitiva recibe VARS negativos de la línea o lo que es lo mismo, un condensador suministra VARS positivos a la línea.

Para estar de acuerdo con este convenio de signos, podemos girar el gráfico al rededor del eje horizontal en 90° , ob teniendo el gráfico N^o 2, en el cual - se señalan solamente valores modulares ya que no tienen la misma relación angu- lar con el eje horizontal, de referencia que las componentes del gráfico N^o 1.

Se determinaran algunos puntos importan- tes del gráfico, para valores fijos de V_S y V_R . En primer lugar el punto n no depende de la corriente I_R y no cam- biará en tanto V_R permanezca constante, además, la distancia nk permanezca cons- tante, en tanto V_S y V_R no varíen. Por lo tanto al variar la carga, varía la - distancia ok . y el punto k para mantener constante la distancia nk tiene que mo verse alrededor de una circunsferencia de radio nk cuyo centro es n .

Si un nuevo valor de V_S se mantiene - constante con el mismo valor de V_R , el punto n queda invariable, pero se ob tiene una nueva circunsferencia de ra dio nk_1 .

La recta $\frac{V_R^2}{B}$ es conocida como línea de referencia, por medirse a partir de ella los ángulos del par (ángulo de potencia).

Respecto a la exactitud de la carta, todo depende de cuan precisos seamos en su trazado, así como también en la lectura de los valores experimentales.

Si se cambia el factor de la carga podemos obtener directamente del gráfico los valores respectivos, así para una carga puramente resistiva ($fp = 1$) si V_R se mantiene.

$$V_R I_R = 2.35 \text{ VA}$$

$$I_R = 0.177 \angle 0^\circ \text{ Amp.}$$

El valor de $V_R I_R$ constituye la distancia om en el gráfico N° 2, con la condición de que V_R y V_S se mantengan constantes, para lo cual tiene que variar el valor del ángulo de potencia; efectivamente $\delta_2 = 46.0^\circ$.

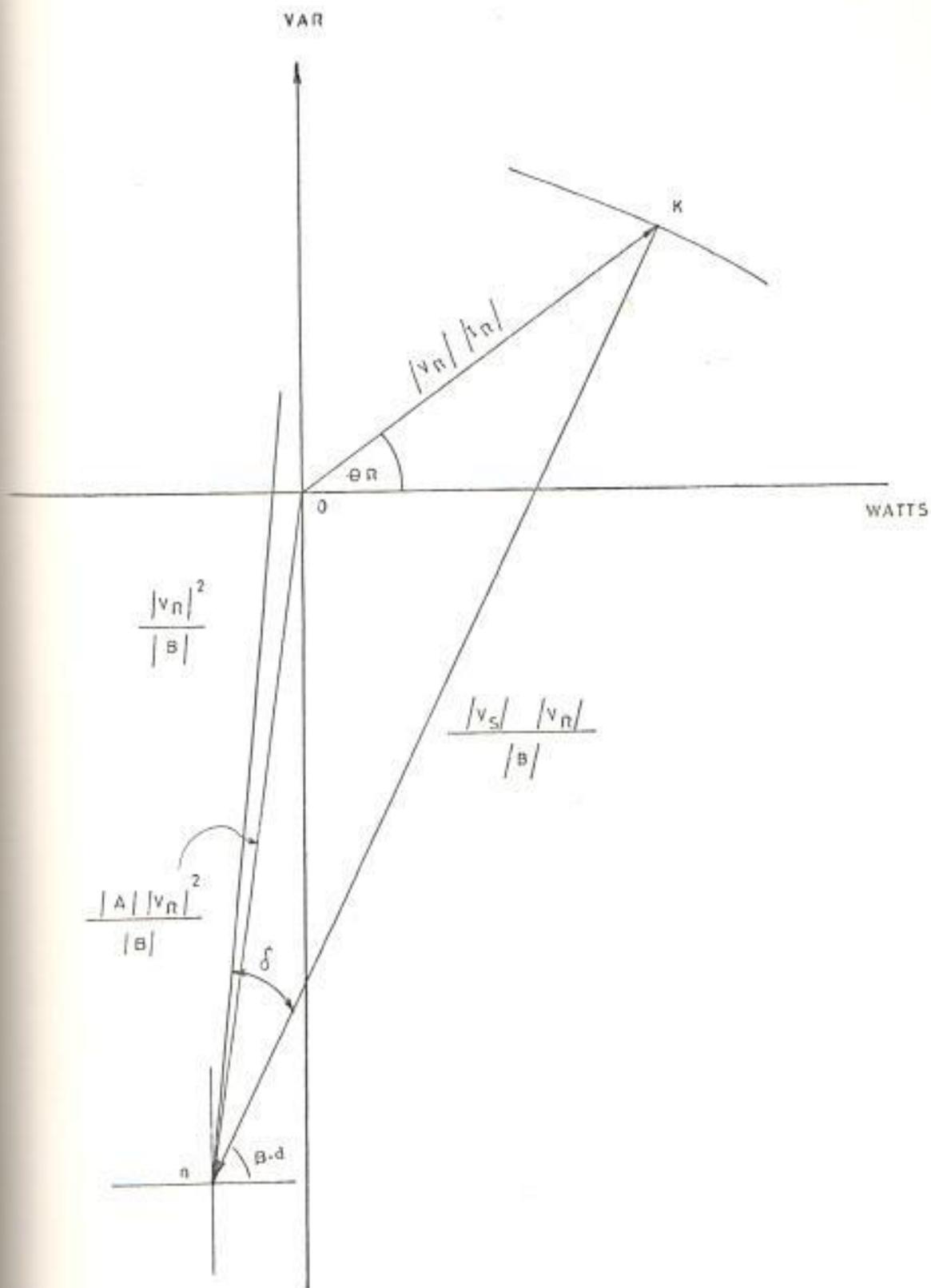


GRAFICO N° 2: CARTA DE LA LINEA CON EL CONVENIO: CARGA INDUCTIVA RECIVE VARS(+)

De la misma manera se pueden obtener valores para cargas de otro factor de potencia.

De los resultados experimentales se obtiene un valor de V_S bastante elevado y tomando en cuenta que para encontrar los valores de la línea real hay que multiplicar todos estos valores por 10^4 , entonces es más claro aún que el valor de $V_S = 19.1$ V., no corresponde a un valor práctico.

Si asumimos que V_R y el factor de potencia de la carga permanecen constantes del gráfico N° 2, se obtienen los siguientes valores para $V_S = 14.0$ V.

$$\frac{V_S V_R}{B} = 2.508$$

$$I_R = 0.0286 \text{ Amp.}$$

$$\delta_3 = 11.0^\circ$$

Todos estos valores para una carga

$$Z_L = \frac{V_R}{I_R} = \frac{13.3}{0.0286}$$

$$Z_L = 465.03 \quad \underline{36.87^\circ}$$

Como se puede ver una vez construída la carta de la línea es fácil obtener cualquier valor del modelo para diferentes condiciones de transmisión.

6.1.2. Análisis de las ondas viajeras en las líneas de transmisión: Aplicación del método del Diagrama de Bewley - Lattice

Objetivo

Aplicar el Diagrama de Bewley Lattice para analizar la posición y dirección de las ondas incidentes, reflejadas y transmitidas en los sistemas en cualquier instante de tiempo.

Equipos a utilizarse

- Modelo de sistema de potencia en estudio.

- Fuente de generación de ondas de -
distintos tipos.
- Osciloscopio.

Teoría sobre el método Bewley - Latti-
ce para el análisis de ondas viajeras
en líneas de transmisión

Cuando una línea de transmisión es
está conectada a una fuente de fuer
za electromotriz (f.e.m.), no adque
re inmediatamente el potencial de la
fuente en toda su longitud; la corrien
te circula por la línea para cargar -
su capacitancia distribuída y estable
ce un campo eléctrico entre los con
ductores y un campo magnético alrede
dor de ellos. La configuración pre
cisa depende de la geometría de la
línea. Las ondas de corrientes y -
voltajes pueden ser tratadas como
ondas de energía que se distribuyen a
lo largo de la línea supliéndose de
energía almacenada en los campos eléc
tricos y magnéticos.

Del Capítulo IV, sección 4, tenemos que se pueden escribir las siguientes ecuaciones diferenciales para una línea de transmisión monofásica:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \gamma^2 V$$

$$\frac{d^2I}{dx^2} = \gamma^2 I$$

$$\gamma = \sqrt{zy} \quad \text{constante de propagación}$$

Solución:

$$V = e^{\gamma x} f_1(t) + e^{-\gamma x} f_2(t)$$

$$\frac{dI}{dx} = -yV$$

$$dI = -y \int V dx$$

$$I = -y \{ \int e^{\gamma x} f_1(t) dx + \int e^{-\gamma x} f_2(t) dx \}$$

$$I = -y \{ \gamma e^{\gamma x} f_1(t) - \gamma e^{-\gamma x} f_2(t) \}$$

$$I = -y\gamma \{ e^{\gamma x} f_1(t) - e^{-\gamma x} f_2(t) \}$$

En las cuales $f_1(t)$ y $f_2(t)$ son constantes de integración con respecto a X , y por lo tanto pueden ser funciones arbitrarias del tiempo " t ".

Si las pérdidas en la línea son despreciables, $R = 0$, $G = 0$

$$\gamma = \sqrt{zy} = \omega \sqrt{LC} = \frac{\omega}{v}$$

$$\text{Donde } v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$\gamma_c = \sqrt{\frac{Y}{Z}} = \sqrt{\frac{C}{L}}$$

La relación $\frac{L}{C}$ depende del espaciamiento de los conductores, consecuentemente será sustancialmente diferente para líneas aéreas y para cables subterráneos. Valores típicos de la impedancia característica para líneas aéreas con 400 Ohmios y para cables subterráneos 40 Ohmios.

Hablando de la velocidad de propagación de la onda (v) observamos que depende solamente de las propiedades del medio y pa

ra toda línea aérea la velocidad de propagación es constante e igual a 3×10^8 m/s, la velocidad de la luz. En la práctica la velocidad será menor que este valor debido al efecto de la resistencia que ha sido despreciada en nuestra deducción.

Reemplazando el valor de γ en la ecuación es de V e I, tenemos:

$$V = e^{x\omega/v} f_1(t) + e^{-x\omega/v} f_2(t)$$

$$I = -Y_0 \{ e^{x\omega/v} f_1(t) - e^{-x\omega/v} f_2(t) \}$$

De la serie de Taylor:

$$f(t+a) = f(t) + af'(t) + \frac{a^2}{2!} f''(t) + \dots$$

$$= (1 + a\omega + \frac{a^2 \omega^2}{2} + \dots) f(t)$$

$$f(t+a) = e^{a\omega} f(t)$$

Comparando esta última ecuación con las de V e I, podemos escribir:

$$V = f_1(t + \frac{x}{v}) + f_2(t - \frac{x}{v})$$

$$I = -Y_0 f_1(t + \frac{x}{v}) + Y_0 f_2(t - \frac{x}{v})$$

Cualquier función de la forma $f(t \pm \frac{x}{v})$ representa una onda viajera, por lo tanto el voltaje y la corriente tal como se presentan pueden ser consideradas como consistentes de dos componentes, una viajando hacia adelante y otra en sentido contrario.

Considerando:

$$v = f(t \pm \frac{x}{v}) \quad \text{ó} \quad v = f(t \pm vt)$$

"x" es la distancia medida a lo largo de la línea, y "v" la velocidad de propagación, si "t" es considerada constante, la gráfica de "v" como función de "x" nos da la distribución a lo largo de la línea en todo instante. Con "x" fija, "v" da la variación del voltaje con respecto al tiempo en cualquier punto.

COEFICIENTES DE TRANSMISION Y REFLEXION

De la discusión anterior se deduce que habrán dos (2) ondas viajeras en la lí

nea, una onda transmitida y otra onda reflejada. Su resultado neto en cualquier punto puede ser obtenido por superposición. Inversión del movimiento de una onda implica la inversión sea del voltaje (polaridad) o de la corriente (en dirección relativa). Así, la onda incidente es V, I con $Z_c = V/I$, la onda reflejada será $-V, I$ ó $V, -I$, - donde ambas $V/I = -Z_c$.

Así, si la inversión es interpretada en esta forma, la relación V/I para la onda en la dirección incidente puede ser considerada como $+Z_c$; y, para la dirección inversa como $-Z_c$.

Consideremos una línea cuya impedancia característica sea Z_c , terminada en una impedancia Z . Supongamos que un voltaje de fuente V con su correspondiente corriente de línea I asociada, llegan al terminal. En general, un voltaje V_R y una corriente I_R se reflejarán y, un voltaje V_T , corriente $-I_T$, aparecerán en el terminal.

Las siguientes ecuaciones pueden escribirse:

$$V/I = Z_C \quad V_R/I_R = -Z_C \quad V_T/I_T = Z$$

También:

$$V_T = V_R + V$$

$$I_T = I_R + I$$

$$I_T = -V_R/Z_C + V/Z_C$$

$$Z_C I_T = V - V_R$$

$$V_T = V + V_R$$

$$V_T + Z_C I_T = 2V$$

$$(V_T + Z_C V_T/Z) = 2V$$

$$V_T \left(\frac{Z + Z_C}{Z} \right) = 2V$$

$$V_T = \frac{2Z}{Z + Z_C} V \quad \text{ó} \quad V_T = K_T V$$

donde:

$$K_T = \frac{2Z}{Z + Z_C} \quad \text{Coeficiente de Transmisión.}$$

Deducción de la fórmula del Coeficiente de reflexión.

$$Z_C I_T = V - V_R$$

$$Z_C (I_R + I) = V - V_R$$

$$Z_C V_T / Z = V - V_R$$

$$Z_C / Z (V_R + V) = V - V_R$$

$$V_R (Z_C / Z + 1) = V (1 - Z_C / Z)$$

$$V_R \left(\frac{Z_C + Z}{Z} \right) = V \left(\frac{Z - Z_C}{Z} \right)$$

$$V_R = \frac{Z - Z_C}{Z + Z_C} V \quad \delta$$

$$V_R = K_R V$$

donde:

$$K_R = \frac{Z - Z_C}{Z + Z_C} \quad \text{Coeficiente de reflexión.}$$

Igual se puede deducir para las ondas de corriente.

RESUMEN

ONDAS REFLEJADAS

$$V_R = \frac{Z - Z_c}{Z + Z_c} V$$

$$I_R = \frac{Z - Z_c}{Z + Z_c} I$$

ONDAS TRANSMITIDAS

$$V_T = \frac{2Z}{Z + Z_c} V$$

$$I_T = \frac{2Z_c}{Z + Z_c} I$$

$$K_R = K_T - 1$$

Estos coeficientes son aplicados a los siguientes casos simples:

1. Línea en circuito abierto:

En estas condiciones la impedancia terminal $Z = \infty$

$$V_R = V$$

$$V_T = 2V$$

$$K_T = 2$$

$$I_R = -I$$

$$I_T = 0$$

$$K_R = 1$$

2. Línea en cortocircuito:

Aquí $Z = 0$; y,

$$\begin{array}{lll} V_R = -V & V_T = 0 & K_R = -1 \\ I_R = +I & I_T = 2I & K_T = 0 \end{array}$$

3. Terminación en resistencia:

Aquí, $Z = R$; y, en general ocurrirá una reflexión parcial con absorción del resto.

$$V_R = \frac{R - Z_C}{R + Z_C} V$$

$$I_R = - \frac{R - Z_C}{R + Z_C} I$$

$$V_T = \frac{2R}{R + Z_C} V$$

$$I_T = \frac{2Z_C}{R + Z_C} I$$

El signo del voltaje reflejado y de la corriente reflejada dependen de la magnitud relativa de R ; si $R = Z_C$ tiene lugar una absorción completa y

no habrá reflexión.

4. Unión de dos líneas:

Consideremos una onda viajera a lo largo de una línea de impedancia característica Z_c , terminada en una segunda línea de impedancia Z , la energía es ahora transmitida como de una fuente a esta segunda línea en lugar de ser absorbida.

La magnitud de estas ondas transmitida y reflejada dependen de la magnitud de Z_c y Z son dadas por la ecuación:

$$V_T = K_T V$$

$$I_T = -K_T I$$

$$V_R = K_R V$$

$$I_R = -K_R I$$

5. Uniones múltiples:

Si en lugar de una sola línea de impedancia característica Z , hay conectadas "n" líneas de impedancias características Z_1, \dots, Z_n , enton-

ces la onda de voltaje transmitido está dada por la ecuación de la sección anterior con Z resultante de la combinación en paralelo de Z_1, \dots, Z_n . La misma onda de voltaje es transmitida a lo largo de cada línea; pero, su onda de corriente asociada depende de la respectiva impedancia características.

6. Reflexión y refracción en una bifurcación:

Cuando una línea de impedancia característica Z_1 se bifurca en dos (2) ramales de impedancia característica Z_2 y Z_3 entonces en lo que a la onda de voltaje concierne, la onda transmitida será la misma para ambos ramales puesto que ellos están en paralelo. Por otro lado, la corriente transmitida será diferente en el caso general que $Z_2 \neq Z_3$.

Hagamos:

V, I, \dots voltaje y corriente in
cidentes

V_R, I_R, \dots voltaje y corriente re
flejadas.

V_T, I_{T2}, \dots voltaje transmitido y
corriente transmitida
en Z_2

V_T, I_{T3}, \dots voltaje transmitido y
corriente transmitida
en Z_3

Entonces:

$$I_{T2} = \frac{V_T}{Z_2}$$

$$I_{T3} = \frac{V_T}{Z_3}$$

También:

$$V/Z_1 - \left(\frac{V_T - V}{Z_1} \right) = V_T/Z_2 + V_T/Z_3$$

cuya solución es:

$$V_T = \frac{2V/Z_1}{1/Z_1 + 1/Z_2 + 1/Z_3}$$

conocido V el resto de cantidades -
pueden ser calculadas.

Si $Z_3 = \infty$

$$V_T = \frac{2VZ_2}{Z_1 + Z_2}$$

que es el caso de la unión de dos (2)
líneas con diferentes impedancias ca-
racterísticas.

EL DIAGRAMA BEWLEY - LATTICE

Es un diagrama que muestra una mirada
de la posición y dirección del movi-
miento de cada onda incidente, refle-
jada y transmitida del sistema en ca-
da instante de tiempo. Este método -
trata todas las líneas básicamente -
como que no poseen pérdidas, pero el
efecto de la atenuación de las on-
das conforme ellas viajan a lo largo
de la línea pueden incluirse. Las lí-
neas son representadas en términos -
de sus coeficientes de transferencia
y los tiempos de viaje, que como se
mostró en la sección anterior son

función de la impedancia caracterís-
tica.

Procedimiento

Para todos los ensayos de la presen-
te práctica se utilizarán los 15
módulos π conectados en serie, y ca-
da módulo tendrá conectado su ramal
capacitivo Y_1 , además en el terminal
de envío se intercalará la resisten-
cia.

$R_{añ} = 5.243 \Omega$ mencionada en seccio-
nes anteriores.

ANALISIS DE ONDAS INCIDEN-
TES Y REFLEJADAS EN UNA LI-
NEA DE TRANSMISION EN CIR-
CUITO ABIERTO:

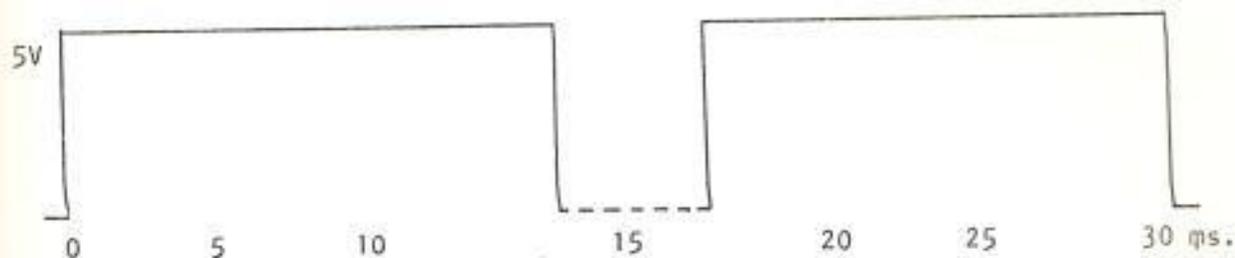


FIGURA N^o 6.1.- ONDA DE VOLTAJE APLICADA AL TERMINAL DE ENVIO DE LA LINEA DE TRANSMISION EN ESTUDIO (OBTENIDA DEL OSCILOSCOPIO).

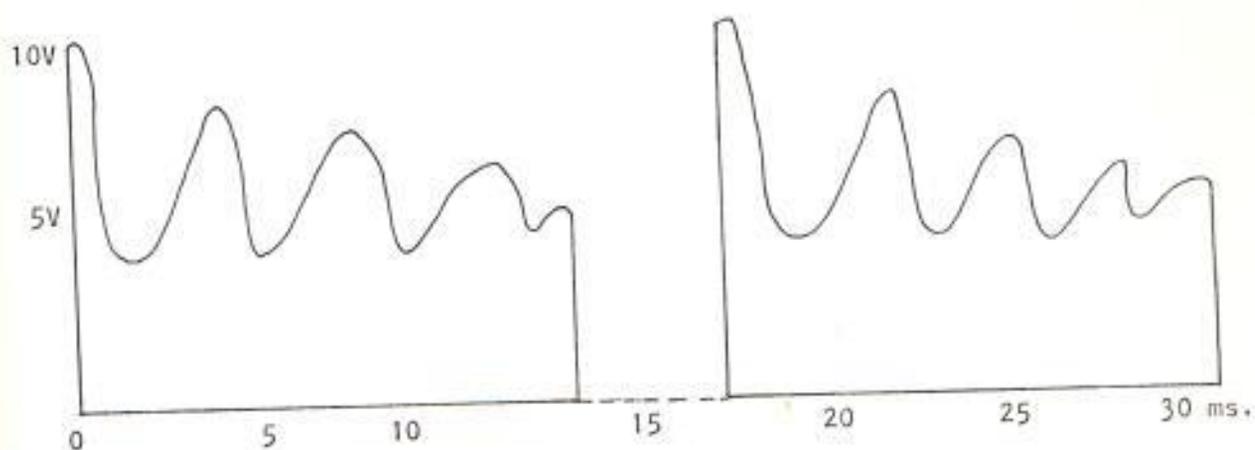


FIGURA N^o 6.2.

ONDA DE VOLTAJE TRANSMITIDA EN EL TERMINAL DE RECEPCION (OBTENIDA DEL OSCILOSCOPIO).

Como se mencionó en la parte teórica, al tener una línea en circuito abierto ($Z_L = \infty$), el voltaje transmitido en el terminal de recepción es el doble que el voltaje incidente. Efectivamente al analizar las figuras anteriores, se puede observar que si consideramos la onda de pulso rectangular con una amplitud de 5 voltios como onda incidente, la onda atenuada de la figura, representa el voltaje transmitido que tiene una amplitud inicial de 10

voltios, luego sufre oscilaciones hasta estabilizarse en 5 voltios, es decir la duplicación de la onda de voltaje tiene lugar en condiciones transientes.

El voltaje reflejado que no puede obtenerse en el osciloscopio, se lo puede deducir matemáticamente de la fórmula $V_T = V + V_R$ es decir que dicho voltaje ($V_R = V_T - V$); representa la parte transiente de la onda de V_T . Para obtenerlo graficamente basta superponer las ondas de pulso de V_T y V , lo cual se ha llevado a cabo en la figura que viene a continuación, y siendo la onda de V_R la que se presenta en la figura que sigue después.

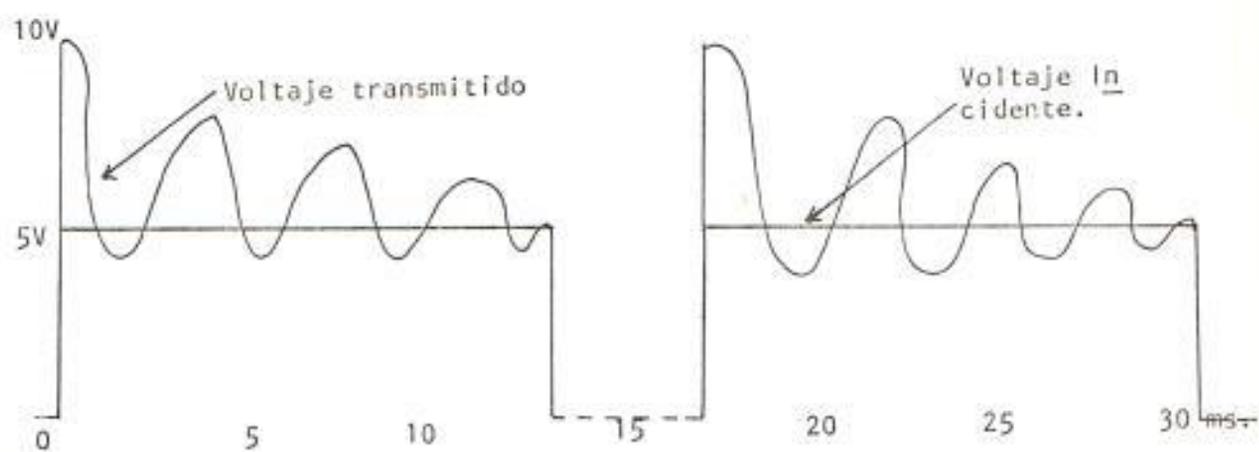


FIGURA N° 6.3.

SUPERPOSICION DE LAS ONDAS DE VOLTAJE TRANSMITIDO E INCIDENTE EN EL TERMINAL DE RECEPCION DE UNA LINEA EN CIRCUITO ABIERTO.

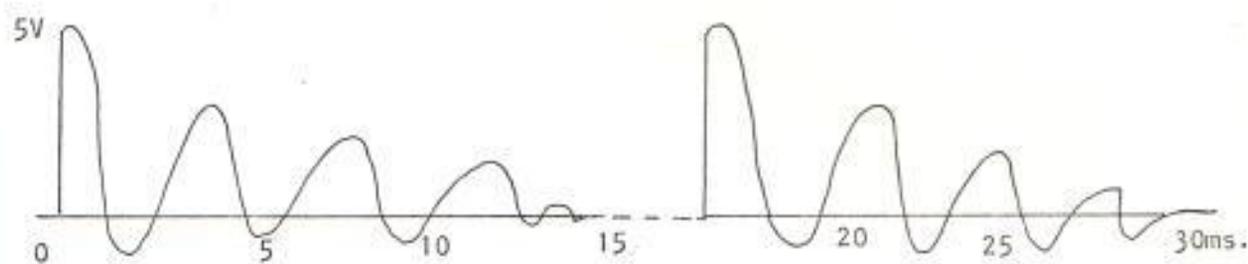


FIGURA N° 6.4.

FORMA DE ONDA DEL VOLTAJE REFLEJADO EN EL TERMINAL DE RECEPCION PARA UNA LINEA EN CIRCUITO ABIERTO.

En esta sección no se tomó mayor asunto a la onda de corriente puesto que su magnitud es sumamente pequeña y especialmente porque con la línea en cortocircuito es en donde se aprecia con mayor claridad lo que sucede con la forma de sus ondas. En todo caso en el osciloscopio en el terminal de recepción se obtiene una señal de magnitud cero que corresponde a la onda de corriente transmitida lo cual implica que la corriente reflejada sea igual a la corriente incidente pero de signo contrario.

ANALISIS DE ONDAS INCIDENTES, REFLEJADAS Y TRANSMITIDAS EN UNA LINEA EN CORTOCIRCUITO:

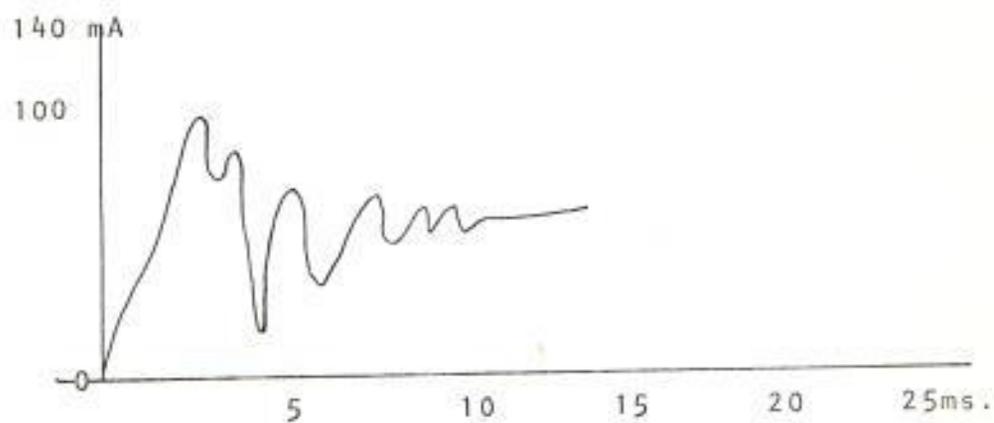


FIGURA N° 6.5.-

ONDA DE CORRIENTE EN EL TERMINAL DE ENVIO RESULTANTE DE APLICAR UN PULSO DE VOLTAJE SIMILAR AL DE LA PRIMERA FIGURA Y CORTOCIRCUITO DE LINEAS EN EL TERMINAL.

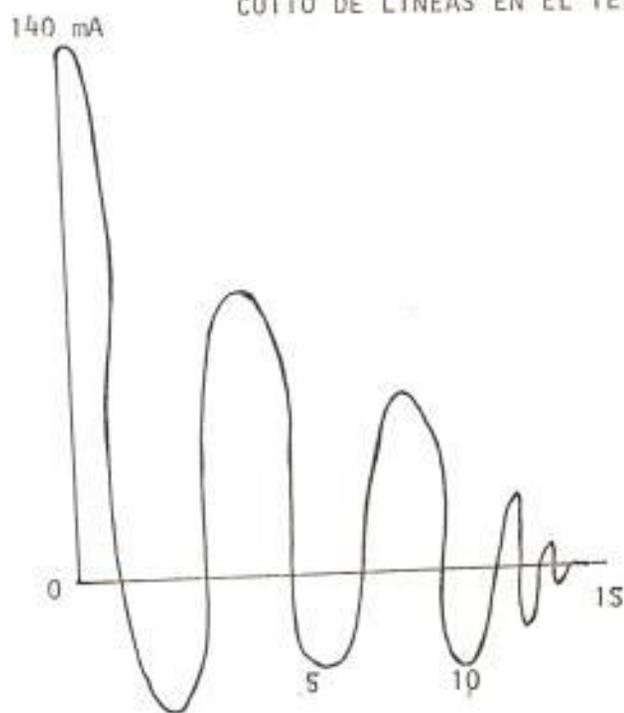


FIGURA N° 6.6.-

ONDA DE CORRIENTE EN EL TERMINAL DE RECEPCION DE LA LINEA EN CORTOCIRCUITO.

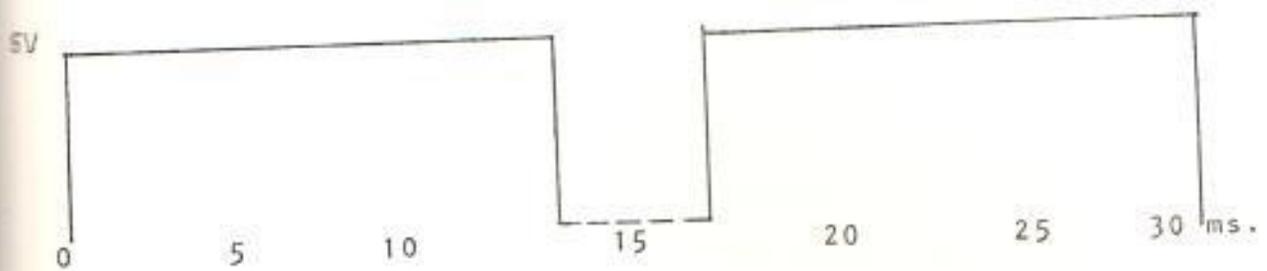
Como se puede observar la magnitud inicial de la corriente transmitida es el doble de la corriente incidente, al estar el terminal de recepción en cortocircuito; la corriente reflejada que no se puede obtener en el osciloscopio viene a ser la diferencia entre la corriente transmitida y la corriente incidente.

La distorsión de las ondas de corriente es debido al efecto capacitivo de la línea.

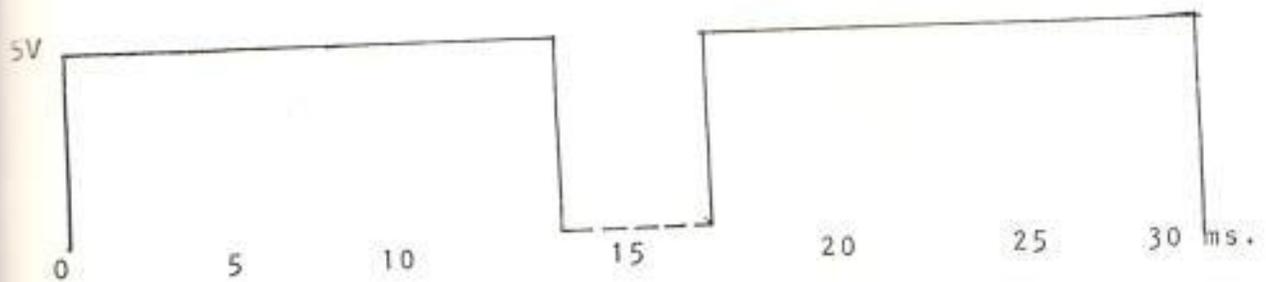
En cuanto a las ondas de voltaje, el incidente es el mismo que se presenta en la sección anterior, el voltaje reflejado será igual al incidente pero de signo contrario, lo cual

da como resultado que el voltaje transmitido en una línea con su terminal en cortocircuito, sea cero.

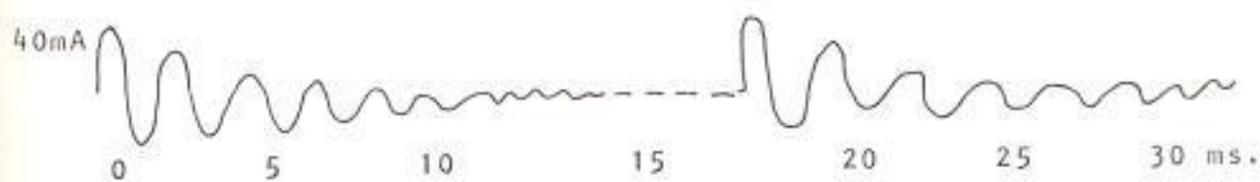
ANÁLISIS DE ONDAS INCIDENTES, REFLEJADAS Y TRANSMITIDAS EN UNA LÍNEA QUE TERMINA EN SU IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA:



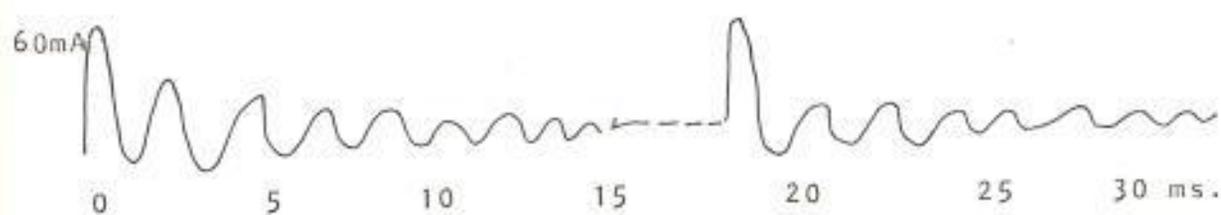
(a)



(b)



(c)



(d)

- FIGURA N^o 6.7.-
- (a) ONDA DE VOLTAJE INCIDENTE
 - (b) ONDA DE VOLTAJE TRANSMITIDO
 - (c) ONDA DE CORRIENTE INCIDENTE
 - (d) ONDA DE CORRIENTE TRANSMITIDA

Del análisis de los gráficos de las ondas viajeras, tanto de voltaje como de corriente cuando la línea termina en su impedancia característica podemos establecer las siguientes conclusiones:

Si partimos de las fórmulas de V_T e I_T y en ella reemplazamos Z por Z_c , obtenemos:

$$V_T = \frac{2Z}{Z + Z_c} V ; Z = Z_c ; V_T = V$$

$$I_T = \frac{2 Z_c}{Z + Z_c} ; Z = Z_c \quad I_T = I$$

Es decir que tanto el voltaje como la corriente transmitidas son correspondientemente iguales a sus ondas incidentes, lo cual se comprueba al comparar las siguientes figuras, estableciendo que existe mayor exactitud en la onda de voltaje.

En cuanto a las ondas reflejadas, analizando sus ecuaciones tenemos:

$$V_R = \frac{Z - Z_c}{Z + Z_c} V ; Z = Z_c ; V_R = 0$$

$$I_R = \frac{Z - Z_c}{Z + Z_c} ; Z = Z_c ; I_R = 0$$

Es decir que para una línea que termina en su impedancia característica sus ondas de voltaje y corriente reflejadas son cero. Es por este motivo que a las líneas con carga igual a su Z_c se les denomina "LINEAS - INFINITAS", ya que en ellos siempre existirá solamente las ondas incidente y transmitida.

Diagrama Bewley - Lattice de la línea

Para trazar este diagrama consideramos primeramente que la línea no tiene pérdidas ohmicas y también que la impedancia de la fuente es cero. Además, se analiza solamente un pulso de la onda de voltaje al que seguiremos en su viaje através de la línea.

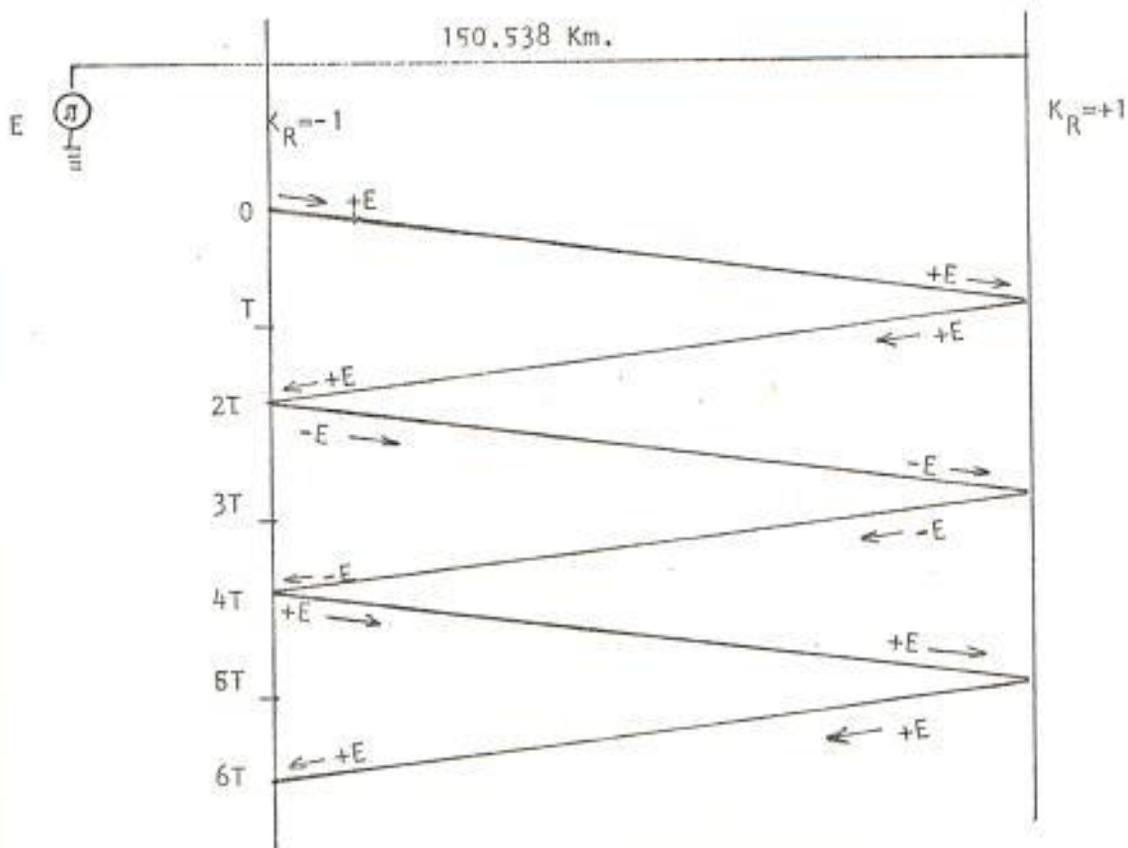
Se presentará el diagrama Bewley-Lattice de la línea en vacío, es decir con su terminal en circuito abierto.

En la siguiente figura la escala de tiempo está dada en términos de "T", el tiempo que

toma la onda en viajar a lo largo de la línea.

Al tiempo $t = 0$ se aplica al terminal de envío la onda de la figura mostrada, lo que tiene una magnitud de 5 voltios; esta onda viaja hacia el terminal de recepción, al que llega luego de un tiempo $t = T$. El progreso de la onda a lo largo de la línea, es mostrado por la línea trazada entre el terminal de envío a $t = 0$ y el terminal de recepción a $t = T$. Al llegar a este terminal la onda se encuentra con un circuito abierto y se refleja con un $K_R = +1$; la onda reflejada regresa al terminal de envío al que llega luego del tiempo $t = 2T$. Como la fuente tiene impedancia cero, aparece como un cortocircuito siendo su $K_R = -1$. La onda incidente que viaja desde el terminal de recepción se refleja con un cambio de signo y la misma magnitud.

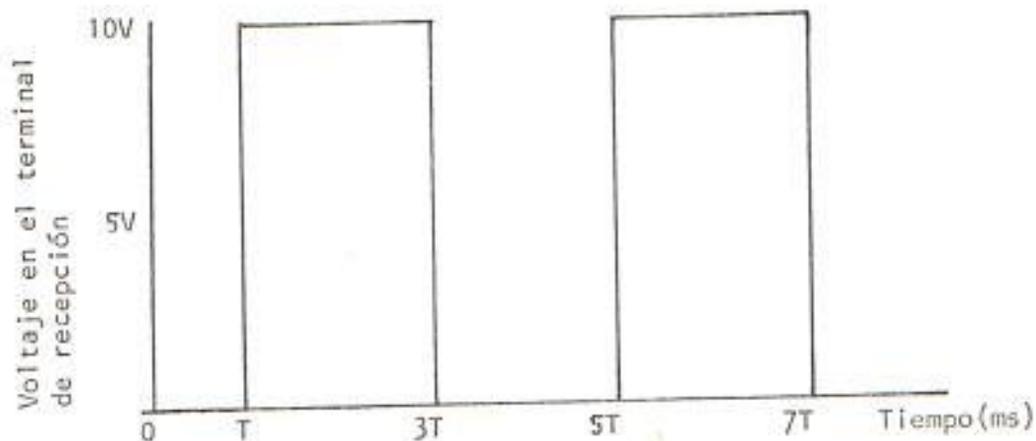
De esta forma obtenemos un gráfico del progreso de las ondas reflejadas en la línea; el voltaje en cualquier punto de



(a)



(b)



(c)

- FIGURA N^o 6.8.- (a) DIAGRAMA BEWLEY - LATTICE PARA LA LINEA EN CIRCUITO ABIERTO
- (b) ONDA DE VOLTAJE APLICADA EN EL TERMINAL DE ENVIO.
- (c) ONDA DE VOLTAJE EN EL TERMINAL DE RECEPCION.

la misma se puede obtener sumando las ondas que llegan al punto en el instante de tiempo que se considere.

Este es un ejemplo simple del diagrama - Bewley - Lattice e igualmente puede trazarse - para condiciones diferentes en el terminal de recepción y con fuentes con valores de su impedancia distintos de cero, variando en estos casos los valores de K_R .

El tiempo "T" se puede calcular en base a la

velocidad de la onda, es decir:

$$v = f \lambda$$

en donde:

f : frecuencia de la onda = 58.82 Hz*

λ : longitud de onda en la línea

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = 3050 \text{ Km.}$$

$$v = 179.401 \text{ Km./seg.}$$

Para una longitud de 150.538 Km. que es la que representa el modelo.

$$T = \frac{150.538}{179.401} = 0.839 \text{ m Seg.}$$

La consideración de un pulso solamente en la onda de voltaje aplicado tiene su justificación en el tiempo T sumamente pequeño, mucho menor que el tiempo tomado por la onda para completar su forma rectangular.

* La frecuencia de la onda aplicada es calculada en base a su período $T_1 = 17 \text{ ms.}$

$$\text{Luego: } f = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{17 \times 10^{-3}} = 58.82 \text{ Hz.}$$

Conclusiones y Recomendaciones

La presente práctica demuestra el alcance que tiene el modelo de líneas de transmisión en estudios, así como también su variada aplicación.

El estudio de ondas viajeras es en sí un tema muy amplio, el cual se ha tratado muy someramente dando las bases teóricas para justificar tal o cual resultado.

Dada la velocidad sumamente elevada de estas ondas es suficiente considerar un pulso de la onda aplicada y hacer el análisis de su trayectoria a través de la línea.

El modelo se presta para hacer otros análisis los que se enuncian para futuras aplicaciones: análisis de las ondas en la unión de una línea aérea con un cable subterráneo para lo cual habría que establecer un modelo de laboratorio que represente el cable. Análisis de las ondas en un sistema línea de transmisión - cable subterráneo - línea de transmisión.

6.1.3. Control de voltaje en líneas de transmisión largas cuando conducen cargas mínimas

Objetivo

Obtener medios de control de voltaje en líneas aéreas en vacío y con conducción de cargas mínimas.

Materiales a utilizarse

Modelo de sistema de potencia del laboratorio.

Multímetro digital

Banco de Inductancias de 3 KVA, 220 V.

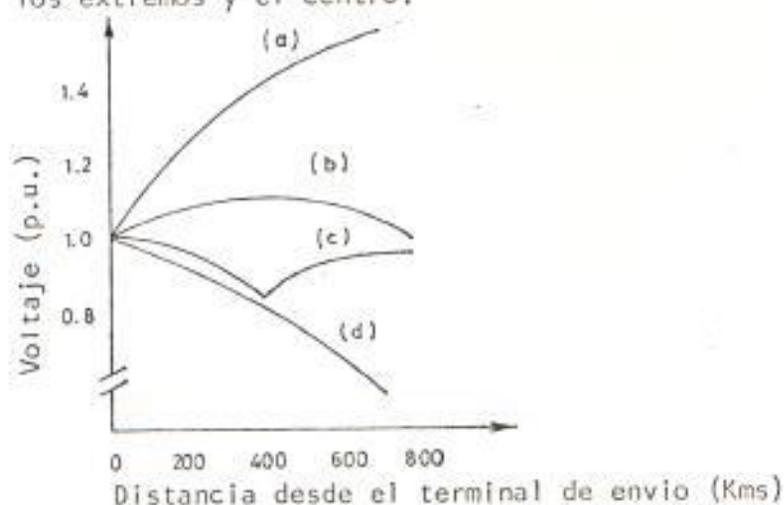
Teoría

Para cargas ligeras los voltamperios (VA) de carga de una línea exceden a los VARS inductivos consumidos y el voltaje se eleva, causando problemas a los generadores. En líneas grandes la caída de voltaje puede ser masiva. Una longitud de 1200 Km. a 60 Hz corresponde a un cuarto de onda. Capacitores serie normalmente se instalan para mejorar la capacidad de potencia y estos efectivamente cortan las líneas electricamente. Además reactores en paralelo son conectados al circuito, cuando este conduce cargas ligeras para que absorban los VARS generados.

Una línea de 600 Kms., puede operar con una variación de ± 10 o/o del voltaje sin reactores en paralelo. Sin embargo, para una línea de 800 Kms., los reactores en paralelo son esenciales, como se puede apreciar en la figura siguiente. (Nº 6.9).

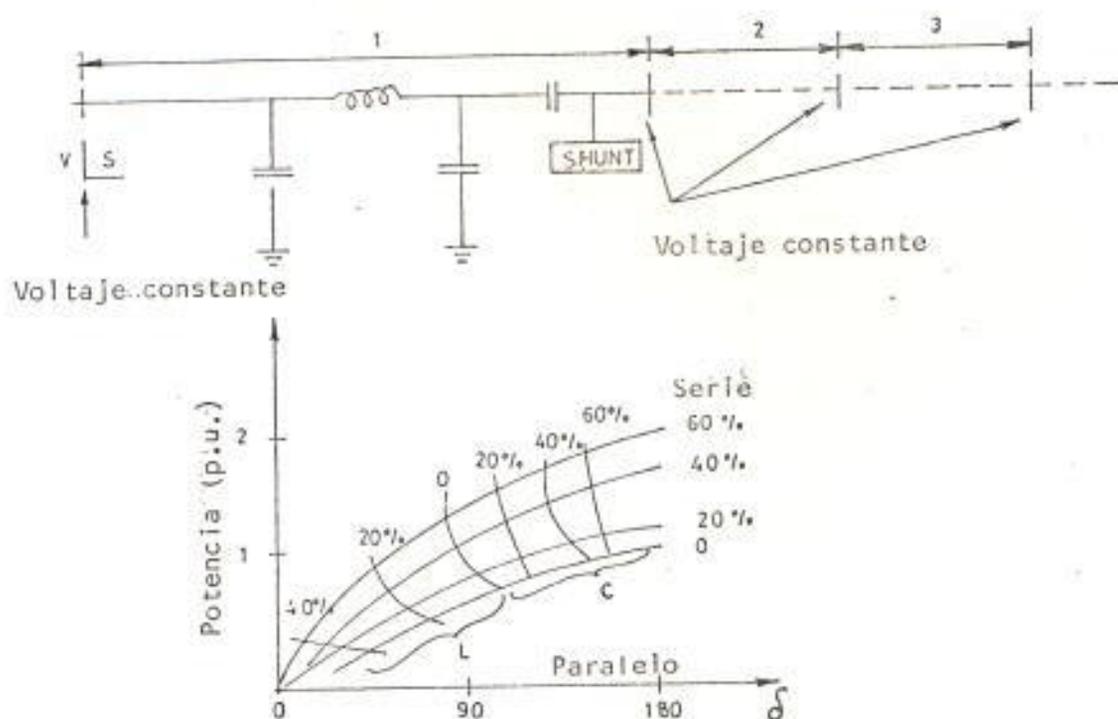
FIGURA Nº6.9. VARIACION DE VOLTAJE A TRAVES DE UNA LINEA LARGA.

- a) Sin carga, sin compensación
- b) Con carga, con compensación a sus extremos
- c) Sin carga con compensación en los extremos y el centro.
- d) Transmitiendo la carga natural, compensación a los extremos y el centro.



Para líneas largas en general, es usual dividir los sistemas en secciones, con compensación a los extremos de cada sección. Esto controla el perfil de voltaje, ayuda en las conexiones y desconexiones; y, reduce las corriente de corto circuito. La compensación en paralelo puede variarse por conexión de cantidades discretas de inductancias. Un esquema típico de 500 KV., - 1000 Km., utiliza una compensación total de - 1.200 MVAR.

FIGURA N°6.10 CURVAS ANGULO-POTENCIA PARA UNA LINEA DE 1300 KMS. EN 3 SECCIONES. LOS VOLTAJES EN LAS BARRAS SON MANTENIDOS CONSTANTES POR COMPENSACION VARIABLE. SE INDICAN LOS PORCENTAJES DE COMPENSACION SERIE Y PARALELO.



Mejoras en el perfil de voltaje pueden obtenerse por compensación en puntos intermedios, así como en los terminales de la línea como se mostró en la figura de la variación de voltaje. (Fig. N° 6.9).

Si la carga natural es transmitida, hay por supuesto un voltaje constante a lo largo de la línea sin compensación. Si las distintas barras de las líneas seccionalizadas pueden ser mantenidas a voltaje constante - prescindiendo de la carga, cada sección tiene un máximo ángulo de transmisión de 90° . Así para una línea de 3 secciones un ángulo mucho mayor de 90° sería posible. Esto es ilustrado en la figura de Curvas - Angulo Potencia para una línea de 1800 Kms., con una carga de factor de potencia unitario y dividida en tres secciones.

Un control manual de las unidades en paralelo puede alcanzar un perfil de voltaje razonablemente constante dentro de condiciones de estado estable; pero, no puede tener suficiente fuerza en condiciones transientes. Similarmente los condensadores

sincronicos son también de poca ayuda en condiciones transientes y también contribuyen a la corriente de falla. Un método de proveer compensación variable en paralelo consiste en el uso de reactores saturados - que tienen respuesta de tiempo de alrededor 0.03 segundos.

El circuito equivalente de un reactor saturable con núcleo de hierro, trifásico es mostrado en la figura siguiente. Este reactor tiene una alta inductancia y una baja absorción de VARS si el voltaje es menor que el nivel prescrito. Arriba de este voltaje la inductancia disminuye para parte del

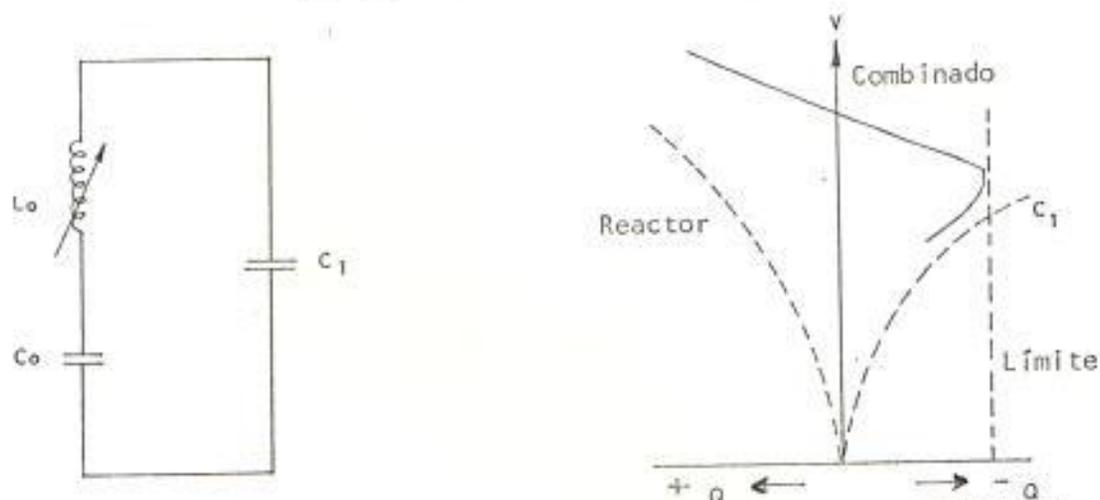


FIGURA N° 6.11. REACTOR SATURADO PARA CONTROL DE VOLTAJE (a) CIRCUITO EQUIVALENTE, (b) CARACTERISTICAS V-Q.

ciclo y son absorbidos más VARS. La capacitancia C_0 cambia la inclinación de la

característica Q-V. El costo es probablemente del mismo orden que un compensador sincrónico.

Con el uso más difundido de los rectificadores controlados de silicio, (SCR) existe la posibilidad del reactor comandado por tiristores.

Aquí la corriente reactiva es controlada por variación del ángulo de disparo del tiristor. Debido a las armónicas generadas se requerirán filtros.

Procedimiento

MODELO DE LINEA DE TRANSMISIÓN:

Para el modelo de línea de transmisión, aplicando un voltaje de 1 p.u., medir el voltaje cada cinco secciones, con la salida en circuito abierto.

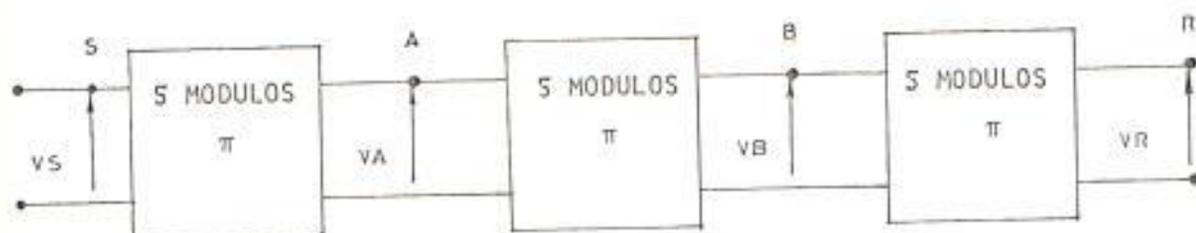
VALORES BASE:

VOLTAJE BASE : 230 KV

VOLTAJE BASE PARA EL MODELO :

$$\frac{230}{\sqrt{3}} = 132.8 \text{ KV}/10^3$$

$$= 133 \text{ voltios}$$



CORRIENTE BASE = 1110 Amps.

CORRIENTE BASE PARA EL MODELO = $1110/10^3 =$
1.11 Amps.

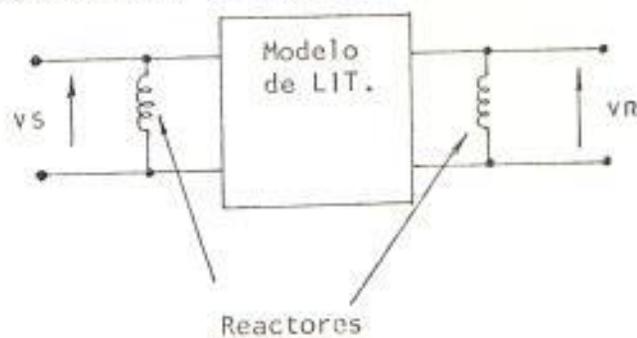
$$V_A \text{ Base} = V_B I_B$$

$$= (133) (1.11) = 147.63 \text{ V.A.}$$

RESULTADOS EXPERIMENTALES

SECCION	V_s	V_A	V_B	V_R
Voltaje(p.u)	1.00	1.052	1.087	1.099

COMPENSACION DE REACTORES A LOS EXTREMOS DE LA LÍNEA:



Añadir la compensación de reactores en paralelo a los extremos de la línea y volver a medir los voltajes se toman valores distintos de V_A de los reactores para obtener el que produzca la mejor compensación de voltaje en la línea.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

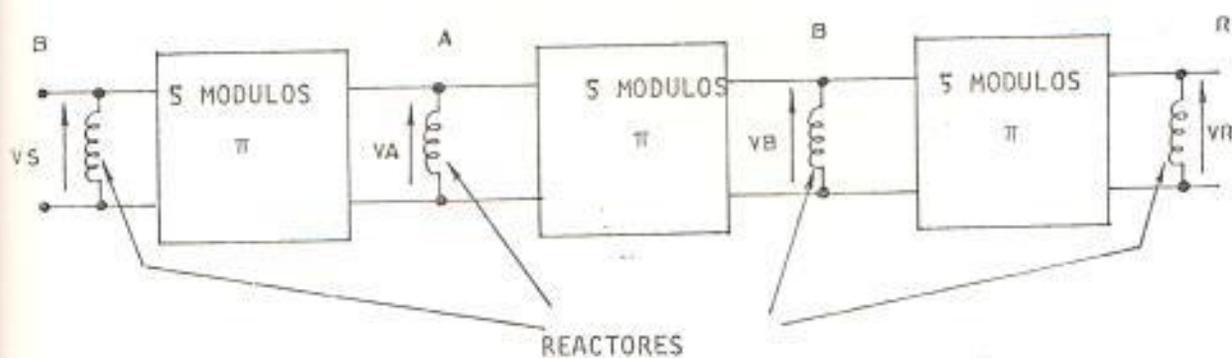
REACTORES (p.u)	V_S (p.u)	V_A (p.u)	V_B (p.u)	V_R (p.u)
0.339	1.000	1.047	1.077	1.086
0.677	1.000	1.040	1.066	1.073
1.355	1.000	1.023	1.031	1.020
1.695	1.000	1.011	1.011	0.992
2.032	1.00	0.996	0.981	0.947
2.371	1.00	0.982	0.953	0.911

Al analizar la tabla anterior, vemos como se puede apreciar de los datos experimentales, el valor óp-

timo de los reactores conectados a los extremos de la línea, se encuentra entre 1.355 p.u. y 1.695 p.u. con los cuales se obtiene tanto en el envío como en la recepción voltajes cercanos a 1 p.u.

COMPENSACION DE REACTORES CADA 5 SECCIONES

Añadir compensación de reactores en paralelo cada cinco secciones π de la línea y medir el voltaje en cada una de ellas.



RESULTADOS EXPERIMENTALES

REACTORES p.u.	V_S p.u.	V_A p.u.	V_B p.u.	V_R p.u.
0.339	1.000	1.040	1.069	1.077
0.677	1.000	1.026	1.044	1.046
1.016	1.000	1.007	1.013	1.009
1.355	1.000	0.981	0.968	0.959
1.693	1.000	0.949	0.915	0.895

En este caso el valor óptimo de los reactores es 1.016 p.u., con el mismo se obtiene tanto en el envío como en la recepción voltajes cercanos a 1 p.u. además con este tipo de compensación existe una distribución prácticamente constante a través de la línea.

TRANSMISION DE CARGA NATURAL:

Cuando una resistencia igual a la impedancia característica de una línea de transmisión sin pérdidas se conecta al terminal de recepción

de la misma, se dice que la línea está transmitiendo su carga natural.

Para tal efecto la impedancia característica de la línea experimental obtenida en la práctica N° 1 es de $262.393 \angle -1.83^\circ \Omega$.

$$Z_0 = 262.393 \angle -1.83^\circ \Omega$$

Por lo tanto se conecta como carga una resistencia (R_L)

$$R_L = 262.393 \Omega$$

Luego se efectúan mediciones de voltaje cada cinco secciones tanto para compensación a los extremos de la línea como para compensación cada cinco módulos π .

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Sin Compensación

REACTORES p.u.	V_S p.u.	V_A p.u.	V_B p.u.	V_R p.u.
0.00	1.000	0.989	0.986	0.982

Con compensación a los extremos de la línea

REACTORES p.u.	V_S p.u.	V_S p.u.	V_B p.u.	V_R p.u.
0.339	1.000	0.986	0.982	0.974
0.677	1.000	0.983	0.973	0.963
1.016	1.000	0.980	0.967	0.951
1.355	1.000	0.974	0.954	0.932
1.693	1.000	0.968	0.940	0.908
2.032	1.000	0.957	0.917	0.875
2.371	1.000	0.945	0.896	0.844

Con compensación cada cinco secciones π

REACTORES p.u.	V_S p.u.	V_A p.u.	V_B p.u.	V_R p.u.
0.339	1.000	0.085	0.978	0.974
0.677	1.000	0.978	0.967	0.956
1.016	1.000	0.963	0.941	0.927
1.355	1.000	0.943	0.907	0.886
1.693	1.000	0.921	0.871	0.844

Comentarios y Conclusiones

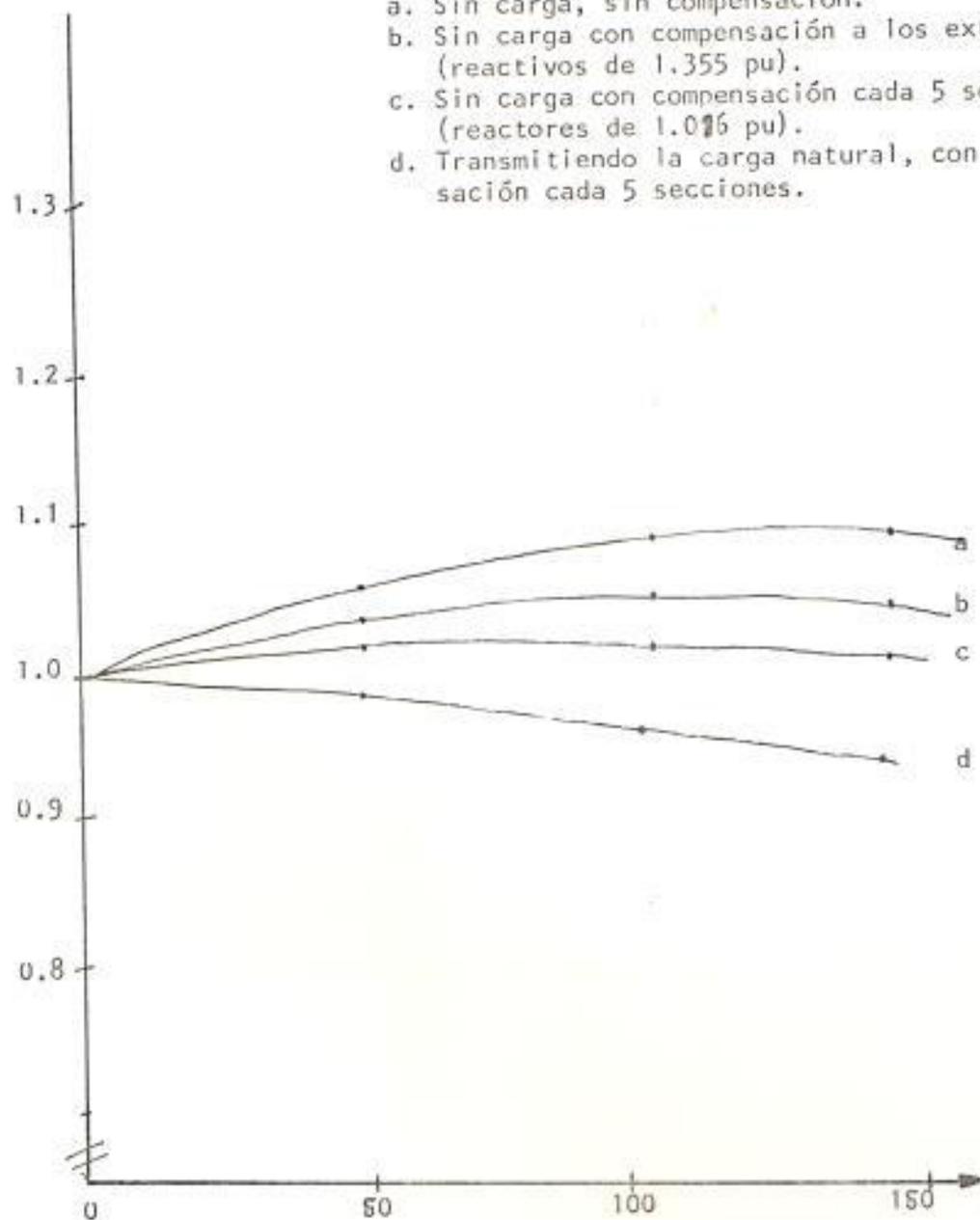
De los resultados experimentales se construye el gráfico N° 3, el mismo que representa el perfil de voltaje de la línea de transmisión en estudio, tanto para el sistema sin com pensación como para compensación de reactores en paralelo.

Del análisis de este gráfico se concluye que efectivamente la compensación por reac tores en paralelo es conveniente para tra tar de disminuir los valores altos de voltaje que se presentan a través de una línea de transmisión en vacío o conduciendo cargas mí nimas.

La compensación por secciones es la más efectiva y es la empleada en líneas rea les, en las que se acostumbra a colocar compensación en los extremos y al centro de la línea, hablando en función de dis tancia.

En definitiva lo que se trata es que los VARS que genera una línea en vacío o con

- a. Sin carga, sin compensación.
- b. Sin carga con compensación a los extremos (reactivos de 1,355 pu).
- c. Sin carga con compensación cada 5 secciones (reactores de 1,016 pu).
- d. Transmitiendo la carga natural, con compensación cada 5 secciones.



: DISTANCIA DESDE EL TERMINAL DE ENVIO (KM)
 GRAFICO N° 3: VARIACION DE VOLTAJE A TRAVES DE LA LINEA DE TRANS
 MISION EXPERIMENTAL.

duciendo cargas mínimas (en estas condiciones la línea se comporta como un capacitor), sean consumidos de alguna manera y estos reactores conectados en paralelo cumplen con dicha función.

Al transmitir la carga natural, de hecho la línea ya no está en vacío y el efecto de la generación de reactivos por la línea desaparece, llegando estos reactores conectados a constituirse más bien una carga, cuyas necesidades de corriente producen una caída adicional de voltaje, la que se suma a la caída de voltaje producida por la corriente de carga. De los datos experimentales se observa que en todos los casos el voltaje con compensación, es menor que el voltaje sin compensación.

Es decir que cuando la línea está transmitiendo una determinada carga, estos reactores tienen que ser desconectados, permaneciendo en línea solamente para cargas mínimas o para líneas en vacío.

6.1.4. MAXIMA TRANSFERENCIA DE POTENCIA, CURVAS ANGULO - POTENCIA PARA SISTEMAS INTERCONECTADOS; LA LINEA INFINITA

Objetivo

Establecer las condiciones de máxima transferencia de potencia para un sistema interconectado.

Equipos a utilizarse

- Modelo de sistemas de potencia del laboratorio
- Multímetros digitales
- Medidor de ángulo de fase
- Carga resistiva

Teoría

A continuación se presenta el análisis de máxima transferencia de potencia para líneas cortas, luego se generalizará para líneas de cualquier longitud.

Refiriéndonos a la figura N° 6.12.

Proyección sobre OA.

$$\frac{V}{Z} \{ IZ \cos \phi = E \cos (\theta - \delta) - V \cos \theta \}$$

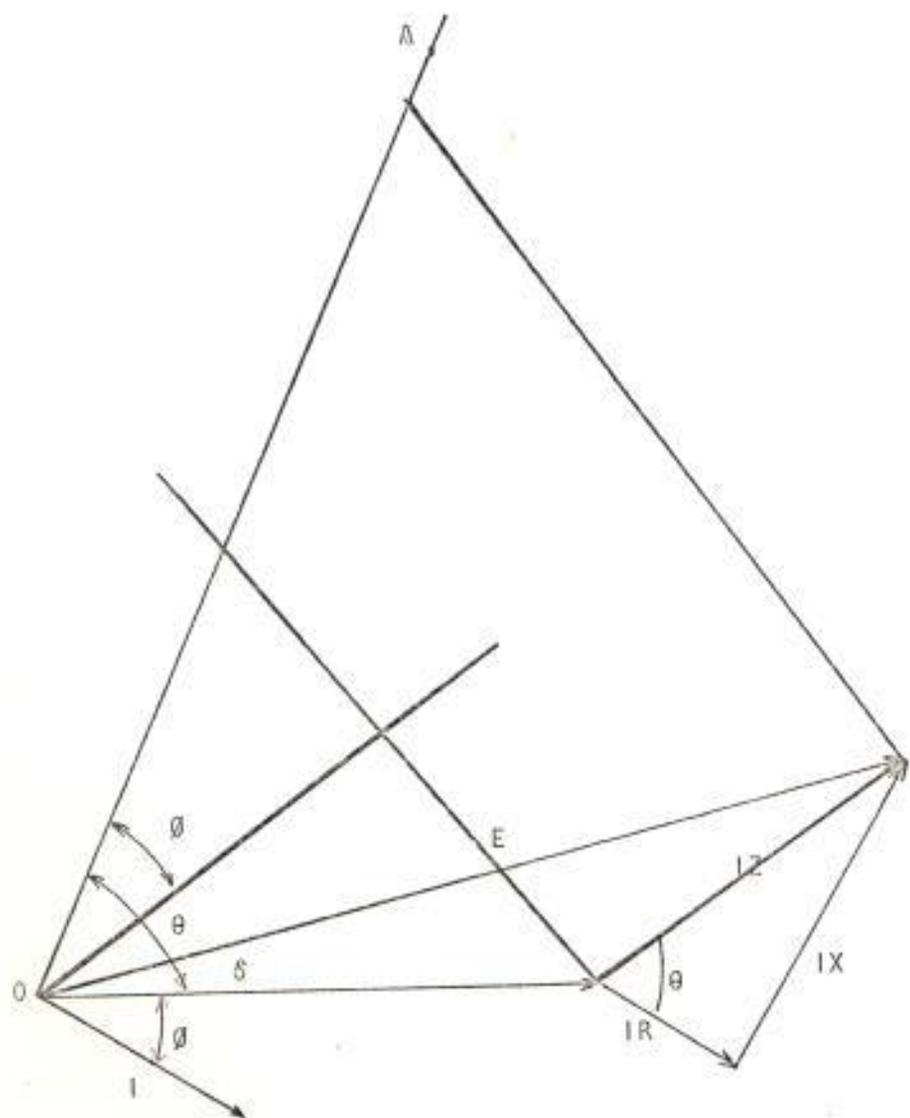


FIGURA Nº 6.12. DIAGRAMA VECTORIAL DE TENSIONES EN UNA LINEA CORTA.

Potencia en el terminal de recepción

$$P = VI \cos \phi$$

$$VI \cos \phi = \frac{VE}{Z} \cos (\theta - \delta) - \frac{V^2}{Z} \cos \theta$$

máxima transferencia de potencia

$$\theta - \delta = 0 \qquad \theta = \delta$$

$$VI \cos \phi = \frac{VE}{Z} - \frac{V^2}{Z} \cos \theta$$

Despreciando los componentes resistivos del sistema,

$$\theta = 90^\circ$$

$$P = \frac{VE}{Z} \cos (\theta - \delta)$$

$$P = \frac{VE}{Z} \sin \delta$$

$$P_{\max} = \frac{VE}{Z} \quad \text{para} \quad \delta = 90^\circ$$

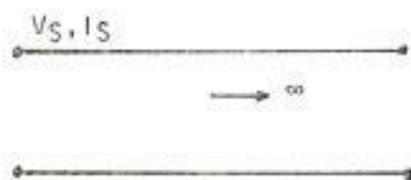
Para líneas largas se utilizará el diagrama de transmisión basado en las ecuaciones de circuitos generalizados:

$$V_S = A V_R + B I_R$$

$$I_S = C V_R + D I_R$$

A partir de este diagrama se puede establecer las condiciones de máxima transferencia de potencia.

LA LINEA INFINITA



Para la línea infinita mostrada si $x = 0$

$$V = V_S = Ae^0 + Be^0$$

$$V_S = A+B$$

Conforme se tiende al infinito V tiende a cero, puesto que el voltaje de la línea es completamente atenuado.

Por lo tanto:

$$0 = Ae^{-x} + Be^x$$

Con $Ae^{-x} \rightarrow 0$, puesto que $x \rightarrow \infty$, la única solución posible es que $B = 0$, con:

$$V_S = A + 0 = A$$

$$V = V_S e^{-\gamma x}$$

$$I = \frac{V_S}{Z_0} e^{-\gamma x}$$

Con la correspondiente ecuación para la línea infinita, esta lleva a la evaluación de Z_0 .

$$Z_0 = \frac{V}{I} = \frac{V_S e^{-\gamma x}}{\left(\frac{V_S}{Z_0}\right) e^{-\gamma x}}$$

La relación de voltaje a corriente en la entrada de una línea infinita o en cualquier punto dentro de ella es Z_0 y es dado el nombre de impedancia característica. Depende principalmente de R, L, G, C que son establecidas por el diseño de una línea particular; sin embargo Z_0 también varía con la frecuencia de la onda de la línea.

Procedimiento

Establecer las condiciones de máxima transferencia de potencia para el sistema en estudio, para una carga resistiva



FIGURA N° 6.13.: DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA EN ESTUDIO.

TABLA N° 5

DATOS EXPERIMENTALES PARA UNA CARGA RESISTIVA DE 0.978 $\angle 0^\circ$
 AMP $V_L = 100 \angle 0^\circ$

V_S (Volts)	I_S (Amps)	I_1 (Amps)	I_2 (Amps)
100.1 $\angle 0.9$	0.057 $\angle 73.1$	0.057 $\angle 277.8$	0.966 $\angle 3.6$
100.9 $\angle 9.8$	0.237 $\angle 20.2$	0.224 $\angle 352.4$	0.749 $\angle 2.5$
100.0 $\angle 16.3$	0.482 $\angle 25.2$	0.432 $\angle 5.2$	0.649 $\angle 256.3$
100.0 $\angle 25.3$	0.900 $\angle 28.2$	0.846 $\angle 21.1$	0.350 $\angle 303.0$
100.6 $\angle 28.2$	1.061 $\angle 31.9$	1.040 $\angle 26.3$	0.471 $\angle 276.0$
100.0 $\angle 30$	1.259 $\angle 36.2$	1.238 $\angle 31.7$	0.664 $\angle 263.4$

TABLA N° 6

POTENCIA EN DIFERENTES PUNTOS DEL SISTEMA, CALCULADA EN BASE A LOS DATOS DE LA TABLA N° 5

δ°	P_S (WATT)	P_1 (WATT)	P_2 (WATT)	P_T (WATTS)
0.9	1.667	0.774	96.409	2.153
9.8	22.242	22.203	74.829	23.333
16.3	43.613	43.022	54.785	38.476
25.3	79.317	78.928	19.062	58.585
28.2	106.500	93.234	4.923	65.169
30.0	125.163	105.330	-1.632	68.54

Conclusiones y Recomendaciones

A partir de los datos de la tabla N° 6, se obtiene el gráfico N° 4 en el cual se presenta la variación de la potencia transmitida como función del ángulo de potencia (δ) del sistema. La potencia transmitida es calculada por la fórmula

$$P_T = \frac{V_S V_R}{X_L} \text{ Sen } \delta$$

Como se puede observar a partir de $\delta = 30^\circ$, la fuente N° 2, ya no entrega potencia activa sino

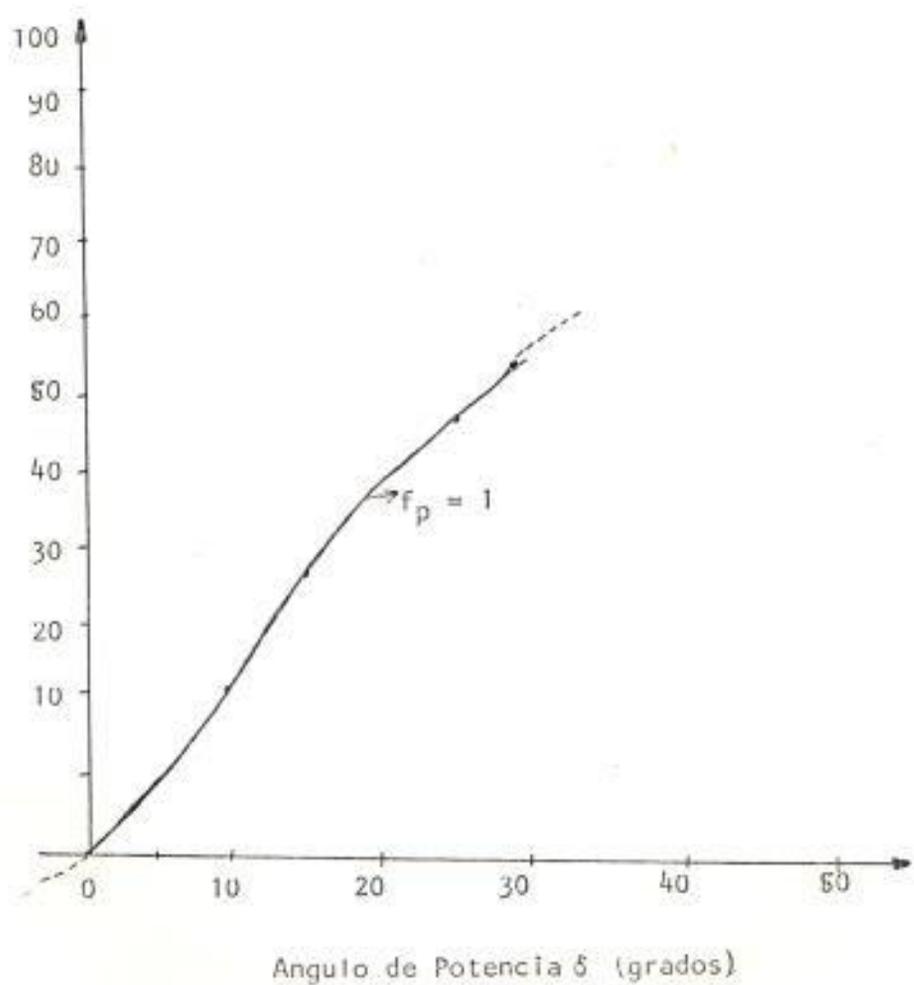


GRAFICO N° 4: POTENCIA TRANSMITIDA DESDE LA FUENTE N° 1 HACIA LA CARGA UBICADA EN EL TERMINAL DE RECEPCION, EN FUNCION DEL ANGULO δ .

más bien recibe, siendo así el máximo ángulo de potencia está entre 28.2 y 30° , lo cual era de esperarse para sistemas interconectados en los cuales el ángulo δ rara vez excede de 30 a 45° , con ello se obtiene sistemas electricamente estables.

Lo anterior tiene su explicación partiendo del concepto del concepto de coeficiente de sincronización

$$T_{SY} \triangleq \frac{\Delta P_{SY}}{\Delta \delta} \approx \frac{dP_{SY}}{d\delta} = P_{\max} \cos \delta$$

T_{SY} viene a ser la relación del incremento de la potencia transmitida (ΔP_{SY}) causada por un pequeño incremento $\Delta \delta$ del ángulo δ y sus unidades son vatios por radián, y conforme el ángulo de potencia se aproxima a $\pm 90^\circ$ este coeficiente tiende a cero y en estas condiciones el sistema tiende a ser sumamente inestable.

La condición de máxima transferencia de potencia para $\delta = 90^\circ$ tiene su aplicación principalmente para circuitos radiales, es decir con una sola fuente, en nuestro caso específico se trabajó con el siste-

ma con fuentes a ambos lados y la condición de máxima transferencia de potencia viene determinada específicamente por el coeficiente T_{S_r}

En esta práctica se ha probado el comportamiento del sistema para una carga resistiva, pero las conclusiones a las que se ha llegado bien pueden aplicarse para cargas a diferentes factores de potencia.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la presente tesis se ha realizado un estudio, del comportamiento de las líneas de transmisión en sistemas de potencia, para diferentes condiciones de operación; para lo cual se ha utilizado el "Modelo de líneas de Transmisión", existente en el laboratorio de Sistemas de la ESPOL.

La importancia de este modelo radica en que se pueden representar líneas de sistemas reales diferentes, variando para ello ciertos valores como el de la resistencia de la línea (se cambia así el valor x/R), capacitancia en paralelo de la línea (para simular distintos voltajes de operación), impedancia de la fuente, resistencia del neutro.

Específicamente hablando de la parte de la línea de transmisión resulta de gran valor didáctico la representación por constantes distribuidas con lo cual nos acercamos mucho más a una representación real de una línea práctica; como se manifestó en el párrafo anterior, es posible ajustar los valores del modelo para representar diferentes líneas reales, variando el número de secciones π , cambiamos la longitud de la línea de acuerdo a las conveniencias o fines de la

Investigación . Por otra parte se puede hacer una representación monofásica o trifásica de la línea y para el caso de la última, las condiciones pueden ser balanceadas o desbalanceadas para lo cual se ha provisto en el modelo "bobinas de neutro" con el fin de representar correctamente la impedancia de secuencia cero.

Los temas en general han sido tratado en un orden que permite en trenar al estudiante en el uso del modelo.

Es necesario que antes de efectuar cualquier ensayo primeramente se familiarice con todos los componentes del modelo para lo cual será útil que lea el Capítulo V, que lo describe en forma detallada. Especialmente es necesario tener presente que el límite en estado estable de la corriente en el modelo son 12.5 Amps. que es impuesto por la impedancia de fuente. Además hay que adquirir práctica en el manejo de los transformadores cambiadores de fase, para ello primeramente se debe comprobar individualmente toda la gama de desplazamiento del voltaje de salida tomando como referencia el voltaje de entrada.

Las prácticas efectuadas son solamente una parte de las muchas que pueden llevarse a cabo y principalmente se las ha realizado con la finalidad de familiarizar y describir en forma práctica el modelo (6.4.1). Otro problema real que se presenta en la operación de Sistemas de Potencia se ha analizado en la práctica 6.4.3. Condiciones de máxima

transferencia de potencia tienen aplicación en la práctica 6.4.4. Adicionalmente en 6.4.2., se ha tratado aunque en forma breve un tópico de transiente en Sistemas de Potencia, la cual demuestra que el modelo tiene aplicación no solamente en condiciones de estado estable, sino también en condiciones transientes.

Finalmente se mencionará algunas de las pruebas que pueden realizarse utilizando el modelo de Sistemas de Potencia que a partir de la fecha queda disponible para su uso sea como una parte de la materia Laboratorio de Sistemas de Potencia o para un estudio más profundo de algún tema en particular, lo cual puede ser un punto de partida para otro tema de Proyectos:

- a. Determinación de componentes simétricas durante condiciones desbalanceadas, por medio de filtros de secuencia.
- b. Comportamiento de los transformadores de corriente bajo condiciones de cortocircuito.
- c. Característica de operación de la protección tipo diferencial, empleando transformadores de corriente en cada terminal de la línea.

- d. Operación de relés de distancia.

- e. La corriente de pico, (Inrush Current) que fluye cuando un transformador es subitamente energizado en el peor punto de la onda de potencia.

- f. La llamada corriente de doble efecto en energizaciones súbitas de inductores lineales si la línea está en cortocircuito en el terminal remoto.

BIBLIOGRAFIA

CONNOR, F.R., INTRODUCTORY TOPICS IN ELECTRIC AND TELECOMMUNICATION WAVE TRANSMISSION, EDWARD ARNOLD LTD., LONDON, 1976.

COTTON, A., THE TRANSMISSION AND DISTRIBUTION OF ELECTRICAL - ENERGY, 3th EDITION, LONDON HODDER AND STOUGHTON, 1970.

EATON, ROBERT., SISTEMAS DE TRANSMISION DE ENERGIA ELECTRICA.

ELGERO, OLLE I., ELECTRIC ENERGY SYSTEMS TECRY: AN INTRODUCTION TMH EDITION, INDIA, 1979.

GUILLER, A.E., ELECTRICAL POWER SYSTEMS, VOLUME ONE 2nd. EDITION BIDDLES LTD., GUILDFORD SURRY, GRAN BRETAÑA, 1978.

METZGER, TRANSMISSION LINES WITH PULSE EXCITATION.

RUDENBERG., ELECTRICAL SHOCK WAVES IN POWERS SYSTEMS.

SKILLING., HUGH, ELECTRICAL TRANSMISSION LINES, MCGRAW-HILL BOOK COMPANY, INC, EE.UU., 1961.

STEVENSON, WILLIAM, ANALISIS DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA, TRADUCCION AL ESPAÑOL DE LA SEGUNDA EDICION - POR ANGEL MEDRANO Y JOSE BESCOS BELLARA, EDICIONES DEL CASTILLO, MADRID, 1966.

WEEDY, B.M., ELECTRIC POWER SYSTEMS, 3th. EDITION, JHON WILEY & SONS LTD., GRAN BRETANA, 1979.

WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION, ELECTRIC TRANSMISSION AND DISTRIBUTION REFERENCE BOOK, 4th. EDITION, EAST PITTSBURG , PENNSYLVANIA, EE.UU., 1964.

BICTFORD, J.P., INTRODUCTION TO BEWLEY - LATTICE DIAGRAM METHODS, SWITCHING SURGES AND POWER SYSTEMS TRANSIENTS , CONTROL ELECTRICITY GENERATING BOARD. A.E.I. POWER SYSTEM ENGINEERING Dpt. MANCHESTER, 1968.

DAVISON, EB. REPORT ON MODEL TRANSMISSION LINE EQUIPMENT SUPPLIED ESCUELA POLITECNICA DEL ECUADOR, BY SUNDERLAND POLYTECHNIC, SUNDERLAND, TYNE & WEAR ENGLNAD, 1.980.