

## Seleção de Sistemas - MRT

### RER - 05

## ÍNDICE

<b>1. OBJETIVO</b>	<b>3</b>
<b>2. INTRODUÇÃO</b>	<b>3</b>
<b>2.1 SISTEMA FASE/FASE</b>	<b>3</b>
<b>2.2 SISTEMA FASE/NEUTRO</b>	<b>4</b>
<b>2.3 SISTEMA MRT</b>	<b>4</b>
<b>2.4 CAPACIDADE DOS SISTEMAS</b>	<b>5</b>
<b>2.5 EXPERIÊNCIA BRASILEIRA</b>	<b>6</b>
2.5.1 COMPARAÇÃO ECONÔMICA ENTRE OS SISTEMAS ELÉTRICOS EMPREGADOS NA ELETRIFICAÇÃO RURAL BRASILEIRA	8
2.5.2 ESTÁGIO ATUAL DAS EXPERIÊNCIAS COM SISTEMAS MRT NO BRASIL	9
<b>2.6 TIPOS DE SISTEMAS MRT</b>	<b>12</b>
<b>2.7 SISTEMAS HÍBRIDOS</b>	<b>14</b>

## 1. OBJETIVO

Apresentar a experiência internacional e brasileira com sistemas monofásicos, notadamente os monofilares com retorno por terra. Esses sistemas são construídos com custos reduzidos, posto que têm construção simplificada e menores custos de manutenção e operação.

## 2. INTRODUÇÃO

A necessidade de se alocar criteriosamente os recursos públicos na construção e manutenção dos serviços de utilidade pública, conduz, tanto os países desenvolvidos como os subdesenvolvidos, a construírem suas redes elétricas rurais no sistema monofásico.

As principais razões para isso, em países desenvolvidos como Nova Zelândia, Austrália, Estados Unidos e Rússia, foram:

- a) as cargas nas zonas rurais são geralmente tão pequenas que raramente são necessários três condutores para atender a capacidade de transporte das mesmas;
- b) a virtual impossibilidade de obter as vantagens teóricas das três, a saber: sua maior capacidade de carga para uma dada queda de tensão e peso do condutor, devido à dificuldade prática de balancear uma pequena carga nas três fases e às limitações, por razões mecânicas, quanto à utilização de condutores de seção bem reduzida;
- c) **economia de custo.**

Para se entender as dificuldades de balanceamento das cargas rurais é necessário entender a natureza das mesmas. **Com consumidores situados, um a cada 1,5 km e, com demandas médias de 2 kVA, há pouca carga para equilibrar em um ramal de 15 ou 30 km de comprimento.** Um exame das curvas de cargas mostra que a possibilidade de balanceá-las nas três fases é muito pequena, só se conseguindo um bom balanceamento com um número maior de consumidores.

Os sistemas monofásicos em uso são:

- a) **o sistema fase/fase;**
- b) **o sistema fase/neutro;**
- c) **o sistema monofilar com retorno por terra – MRT.**

### 2.1 SISTEMA FASE/FASE

**Esse sistema constitui-se de dois condutores fases, derivados de uma rede trifásica, para atender um suprimento monofásico.** É muito usado na França, onde a prática tem sido construir estas redes fase/fase em estruturas idênticas às usadas para o sistema trifásico, com a omissão do condutor no topo do poste. **Também no Brasil algumas concessionárias, tais como COPEL, CEEE, CEMAT, COSERN, COELBA, CELPE, etc., o usam.** A aparência desse sistema é a indicada na Figura 1.

A conversão dessas redes para trifásica é simples, requerendo somente a instalação do 3º condutor.

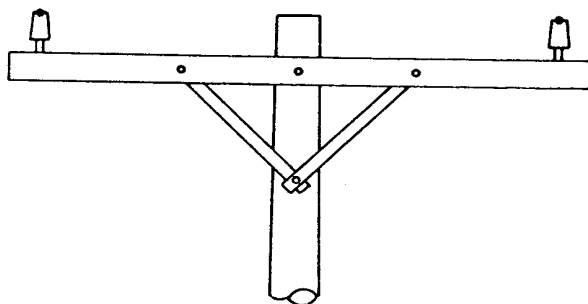


Fig. 1



Fig. 2

## 2.2 SISTEMA FASE/NEUTRO

Nos Estados Unidos o desenvolvimento da eletrificação rural tem sido quase totalmente feito com o uso do sistema fase/neutro, que atualmente se estende por milhões de quilômetros. A aparência desse sistema é a indicada na Figura 2.

As principais vantagens são:

- a) eliminação das cruzetas e ferragens associadas;
- b) eliminação de um isolador de alta tensão por poste (em relação ao sistema fase/fase);
- c) simplificação da construção, permitindo maior rapidez e menores custos;
- d) utilizam estações transformadoras mais simples e baratas, pois os transformadores têm somente uma bucha de alta tensão e exigindo portanto um único pára-raios e uma chave monofásica;
- e) possibilidade de usar o neutro comum na alta e na baixa tensão.

Esses sistemas alcançam em média uma redução de custo de aproximadamente 20%, em relação aos sistemas fase/fase.

Como nem sempre os sistemas trifásicos são associados a um condutor neutro, será necessário para adotar o sistema fase/neutro proceder ou ao lançamento do neutro desde a fonte do suprimento, ou instalar um transformador de aterramento. Desse transformador monofásico, conectado entre duas fases do sistema trifásico, deriva-se a tensão fase/neutro. No Brasil algumas concessionárias também usam tal sistema, como a ESCELSA, CEB, CFLCL, CEMIG, CELPE, COELBA, CELPA, etc.

## 2.3 SISTEMA MRT

O sistema de distribuição com retorno por terra, tem sido adotado em muitos países do mundo para suprimento de áreas rurais.

A Figura 3 a seguir, indica uma de suas configurações.

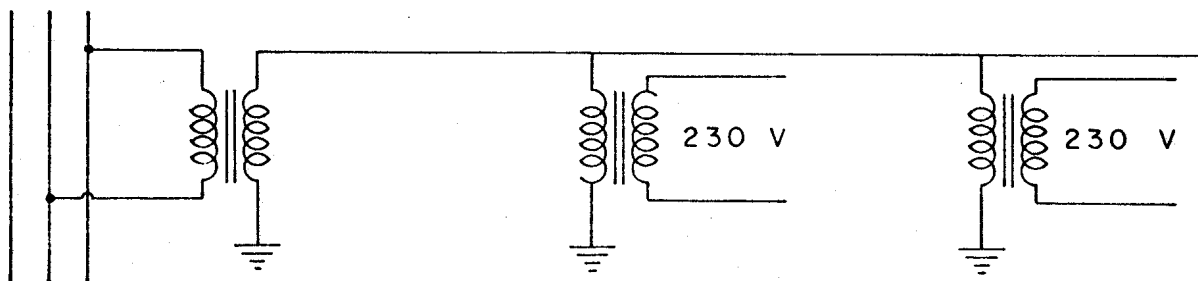


Figura 3

Na Rússia linhas monofilares de aço foram desenvolvidas para uso em zonas agrícolas. Em Leningrado usou-se linhas portáteis deste tipo para atender demandas sazonais de irrigação e moagem.

Na Nova Zelândia o engenheiro Zelayo Mandeno foi o primeiro a empregá-lo em larga escala, na Ilha Norte, em 1941. Dali estendeu-se à Austrália, onde hoje cobre área de milhares de km<sup>2</sup>. Nesse texto será transcrita a experiência australiana com os sistemas MRT.

As suas vantagens principais são:

- a) Menor custo de capital. Comparado com o sistema fase/fase, na Austrália, apresentou redução de 30% (trinta por cento) dos investimentos;
- b) A sua construção simplificada, reduz material e mão-de-obra nas redes, além de permitir mais rápida construção;
- c) Menor probabilidade de ocorrência de interrupções, quando comparado aos demais sistemas;
- d) O crescimento de carga pode ser convenientemente observado usando instrumentos de baixa tensão ligados no aterramento primário dos transformadores;
- e) Apresentam redução de custos de manutenção e operação.

## 2.4 CAPACIDADE DOS SISTEMAS

Em um sistema de distribuição rural, a regulação de tensão é o fator determinante para avaliar sua capacidade de carga. Como a resistência do circuito de retorno por terra pode ser desprezada, pode-se afirmar que uma rede monofilar, para a mesma regulação de tensão, usando os mesmos condutores, operando a 11 kV, tem a mesma capacidade de uma rede trifásica a 3 fios a 11 kV.

Uma rede monofilar em 12,7 kV tem 2/3 da capacidade de carga de uma linha fase/fase em 22 kV.

A Tabela 1 a seguir, apresenta as capacidades relativas de carregamento de vários sistemas, para uma queda de tensão permitida de 7%, a um fator de potência de 0,8, atrasado.

Tabela 1

CAPACIDADE DE REDES RURAIS (7% de queda de tensão e $\cos \phi = 0,8$ )		
	CONDUTOR DE COBRE DE 7/0,064	CONDUTOR DE AÇO DE 3/12
	kW – milhas	kW – milhas
11 kV – 3 fases – 3 fios	3.300	460
11 kV – fase/fase	1.650	230
11 kV – fase/neutro (neutro multi-aterrado)	2.300	-
11 kV – MRT	3.300	460
12,7 kV – MRT	4.400	610
22 kV – fase/fase	6.600	920
22 kV – 3 fases – 3 fios	13.200	1.840

Nota: Esses são os condutores padronizados na Austrália.

## 2.5 EXPERIÊNCIA BRASILEIRA

Atualmente no Brasil, oito empresa distribuidoras de energia elétrica vêm desenvolvendo experiências com os sistemas MRT.

De acordo com a natureza do sistema elétrico existente e as características do solo de cada região do país onde as experiências vêm se verificando, foram desenvolvidas no Brasil as seguintes versões do sistema MRT:

### • Sistema Monofilar

Constitui-se de um único condutor metálico ligado diretamente a uma das fases de uma linha trifásica, tendo o solo como caminho de retorno da corrente. Os transformadores de distribuição por ele alimentados têm seus enrolamentos primários ligados entre o condutor e o solo (Figura 4).

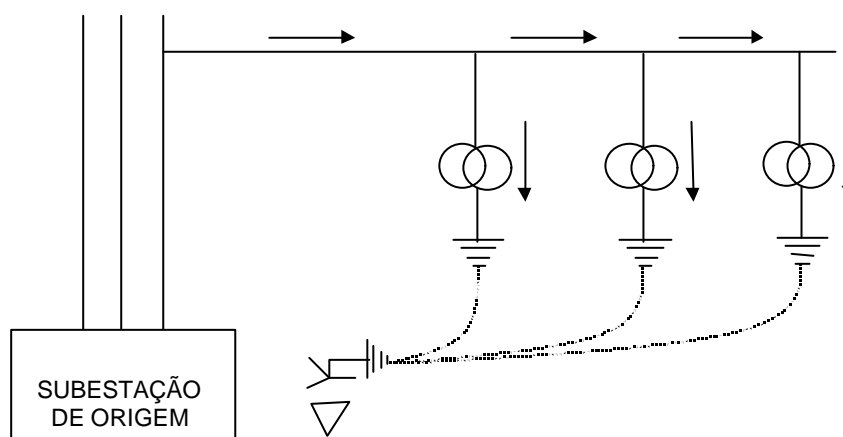


Figura 4

Este sistema só pode ser originado em alimentadores cuja saída da subestação de origem é estrela aterrada.

Apresenta-se como uma simplificação do monofásico multi-aterrado convencional com a eliminação do condutor neutro e, conseqüentemente, dos aterramentos ao longo da linha. É comprovadamente a versão mais prática e econômica do MRT, sendo, portanto, a mais recomendada.

- Sistema Monofilar com Transformador de Isolamento

Consiste de um único condutor metálico partindo de um sistema trifásico através de um transformador de isolamento, tendo o solo como caminho de retorno da corrente. O transformador de isolamento tem seu enrolamento primário ligado a duas fases do sistema trifásico e o secundário entre o condutor metálico e a terra (Figura 5).

Apresenta-se como solução para emprego do MRT a partir de sistemas isolados. Nesses casos, a sua utilização poderá vir a ser justificada aliando-se a este fato outras vantagens como:

- Adequar a tensão do sistema MRT às tensões nominais padronizadas;
- Elevar a tensão para permitir o atendimento a uma área mais ampla em condições econômicas;
- Limitar a zona de circulação das correntes de retorno pela terra, evitando interferências em linhas de telecomunicações fora do percurso do ramal;
- Limitar as correntes de curto-circuito disponíveis nas linhas MRT.

Como desvantagens, além do custo adicional do transformador de isolamento, cumpre destacar:

- Limitação da potência do ramal à potência nominal do transformador de isolamento;
- Necessidade de se reforçar o aterramento do transformador de isolamento, pois na sua falta cessa o fornecimento de energia para todo o ramal.

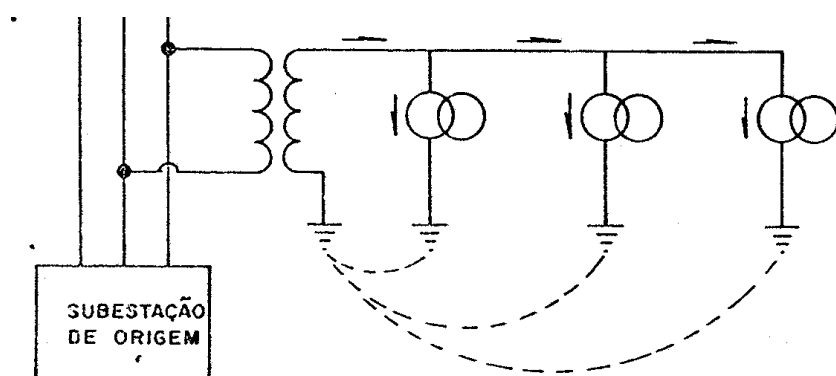


Figura 5

- Sistema MRT na Versão Neutro Parcial

Consiste da interligação dos aterramentos dos transformadores do ramal MRT através de um condutor adicional. Dessa forma, apresenta-se fisicamente como o monofásico fase-neutro multi-

aterrado, com a diferença de que o condutor neutro não está conectado à subestação de origem (Figura 6).

É empregado como solução para a utilização do sistema MRT em regiões de solos de alta resistividade, quando se torna difícil obter valores de resistências de terra dos transformadores dentro dos limites máximos estabelecidos no projeto. Nesse sistema, a interligação dos aterramentos dos transformadores forma uma única malha de terra, reforçada pelos aterramentos que podem ser acrescentados ao longo do ramal, contribuindo, desta forma, para baixar o valor da resistência equivalente em cada ponto.

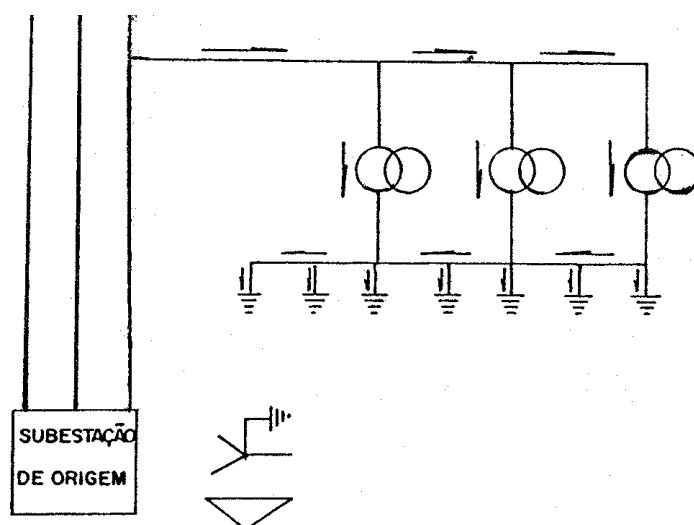


Figura 6

### 2.5.1 COMPARAÇÃO ECONÔMICA ENTRE OS SISTEMAS ELÉTRICOS EMPREGADOS NA ELETRIFICAÇÃO RURAL BRASILEIRA

Os dados de custos dos sistemas elétricos rurais utilizados nesta análise, foram tirados do padrão de uma empresa distribuidora de energia elétrica, a Companhia de Eletricidade de Pernambuco – CELPE. Entretanto, muito embora possam haver divergências consideráveis nos seus valores absolutos comparados aos de uma outra empresa, ficam resguardadas, com relativa aproximação, as mesmas proporções entre os custos dos diversos sistemas, não prejudicando, dessa forma, as conclusões aqui apresentadas.

O quadro dos custos por quilômetro de linha de distribuição rural na tensão 13,8 kV, com postes de concreto armado, apresenta os valores médios da Tabela 2 a seguir.



Tabela 2 – Custos dos sistemas elétricos empregados na eletrificação rural [US\$]\*

Padrão CELPE

Discriminação	Condutor CAA 21,15 mm (4 AWG)								Condutor CAZ 1 x 3,09 mm	
	Trifásico	%	Bifásico Monof. Fase/ Fase	%	Monof. Multi- aterrado	%	MRT Monofilar	%	MRT Monofilar	%
Postes	325	14	325	17	297	22	297	25	169	26
Condutores	302	13	201	11	201	15	102	9	26	4
Mão-de-obra	483	20	375	20	274	20	242	20	132	20
Outros	1249	53	978	52	563	43	538	46	316	50
Total	2359		1879		1235		1179		643	

Nota: Os custos do monofásico multi-aterrado valem para o MRT – Neutro Parcial.

Analisando este quadro, verifica-se entre os ramais com condutor de alumínio que os custos do monofásico multi-aterrado e do MRT monofilar, correspondem, respectivamente, a 60% e 50% do trifásico. Já o bifásico, cujos custos correspondem a 80% do trifásico e dada as limitações que apresenta na capacidade de transporte de energia em relação a este, normalmente só se cogita a sua viabilidade em situações que se apresentem inviáveis ao MRT.

Na discriminação dos itens que compõem os orçamentos, observa-se a redução gradativa dos custos de mão-de-obra na passagem do trifásico para monofásico multi-aterrado e, em seguida, para o MRT monofilar, representando percentualmente 55% do 1º para o 2º e 10% do 2º para o último. Este fato reflete a simplificação de um sistema em relação ao outro.

Observa-se ainda que os custos das linhas MRT monofilares caem em 45% com emprego do fio de aço. Constituindo-se esse condutor, portanto, numa alternativa econômica muito significativa.

## 2.5.2 ESTÁGIO ATUAL DAS EXPERIÊNCIAS COM SISTEMAS MRT NO BRASIL

O Brasil contava em março de 1986 com 40.912 km de linhas de distribuição rural operando no sistema MRT, implantadas através de empresas concessionárias de distribuição de energia elétrica, atendendo a 124.328 consumidores. Sendo que desse total, 13.211 km com 51.417 consumidores são na versão neutro parcial e 59 km com 108 consumidores são ramais partindo de transformadores de isolamento (Tabela 3). Destaca-se, nesta tabela, a experiência da Companhia Paranaense de Energia Elétrica – COPEL com sistema MRT – monofilar, atingindo 53.000 ligações de consumidores com 20.000 km de linhas de distribuição, implantadas a partir do ano de 1967. Apresenta-se também de forma muito expressiva a experiência das Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A. com o

\* Preços de setembro de 1986, convertidos para dólar da época, onde é considerada a média dos índices da variação cambial do dólar para compra e venda no paralelo, ou seja, 1 dólar igual a 22,4 cruzados (Fonte: CD Financeiro da Folha de São Paulo).

sistema MRT – Neutro Parcial, atingindo 50.000 ligações de consumidores com 12.500 km de linhas de distribuição, implantadas a partir de 1974.

Tabela 3 – Sistemas MRT implantados pelas empresas distribuidoras de Energia Elétrica

Empresa	Estado	Região	Início das Experiências	Sistema MRT Implantado					
				MRT Monofilar		MRT – Monofilar com Trafo de Isolamento		MRT Neutro Parcial	
				Cons. Ligados	km de Linha	Cons. Ligados	km de Linha	Cons. Ligados	km de Linha
CEMAR	MA	Nordeste	1979	1.800	2.000	-	-	-	-
CELPE	PE	Nordeste	1980	2.000	370	-	-	1.100	500
COBER	BA	Nordeste	1980	4.201	258	-	-	19	27
LIGHT	RJ	Sudeste	1982	-	-	108	59	298	134
CESP	SP	Sudeste	1981	52	73	-	-	-	-
COPEL	PR	Sul	1967	53.000	20.000	-	-	-	-
CELESC	SC	Sul	1974	3.000	1.500	-	-	50.000	12.500
CEEE	RS	Sul	1980	8.750	3.500	-	-	-	-
<b>TOTAL</b>				<b>72.803</b>	<b>27.701</b>	<b>108</b>	<b>59</b>	<b>51.417</b>	<b>13.211</b>

Na Tabela 4 apresentam-se os valores máximos de resistências de terra admitidos para o aterramento dos transformadores, pelas oito empresas distribuidoras de energia elétrica brasileiras, que vem realizando experiências com os sistemas MRT. Bem como, os valores recomendados pela ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras, que vem desenvolvendo estudos visando estabelecer diretrizes gerais para o emprego do sistema MRT no Brasil. No caso do MRT – Neutro Parcial, as exigências relativas à resistência de aterramento de cada ponto de transformação, passam a ser exigidas da equivalência de todos os aterramentos interligados. Na análise deste quadro, observa-se uma tendência das empresas a estender os mesmos valores máximos de resistências de terra adotados para os transformadores de potências mais elevadas, aos de menor potência. Com exceção da CELPE e da LIGHT, que definem um valor de resistência distinto para cada potência de transformadores, mais ao feitiço da recomendação da ELETROBRÁS. Sendo que a ELEKTRO (antiga CESP) não estabelece valores limites para resistências de terra, controlando ao invés deste parâmetro, os níveis de potenciais de superfície em volta dos aterramentos.

Tabela 4 – Resistências de terra limites ( $\Omega$ ) para aterramento dos transformadores

Tensão $13,8/\sqrt{3}$ kV	Transformadores (kVA)				
Empresa	3	5	10	15	25
CEMAR	20	20	20	-	-
CELPE	65	40	20	15	-
COBER	30	30	20	13,3	-
LIGHT	-	42,5	21,2	14,2	-
CESP	*	*	*	*	-
CELESC	-	10	10	10	10
CEEE	-	20	20	20	10
<b>ELETROBRÁS</b>	<b>71</b>	<b>42,5</b>	<b>21,2</b>	<b>14,2</b>	<b>8,5</b>
Tensão $23/\sqrt{3}$ kV	Transformadores (kVA)				
Empresa	3	5	10	15	25
CELESC	-	10	10	10	10
CEEE	-	20	20	20	15
<b>ELETROBRÁS</b>	<b>100</b>	<b>70,8</b>	<b>35,4</b>	<b>23,6</b>	<b>14,2</b>
Tensão $34,5/\sqrt{3}$ kV	Transformadores (kVA)				
Empresa	3	5	10	15	25
CEMAR	20	20	20	-	-
COBER	30	30	30	30	20
CESP	-	*	*	-	-
COPEL	50	50	50	33	20
<b>ELETROBRÁS</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>53,1</b>	<b>35,4</b>	<b>21,2</b>

\* Verificar os valores de potencial na superfície

Na Tabela 5 mostram-se os tipos de materiais empregados no aterramento dos transformadores, bem como, a forma de ligação à terra destes. Observa-se que não existe um consenso com relação ao critério de se utilizar um aterramento único para as buchas de neutro de AT e BT dos transformadores ou o de aterrá-las separadamente. Registrando-se, entretanto, uma predominância do primeiro critério, adotado por cinco empresas. No que diz respeito aos tipos de materiais empregados nos aterramentos, verifica-se uma unanimidade com relação ao emprego da haste de aço cobreada, uma relativa diversidade com relação aos condutores de descida e uma baixa participação ainda do processo de solda exotérmica nas conexões.

Tabela 5 – Padrões de aterramento dos transformadores

Empresa	Interliga o Neutro da A.T. e B.T.	Separa o Neutro da A.T. e B.T.	Tipo e Dimensões da Haste de Terra	Tipo e Bitola do Condutor de Descida	Tipo de Conexão
CEMAR	Sim	Não	Cantoneira de ferro galv. De 2,40 m e haste cobreada de 2,00 m	Cabo de cobre Nu n.º 2 AWG	Conector de aperto
CELPE	Sim	Não	Aço cobreada de 2,00 m	Fio de cobre Nu n.º 4 AWG	Conector de aperto
COBER	Não	Sim	Aço cobreada de 2,40 m	Cabo de cobre isolado 25 mm <sup>2</sup> e cabo de aço cobreado	Solda exotérmica
LIGHT	Não	Sim	Aço cobreada de 3,00 m	Cordoalha de aço de 5/16" e cabo de cobre Nu de 25 mm <sup>2</sup>	Conector de aperto
CESP	Não	Sim	Cantoneira de ferro galv. De 2,40 m e haste cobreada de 2,40 m	Fio de ferro galv. n.º 4 AWG	Conector de aperto
COPEL	Sim	Não	Aço cobreada de 2,40 m	Fio de cobre Nu n.º 4 AWG	Solda exotérmica
CELESC	Sim	Não	Haste de aço galv. de 2,40 m e haste cobreada de 2,00 m	Cabo de aço galv. de 6,4 mm e cabo de cobre Nu n.º 2 AWG	Conector de aperto
CEEE			Aço cobreada de 2,40 m	Fio de aço cobreado n.º 6 AWG	Conector de aperto

No Brasil somente observou-se uma maior difusão do seu uso a partir do ano de 1980, com a criação, pela ELETROBRÁS, de um Grupo de Trabalho com o objetivo de estudar e divulgar os aspectos e as diretrizes básicas para a sua utilização a nível nacional.

É importante ressaltar que não foi registrado até o momento pelas empresas brasileiras que vêm desenvolvendo experiências com o sistema MRT, nenhum problema de ordem técnica durante a sua operação, que possa ser considerado exclusivo deste sistema, como também, não foi registrado nenhum caso de acidente com pessoas ou animais em torno dos aterramentos. Esse fato transmite muita tranquilidade com relação aos aspectos de segurança e eficiência do sistema.

## 2.6 TIPOS DE SISTEMAS MRT

O princípio de usar a terra como condutor de retorno para redes de distribuição é utilizado em três tipos de sistemas:

- O sistema ISOLADO, monofilar, que usa um transformador de isolamento e um único fio condutor (Figura 7):

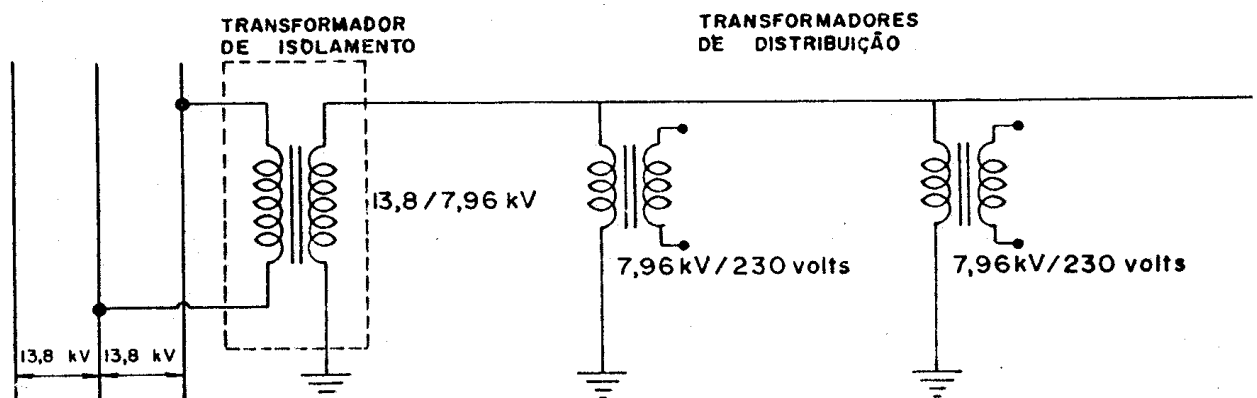


Figura 7

- b) O sistema DUPLEX, que usa um transformador com o secundário aterrado no tap central e supre uma linha principal a dois fios, à qual são ligados os ramos monofásicos (Figura 8):

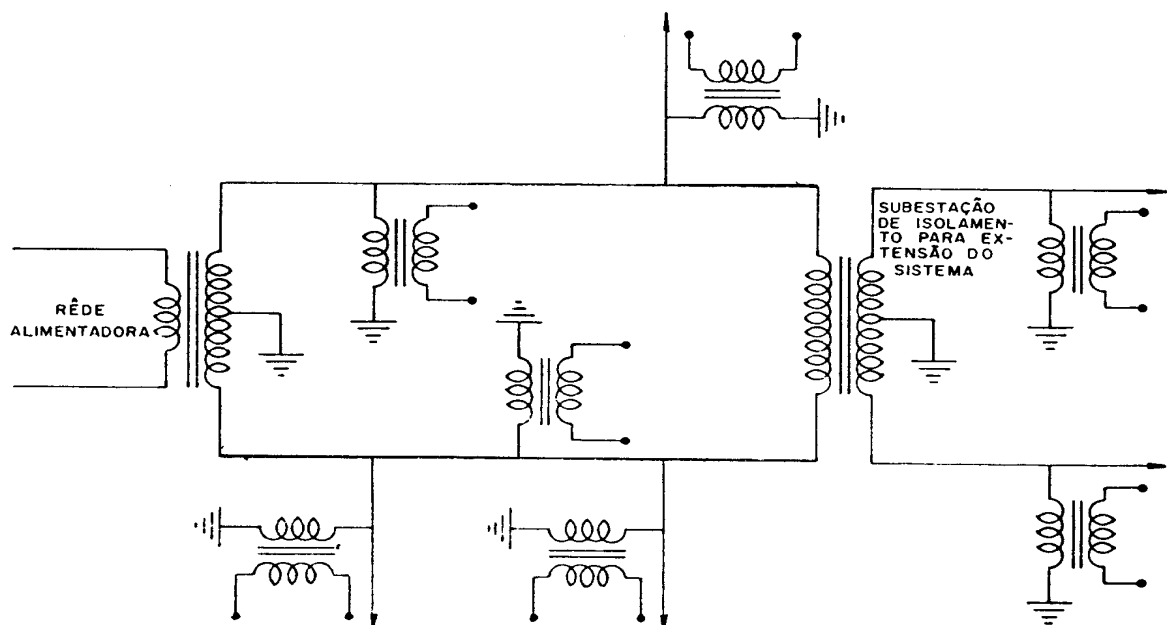


Figura 8

- c) O sistema NÃO ISOLADO, que usa como linha principal uma rede convencional a 3 fases, com ou sem neutro multi-aterrado e com o neutro solidamente aterrado na origem. Redes monofilares com retorno pela terra partem da rede principal para alimentar os transformadores rurais (Figura 9).

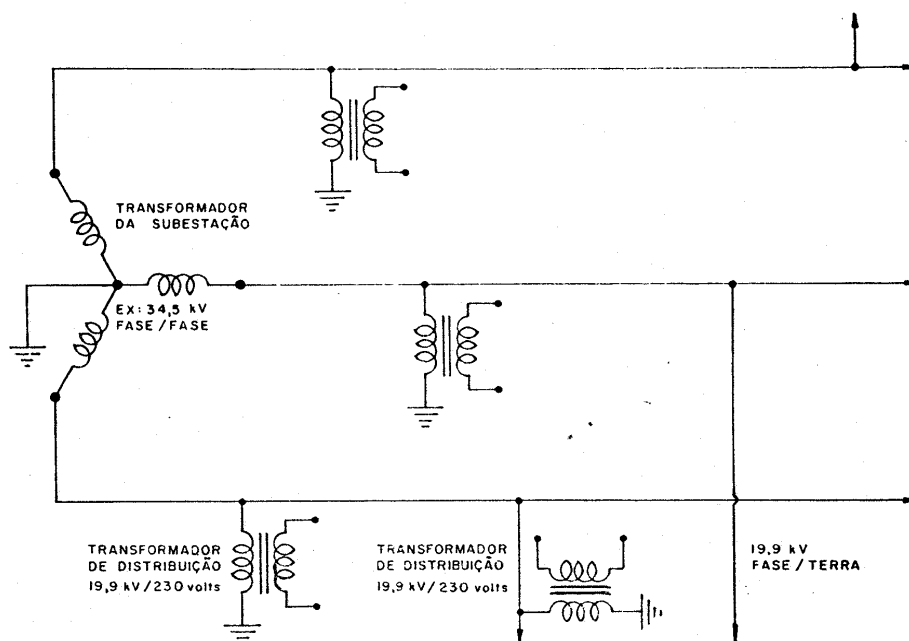


Figura 9

## 2.7 SISTEMAS HÍBRIDOS

Uma certa variedade destes sistemas foi desenvolvida e posta em prática em diversos países, combinando os princípios do sistema MRT com outros sistemas, alguns dos quais descritos a seguir:

a) Sistema trifásico, com NEUTRO ATERRADO, como linha tronco, com ramais MRT não isolados:

### • Vantagens

O sistema é ideal onde uma rede trifásica alimenta uma grande carga no seu final. Se for mantido um equilíbrio criterioso dos ramais monofilares com relação as potências em kVA dos transformadores ligados e ao comprimento da rede (corrente a vazio), ao longo da rede principal, a corrente de retorno por terra, ao longo da trajetória da linha principal será mantida baixa. Isso permite um maior número de ligações de consumidores do que seria possível com uma rede MRT convencional.

Como não há transformadores de isolamento entre a rede principal e o ramal, melhor regulação de tensão e características de proteção são obtidas.

### • Desvantagens

A rede principal deve obedecer os mesmos critérios de afastamento em relação às redes de comunicação de circuito aberto exigidos para as redes MRT. A concessionária também deve instalar proteção de terra nos seus terminais de suprimento em grosso. Longos circuitos monofilares de retorno pela terra sem os transformadores de isolamento podem produzir altas correntes residuais de terra e diminuir a sensibilidade efetiva da proteção de falha à terra.

Entretanto, se os comprimentos dos ramais e a carga forem distribuídos equitativamente com relação às 3 fases do sistema, então somente as correntes residuais de harmônico tríplice aparecerão na

ligação de terra e relés sensíveis à corrente de 60 Hz podem ser usados para se conseguir proteção sensível as falhas de terra.

Este sistema, infelizmente, não pode discriminar as operações de fusíveis nos ramais monofásicos ou ramais MRT, o que pode causar desequilíbrio no sistema. Em vista disso preferem-se os sistemas de retorno pela terra não ligados diretamente às estações de **suprimento em grosso**.

Embora a supressão de corrente de terra de frequência harmônica possa ser conseguida equilibrando a corrente magnetizante dos transformadores e a corrente de carga de retorno pela terra, isto não será possível para as harmônicas tríplexes (terceira e seus múltiplos). As harmônicas tríplexes se adicionam aritmeticamente e podem causar considerável perturbação nos circuitos de comunicação. Essa desvantagem pode ser aliviada usando-se transformadores de baixa harmônica, desde que naturalmente a forma de onda elétrica da rede primária seja boa. Se a forma de onda é pobre, a tensão na rede não deve exceder 12,7 kV. Seccionalizando-se a linha trifásica com transformadores de isolamento em  $\Delta/\lambda$  também se consegue controlar as terceiras harmônicas.

- b) Sistema trifásico isolado com neutro ATERRADO, como linha tronco, com ramais MRT não isolados (Figura 10).

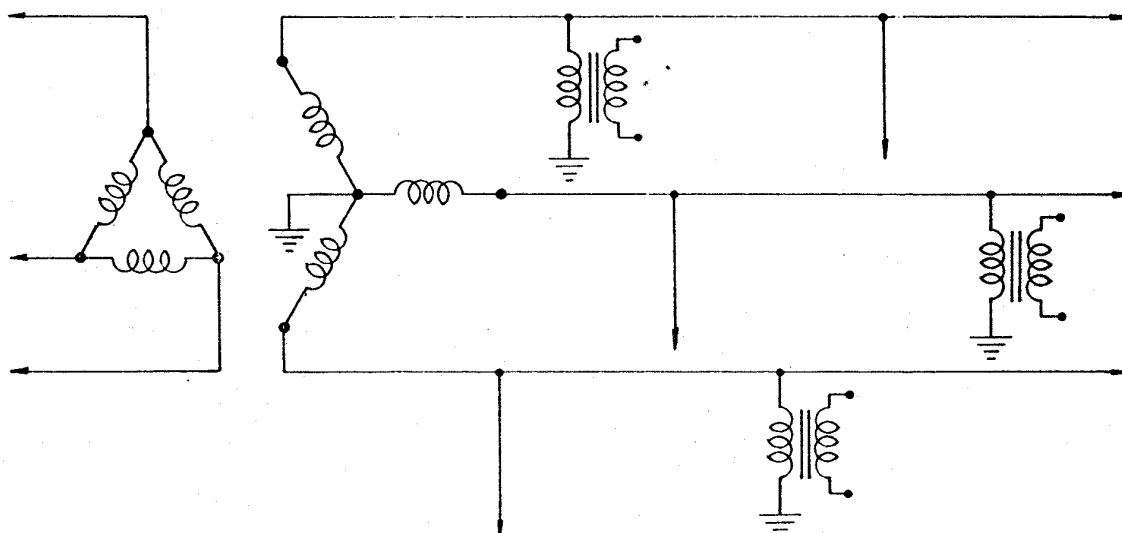


Figura 10

Este sistema é semelhante ao já descrito no item **a**. A diferença principal é que a linha tronco trifásica é isolada do sistema principal.

O isolamento pode ser conseguido num ponto de elevação de tensão (por exemplo, 11 kV para 22 kV) ou num ponto de regulação se for usada na construção um duplo enrolamento. O primeiro destes dois métodos tem a vantagem que para o mesmo condutor um sistema em 22 kV tem quatro vezes a capacidade de carga do que em 11 kV; além disso, acarreta um custo adicional insignificante. A linha de 22 kV também permite o uso de transformadores de distribuição padronizados de 12,7 kV.

Como alternativa, um sistema isolado em 33 kV poderia ser usado, porém o custo adicional da subestação convencional típica deveria ser considerado.

Se qualquer quantidade destas subestações tiverem de ser usadas, o aumento de custo em relação ao 22 kV será substancial. Na maior parte dos casos o custo adicional dessas subestações, e as exigências de maiores isolamento, são superiores às economias conseguidas pelo aumento da capacidade da linha.

Um sistema desse tipo usando um transformador de duplo enrolamento 11 kV/22 kV para isolamento, está em uso no Hartley Country District; enquanto um sistema usando um transformador de 22 kV/33 kV, está em operação a oeste de Nyngan, no Macquarie Country District.

- Vantagens

Esse sistema tem vantagens sobre o sistema tronco de 3 fases não isoladas, porque permite melhor localização do circuito de retorno por terra. Permite ainda a mudança da tensão primária, se necessário; é menos restrito pelas características que o sistema anterior; elimina as harmônicas de 3ª ordem.

- Desvantagens

É necessária uma subestação de isolamento, muitas vezes de grande capacidade. Além de localizar o caminho de retorno por terra e permitir a escolha da tensão, tem as mesmas desvantagens relacionadas para o sistema não isolado trifásico.

c) Sistema de TRÊS FASES com dois fios e neutro isolado e ramais MRT (Figura 11).

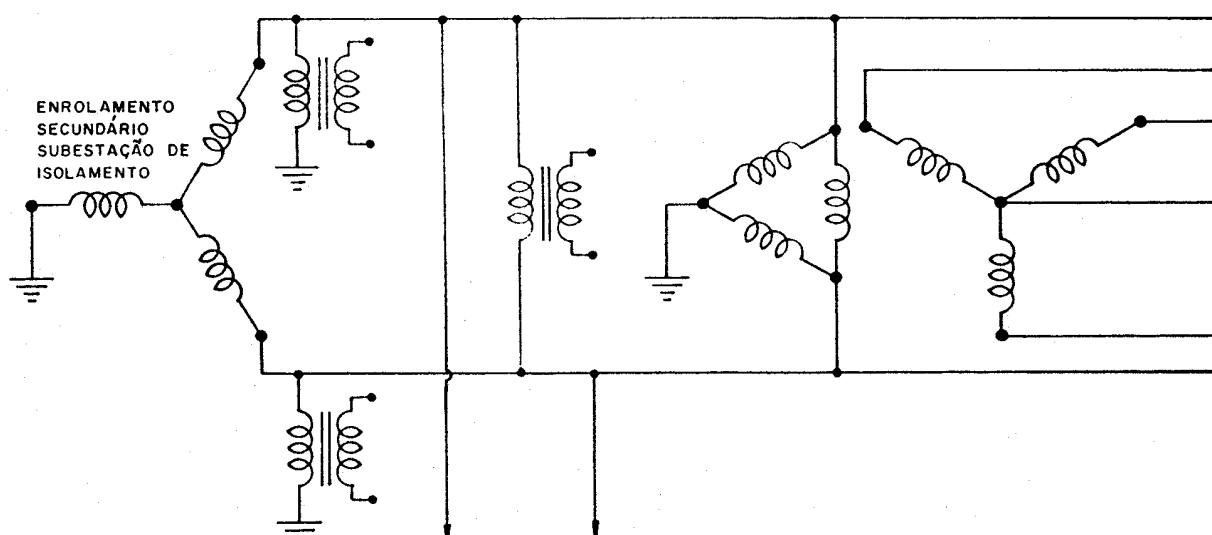


Figura 11

O sistema consiste de uma linha a 2 fios e um caminho de retorno por terra para formar um sistema trifásico a 3 condutores. O sistema requer o uso de um transformador de isolamento especialmente desenhado e transformadores de distribuição trifásicos. Transformadores monofásicos plenamente isolados podem ser ligados aos dois condutores aéreos se for desejado. As três fases são deslocadas a 120° uma da outra de maneira semelhante ao sistema convencional trifásico. Os ramais são usualmente monofilares. O sistema é usado na Romênia e na Rússia.



- Vantagens

Um suprimento trifásico é possibilitado.

Transformadores enrolados em delta aberto podem ser usados com isolamento gradual nas subestações de distribuição das fases. O número de equipamentos de proteção é reduzido em 33%.

- Desvantagens

Os níveis de isolamento com relação ao solo são grandes.

Um sistema básico de 22 kV trifásico, precisará de isolamento equivalente a 28,2 kV. Isso se aplicaria a qualquer subestação com os enrolamentos do seu transformador ligados aos dois condutores aéreos.

As correntes de retorno por terra não se cancelam completamente e o sistema tem somente o dobro da capacidade de uma fase de uma linha MRT convencional operando à mesma tensão fase/terra e 1,73 vezes a capacidade de uma linha monofilar, quando usada para suprir somente cargas trifásicas.

A corrente a vazio para o terra é maior do que em outros sistemas, e cuidados especiais devem ser tomados para anulá-la com reatores ou transformadores de alta corrente de magnetização. O efeito perturbador nas comunicações será também maior do que o usual.

Tanto os transformadores trifásicos como os MRT deverão ser de tensão não padronizada.

A tendência de ligar transformadores entre a fase e a terra e não fase a fase, resulta em um sistema desequilibrado.

d) Sistema de TRÊS FASES com dois fios e neutro aterrado e ramais MRT (Figura 12):

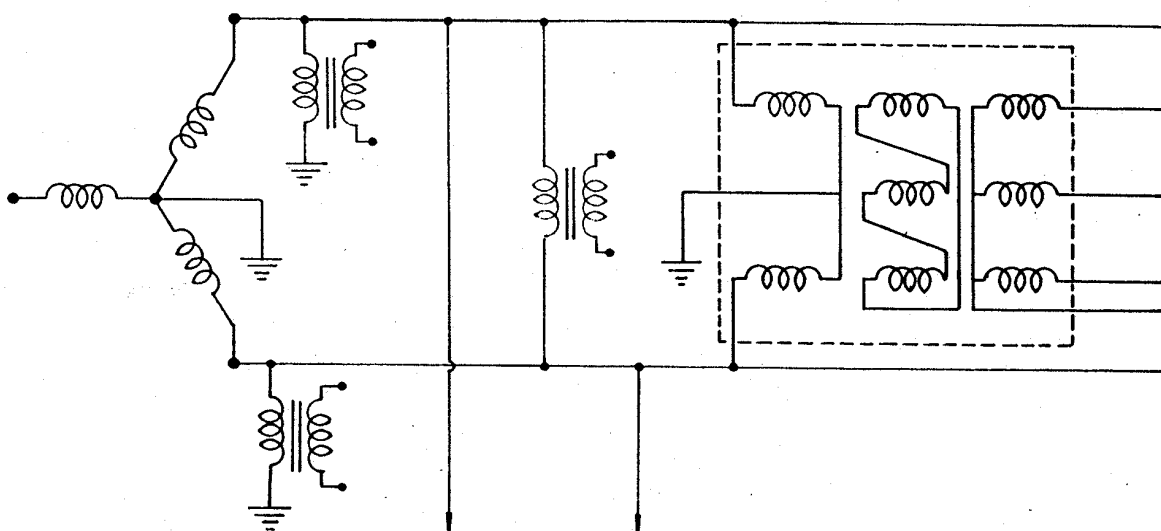


Figura 12

O arranjo dos enrolamentos e a distribuição da corrente para relação 1:1:1 dos enrolamentos e uma carga trifásica secundária equilibrada são indicados nos desenhos a seguir (Figuras 13 e 14):

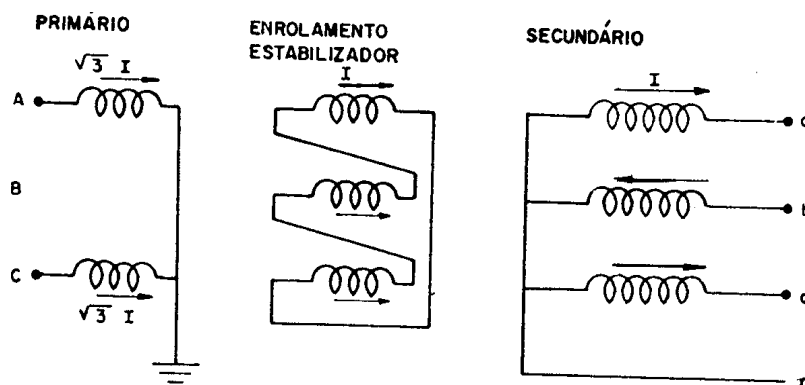


Figura 13

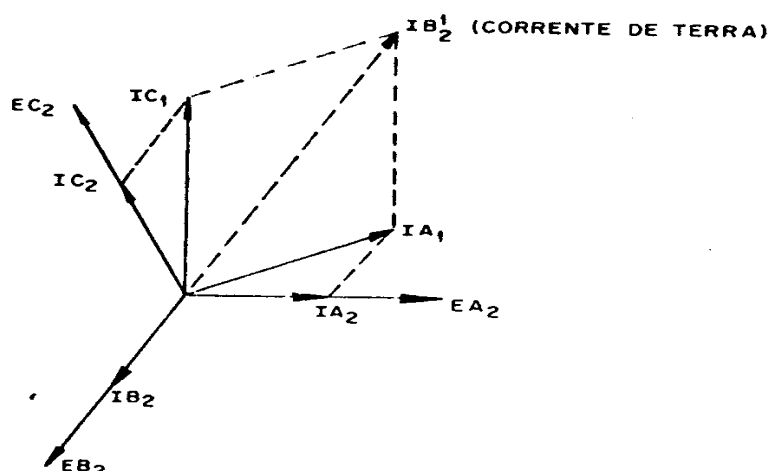


Figura 14

Este sistema usa um circuito convencional de dois fios monofásicos (que pode ou não ser isolado), partindo de um sistema trifásico com neutro aterrado. Se o sistema não é isolado, a linha é submetida a correntes de retorno por terra que fluiriam no caminho inteiro entre a carga e a ligação de terra do neutro, e necessitaria obedecer às exigências de afastamento das redes de comunicações como o sistema trifásico não isolado.

O sistema é capaz de suprir cargas trifásicas, porém necessita de um transformador especialmente enrolado, cuja descrição é dada na Figura 12, onde pode ser visto que ele consiste de um núcleo de três colunas com os enrolamentos primários somente nas colunas extremas, um enrolamento de equilíbrio conectado em delta e enrolamentos secundários nas três colunas. A finalidade do enrolamento de equilíbrio é assegurar que a coluna central receba a quantidade correta de fluxo de cada coluna extrema. O enrolamento na coluna central é ajustado para atender as exigências de fluxo da coluna e é muito semelhante a um enrolamento terciário em delta convencional.

A distribuição de correntes nos enrolamentos é mostrada na Figura 13, sendo  $EA_2$ ,  $EB_2$  e  $EC_2$ , tensões secundárias fase/neutro  $IA_2$ ,  $IB_2$  e  $IC_2$  suas respectivas correntes de fase.

Não há enrolamento na fase B no lado primário e consequentemente a corrente secundária da fase B deve resultar das correntes primárias das fases A e C. Sob condições de equilíbrio e com o enrolamento secundário B ligado em oposição aos enrolamentos secundários A e C, as correntes primárias  $IA_1$  e  $IC_1$ , serão as resultantes respectivas de  $IA_2 + IB_2$  e  $IC_2 + IB_2$  como mostrado no diagrama vetorial.

Será observado que  $IA_1$  está adiantada de  $30^\circ$  da sua respectiva tensão para a terra. As correntes nas linhas estão portanto defasadas de  $60^\circ$ . A corrente de retorno por terra será a resultante destas correntes e por isso será três vezes as correntes na linha.

- Vantagens

O isolamento dos transformadores ligados fase/fase e transformadores ligados fase/terra, para suprir cargas monofásicas, são padronizados.

Permite o suprimento trifásico a partir de uma linha monofásica a dois fios.

- Desvantagens

A corrente de retorno por terra não se anula e o sistema é somente capaz de suprir duas vezes a carga da linha MRT convencional, para a mesma corrente de retorno por terra.

As cargas trifásicas provocam corrente que flui no caminho de retorno por terra limitando-as. Isto não acontece com a linha tronco de três fios.

Correntes a vazio ao longo do trajeto dos dois fios, carregam o circuito de terra da mesma forma que o sistema monofilar.

Transformadores especiais são necessários para o suprimento trifásico.

- e) Sistema duplex ou linha TRONCO DE DOIS FIOS isolados saindo de um transformador de isolamento aterrado no meio do enrolamento secundário com ramais em MRT (Figura 15).

O MRT duplex tem muitas vantagens que o tornam uma atrativa proposição para linhas mais longas do que 100 km e sistemas rurais moderadamente carregados.

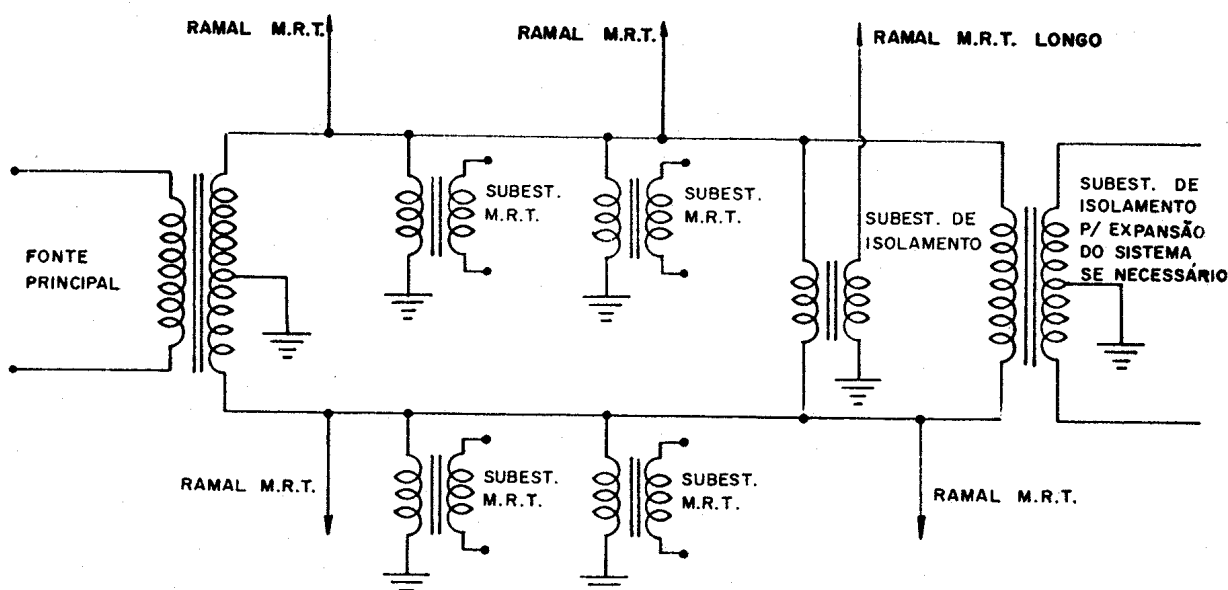


Figura 15

Compreende uma linha tronco a dois fios que é alimentada pelo transformador de isolamento com o centro aterrado. Ramais monofilares partem da linha de dois fios para suprir grupos de consumidores rurais.

A tensão fase/fase nos dois fios, ou seção duplex, é duas vezes aquela em relação a terra. O sistema permite o uso de uma tensão de 19,1 kV para a terra ou 38,2 kV fase a fase. Esta tensão, embora maior do que a tensão normal de 33 kV, não requer qualquer isolamento adicional e prevê um aumento de 34% na capacidade da linha, comparada a um sistema monofásico de 33 kV.

Transformadores de uma bucha de alta e enrolamentos de isolamento reduzido, são usados para permitir construção mais barata. Em comparação, um posto de transformação usando transformadores MRT de 19,1 kV custaria aproximadamente 38% do valor correspondente a um equivalente completamente isolado.

Correntes de carga e a vazio na terra podem ser mantidas no valor mínimo, pelo equilíbrio criterioso de cargas e comprimentos de redes. Os desenhos mostrados nas Figuras 16 e 17 indicam como o sistema pode ser vantajosamente sobre o MRT convencional. A corrente em vazio poderia ser mantida no valor mínimo, usando transformadores de alta corrente de magnetização ou reatores, mais isto não é necessário para a coordenação telefônica. O uso mais provável para o sistema duplex, seria em áreas onde há dúvida de interferência com circuitos telefônicos pelos sistemas MRT convencionais, ou onde as necessidades de carga são muito grandes para um fio único.

Em casos onde é difícil obter terras para subestações MRT, ou onde a presença de redes de comunicações monofilares impedem o aterramento próximo a um consumidor particular, o suprimento convencional a dois fios pode ser usado para superar o problema, desde que o custo adicional possa ser justificado.

- Vantagens

O comprimento e capacidade do sistema de retorno por terra é consideravelmente estendido quando as correntes de terra podem ser mantidas no mínimo por equilíbrio criterioso.

Um sistema duplex 19,1 kV tem 20% maior capacidade do que uma linha trifásica a 22 kV usando o mesmo condutor, mesmo permitindo uma queda de 1% no transformador de isolamento. Também custa 7% menos.

Onde longos ramais, ou ramais assimetricamente carregados são encontrados, podem ser usados transformadores de alta magnetização, ou reatores, para neutralizar qualquer corrente a vazio resultante.

Correntes de terra fundamentais e harmônicas são canceladas por carregamento balanceado, reduzindo a interferência em comunicações para cerca de 10% daquela originada pelas linhas convencionais MRT, operando com a mesma tensão fase/fase.

- Desvantagens

O sistema supre somente cargas monofásicas. Isto entretanto, não é problema, pois há motores monofásicos disponíveis ou, com conversores de fases, poderá suprir cargas trifásicas.

A distância a que o sistema pode ser estendido, é limitada ao grau de carga desequilibrada (monofásica), que pode ser tolerada no ponto de suprimento.

A não ser que se usem transformadores de alta corrente de magnetização, a corrente a vazio fase / fase é maior do que a da linha convencional MRT e pode causar problema com relação à tarifa de demanda e às perdas  $I^2R$ .

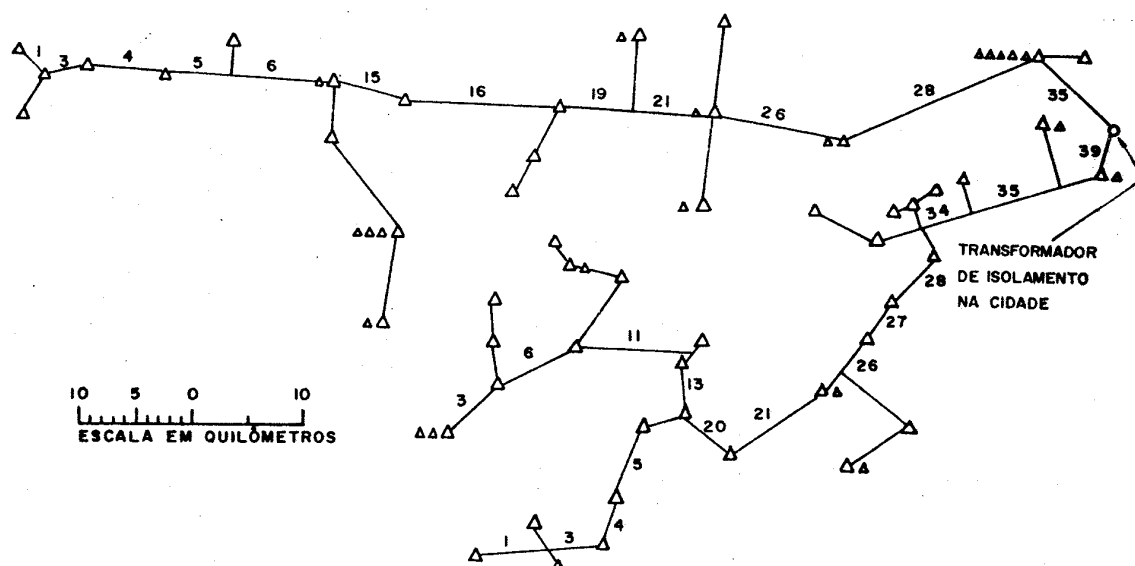


Figura 16 – Arranjo convencional do Sistema MRT

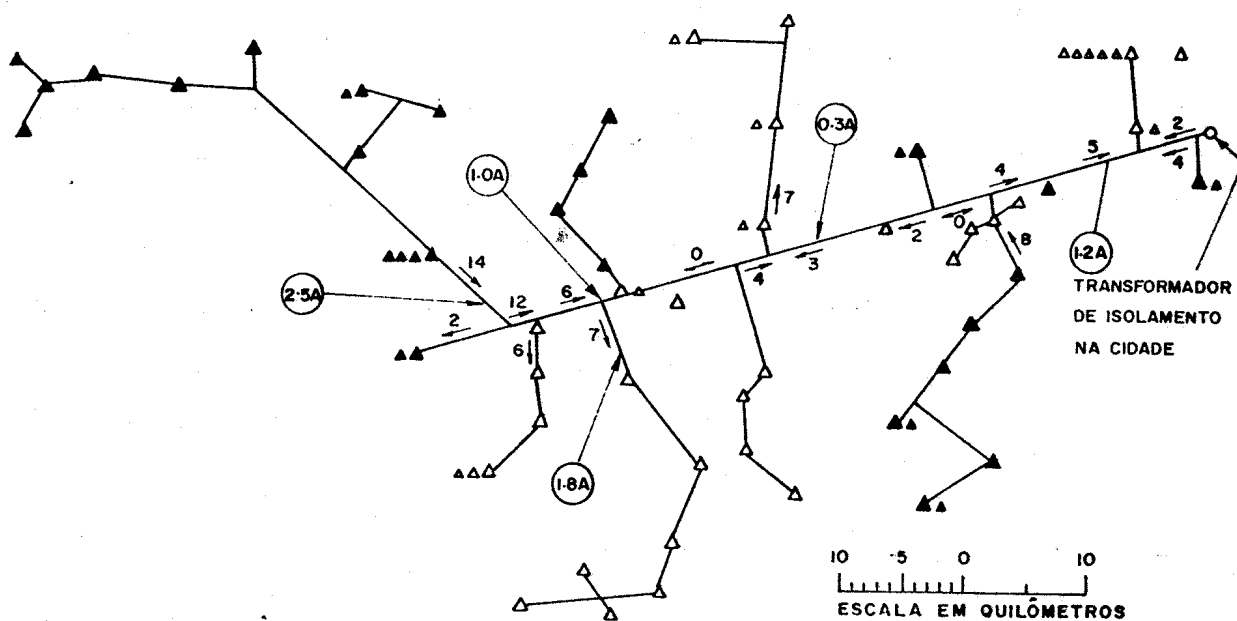


Figura 17 – Arranjo alternativo usando o Sistema MRT Duplex como tronco