

## Capítulo IV

# Aterramento de sistemas elétricos industriais de média tensão com a presença de cogeração

Paulo Fernandes Costa\*

Nos três capítulos anteriores, foram discutidos os aspectos da escolha e da especificação dos tipos de resistores para aterramento do neutro nos sistemas elétricos industriais de baixa e média tensão. Foram fornecidas as justificativas técnicas que levaram à conclusão de que em sistemas de baixa tensão aplicam-se resistores de alto valor ôhmico, conservando-se o sistema operacional durante uma falta à terra, enquanto que na maioria dos sistemas de média tensão é necessário aplicar resistores de baixo valor ôhmico com o desligamento obrigatório durante a falta à terra.

Em plantas industriais que utilizam vapor no processo (plantas de produção de papel e celulose, por exemplo) são utilizados geradores de média potência (isto é, menores ou pouco maiores que 100 MVA), que são diretamente ligados ao sistema de distribuição em média tensão da planta, geralmente na tensão de 13,8 kV (mais comum), 6,6 kV ou 4,16 kV (geradores de menor porte).

Embora estes geradores possam em alguns casos operar em sistema ilhado, ou seja, desconectado do sistema elétrico da concessionária local, o mais comum é o trabalho em paralelo, seja para importar energia complementar, seja para manter

estabilidade, seja para suprir energia de partida (black-start) ou para exportar energia excedente.

Esta peculiaridade das plantas de cogeração provoca interessantes questões no planejamento dos seus sistemas elétricos, dentre as quais se destaca o aterramento do neutro, objeto de tratamento no presente artigo. Observa-se que este artigo é o quarto de uma série de seis, abordando o aterramento do neutro em sistemas elétricos industriais de baixa e média tensão.

### **Breve síntese quanto à escolha dos resistores para aterramento do neutro em média tensão**

Os princípios de dimensionamento dos resistores para aterramento do neutro estabelecidos para sistemas de média tensão nos dois primeiros artigos são completamente válidos para sistemas elétricos de cogeração e podem ser resumidos da seguinte forma:

- Sistemas elétricos com neutro isolado flutuante, isto é, neutro sem conexão à terra, são susceptíveis de sofrerem sobretensões transitórias de valor elevado durante faltas à terra. A melhor maneira

de eliminar as referidas sobretensões nos sistemas elétricos industriais consiste em aterrar o neutro através de resistores.

- Para eliminar sobretensões transitórias durante faltas fase-terra, deve circular pelo resistor uma corrente maior ou igual à corrente capacitiva do sistema elétrico.
- A corrente capacitiva dos sistemas de média tensão é significativa, sendo, em geral, maior que 10 A. Portanto, deve ser projetado um resistor para drenar uma corrente resistiva maior que 10 A, o que obriga o desligamento rápido do sistema elétrico para que sejam evitados danos, principalmente devido à formação de arco elétrico e sua evolução para arco entre fases. O resistor neste caso é denominado resistor de baixo valor ôhmico.
- Observa-se ainda que em sistemas elétricos de média tensão de até 13,8 kV, o arco se mantém para correntes menores que 10 A, o que reforça a necessidade de desligamento imediato no caso de ocorrência de falta fase terra.
- Havendo necessidade de desligar o sistema durante curtos fase-terra, deve-se dimensionar o resistor com valor de limitação tal que, além de eliminar sobretensões transitórias, seja criada corrente suficiente para facilitar a operação do sistema de proteção de falta à terra utilizando-se relés associados a TCs

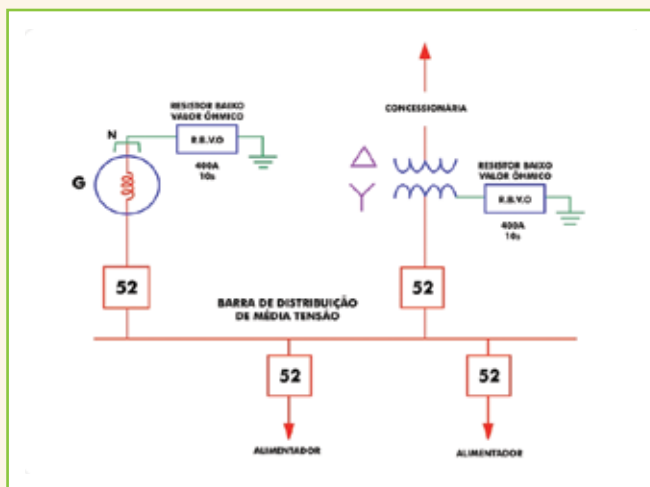
toroidais nos alimentadores, forma ideal para proteção quando se utiliza limitação através de resistores de baixo valor ôhmico.

- Os valores de limitação mais utilizados atualmente são: 50 A, 100 A, 150 A, 200 A, 300 A, 400 A. Estes valores são bem menores do que os utilizados no passado, sendo possível sua aplicação devido ao surgimento dos relés digitais sensíveis e de baixo consumo.

### *Características dos sistemas industriais com presença de cogeração e que afetam o aterramento do neutro*

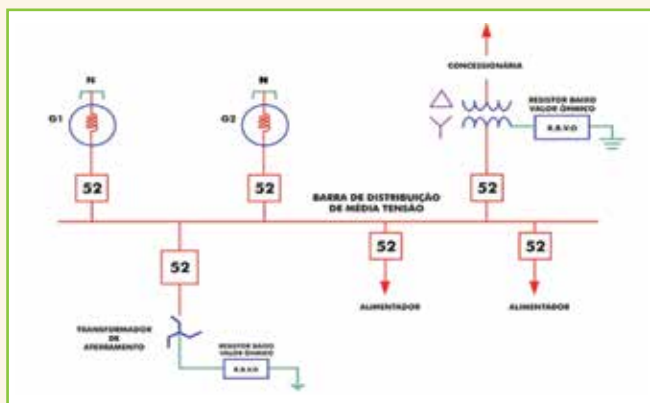
Tendo em vista que um sistema elétrico industrial não deve em nenhum momento ficar sem um ponto de aterramento do neutro, os sistemas industriais com a presença de cogeração, nos quais os geradores trabalham em paralelo com a concessionária, possuem em geral no mínimo dois pontos de aterramento. Como eventualmente o sistema elétrico pode trabalhar ilhado, ou somente alimentado pela concessionária, cada um dos aterramentos deve ser dimensionado para atender a toda a planta. A Figura 1 mostra esta condição, onde foram utilizados resistores de baixo valor ôhmico limitando a corrente

em 400 A no neutro de cada fonte. Como será comentando oportunamente neste artigo, esta forma de aterramento propicia uma corrente fase-terra de 800 A no ponto de falta, que não é aceitável à luz dos conhecimentos atuais.



**Figura 1 - Duplo aterramento em plantas de cogeração.**

Quando existe mais de um gerador na planta de cogeração é preferível utilizar transformador de aterramento na barra de distribuição o que permite manter o critério de dois pontos de aterramento citado anteriormente. A Figura 2 indica esta solução.



**Figura 2 - Aplicação de transformador de aterramento quando existe mais de um gerador na planta.**

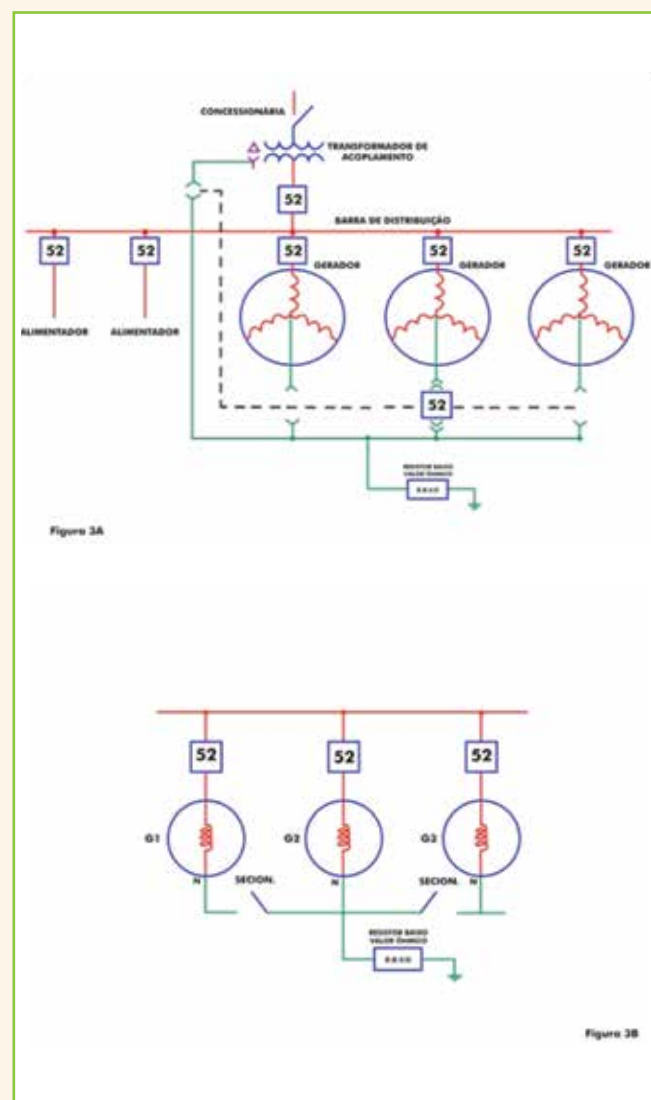
### Formas de aterramento não recomendadas

Em plantas de cogeração que utilizam mais de um gerador, alguns projetistas adotam esquemas de aterramento do neutro que utilizam chaveamento, visando economia e redução do nível de curto fase-terra. Esta conduta é considerada má engenharia, uma vez que uma das práticas mais saudáveis de planejamento de sistemas elétricos industriais consiste em se manter o neutro íntegro todo o tempo.

O chaveamento do neutro, além de exigir as chaves de média tensão para seccionamento, (chaves a vácuo ou disjuntores) requer sistemas de controle e intertravamentos para

garantir segurança de pessoas e do sistema elétrico.

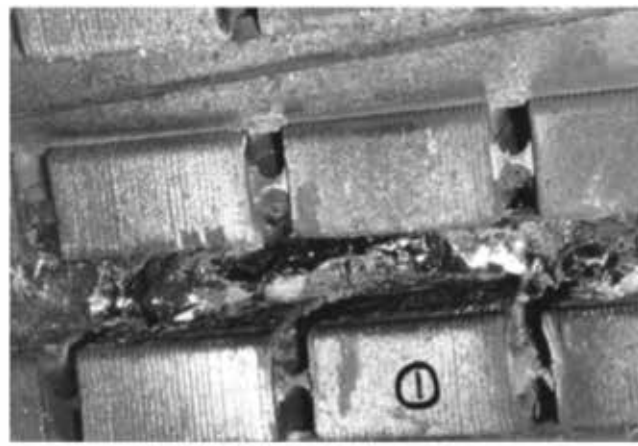
O mero esquecimento de uma chave aberta pode provocar sérios inconvenientes durante faltas à terra, uma vez que o curto não será identificado e podem ocorrer sobretensões transitórias com queima de equipamentos como grandes motores, geradores e transformadores. Na Figura 3 são identificadas duas situações que devem ser evitadas no planejamento do sistema elétrico.



**Figura 3 - Utilização de dispositivo de chaveamento no neutro (aplicação não recomendada).**

### Avaliação da energia liberada por um curto fase-terra interno no gerador

A falta mais comum no interior do gerador em sistemas de média tensão é, sem dúvida, a falta fase-terra que ocorre nas ranhuras do estator ou cabeças de bobinas. A ocorrência geralmente é acompanhada de arco elétrico que, dependendo do valor da corrente e do tempo de duração, destrói as chapas magnéticas, fundindo-as. Ver Figura 4.



**Figura 4 - Danos em chapas magnéticas de geradores.**

Nesta situação, a recuperação do gerador torna-se extremamente trabalhosa, demorada e onerosa, uma vez que, além da recuperação do enrolamento, exige-se o baralhamento do pacote magnético para reduzir a possibilidade de existência de pontos quentes localizados, quando da operação após reparo.

A configuração de aterramento do neutro do sistema elétrico (valor de limitação por resistor e número de resistores existentes) exerce grande influência nos danos do gerador, pois no ponto de falta, a corrente total é a soma das contribuições das correntes do próprio gerador com a corrente de limitação do sistema externo ao mesmo. Por exemplo, na Figura 1, um curto interno no gerador poderá atingir 800 A, sendo 400 A próprio gerador e 400 A devido à limitação através do resistor do transformador.

Vários estudos mostram que os danos causados pelo curto fase-terra no interior do gerador são causados principalmente pela contribuição do próprio gerador. Isto pode ser explicado pelo fato de que para o curto em questão, a proteção diferencial do gerador atua rapidamente, desligando o disjuntor de saída do gerador que acopla o mesmo ao sistema elétrico de distribuição, desligando também o disjuntor de campo. No entanto, o gerador continua gerando e alimentando o curto interno devido à sua grande inércia e ao fluxo remanescente (residual). A corrente interna de falta sofre um processo de decaimento exponencial.

Pode-se avaliar a ordem de grandeza da energia liberada por unidade de resistência de arco através dos seguintes cálculos, em que o expoente 1.5 leva em conta que a corrente se desenvolve na resistência de arco e não em um resistor linear onde o coeficiente seria igual a dois.

$$E = \int i(t)^{1.5} dt \quad \text{W.s} \quad (\text{equação 1})$$

A energia desenvolvida pela parcela devido à corrente no

resistor do sistema elétrico considerando a operação do relé diferencial de terra em um ciclo e tempo de abertura e eliminação de arco do disjuntor de cinco ciclos, total de seis ciclos (igual a 100 ms, ou seja 0,1 segundo) será:

$$E_{\text{system}} = \int_0^{0.1} 400^{1.5} dt = 800 \text{ W.s} \quad (\text{equação 2})$$

Por outro lado, para calcular a energia liberada pela corrente do próprio gerador devemos considerar que a sua característica é exponencial decrescente, dependendo de uma constante de decaimento que representaremos pela letra grega  $\tau$  (tau).

$$I(t) = Ie^{-t/\tau} \quad (\text{equação 3})$$

Considerando que a constante de decaimento se situa entre 0,8 s e 1,1 s (média de 0,9 s) e para que para um tempo de  $5\tau$  de decaimento (praticamente toda a energia já foi liberada), segue:

$$E_{\text{GEN}} = \int_0^{5 \times 0.9} (400 \times e^{-\frac{t}{0.9}})^{1.5} dt = 4800 \text{ W.s} \quad (\text{equação 4})$$

A energia total liberada no ponto de falta alcança  $(4800 + 800) = 5600 \text{ W.s}$ , da qual a contribuição do sistema (800 W.s) representa 14% e a contribuição do próprio gerador 76% (4800 W.S).

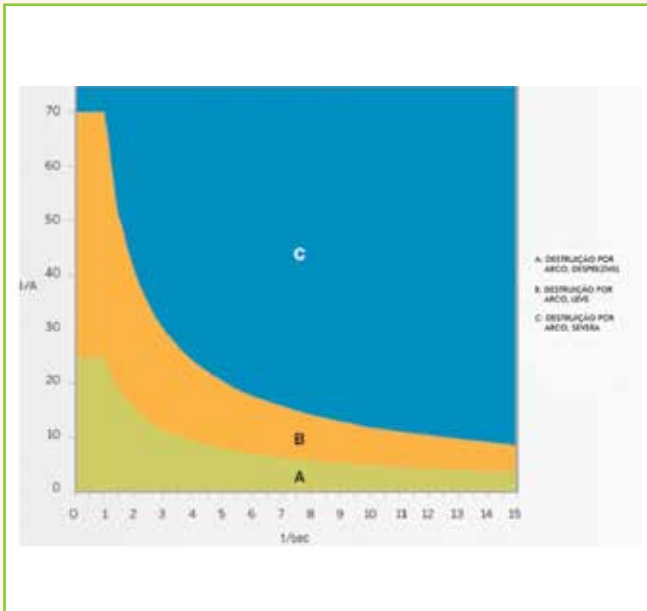
Esta conclusão, relativamente recente, mostra a necessidade de se modificar a forma de aterramento do neutro dos geradores diretamente ligados ao sistema de distribuição das plantas industriais, cujo neutro é aterrado por meio resistor de abaixo valor ôhmico.

### **Suportabilidade dos geradores a curtos fase-terra**

Experimentos com curtos fase-terra no interior de ranhuras de geradores indicam que o curto ocorre através de arcos

intermitentes, isto é, que acendem e se extinguem de forma repetida. A energia desenvolvida por estes arcos ao longo do tempo é que produz a fusão das chapas magnéticas, que são de difícil e oneroso reparo, conforme discutido anteriormente.

Para proteção dos geradores, os fabricantes desenvolveram uma curva inversa que recomenda que seja aplicada para proteção fase terra dos geradores, sendo esta curva vista a seguir (Figura 5).



**Figura 5 – Suportabilidade dos geradores e curto fase-terra internos.**

Se adotarmos “danos leves” como aceitáveis, verifica-se que a corrente de falta à terra, que pode circular permanentemente sem desligar o gerador, será inferior a 10 A. Este limite está de acordo com o que foi estabelecido no primeiro capítulo deste fascículo, onde foi mostrado (tabela 1) que para tensões utilizadas em média tensão até 13.8 kV, a corrente de arco se mantém para correntes menores que 10 A.

Alguns fabricantes adotam uma característica de suportabilidade maior e consideram uma energia suportável constante baseada na capacidade adiabática das chapas magnéticas de suportar a corrente de curto fase-terra ( $I^2T = \text{constante}$ ).

O limite estabelecido é o de  $I^2T = 3000 \text{ A}^2.\text{s}$ , que se aplicado para uma corrente de 10 A, fornece um tempo de suportabilidade de 30 segundos.

Utilização de sistema híbrido para aterramento do neutro de geradores em plantas de cogeração

Para solucionar a questão da fragilidade dos geradores ao curto fase-terra interno (nos casos em que existe necessidade de aterrar o neutro dos mesmos com resistor de baixo valor ôhmico), foi desenvolvido o sistema híbrido considerado a seguir.

O sistema consiste em instalar no neutro um sistema híbrido composto de dois resistores, um de baixo valor ôhmico, dimensionado conforme critérios anteriormente definidos e um resistor de alto valor ôhmico, limitando a corrente em valores menores ou iguais a 10 A.

Quando da ocorrência do curto fase-terra interno ao gerador, a proteção diferencial de terra retira o disjuntor de saída do estator, o campo e o resistor de baixo valor ôhmico, permanecendo apenas o resistor de alto valor ôhmico.

Nestas condições, as energias envolvidas passam a ser  $2 \times 800 \text{ W.s}$  (energia desenvolvida devido à corrente de circulação nos dois resistores de 400 A, conforme equação 2), mais a energia desenvolvida após a retirada do disjuntor de saída do estator e do campo, no resistor de 10 A, que ficará em funcionamento (Figura 5).

A energia desenvolvida no resistor de 10 A devido à inércia do gerador após desligamento do disjuntor de saída e do disjuntor de campo será:

$$G_{\text{Contrib.}} = \int_0^{5 \times 0,9} (10 \cdot e^{-\frac{t}{0,9}})^2 \cdot 1,5 = 19 \text{ W.s} \quad (\text{equação 5})$$

A energia total, devido à corrente total de falta, utilizando o sistema híbrido (400 A do resistor de baixo valor ôhmico do sistema externo mais 400 A do resistor de baixo valor ôhmico do gerador, retiradas de circulação pela proteção diferencial, mais 10 A do resistor de alto valor ôhmico do gerador que permanece até decaimento em cinco constantes de tempo) será:

$$E_{\text{total}} = 800 \text{ W} + 800 \text{ W} + 19 \text{ W} = 1619 \text{ W.s} \quad (\text{equação 6})$$

Quando comparada com a energia desenvolvida no primeiro caso no qual não foi utilizado sistema híbrido (5600 W.s), verificamos uma queda de 71% no valor da energia desenvolvida.

Se o arranjo do sistema de aterramento do neutro é realizado conforme mostra a Figura 6, no qual são utilizados resistores de alto valor ôhmico ligados no neutro dos geradores e um resistor de baixo valor ôhmico associado a um transformador de

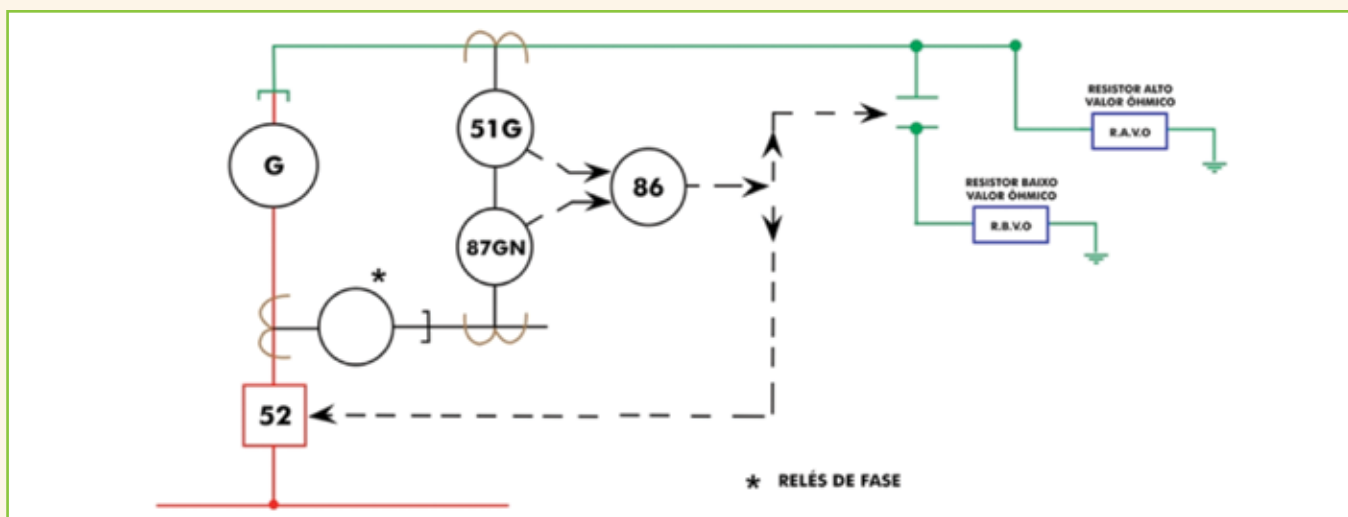


Figura 6 - Sistema híbrido.

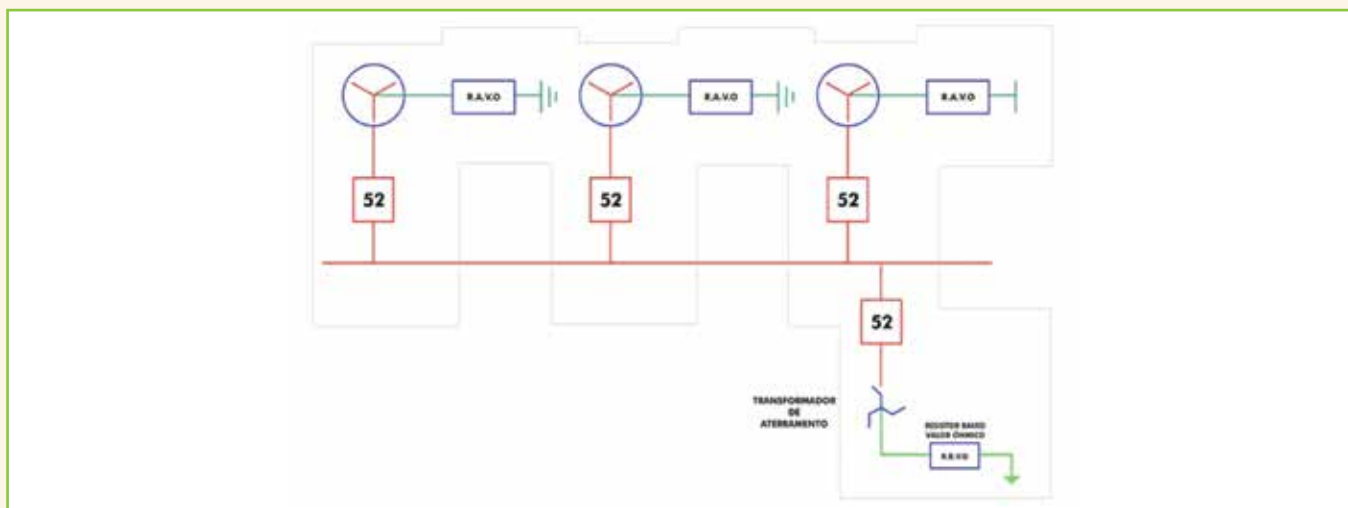


Figura 7 - Utilização de resistores de alto valor ôhmico no neutro dos geradores e de baixo valor ôhmico no sistema.