O MISTÉRIO DA INDUTÂNCIA MÚTUA E O MODELO DO TRANSFORMADOR!

Professor Bairros (14/09/2024)

O mistério da indutância mútua e o modelo do transformador!

www.bairrospd.com

VISITE O SITE DO PROFESSOR BAIRROS LÁ EM O PDF E MUITO MAIS.
PARA AULAS ONLINE CONTATE VIA SITE.
www.bairrospd.com

https://www.youtube.com/@professorbairros

Sumário

1. Introdução 5
2. A indutância mútua..... 6
3. O transformador ideal..... 7
4. O transformador real..... 8
5. O coeficiente de acoplamento K. 9
6. O modelo do transformador com indutância mútua. 10
7. O modelo do transformador com transformador ideal. 11
8. As indutâncias no modelo do transformador..... 12
9. Detalhando o modelo usando a indutância mútua. 13
10. Usando o modelo com indutância mútua..... 14
11. O exemplo do circuito aberto..... 15
12. A solução: a indutância do secundário. 16

O mistério da indutância mútua e o modelo do transformador!

13. A corrente no primário. 17

14. A tensão no secundário. 18

15. Analisando o secundário. 19

16. Resumindo o modelo da impedância mútua. 20

17. Os simuladores. 21

18. Conclusão. 22

19. Créditos 23

O mistério da indutância mútua e o modelo do transformador!

O mistério da indutância mútua e o modelo do transformador!

YOUTUBE: https://youtu.be/8o5hxfadx2E

1. INTRODUÇÃO

O mistério da indutância mútua e o modelo do transformador!

Eu sempre achei misterioso o conceito da indutância mútua.

Por que algumas vezes a indutância mútua era usada para explicar o funcionamento de alguns transformadores e outras vezes não?

Por exemplo, explicar a bobina de TESLA sem usar a indutância mútua é complicado!

Por que o Proteus não usa o modelo simples do transformador e sim usa a indutância mútua para as suas simulações, e por aí vai?

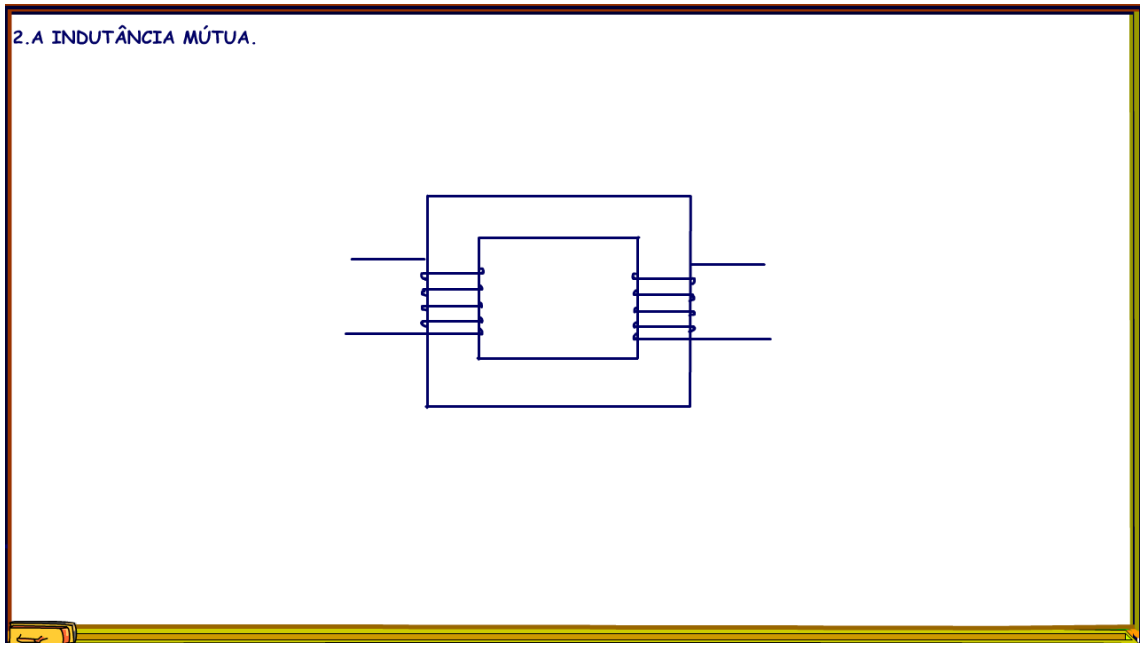
Pois é sobre esse mistério que eu vou falar nesse tutorial e vou tentar esclarecê-lo, se é que tem como esclarecer.

Se você também tem essas dúvidas, esse tutorial poderá ajudar muito.

Vamos lá.

O mistério da indutância mútua e o modelo do transformador!

2. A INDUTÂNCIA MÚTUA.

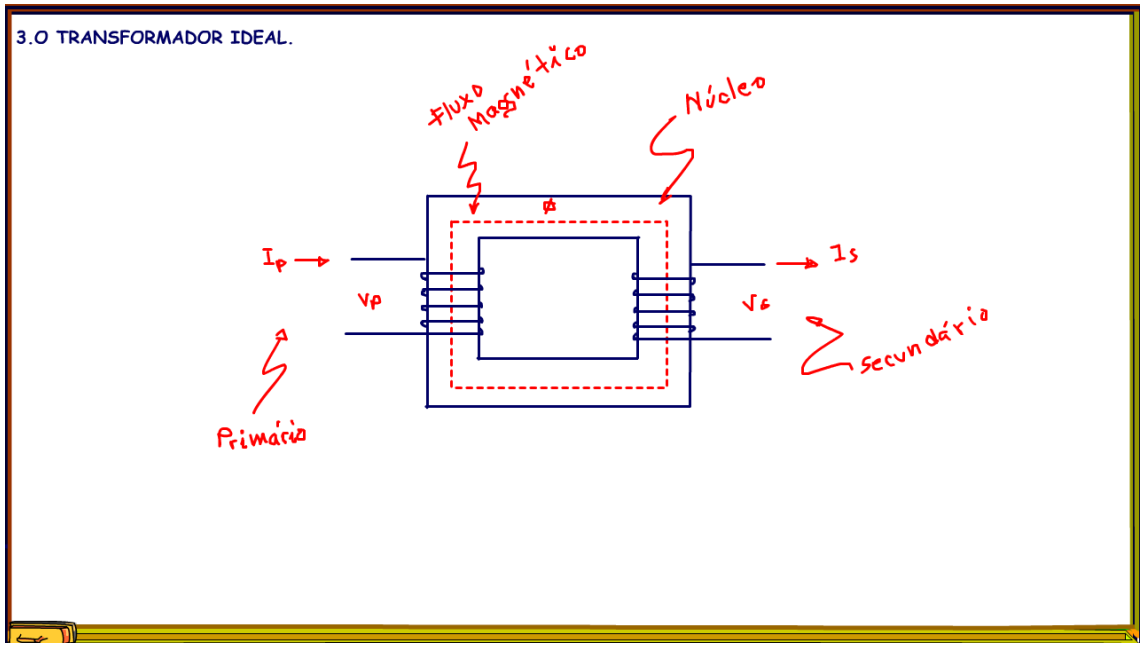


Vamos começar mostrando o que é a indutância mútua, um conceito presente em todo o transformador real, então já aparece a primeira pista, a indutância mútua vai nos ajudar a entender melhor a diferença entre o transformador ideal, aquele que aprendemos nos cursos básicos de eletrônica e eletricidade e um transformador real.

Veja a conhecida estrutura de um transformador, aquela que você está careca de saber.

O mistério da indutância mútua e o modelo do transformador!

3. O TRANSFORMADOR IDEAL.



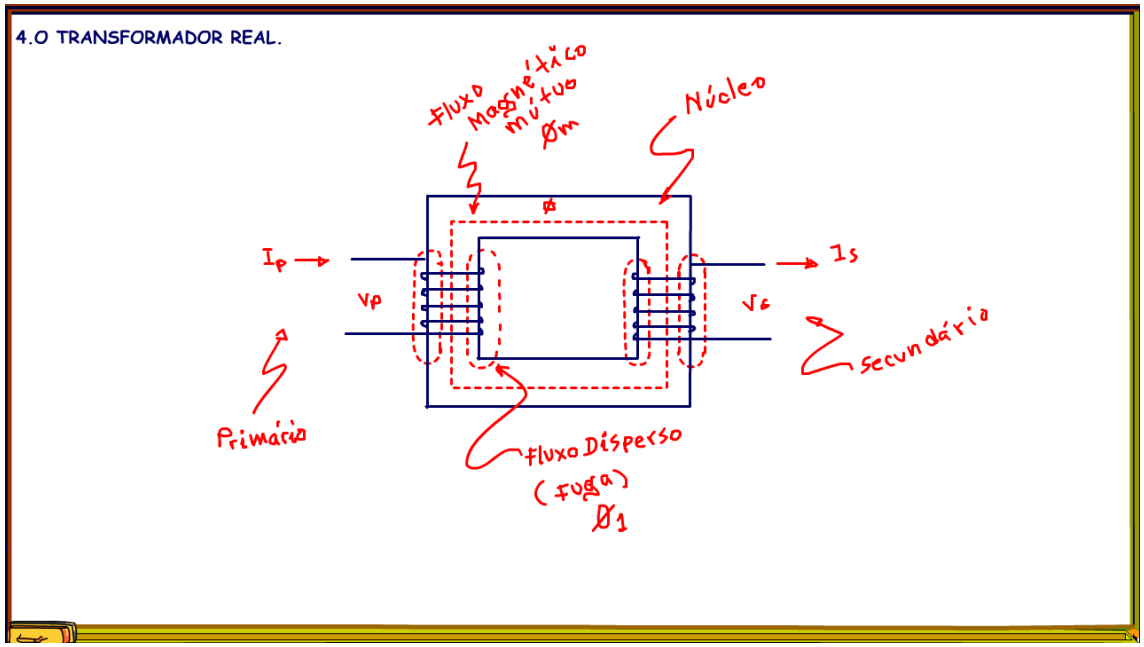
A figura mostra a estrutura de um transformador ideal, o enrolamento primário enrolado sobre um núcleo de material ferromagnético e sobre esse mesmo núcleo temos o enrolamento do secundário.

A função do núcleo é concentrar o fluxo magnético no seu interior de forma a acoplar ao secundário ao campo magnético criado pelo primário.

No transformador ideal todo o fluxo magnético criado no primário cruza o enrolamento do secundário.

O mistério da indutância mútua e o modelo do transformador!

4. O TRANSFORMADOR REAL.

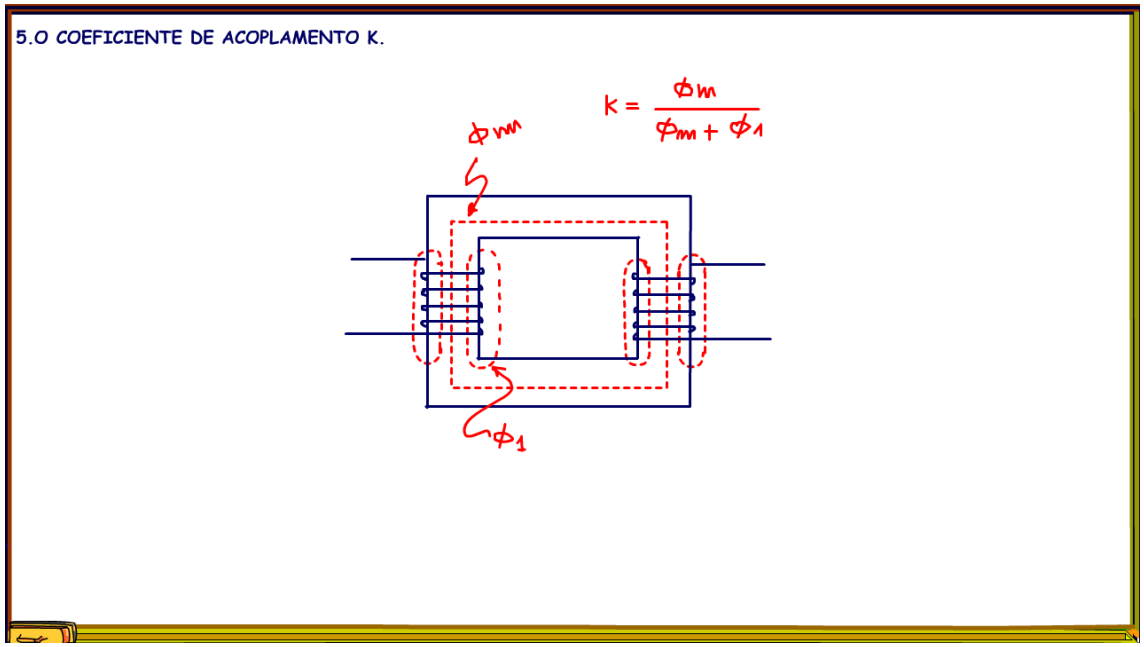


Mas, no mundo real não bem isso que acontece, nem todo o fluxo magnético criado no primário irá cruzar o enrolamento do secundário, a gente diz que há uma fuga de fluxo magnético, o mesmo vai acontecer no campo magnético criado no secundário, então, a representação de um transformador real deverá levar em conta essa fuga do fluxo magnético.

No transformador real há uma parte do fluxo total criado no primário que cruza o secundário, vou chamar de fluxo mútuo, e uma parte do fluxo que vai se dispersar, vou levar em conta somente o fluxo criado no primário, vamos olhar o transformador pelo lado do primário, nesse conceito é bom olhar o transformador pelo lado de mais espiras.

O mistério da indutância mútua e o modelo do transformador!

5. O COEFICIENTE DE ACOPLAMENTO K.



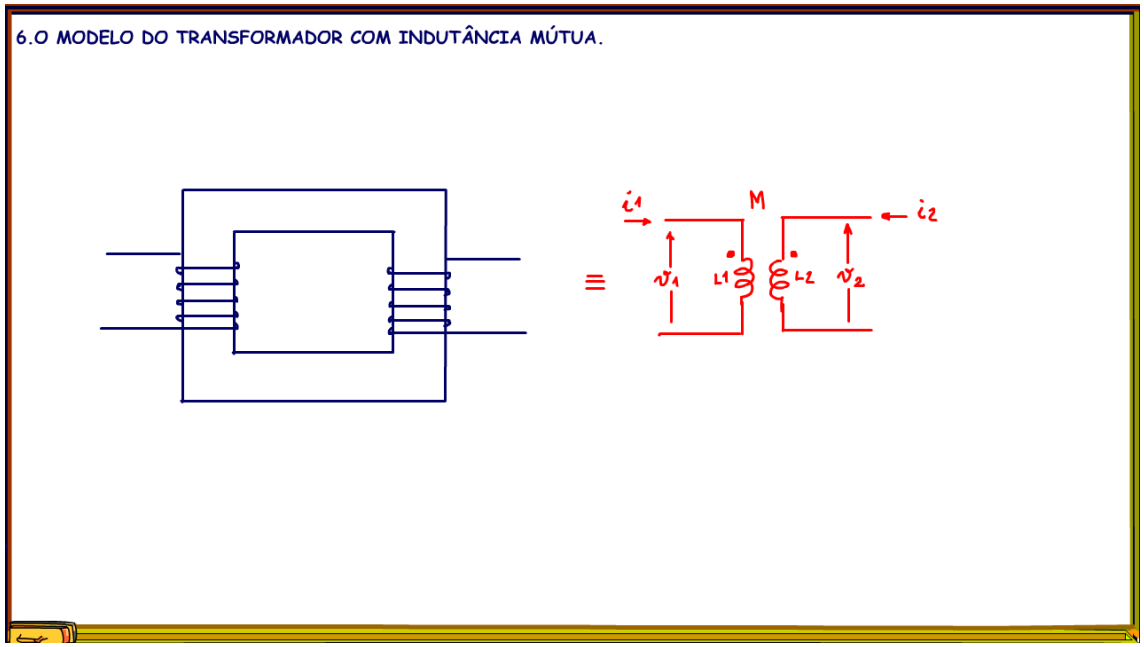
O coeficiente de acoplamento relaciona a intensidade do fluxo mútuo e a intensidade do fluxo disperso, o coeficiente de acoplamento é representado pela letra “K”, e no transformador ideal o coeficiente de acoplamento é igual a um, nos transformadores reais com núcleo de ferro, como esses para fontes de alimentações, esse valor é menor do que um, mas se aproxima de um.

O coeficiente de acoplamento K é igual ao fluxo mútuo sobre a soma do fluxo mútuo e o fluxo disperso, no denominador temos o fluxo total criado no enrolamento do primário.

Pois é exatamente esse fluxo disperso que causa a maioria dos problemas do transformador e que precisam serem levados em conta na hora de projetar ou analisar circuitos com transformador para que consigamos chegar num resultado mais próximo do real.

O mistério da indutância mútua e o modelo do transformador!

6. O MODELO DO TRANSFORMADOR COM INDUTÂNCIA MÚTUA.



Como a gente faz isso na análise e projeto de um circuito com transformador?

Usando modelos e aqui vai uma pista importante para a solução desse mistério!

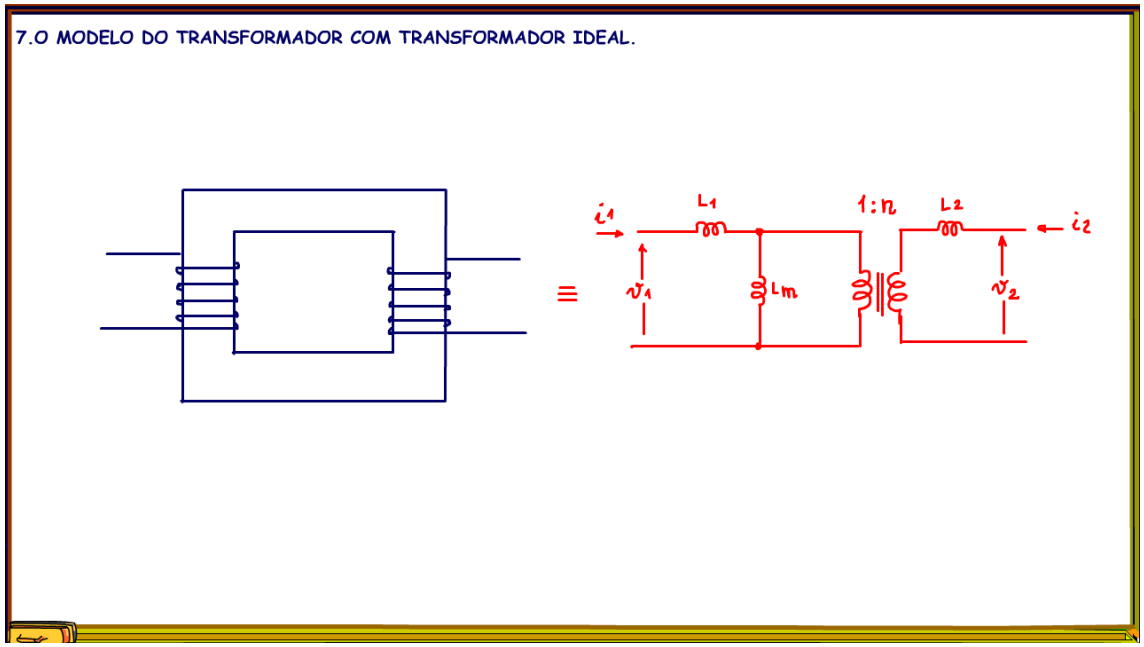
Você sabia que existem duas abordagens para modelar um transformador?

A primeira usa o coeficiente de acoplamento, mas não de forma direta, já que além da questão da dispersão, o transformador também tem indutâncias, que são muito importantes no comportamento do transformador, então foi criado o modelo usando a indutância mútua, que leva em conta o coeficiente de acoplamento, note que a palavra mútua está relacionada ao fluxo magnético mútuo, a parte do fluxo que cruza as duas bobinas.

No modelo a indutância mútua é representada pela letrinha M entre os enrolamentos do transformador, note que o número de espiras não aparece nessa representação, será outro mistério?

O mistério da indutância mútua e o modelo do transformador!

7. O MODELO DO TRANSFORMADOR COM TRANSFORMADOR IDEAL.



Mas existe uma segunda forma de modelar o transformador, o modelo da figura, que parece mais conhecido entre os técnicos eletrônicos e é o preferido entre 9 de cada 10 engenheiros de projetos.

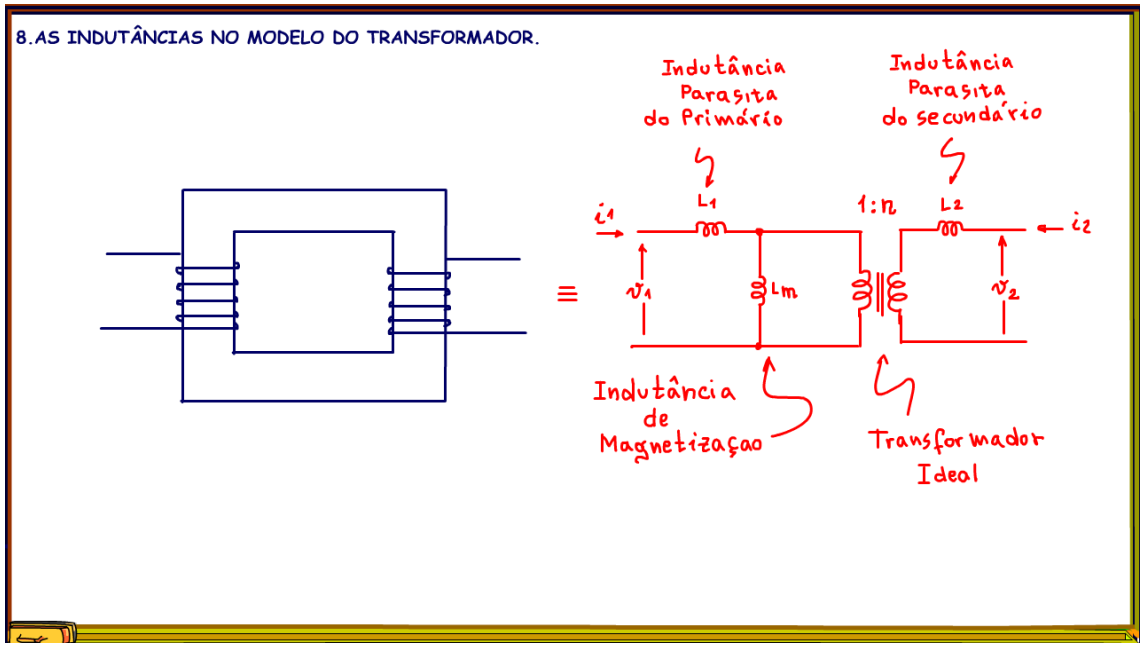
Nesse modelo aparece um transformador ideal no centro de tudo, esse é aquele transformador que aprendemos na escola onde o que mais interessa é a relação de espiras “n”.

Mas aqui são desenhadas duas indutâncias que representam as indutâncias devido a fuga do fluxo magnético, elas estão relacionadas com o coeficiente de acoplamento K, quando você montar esse modelo você deverá montar olhando para um dos lados do transformador, aqui estou representando o transformador olhando pelo primário.

Essa representação não leva em conta as questões relacionadas as perdas no ferro, as perdas devido as resistências dos enrolamentos, a questão das capacitância parasitas, nesse representação eu só estou levando em conta as indutâncias, isso para achar o elo de relacionamento com o modelo da indutância mútua, que o mistério desse tutorial.

O mistério da indutância mútua e o modelo do transformador!

8. AS INDUTÂNCIAS NO MODELO DO TRANSFORMADOR.

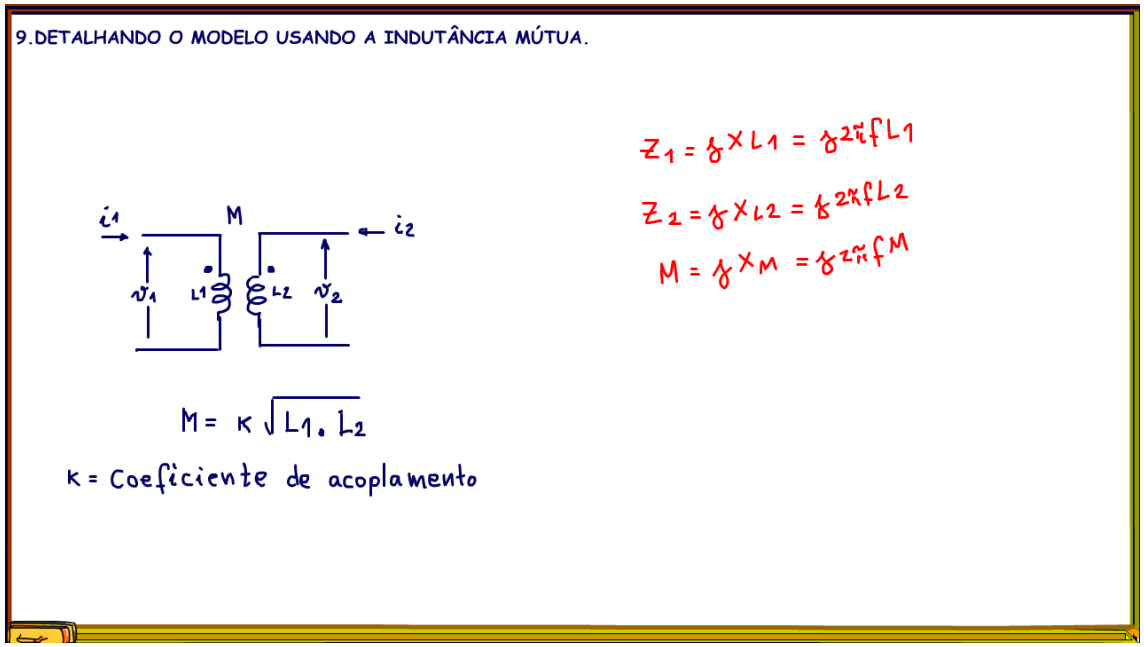


Note a presença da indutância de fuga, nós aqui no Brasil chamamos indutância parasita ou indutância de dispersão, a indutância L1 em série com o primário do transformador ideal, e a indutância L2 em série com o secundário do transformador ideal, essas duas indutâncias estão relacionadas como o coeficiente de acoplamento como vamos ver mais tarde.

E paralelo com primário do transformador tem a indutância LM, a indutância de magnetização, a indutância responsável por criar o fluxo magnético no núcleo, então a indutância total do primário é igual a soma da indutância de fuga mais a indutância de magnetização, mais adiante vamos ver os detalhes, o importante é você saber que existem duas formas de modelar o transformador e essa é chave para resolver o mistério, e isso não te contaram no curso de eletrônica ou eletricidade.

O mistério da indutância mútua e o modelo do transformador!

9. DETALHANDO O MODELO USANDO A INDUTÂNCIA MÚTUA.



Vou falar um pouco mais sobre o modelo da indutância mútua, esse que a gente não usa muito.

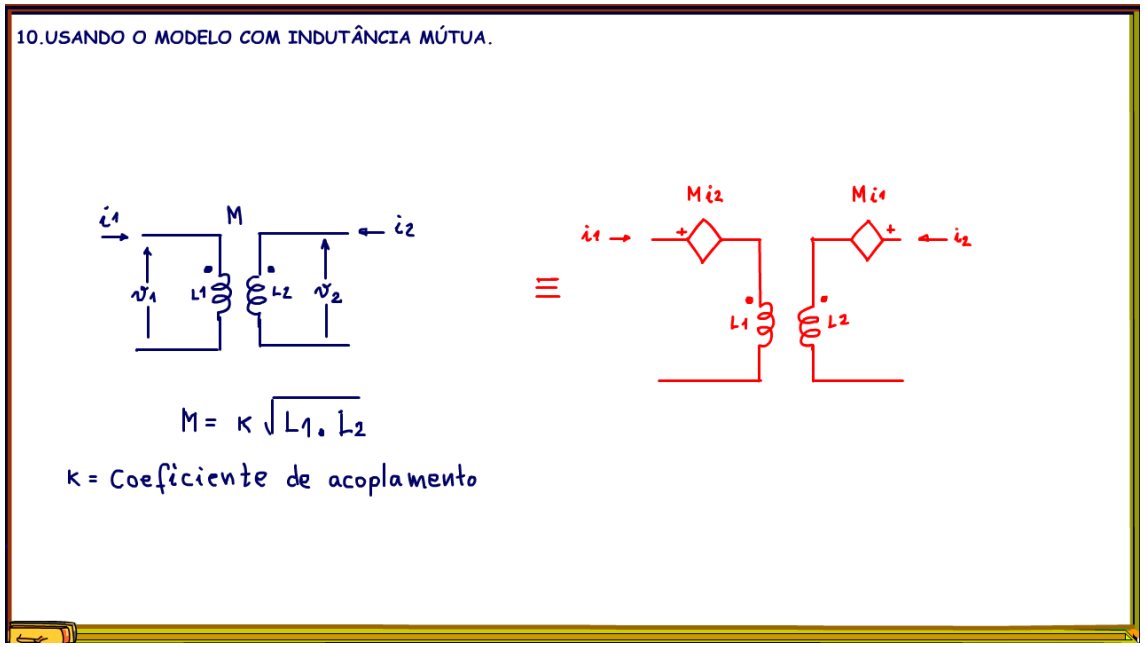
O primeiro detalhe é que são indutâncias, então na hora de resolver o circuito AC elas têm que serem tratadas como impedâncias, e a impedância indutiva é igual a “jXL”, mas eu só vou pensar como impedância na hora de resolver o circuito em AC, para escrever o modelo posso manter só as indutâncias.

Veja que o modelo fica bem simples, desde que a gente saiba como determinar a indutância mútua, veja a equação para determinar a indutância mútua, ela relaciona as indutâncias e o coeficiente de acoplamento, por ter o coeficiente de acoplamento esse modelo representa um transformador real.

Essa é uma equação que você deve memorizar daqui para frente, a indutância mútua é igual a raiz quadrada do produto das indutâncias multiplicado pelo coeficiente de acoplamento.

O mistério da indutância mútua e o modelo do transformador!

10. USANDO O MODELO COM INDUTÂNCIA MÚTUA.



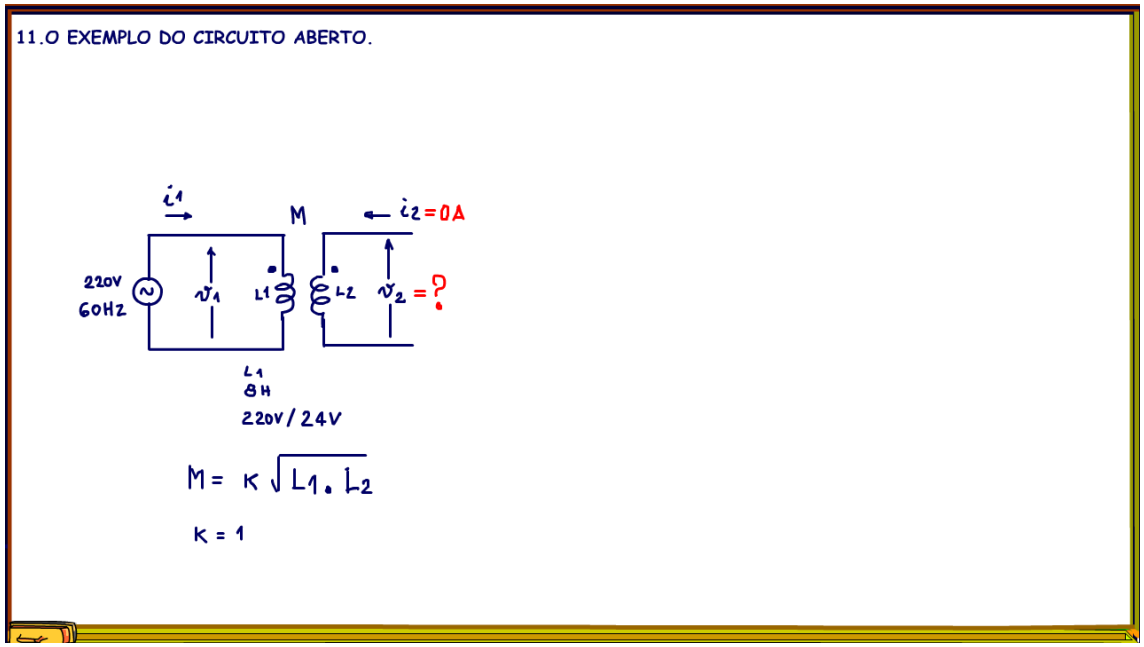
Mas no transformador a gente aplica uma tensão no primário e tira essa tensão no secundário e essa tensão é função do número de espiras e nesse modelo nada disso aparece, como usar esse modelo para análise de circuitos práticos?

Bem, é por isso que esse modelo é pouco usado, ele é meio complicado de usar, na análise prática você terá que montar o modelo do modelo, isso mesmo, uma forma de fazer isso é mostrado na figura.

As fontes de tensões marcada por Mi1 e Mi2, são fontes dependentes, o seu valor depende de outra grandeza, essas fontes representam a influência da corrente de um enrolamento no outro, representando dessa forma eu vou poder saber a tensão no secundário em função da corrente e mais, levando em conta as perdas.

O mistério da indutância mútua e o modelo do transformador!

11. O EXEMPLO DO CIRCUITO ABERTO.



Nada melhor do que mostrar um exemplo bem prático, se eu usar esse modelo para representar um transformador comum que reduz a tensão de 220V para 24V, se a impedância medida no primário foi de 8H, qual a tensão que ele vai mostrar no secundário com o circuito aberto, a corrente no secundário é igual a zero.

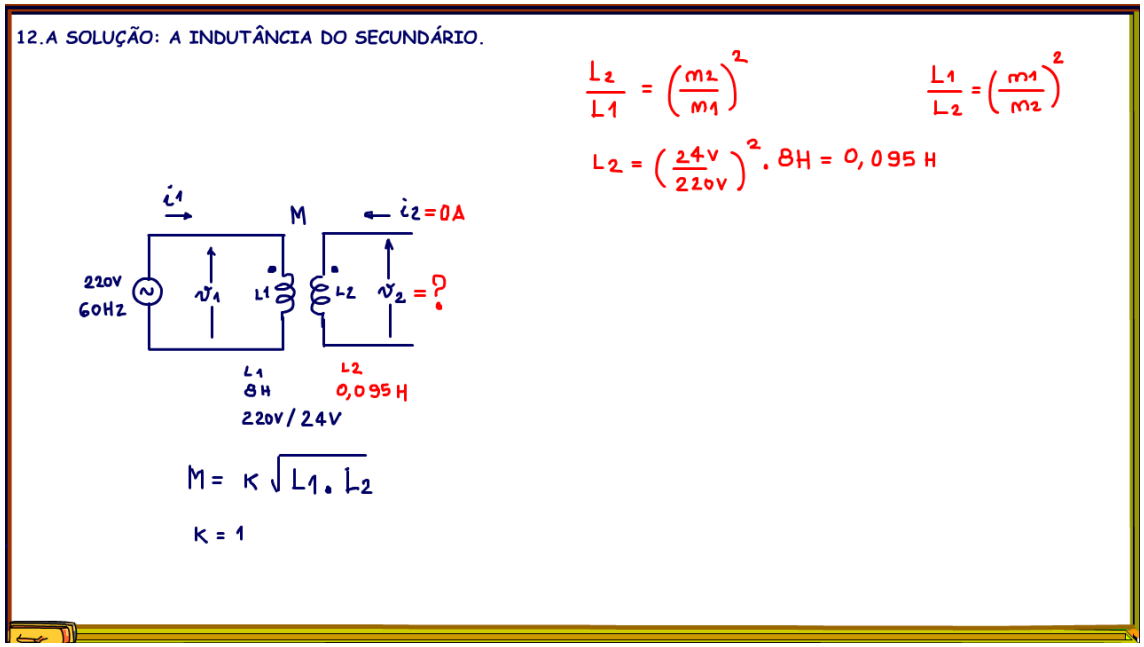
Para simplificar esse primeiro exemplo vamos supor um coeficiente de acoplamento igual a um!

Na prática todo mundo sabe que vai medir 24V, vamos ver se nesse modelo vamos achar o mesmo valor?

Veja que esse é um exemplo bem prático, com valores normalmente encontrados nos transformadores.

O mistério da indutância mútua e o modelo do transformador!

12. A SOLUÇÃO: A INDUTÂNCIA DO SECUNDÁRIO.



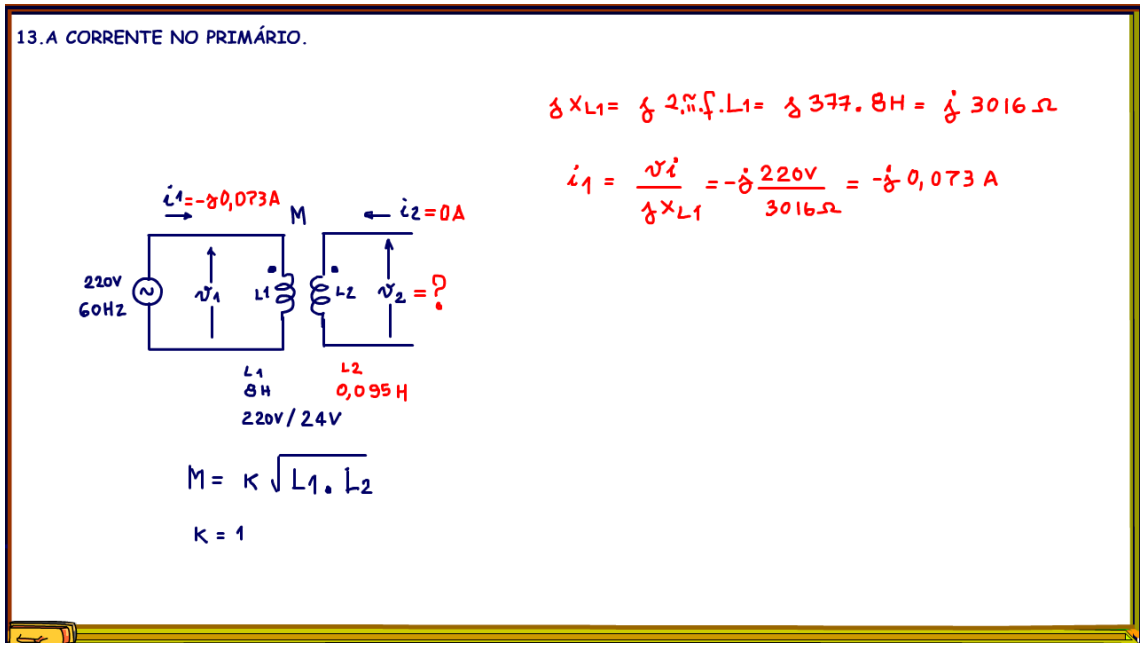
Nesse tutorial vou resolver usando o modelo com indutância mútua, para isso precisamos da indutância do secundário, essa indutância pode ser conseguida usando a equação da transferência de impedância, que é função do número de espiras, veja na figura.

Se eu quero a impedância do secundário eu coloco o número de espiras do secundário no numerador, que é o nosso caso, mas se eu quisesse a impedância do primário a partir da impedância do secundário, então o número de espiras do primário deveria ser colocado no numerador.

Substituindo os valores chegamos a uma impedância de 0,095H, pronto temos o nosso modelo completo agora.

O mistério da indutância mútua e o modelo do transformador!

13. A CORRENTE NO PRIMÁRIO.



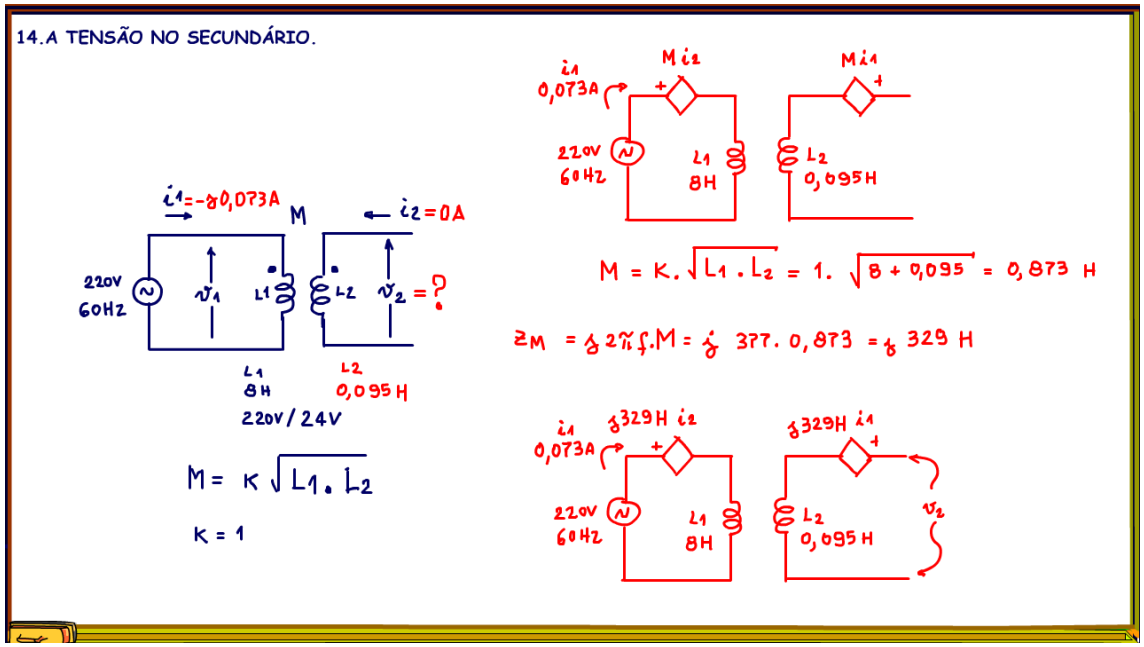
Agora é só continuar analisando o circuito em AC, nesse caso os indutores devem ser substituídos pelas suas impedâncias, a impedância indutiva é igual a jXL onde XL é igual 2pifL, para a frequência de 60 Hz, 2pif é igual a 377, substituindo os valores para a indutância do primário, a reatância indutiva é igual a 3016 OHM, um valor bem alto, por isso o transformador consome pouca corrente quando está a vazio, com o secundário desligado.

Conhecendo a impedância fica fácil calcular a corrente no primário, é simplesmente a tensão do primário de 220V, dividido pela impedância do primário, a corrente é igual a -j0,073A, observe a componente imaginária, o jota, veja que é uma corrente bem baixa, mas observe bem, no transformador real aparece uma corrente no primário mesmo sem corrente no secundário, olhando para o modelo com impedância mútuo isso fica bem claro.

Agora vamos olhar para o secundário, mas como a tensão do primário aparece no secundário?

O mistério da indutância mútua e o modelo do transformador!

14. A TENSÃO NO SECUNDÁRIO.



Chegou a hora de usar o modelo do modelo, esse com as fontes de tensões.

Note que agora temos a relação entre o primário e o secundário, é a impedância mútua M, ela que faz a ligação entre o primário e o secundário, então vamos começar a analisar o secundário determinando a impedância mútua M.

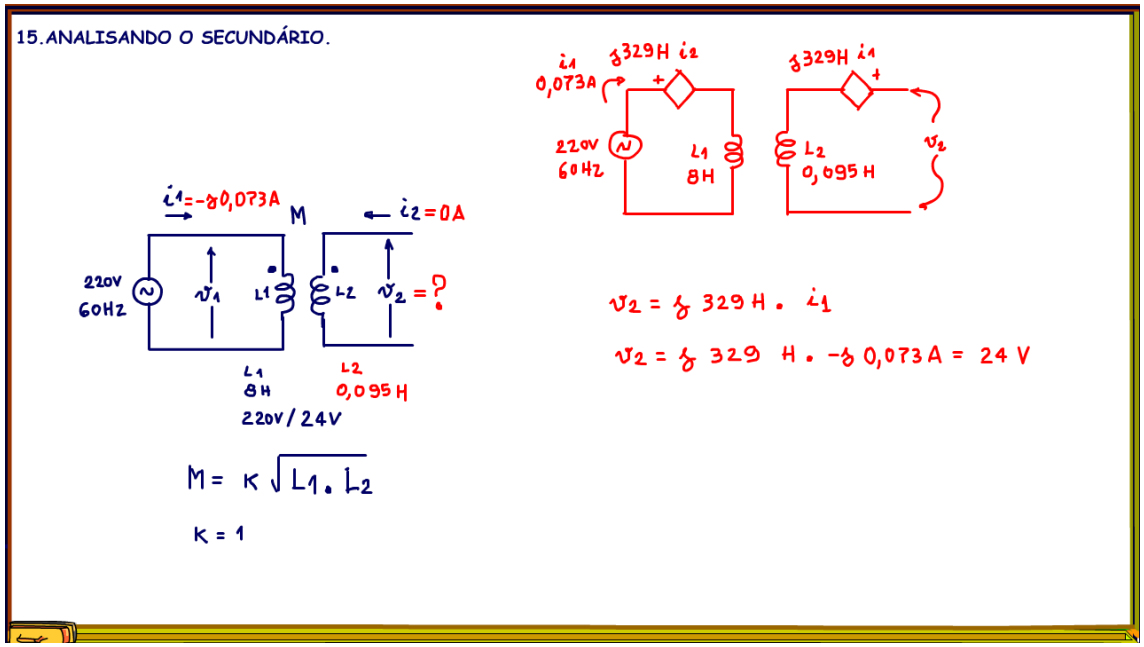
É só aplicar a equação vista antes, substituindo os valores chegamos a indutância de 0,873 H.

Mas, estamos analisando o circuito em AC, então temos que usar a impedância, então é só multiplicar a impedância M por 2pif, isso dá, E, uma impedância muito alta.

Pronto temos o modelo devidamente atualizado, note que a indutância mútua aparece nos dois lados do transformador, agora é só calcular a tensão V2 no secundário.

O mistério da indutância mútua e o modelo do transformador!

15. ANALISANDO O SECUNDÁRIO.



Observe que sem corrente no secundário, não haverá queda de tensão no indutor do secundário, então só sobrou a fonte de tensão controlada, a tensão no secundário vai ser igual a tensão da fonte da tensão controlada do modelo.

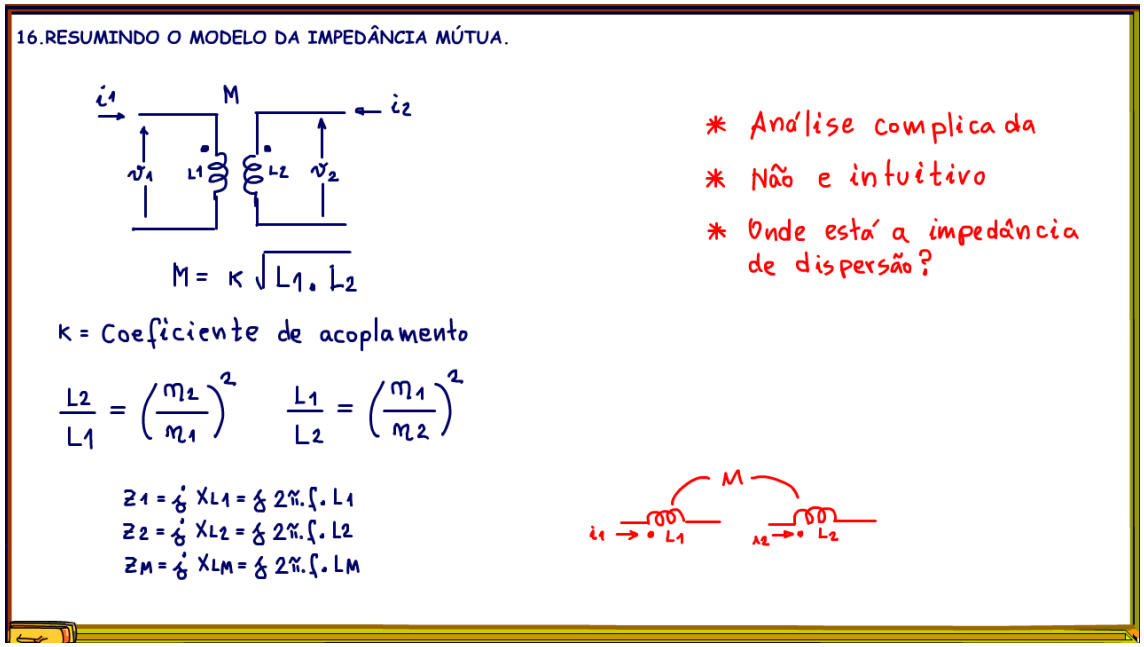
A tensão na fonte de tensão controlada é igual a indutância mútua multiplicada pela corrente no primário, e como a gente já sabe o valor da corrente no primário fica fácil calcular essa tensão, é só substituir os valores na equação.

Fazendo o produto e cancelando o mais jota com o menos jota, o milagre acontece!

A tensão no secundário é igual a 24V, exatamente o que todo mundo esperava, exatamente o que todo mundo ia medir no secundário desse transformador com o circuito do secundário aberto, então esse modelo funciona bem.

O mistério da indutância mútua e o modelo do transformador!

16. RESUMINDO O MODELO DA IMPEDÂNCIA MÚTUA.

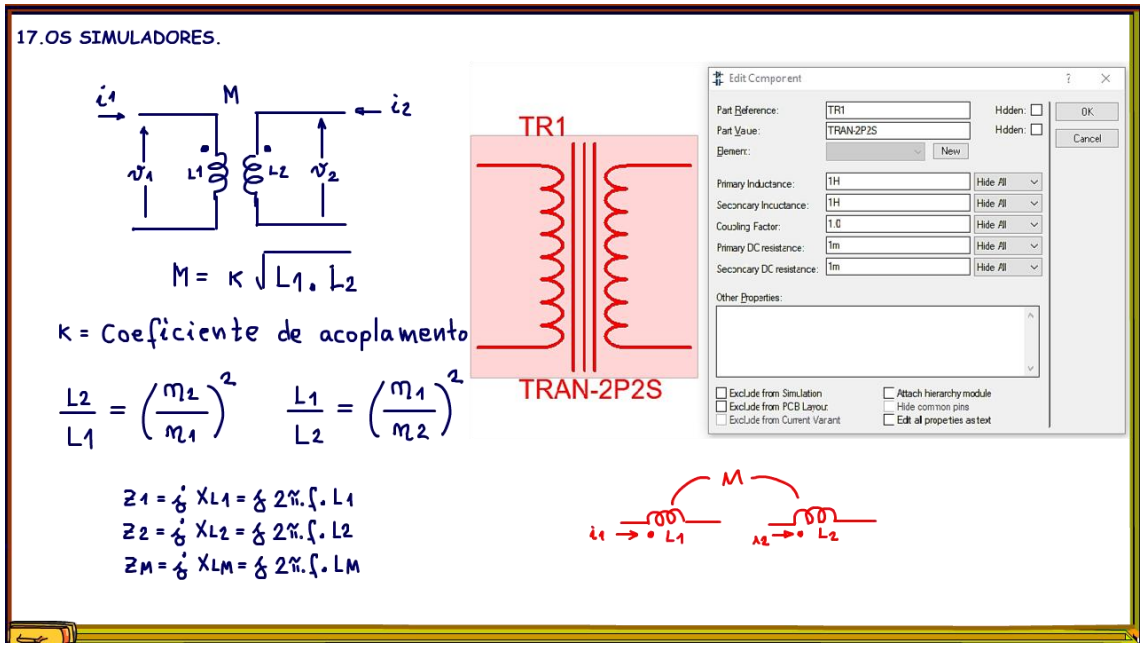


Aqui está o resumo do modelo com impedância mútua, com as equações e tudo mais, observe que eu coloquei a equação que relaciona as impedâncias do primário e do secundário com o número de espiras é a mesma equação da impedância refletida no transformador.

Esse é um método que os engenheiros e técnicos eletrônicos não gostam muito, ele parece complicar na análise, a impedância mútua não é uma impedância fácil de medir no transformador, é um modelo muito teórico, não é nada intuitivo e ainda não mostra com clareza a impedância distribuída, que todo mundo está acostumado a usar.

O mistério da indutância mútua e o modelo do transformador!

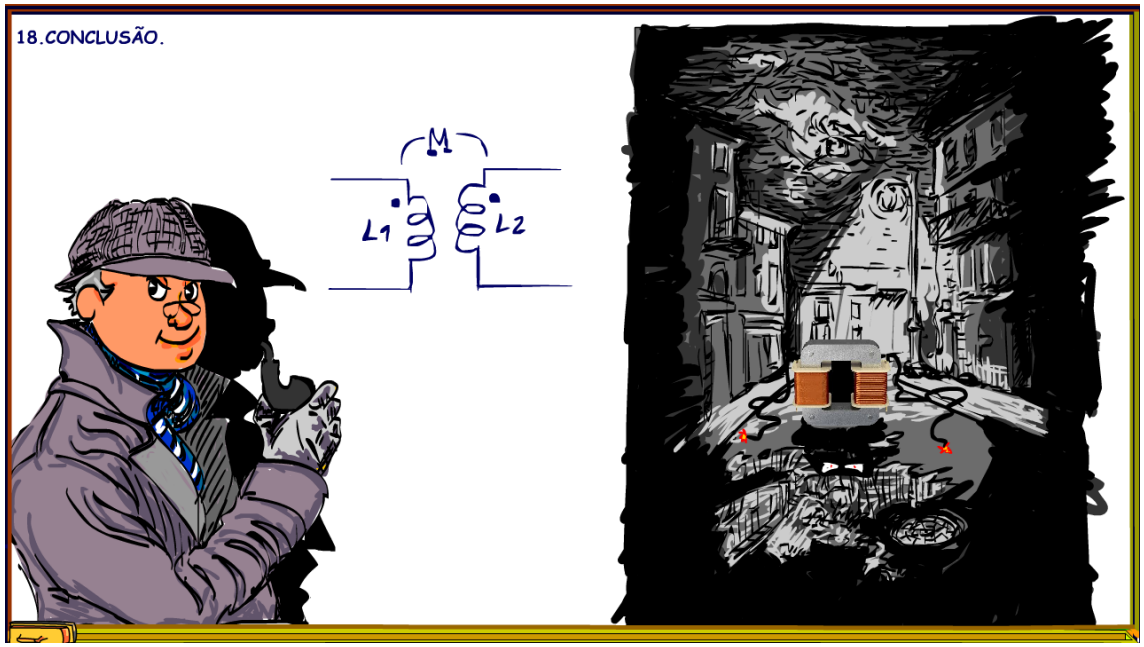
17. OS SIMULADORES.



Por outro lado, os simuladores adoram esse modelo, praticamente todos o adotam, um caso clássico é o Proteus, note que nos dados do transformador do Proteus não consta o número de espiras do primário e do secundário, e tenho certeza que isso sempre intrigou você, aqui está a resposta, esse simulador usa o modelo da indutância mútua, assim como o LTSPICE, uma vantagem grande desse modelo é que ele pode ser usado tanto para transformadores com núcleo magnético ou não e mais ele pode ser usado para indutores magneticamente acoplados, que é o caso da bobina de TESLA, o modelo clássico do transformador só é prático para modelar transformadores com núcleo magnético.

Veja como esse modelo é cheio de detalhes, que na maioria das vezes não são salientados nos cursos técnicos.

18. CONCLUSÃO.



Você viu nesse tutorial que existem duas formas de modelar um transformador uma usando o modelo com a impedância mútua e outra com o transformador ideal, essa é a solução do mistério, de porque você não conseguia entender a utilidade da indutância mútua.

Claro que nesse tutorial a luz foi lançada, vamos nos próximos tutoriais ampliar esse conceito e começar a analisar circuitos com os dois modelos e ver onde um é mais prático de aplicar do que o outro, será que agora vamos finalmente entender os detalhes da bobina de TESLA?

Até os próximos tutoriais e bom proveito.

19. CRÉDITOS

E por favor, se você não é inscrito, se inscreva e marque o sininho para receber as notificações do canal e não esqueça de deixar aquele like e compartilhar para dar uma força ao canal do professor bairros.

Arthurzinho: E não tem site.

Tem sim é www.bairrospd.com lá você encontra o PDF e tutoriais sobre esse e outros assuntos da eletrônica

E fique atento ao canal do professor bairros para mais tutoriais sobre eletrônica, até lá!

INCRIÇÃO YOUTUBE: https://www.youtube.com/@professorbairros

VISITE O SITE DO PROFESSOR BAIRROS LÁ TEM O PDF E MUITO MAIS

PARA AULAS ONLINE CONTATE VIA SITE

www.bairrospd.com

SOM: pop alegre Mysteries -30 (fonte YOUTUBE)

O mistério da indutância mútua e o modelo do transformador!

20240914 O mistério da indutância mútua e o modelo do transformador

O mistério da indutância mútua e o modelo do transformador!

Eu sempre achei misterioso o conceito da indutância mútua.

Por que algumas vezes a indutância mútua era usada para explicar o funcionamento de alguns transformadores e outras vezes não?

Por exemplo, explicar a bobina de TESLA sem usar a indutância mútua é complicado!

Por que o Proteus não usa o modelo simples do transformador e sim usa a indutância mútua para os suas simulações, e por aí vai?

Pois é sobre esse mistério que eu vou falar nesse tutorial e vou tentar esclarecê-lo, se é que tem como esclarecer.

Se você também tem essas dúvidas, esse tutorial poderá ajudar muito.

Vamos lá.

Assuntos relacionados.

Quanta teoria eu preciso para trabalhar com eletrônica?: https://youtu.be/-5T6T3sIjDo

YOUTUBE: https://youtu.be/8o5hxfadx2E

Transformador, indutância mútua, o que é indutância mútua, modelo do transformador,