

Maquete didática de um sistema trifásico de corrente alternada com Arduino: ensinando sobre a rede elétrica⁺*

*Ronaldo Celso Viscovini*¹

Departamento de Ciências – UEM

*Dayson de Mello Silva*²

*Eduardo Alexandrino Ávila*²

*Ítalo Leonardo de Alencar Marton*²

*Marcio Anicete dos Santos*²

*Marcos Paulo Baliscei*²

*Marina Aparecida Ferreira de Oliveira*²

Mestrandos MNPEF – UEM

Maringá – PR

*Renato Rodrigues dos Santos*³

Instituto Federal do Paraná – Campus Paranavaí

Paranavaí – PR

*Ana Cláudia Sabino*²

Graduanda em Física – UEM

*Eliane da Silva Gomes*⁴

Centro Universitário Cesumar – UniCesumar

Maringá – PR

*Marinez Meneghello Passos*⁵

Departamento de Matemática – UEL

*Sergio de Mello Arruda*⁶

Departamento de Física – UEL

Londrina – PR

⁺ Didactic model of the three-phase alternating current system with Arduino: teaching about the electrical grid

^{*} *Recebido: maio de 2015.*

Aceito: julho de 2015

¹ E-mail: viscovin@gmail.com

² E-mails: dayson.mello@gmail.com; edudrino@gmail.com; eng.italo@hotmail.com; marcioanicete@gmail.com; marcao_cfh@hotmail.com; marina_afer@hotmail.com; ana.c.sabino@hotmail.com

³ E-mail: renato.santos@ifpr.edu.br

⁴ E-mail: elianedasilvagomes71@gmail.com

⁵ Com o apoio da Fundação Araucária. E-mail: marinezmp@sercomtel.com.br

⁶ Com o apoio do CNPq. E-mail: renop@uel.br

Resumo

Neste artigo é apresentada uma proposta experimental, na forma de uma maquete, que simula uma rede elétrica trifásica, com frequência variável, entre 2Hz e 20Hz, permitindo visualizar as inversões na tensão elétrica através de LEDs coloridos. Na maquete estão representados diversos componentes presentes na rede elétrica, tais como gerador, transformador e linhas de distribuição. Usando materiais comuns e com custos acessíveis, essa maquete pode ser multiplicada por professores e alunos interessados no assunto.

Palavras-chave: *Eletrodinâmica; Corrente alternada; Sistema trifásico.*

Abstract

This paper presents an experimental proposal, in the form of a model which simulates a three-phase electric power system with variable frequency between 2Hz and 20Hz, and allows us to observe the inversions in electric voltage through colored LEDs. Several components of the three-phase electric power system are represented in the model, such as generator, transformer and distribution lines. By using common and affordable materials, teachers and students interested in the subject are able to multiply this model.

Keywords: *Electrodynamics; Alternating Current (AC); Three-phase electric power.*

I. Introdução

Na educação básica brasileira o Ensino de Física, de um modo geral, está pautado em decorar fórmulas e resolver extensas listas de exercícios, que pouco se relacionam com a realidade dos alunos. Esse ensino se limita à preparação para exames vestibulares, excluindo a ação ativa de alunos e professores sobre o conteúdo. O descobrir e o explorar acabam sendo deixados em segundo plano. Zanetic (2006, p. 41) pontua o desinteresse observado em sala de aula:

Meu objetivo central é atingir aqueles alunos que, no formato tradicional do ensino, não se sentem motivados ao estudo da física. E não precisamos nos basear em nenhum sofisticado levantamento de opiniões para saber que esses alunos representarão a grande maioria de nosso alunado do ensino médio.

Novas tecnologias surgem para auxiliar o tradicional quadro negro. No entanto, faz-se necessário a elaboração e utilização de estratégias de ensino, garantindo uma maior interação

entre professor e alunos. Neste sentido, propõe-se que o professor não seja um mero utilizador das tecnologias disponíveis, mas que tenha um papel ativo em construir e experimentar juntamente com seus alunos.

Neste contexto encontra-se o assunto – corrente alternada – pouco abordado até mesmo nos manuais didáticos, mas que é a base da geração, transmissão e distribuição da energia elétrica. Erthal e Gaspar (2006) acreditam que um dos motivos para que o conteúdo sobre corrente alternada seja pouco ensinado na disciplina de Física no Ensino Médio é:

[...] a falta de boas propostas instrucionais que possibilitem a abordagem desse conteúdo. Ou, para utilizar a linguagem da pesquisa em ensino de ciências, falta uma proposta que viabilize a transposição didática da teoria da corrente alternada para o seu estudo no ensino médio (ERTHAL; GASPAREL, 2006, p. 346).

Nas salas de aula os professores geralmente gastam a maior parte do tempo de suas aulas ensinando conceitos de eletrostática ou tratando a eletrodinâmica como se a corrente elétrica fosse apenas contínua. De fato, a maioria dos alunos deixa o ensino médio acreditando que as tomadas de suas residências sejam de corrente contínua e que todos os objetos eletrônicos funcionem com ela. Tem-se ensinado uma física extremamente abstrata, na qual suas aplicações, na maioria das vezes, não são percebidas pelos alunos. No tema de corrente alternada, fazer a correlação do que está sendo estudado com o cotidiano dos alunos é muito simples, já que praticamente todos os objetos eletrônicos de suas casas funcionam utilizando esse tipo de corrente. Daí a necessidade de se propor novas alternativas para o ensino desse conceito, entendendo que sua proximidade com o dia a dia dos alunos pode funcionar como fato motivador, tornando as aulas mais dinâmicas e interativas.

Neste artigo é apresentada uma maquete para simular uma rede elétrica trifásica. Com uma frequência variável entre 2Hz e 20Hz, pode-se visualizar as inversões na tensão elétrica através de LEDs. Na maquete estão representados diversos componentes presentes na rede elétrica, tais como gerador, transformador e linhas de distribuição. Este trabalho foi resultado das discussões e pesquisas desenvolvidas na disciplina Atividades Experimentais para o Ensino Fundamental e Médio, do curso Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) do polo Maringá (PR), com a colaboração do Grupo de Pesquisa em Educação em Ciências e Matemática (EDUCIM) de Londrina (PR).

II. Corrente alternada

Quando se deseja enviar energia elétrica a grandes distâncias um importante fator deve ser avaliado: a dissipação do fio elétrico, pois a resistência do fio é proporcional ao seu comprimento (distância). A potência transmitida (P_t) é igual ao produto da tensão (U) e a corrente elétrica (i), ou seja: $P_t = U \times i$. Já a potência dissipada num fio (P_a) é igual ao produto da resistência do fio (R) e ao quadrado da corrente elétrica (i^2), ou seja: $P_a = R \times i^2$. Para diminuir

a potência dissipada pelo fio é necessário minimizar a corrente elétrica, mas para manter a potência transmitida será necessário aumentar a tensão elétrica. Infelizmente tensões muito altas são perigosas para os usuários. Portanto, o ideal seria transmitir a energia elétrica em alta tensão e quando estiver próximo ao usuário converter para baixa tensão. Um dispositivo capaz de realizar esta conversão é o transformador, que só funciona com correntes alternadas.

Enquanto na corrente contínua a corrente possui apenas um sentido, na corrente alternada tem-se uma alternância no sentido, geralmente na forma de uma função senoidal. A Fig. 1 representa o comportamento da tensão elétrica num gerador senoidal de corrente alternada.

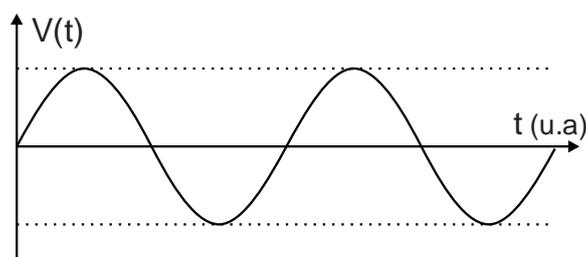


Fig. 1 – Variação da tensão em um gerador senoidal de corrente alternada em função do tempo. Fonte: Os autores.

No lugar dos polos positivo e negativo dos sistemas de corrente contínua, nos sistemas de corrente alternada os polos são nominados como neutro e fase. O polo neutro possui uma diferença de potencial (ddp) baixa, idealmente nula, em relação a um terceiro polo, denominado de terra por estar diretamente ligada ao solo.

No Brasil, o sistema de distribuição de energia elétrica funciona com tensão alternada que realiza 120 inversões por segundo, onde a tensão na fase muda de positiva para negativa e de negativa para positiva, por isso a frequência da corrente elétrica no Brasil é de 60Hz. Tal frequência é suficientemente elevada para não ser possível perceber o constante piscar de uma lâmpada fluorescente, a menos que isso cause um fenômeno de batimento com um monitor de computador, por exemplo. Por isso a maquete apresentada opera com frequência variável, de 2Hz a 20Hz, permitindo visualizar as inversões na tensão elétrica.

III. Sistema trifásico

Um sistema trifásico equivale a três sistemas de corrente alternada com os polos neutros conectados. Os três polos de fase, algumas vezes nominados ABC ou RST, estão defasados em 120° em relação uns aos outros. A Fig. 2 representa a variação da tensão num sistema trifásico.

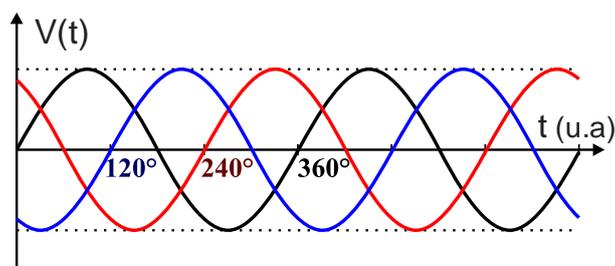


Fig. 2 – Variação da tensão num sistema trifásico. Fonte: Os autores.

IV. Componentes da maquete

Um dos pontos mais importantes para compreender a rede elétrica que percorre as cidades é entender o que acontece nos postes que possuem transformadores pendurados, mostrado na Fig. 3. Por que esses transformadores geralmente estão ligados a três fios paralelos horizontais, na parte cima, e a quatro fios paralelos verticais? Por que alguns postes, especialmente nas rodovias, só têm os três fios horizontais, enquanto outros, normalmente nas cidades, só têm os quatro fios verticais? Por que as casas são ligadas em alguns ou todos os quatro fios verticais? Devido a isso, a presente maquete foca especialmente esta parte da rede elétrica.



Fig. 3 – Poste da rede elétrica com transformador pendurado. Fonte: Os autores.

Transformadores

Um transformador consiste num conjunto de enrolamentos de fios em um núcleo, normalmente feito de lâminas de metal. Na Fig. 4 é mostrado esquematicamente um transformador simples, com apenas dois enrolamentos, o primário e o secundário (DIEZ ARRIBAS, 1993).

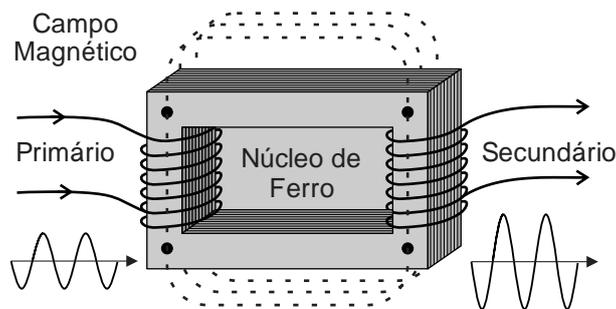


Fig. 4 – Transformador simples com enrolamentos primário e secundário. Fonte: Os autores.

Quando uma corrente alternada passa pelo enrolamento primário de um transformador, gera um campo magnético oscilante, obedecendo à Lei de Ampère-Maxwell, mostrado na Fig. 4. Esse campo magnético oscilante atua no enrolamento secundário, induzindo nele uma diferença de potencial, de acordo com a Lei de Faraday.

A diferença de potencial induzida no enrolamento secundário depende da razão entre as voltas dos enrolamentos primário e secundário. Se a razão for menor que 1, a diferença de potencial no secundário será maior que no primário, porém a corrente será menor. Para razões maiores que 1, a diferença de potencial no secundário será menor que no primário, porém a corrente será maior. Na presente maquete foram utilizados três transformadores comerciais com entrada de 0-110-220V e saída 15+15V x 400mA. Tendo sido empregado como primário 220V e secundário 30V, a razão primário/secundário será 0,136.

Relés eletromecânicos

O relé eletromecânico é basicamente uma chave controlada eletricamente. Dentro do relé há uma chave (contato), formada por uma alavanca, dois polos e uma bobina (eletroímã), mostrados na Fig. 5.

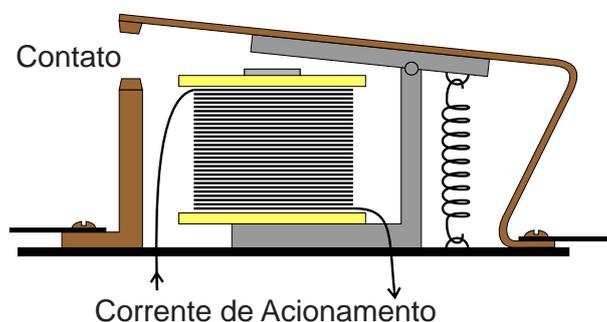


Fig. 5 – A estrutura básica de um relé. Fonte: Os autores.

Quando a bobina é percorrida por uma corrente, o eletroímã atrai a alavanca, conectando-a a um dos polos fixos e fechando a chave. Quando a corrente deixa de percorrer a bobina,

o campo eletromagnético cessa e uma mola é responsável por fazer a alavanca retornar à posição inicial, abrindo a chave. Para a presente maquete foi utilizado um módulo comercial com oito relés.

LED (light emitting diode)

O LED é um diodo emissor de luz, ou seja, quando submetido a uma tensão e percorrido por uma corrente elétrica emite luz. Caso a polaridade da tensão seja invertida a corrente será bloqueada e o LED não emitirá luz. Existem LEDs de diferentes cores: vermelho, verde, laranja, amarelo, azul, infravermelho, ultravioleta. Também podem ser encontrados arranjos com dois ou três LEDs de cores diferentes no mesmo componente, conhecidos como LEDs bicolor e tricolor.

Para visualizar as inversões de polaridade na maquete, os LEDs deveriam ser bicolores bidirecionais, que possuem LEDs internos (vermelho/verde) ligados invertidos, de modo que num sentido de corrente acende uma cor e no outro sentido acende outra cor. Estes LEDs têm apenas dois terminais e são difíceis de ser encontrados. Normalmente os LEDs bicolores encontrados são do tipo paralelo, que tem três terminais para que cada cor seja acionada separadamente. Por isso montou-se um arranjo de LEDs bicolor (vermelho/verde) de três terminais e dois resistores ($1K\Omega$) para simular o bicolor bidirecional, mostrado na Fig. 6.

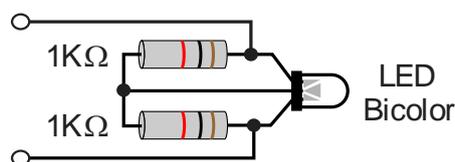


Fig. 6 – Arranjo para LED bicolor bidirecional. Fonte: Os autores.

V. Montagem da maquete

Gerador elétrico trifásico

Esta é a parte mais importante e desafiadora do projeto. Necessita-se de um circuito que forneça três tensões alternadas, com defasagem de 120° , para alimentar os primários dos transformadores.

Para simplificar o circuito optou-se por usar sinais digitais bipolares (positivo/negativo) no lugar de sinais analógicos (senoidal). Foi montada uma sequência de seis passos digitais para simular um sistema trifásico, mostrado na Fig. 7. Os sinais (+) e (-) representam a tensão (polaridade) conectada no terminal dos indutores, referenciados como fases positivas/negativas, e as setas vermelhas representam o sentido da corrente elétrica. Duas setas, uma de cada lado do indutor, representam uma corrente maior que apenas uma seta.

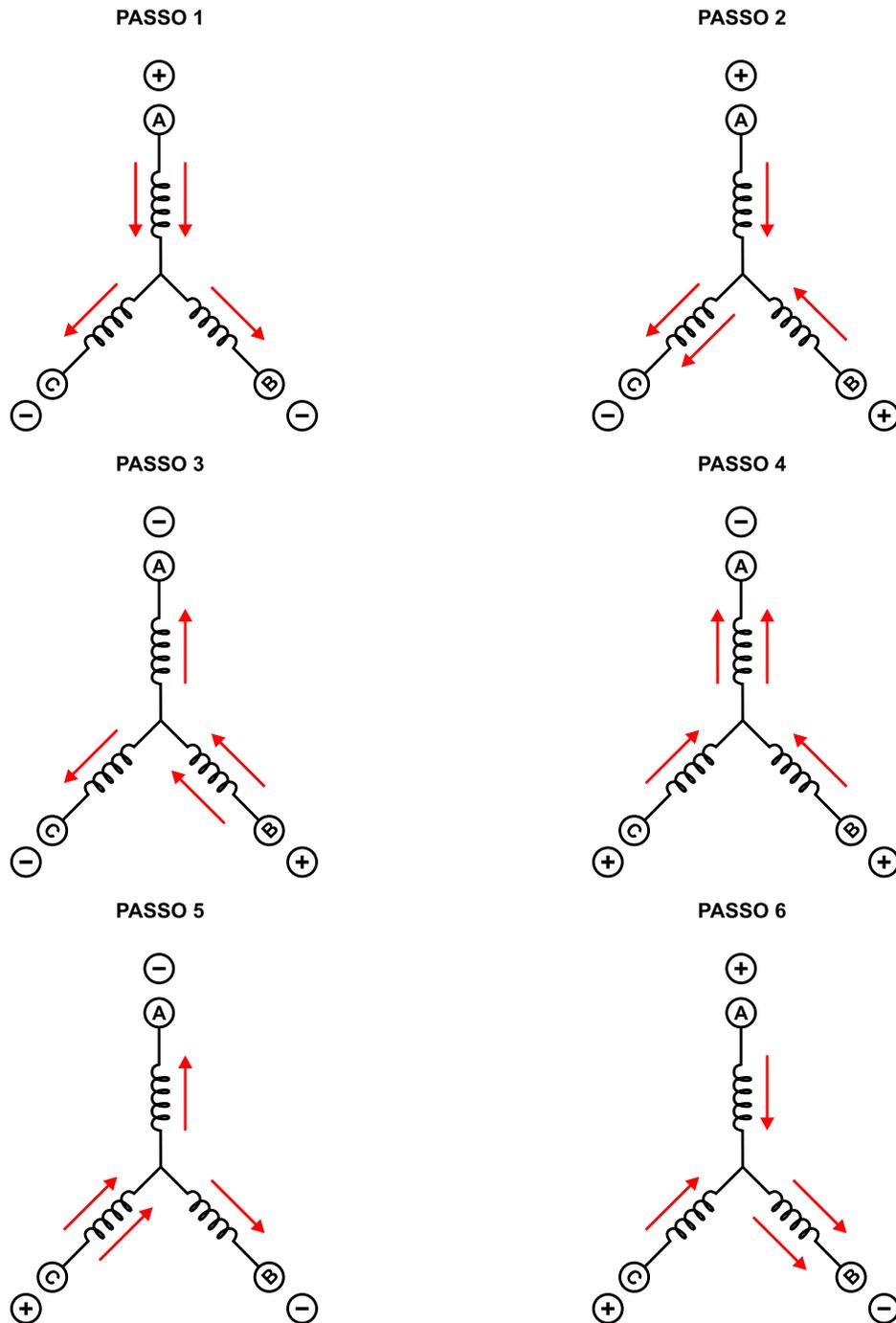


Fig. 7 – Sequência de seis passos para simular um sistema trifásico. Fonte: Os autores.

Desconsiderando os efeitos indutivos, esse seis passos de tensões digitais criariam seis passos de correntes nos primários dos transformadores, parecidos com os mostrados na Fig. 8, simulando sinais senoidais. Para o chaveamento dos três transformadores, foi utilizada uma versão modificada da ponte H mostrada na Fig. 6, possibilitando o chaveamento da polaridade dos três transformadores de forma independente.

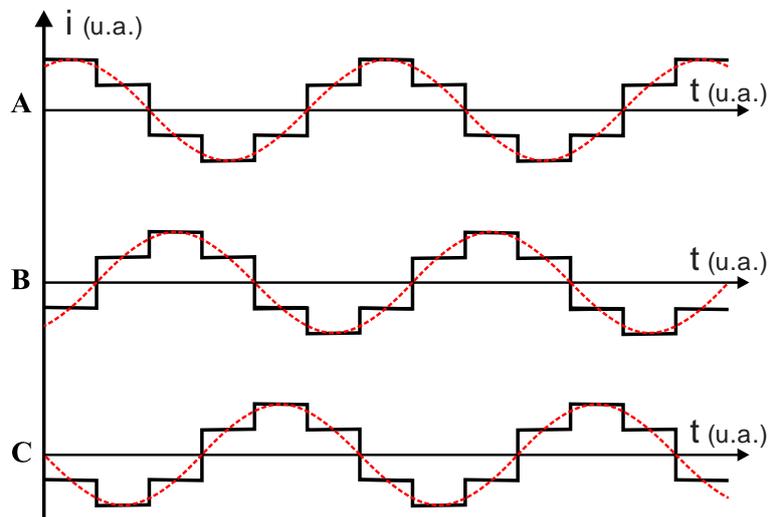


Fig. 8 – Sequência de seis passos de corrente nos transformadores. Fonte: Os autores.

Para alimentar o gerador trifásico é empregada uma fonte de tensão contínua de 30V, para evitar choques elétricos. Para gerar as tensões digitais alternadas, cada fase (ABC) é ligada no polo positivo da fonte (+30V) através de um relé ou no polo negativo (-30V) através de outro relé. Portanto, a amplitude de voltagem do gerador é de 60V, que é a “Alta Tensão” na maquete. Considerando a relação entre os enrolamentos primários e secundários dos transformadores igual a 0,136, a “Baixa Tensão” da maquete terá uma amplitude de voltagem de aproximadamente 8V, entre -4V e +4V, tensões suficientes para acender os LEDs.

São necessários seis relés para as três fases, por isso foi utilizado um módulo de oito relés, que deve ser alimentado por uma fonte de 5V. O acionamento sincronizado dos relés é controlado por uma plataforma Arduino Uno, que tem se destacado na área de instrumentação para o ensino (CAVALCANTE, 2001). Um potenciômetro (10K Ω) ligado numa entrada analógica (A0) fornece um referencial para o tempo de cada passo e, conseqüentemente, a frequência de operação do gerador alternado.

Esquema da montagem

A montagem dos componentes da maquete é representada na Fig. 9, onde são visíveis os três transformadores, o módulo de relé e o Arduino Uno ligado ao potenciômetro para ajuste de frequência. Também são visíveis as fontes de 30V e 5V, sendo que a alimentação de energia do Arduino é feita pelo cabo USB que também serve de comunicação com o computador durante a programação. Caso não queira usar um computador conectado ao Arduino, basta alimentá-lo também com a fonte de 5V.

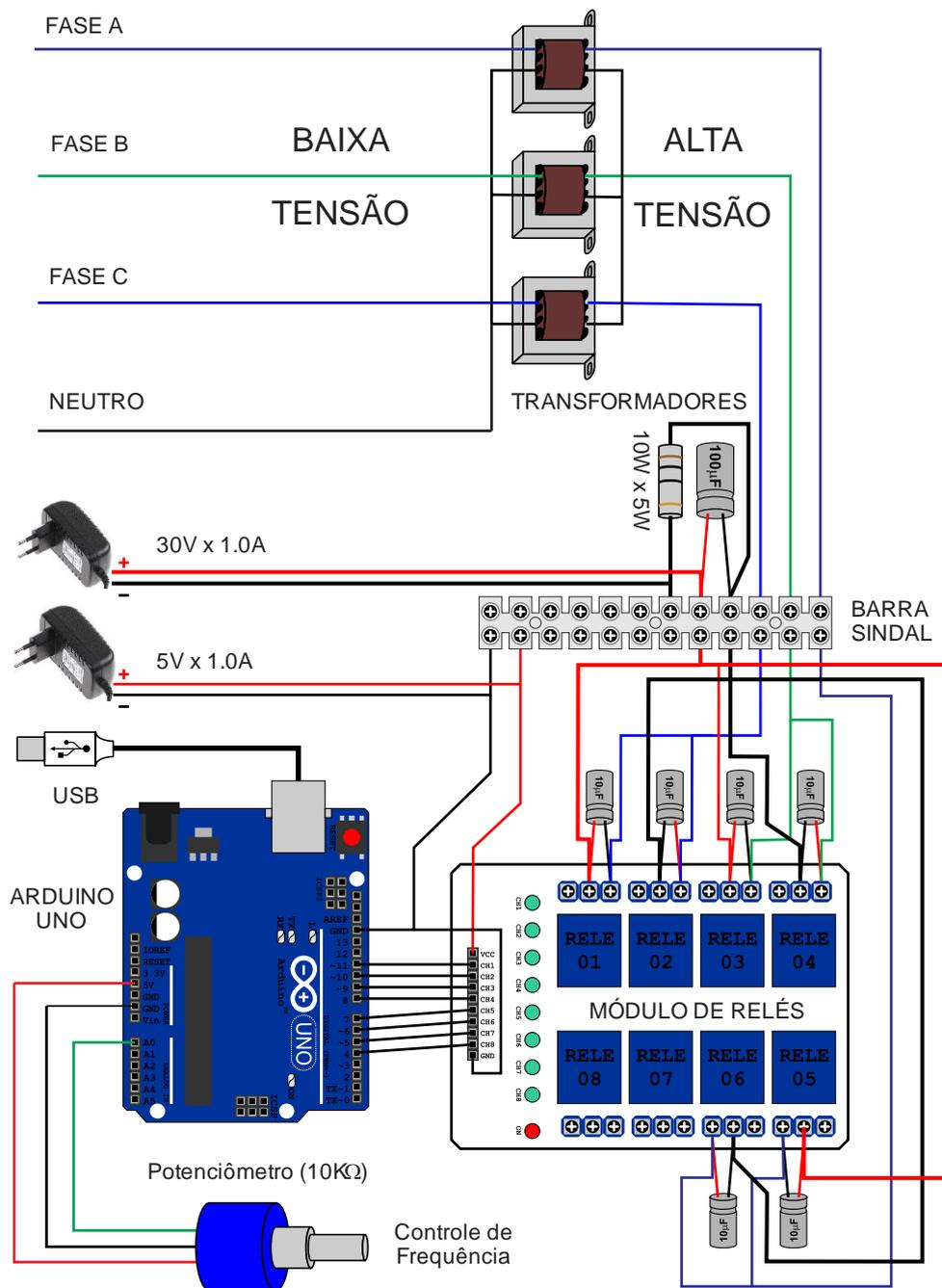


Fig. 9 – Esquema da montagem de maquete. Fonte: Os autores.

Uma barra de contatos aparafusável (Sindal) é usada para conectar os componentes, evitando a necessidade de soldagens. O resistor de 10Ω serve como limitador de corrente e deve suportar uma dissipação de pelo menos 5W. Os capacitores de $10\mu\text{F}$ e $100\mu\text{F}$ servem para reduzir o ruído elétrico produzido pelo chaveamento de cargas indutivas, os enrolamentos primários dos transformadores.

Na Fig. 10 tem-se uma fotografia da maquete construída sobre uma base de madeira do tamanho de uma carteira típica escolar. Os transformadores foram montados em um pequeno

poste de madeira. Na parte superior do poste montamos os três fios de alta tensão que alimentam os transformadores e na lateral os três fios das fases e mais o neutro, assim como nos postes da rede elétrica.

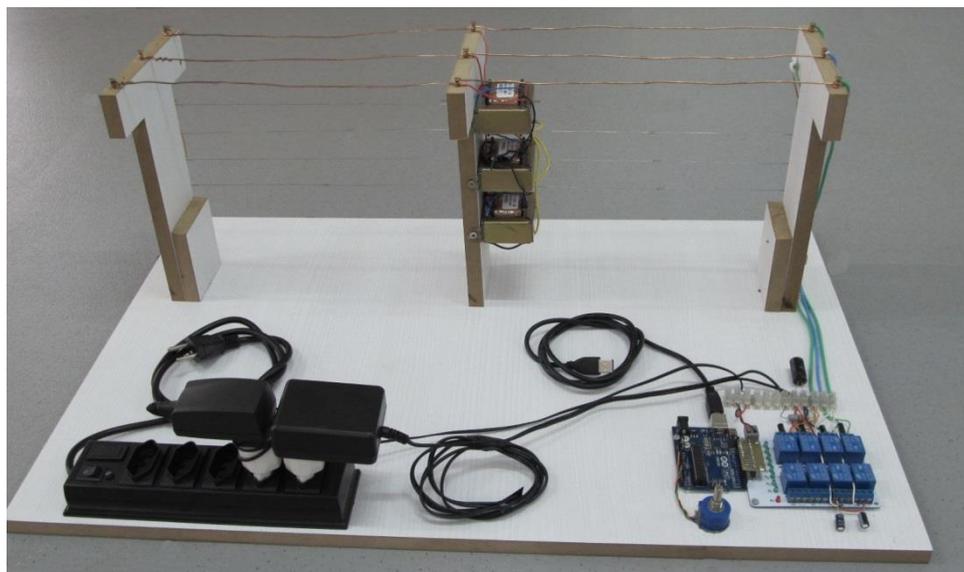


Fig. 10 – Maquete montada. Fonte: Os autores.

VI. Programação do Arduino

A programação foi realizada em ambiente de desenvolvimento integrado (*Integrated Development Environment – IDE*) para o Arduino, disponível na página oficial: www.arduino.cc. O ambiente permite escrever a programação em linguagem C, compilar e transferir direto para a placa do Arduino Uno através de uma porta USB. Para simplificar, neste ambiente a programação pode ser reduzida para a definição (programação) de apenas duas funções: a de inicialização *setup()* que é executada uma única vez no início e a de repetição *loop()* que é repetitivamente executada após o *setup*. Para a programação destas duas funções utilizou-se cinco funções da biblioteca básica do Arduino:

pinMode([n],OUTPUT): configura a porta [n] como sendo de saída digital;
digitalWrite([n],HIGH): seta uma tensão de 5V na porta [n], que ativa o relé;
digitalWrite([n],LOW): seta uma tensão de 0V na porta [n], que desativa o relé;
delay([x]): faz uma pausa de [x] milissegundo;
analogRead([n]): converte o sinal analógico da porta [n], entre 0 e 5V, em valor digital, entre 0 e 1023.

A listagem completa do programa-fonte é apresentada a seguir. Inicialmente definem-se as portas para chavear: fase A negativa (faseANeg = porta 6), fase A positiva (faseAPos =

porta 7), fase B negativa (faseBNeg = porta 8), fase B positiva (faseBPos = porta 9), fase C negativa (faseCNeg = porta 10) e fase C positiva (faseCPos = porta 11).

Na função de inicialização *setup* as portas de controle dos relés são configuradas como saída e são ativadas (*HIGH*) as faseBNeg e faseCPos como preparação para o passo 5 (Fig. 7).

Na função de repetição *loop* calcula-se primeiramente o intervalo entre passos a partir do valor de tensão na porta A0, proveniente do potenciômetro de controle de frequência (Fig. 9). Este valor, com mínimo de 8 (para A0=0) e máximo de 93 (para A0=1023), é armazenado na variável inteira *iTempo* que é usada nas funções *delay* para fazer pausas (em milissegundos). As pausas intercalam cada inversão de polaridade, ou seja, quando a tensão de uma fase muda de positivo para negativo ou vice-versa. Ativada a faseANeg tem-se a configuração do passo 5 (A-/B-/C+). Em seguida promove-se a inversão da fase B, desativando faseBNeg, pausa e ativando faseBPos, conseguindo o passo 4 (A-/B+/C+). Depois o passo 3 (A-/B+/C-), invertendo a fase C; o passo 2 (A+/B+/C-), invertendo A; o passo 1 (A+/B-/C-), invertendo B; o passo 6 (A+/B-/C+), invertendo C. Finalmente desativa-se a faseAPos como preparação para o passo 5 e repete-se a sequência do *loop*. Essa sequência invertida e começando no passo 5 é para mostrar que outras sequências podem ser utilizadas.

Com um intervalo de 8ms entre passos o ciclo de seis passos demora 48ms, ou seja, uma frequência de 20,8Hz. Já com um intervalo de 93ms, o ciclo demora 558ms, uma frequência de 1,8Hz.

```
// Define Portas
#define faseANeg 6
#define faseAPos 7
#define faseBNeg 8
#define faseBPos 9
#define faseCNeg 10
#define faseCPos 11

// Intervalo entre Passos
int iTempo;

// Função de Inicialização
void setup() {
  // Configura Porta Saída
  pinMode(faseANeg,OUTPUT);
  pinMode(faseAPos,OUTPUT);
  pinMode(faseBNeg,OUTPUT);
  pinMode(faseBPos,OUTPUT);
  pinMode(faseCNeg,OUTPUT);
  pinMode(faseCPos,OUTPUT);
  // Prepara Passo 5
  digitalWrite(faseANeg,LOW);
  digitalWrite(faseAPos,LOW);
  digitalWrite(faseBNeg,HIGH);
```

```

digitalWrite(faseBPos,LOW);
digitalWrite(faseCNeg,LOW);
digitalWrite(faseCPos,HIGH);
}

// Função de Repetição
void loop() {
  iTempo=(analogRead(A0)/12+8);
  delay(iTempo);
  digitalWrite(faseANeg,HIGH);
  // Passo 5 (A-/B-/C+)
  digitalWrite(faseBNeg,LOW);
  delay(iTempo);
  digitalWrite(faseBPos,HIGH);
  // Passo 4 (A-/B+/C+)
  digitalWrite(faseCPos,LOW);
  delay(iTempo);
  digitalWrite(faseCNeg,HIGH);
  // Passo 3 (A-/B+/C-)
  digitalWrite(faseANeg,LOW);
  delay(iTempo);
  digitalWrite(faseAPos,HIGH);
  // Passo 2 (A+/B+/C-)
  digitalWrite(faseBPos,LOW);
  delay(iTempo);
  digitalWrite(faseBNeg,HIGH);
  // Passo 1 (A+/B-/C-)
  digitalWrite(faseCNeg,LOW);
  delay(iTempo);
  digitalWrite(faseCPos,HIGH);
  // Passo 6 (A+/B-/C+)
  digitalWrite(faseAPos,LOW);
}

```

VII. Conclusão

A maquete apresentada neste trabalho foi desenvolvida para servir como modelo de uma rede elétrica trifásica, usada em todo o Brasil. Ela poderá auxiliar as aulas de eletricidade/eletrodinâmica, especialmente sobre corrente alternada. Além dos conceitos físicos, outros assuntos muito importantes podem ser discutidos, entre eles a matriz energética brasileira e mundial, com suas diversas fontes, renováveis ou não. Na maquete são utilizados componentes comuns, facilitando sua construção por professores e/ou grupo de alunos. Testes realizados em sala de aula têm demonstrado uma boa receptividade por alunos, que se apresentaram motivados e interessados pela maquete.

Referências

CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C.; MOLISANI, E. Física com Arduino para iniciantes. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 33, n. 4, p. 4503, 2011.

ERTHAL, J. P. C.; GASPAR, A. Atividades experimentais de demonstração para o ensino de corrente alternada no nível do Ensino Médio. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 23, n. 3, p. 345-359, 2006.

DIEZ ARRIBAS, S. Laboratório Caseiro: Transformador. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 10, n. 3, p. 269-276, 1993.

ZANETIC, J. Física e Arte: uma ponte entre duas culturas. **Pro-posições**, Campinas, v. 17, n. 1, p. 39-58, 2006.