

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ANDERSON FELIPE SCHUMACHER

BANCO DE CAPACITORES COM AJUSTE AUTOMÁTICO

TOLEDO
2019

ANDERSON FELIPE SCHUMACHER

BANCO DE CAPACITORES COM AJUSTE AUTOMÁTICO

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica na Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Alberto Vinicius de Oliveira

Coorientador: Eng. Ruahn Fuser

TOLEDO
2019

TERMO DE APROVAÇÃO

BANCO DE CAPACITORES COM AJUSTE AUTOMÁTICO
Nº 82

BANCO DE CAPACITORES COM AJUSTE AUTOMÁTICO

por

Anderson Felipe Schumacher

Esse Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 09h do dia 26 de junho de 2019, como requisito parcial para a obtenção do título Bacharel em Engenharia Eletrônica. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado APROVADO.

Marcos Roberto Bombacini

UTFPR

Djones Aldivo Boni

UTFPR

Alberto Vinicius de Oliveira

COELE

Orientador (a)

Fabio Rizental Coutinho

Coordenador(a) da COELE

O termo de aprovação assinado encontra-se na coordenação do curso.

RESUMO

Este projeto tem como objetivo principal desenvolver um dispositivo eletrônico que seja capaz de configurar capacitância de saída de uma matriz quadrada (2x2), cujos elementos são capacitores. O dispositivo é gerenciado por um microcontrolador, o qual associa os elementos capacitivos, por meio de relés eletromecânicos, de acordo a capacitância definida pelo usuário. Para verificar a funcionalidade do dispositivo, foram utilizados dois métodos de validação: 1) utilizar a matriz como elemento capacitivo de um filtro ativo passa-baixas de primeira ordem, a fim de variar a frequência de corte; e 2) medição direta do valor de capacitância equivalente nos terminais de saída da matriz, comparando-o com o resultado da medição da associação manual efetuada com os mesmos capacitores. Como resultado, as respostas em frequência do primeiro método de validação ficaram semelhantes às curvas da associação manual. Este comportamento também foi encontrado no segundo método. Entretanto, descobriu-se que em ambos os métodos o dispositivo causa um desvio, cerca de $\pm 20\%$, quando utilizados os capacitores de 120 pF.

Palavras-chave: Banco de capacitores. Fator de potência. Matriz de capacitores. Filtros. Resposta em frequência.

ABSTRACT

This project aims to develop an electronic device that controls the output capacitance of a square matrix (2x2), whose elements are capacitors. The device is managed by a microcontroller, which associates the capacitive elements, through electromechanical relays, according to the defined capacitance value by the user. Thus, the device functionality is evaluated according to two validation methods. The first one is based on using the capacitor matrix as the capacitive element of an active low-pass first-order filter in order to vary the cutoff frequency. On the other hand, the second method consists of the direct measurement of the equivalent capacitance at its output terminals using a digital LC meter, followed by a comparison with the manual association measurement for the same capacitors. The frequency responses related to the first validation method were similar to the manual association ones. The same behavior has been found for the second method. However, in both validation methods it has presented an error around $\pm 20\%$ when using the 120 pF capacitors.

Key-words: Capacitors bank. Power factor. Capacitors matrix. Filters. Frequency response.

SUMÁRIO

1	Introdução.....	6
1.1	Objetivo.....	7
1.2	Justificativa.....	8
2	Referencial Teórico	9
2.1	Capacitores	9
2.1.1	Associação De Capacitores	10
2.1.2	Matriz De Capacitores.....	11
2.2	Filtros.....	12
2.2.1	Filtro Ativo De 1ª Ordem	14
3	Materiais E Métodos	16
3.1	Características Do Projeto	17
3.1.1	Lista De Materiais	18
3.2	Metodologia Da Validação.....	19
3.2.1	Método 1 De Validação.....	19
3.2.2	Método 2 De Validação.....	19
4	Resultados	21
4.1	Versão Preliminar.....	21
4.2	Versão Final Da Placa	24
5	Conclusão	26
6	Referências	28
	Apêndice A – Código Fonte Do Programa Utilizado No Pic 16f877a E Arduino Pro Mini....	30
	Apêndice B – Esquema Elétrico	31
	Apêndice C – Placa De Circuito Impresso	33

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Produtos comerciais Siemens: a) PhiCap, b) Módulo Trifásico – MT e c) Controlador.....	7
Figura 2 – Controlador WEG	7
Figura 3 – Capacitor Comum	9
Figura 4 – Associação de capacitores: a) em série e b) em paralelo	11
Figura 5 – Matriz de capacitores quadrada de ordem 2.....	12
Figura 6 – Resposta de filtros passa-baixas: a) passivo ideal e b) de 1ª ordem.....	13
Figura 7 – Filtros passivos: a) passa-baixas e b) passa-altas.	14
Figura 8 – Filtros ativos de primeira ordem: a) passa-altas e b) passa-baixas.	15
Figura 9 – Fluxogramas do trabalho proposto: a) visão geral, b) desenvolvimento do algoritmo da matriz e c) funcionamento da interface homem-máquina.	16
Figura 10 – Circuito montado em placa perfurada e protoboard, foi utilizado para aquisição dos resultados.....	21
Figura 11 – Resposta em frequência do filtro ativo passa-baixas de primeira ordem com capacitores associados de forma manual e com a matriz automática: a) Capacitor de 120 pF, b) Capacitor de 22 nF e c) capacitor de 1 μ F.....	22
Figura 12 – Capacitância equivalente medida na matriz automática e na associação manual com diferentes valores comerciais de capacitores: a) 120 pF, b) 22 nF e c) 1 μ F	23
Figura 13 – Placa final do dispositivo em circuito impresso com capacitores de 1 μ F.	24
Figura 14 – Capacitância equivalente medida nos bornes da PCB e na associação manual com diferentes valores comerciais de capacitores: a) 120 pF, b) 22 nF e c) 1 μ F	25

1 INTRODUÇÃO

Há diversas aplicações para um sistema de configuração de capacitância ou reatância em circuitos, o qual executa algoritmos para associar ramos de circuitos elétricos, a fim de obter o valor requerido na saída do sistema. Uma solução já bastante difundida é a utilização de chaves e capacitores em forma de matriz quadrada. Dentre as mais variadas aplicações, destacam-se: controle automático de fator de potência, controle da impedância, circuitos para carregar e/ou dessulfatar baterias e filtros de sinais (PEÑA, 2018; REIS, 2015).

Os bancos de capacitores utilizados especialmente para correção de fator de potência são especificados pela potência reativa em VAR a ser introduzida à rede elétrica. Nas indústrias, é comum a utilização de motores funcionando a vazio, ou com uma carga mecânica abaixo do seu valor nominal; máquinas de solda a transformador; fornos a arco, entre outros. Desta forma, a potência reativa indutiva é injetada na rede elétrica, resultando no aumento de perdas na transmissão e diminuição do fator de potência (MAMEDE FILHO, 2006).

Com a finalidade de incentivar a eficiência energética da rede de distribuição de energia elétrica, uma legislação nacional determina que o fator de potência deve ser mantido próximo do valor unitário, porém permite um valor mínimo de até 0,92 (BRASIL, 2010, 2011, 2013). Quando isto é descumprido, a empresa é penalizada. A multa pela má utilização do sistema elétrico utilizada pela distribuidora Companhia Paranaense de Eletricidade (COPEL) é calculada

$$A = V_{fat} \cdot \left[\frac{0,92}{F_p} - 1 \right], \quad (1)$$

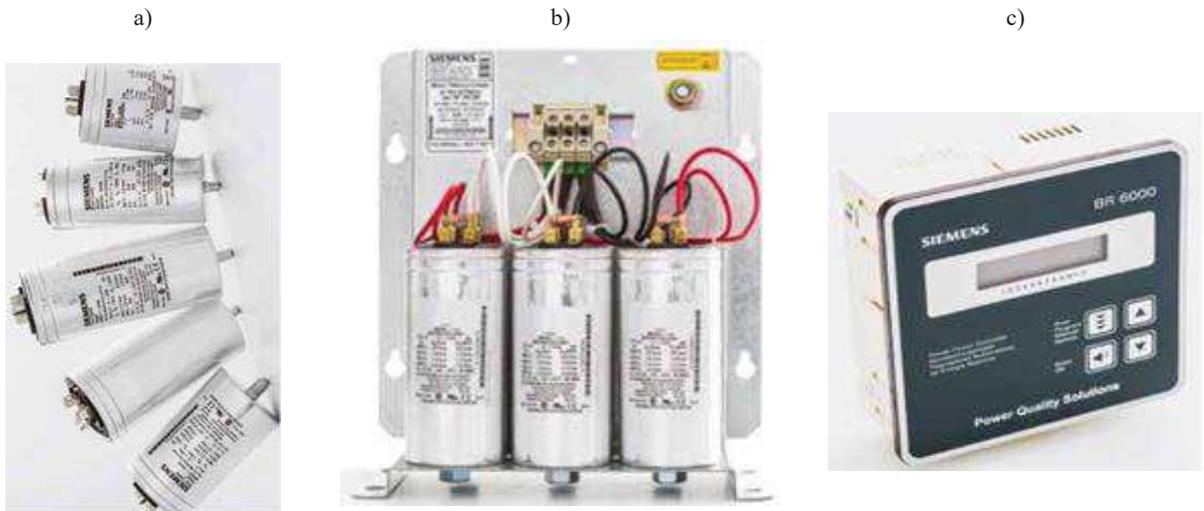
sendo A o acréscimo na fatura de energia, V_{fat} o valor da fatura e F_p o fator de potência medido na empresa.

A COPEL sugere, dentre outros meios, a utilização de banco de capacitores com o propósito de melhorar o fator de potência. Este banco deve ser projetado e instalado por profissional qualificado (COMPANHIA PARANAENSE DE ELETRECIDADE, 2017).

Várias empresas fornecem uma variedade de capacitores e banco de capacitores, com acionamentos: manual ou automático. Dentre aqueles utilizados para correção de fator de potência destacam-se: 1) PhiCap da Siemens (Figura 1a) que possui capacitores especificamente para correção de fator de potência. Estes permitem a variação de potência reativa de 0,5 kVAR a 30 kVAR para sistema trifásico e de 0,7 kVAR a 5 kVAR para sistema monofásico. Três destes capacitores monofásicos formam o “Módulo Trifásico - MT” que é vendido como um só produto, ilustrado pela Figura 1b. Há também soluções que controlam e

medem células capacitivas, tensão e corrente (Figura 1c) (SIEMENS AG, 2016). 2) outro produto comercializado é o controlador da WEG que possibilita o controle de banco de capacitores conectados a diversos estágios de saída. Além disso, este dispositivo permite correção manual ou automática do fator de potência, programando-se o valor requerido. Desta maneira, há uma gestão inteligente dos bancos onde são acionados, preferencialmente, aqueles com menor frequência (Figura 2) (WEG, 2018; CORREÇÃO, 2018).

Figura 1 – Produtos comerciais Siemens: a) PhiCap, b) Módulo Trifásico – MT e c) Controlador.



Fonte: Adaptado de Siemens Ag (2016).

Figura 2 – Controlador WEG



Fonte: WEG (2013)

1.1 Objetivo

O presente trabalho teve como objetivo geral: implementar um controle automático para configuração do valor de capacitância em um banco de capacitores – disposto na forma de uma matriz 2x2 – composto por microcontrolador e interface com usuário, para que este, através dos botões, selecione um valor de capacitância dentro da faixa projetada. Além disso, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- a) permitir os ajustes de frequência de corte de um filtro ativo de 1ª ordem e de valor de capacitância da matriz através dos botões pelo usuário;
- b) implementar o dispositivo que seja capaz de ajustar da frequência de corte com o menor tempo possível;

1.2 Justificativa

Ao cursar disciplinas que exigem atividades práticas em laboratório com circuitos, componentes eletrônicos, fios e etc., os alunos se deparam com algumas tarefas trabalhosas e repetitivas, por exemplo, montar um mesmo circuito várias vezes trocando apenas um pequeno grupo de componentes. Esta ação, apesar de ser simples, demanda tempo.

Portanto, para auxiliar no ensino, quando for necessário variar o valor de capacitores, de maneira que, tornando mais célere a alteração do valor do elemento capacitivo em um determinado circuito, o estudante possa entender e abstrair melhor o funcionamento do mesmo, será produzido um dispositivo nomeado BANCO DE CAPACITORES COM AJUSTE AUTOMÁTICO.

Este dispositivo pode ser empregado como kit instrucional em disciplinas como: circuitos elétricos, sinais e sistemas, processamento digital de sinais, eletrônica analógica, eletrônica de potência entre outras que constam na grade dos cursos de Engenharia Eletrônica e Elétrica. Este dispositivo poderá assumir os valores de $0,5C$; C ; $1,5C$ e $2C$, onde C é o valor da capacitância de cada capacitor.

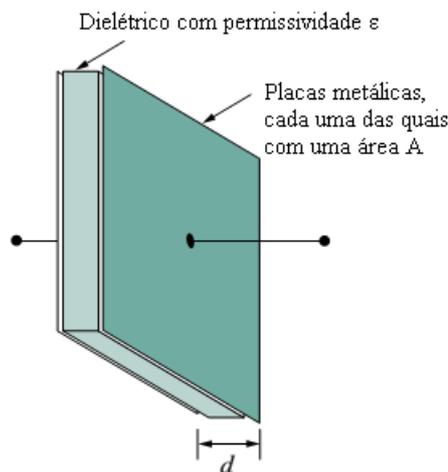
2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção, os conceitos básicos relacionados ao trabalho serão discutidos.

2.1 Capacitores

Capacitores são componentes eletrônicos constituídos de placas condutoras (de secção transversal A) separadas por um meio isolante, chamado dielétrico, de largura d , como esquematizado na Figura 3. Este meio pode ser ar, fluido, ou qualquer material com propriedades elétricas isolantes. O capacitor acumula cargas elétricas quando se aplica uma diferença de potencial nas faces externas das placas, resultando em um campo eletrostático entre elas (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

Figura 3 – Capacitor Comum



Fonte: Adaptado de Alexander; Sadiku (2013).

Para o capacitor de placas paralelas na Figura 3, a capacitância é obtida através de

$$C = \frac{k \cdot \epsilon_0 \cdot A}{d}, \quad (2)$$

sendo ϵ_0 a constante de permissividade do vácuo, k a constante dielétrica do material entre as placas, A a área das placas, e d a distância entre as placas.

A capacitância de um elemento capacitivo de qualquer formato pode ser expressa em sua forma mais geral, pela fórmula

$$C = \frac{Q}{V} \quad (3)$$

onde, Q representa a carga de cada placa e V representa a diferença de potencial entre as placas (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

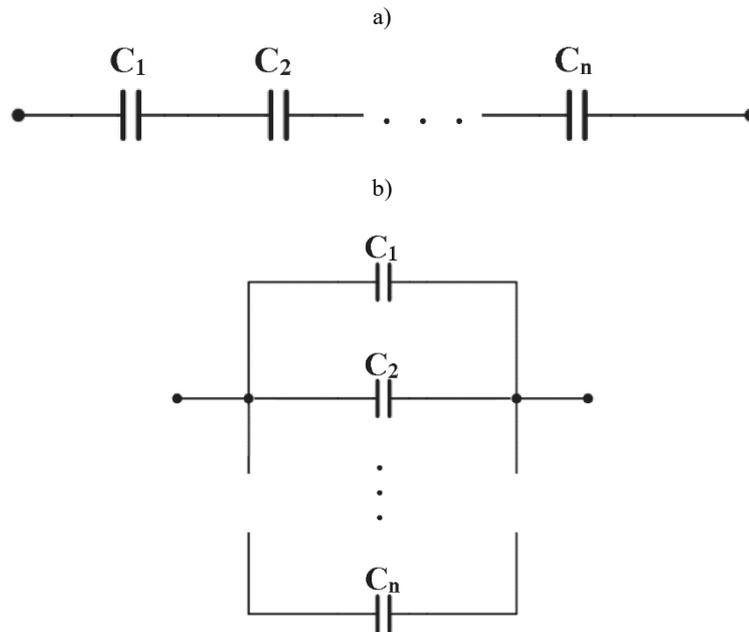
Há diversos tipos de capacitores de capacitância fixa, classificados geralmente pelo dielétrico utilizado. Dentre eles, destacam-se: cerâmico (1 nF a 1 μ F), de mica (10 pF a 10 nF), de silício, de poliéster, eletrolítico de alumínio (1 μ F a 47 mF) ou tântalo. Os capacitores cerâmicos e eletrolíticos de alumínio são os mais usuais em circuitos de corrente contínua e prototipação. O capacitor cerâmico não possui polaridade, é usualmente feito com capacitâncias bem pequenas e devido a sua boa estabilidade com grandes alterações de frequência pode ser utilizado em circuitos com frequência mais elevada – de quilohertz a megahertz. O capacitor eletrolítico possui polaridade e, portanto, deve ser ligado de uma maneira específica, pois caso conectado com a polaridade invertida a um circuito serão danificados. Além disso, são utilizados comumente na etapa de filtragem de fonte de alimentação e em acoplamento e desacoplamento de circuitos de áudio (CAPACITOR GUIDE, 2018).

Há também capacitores de capacitância variável, utilizados para sintonia de rádios portáteis, e ainda, os diodos de capacitância variável, ou varicaps, utilizados principalmente em circuitos sintonizadores em canais de radiofrequência de VHF e UHF (MUNDO DA ELÉTRICA, 2018; SABER ELÉTRICA, 2018).

2.1.1 Associação de Capacitores

Estes elementos podem ser associados, ou em série, ou paralelo. O primeiro tipo de associação caracteriza-se pelos componentes compartilharem a ligação em apenas um de seus terminais, como apresentado na Figura 4a e a capacitância total do conjunto ou capacitância equivalente é dada pela Equação (4). No segundo caso, os componentes compartilham uma ligação em ambos os terminais (Figura 4b) e resulta na capacitância equivalente do conjunto dada pela Equação (5).

Figura 4 – Associação de capacitores: a) em série e b) em paralelo



Fonte: Adaptado de Alexander; Sadiku (2013).

$$\frac{1}{C_e} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}, \quad (4)$$

onde C_e representa a capacitância equivalente, em Farads; C_1 , C_2 , C_3 e C_n representam a capacitância de cada capacitor, em Farads.

$$C_e = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n. \quad (5)$$

2.1.2 Matriz de capacitores

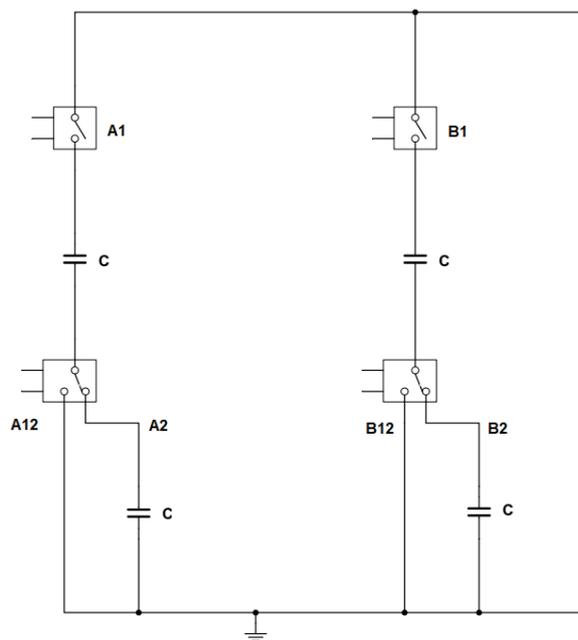
As combinações de associações de uma matriz de capacitores quadrada de ordem 2 podem ser realizadas por meio do fechamento das chaves A e B, como ilustrado na Figura 5. Para tal, utiliza-se todos os capacitores iguais e de valor C_x . Neste formato, há quatro possibilidades de valores, a faixa de capacitância varia de $0,5C_x$ a $2C_x$ conforme a Tabela 1 e cada ramo é tratado como um módulo de capacitores. Portanto, para uma matriz genérica com duas linhas e N colunas, a faixa de capacitância do circuito fica entre $0,5C \leq C_{eq} \leq NC$; onde, C é a capacitância dos capacitores da matriz e N é o número de módulos.

Tabela 1 – Arranjos de capacitores para uma matriz quadrada de ordem 2.

Combinação das chaves	Capacitância Equivalente
A1 e A2	$\frac{1}{2}C_x$
B1 e B2	
A1 e A12	C_x
B1 e B12	
A1 e A2 e B1 e B2	$\frac{3}{2}C_x$
A1 e A12 e B1 e B2	
A1 e A12 e B1 e B12	$2C_x$

Fonte: Autor

Figura 5 – Matriz de capacitores quadrada de ordem 2.



Fonte: Autor

2.2 Filtros

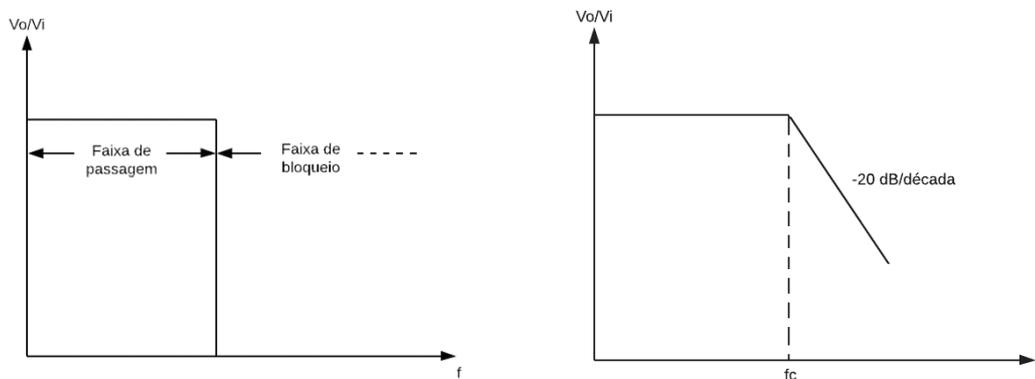
Projeto de filtros eletrônicos é importante para as áreas de sistemas de comunicação e instrumentação. Sua principal finalidade é permitir a passagem de uma determinada parte de um sinal elétrico no espectro de frequência (faixa de passagem). Por outro lado, atenua-se a parte complementar do sinal (faixa de bloqueio), a qual não é de interesse do processo. (SEDRA; SMITH, 2007).

Os filtros podem ser classificados como: passa-baixas, passa-altas, passa-faixa, rejeita-faixa. O nome dos filtros está intrinsecamente associado com a função para a qual ele foi projetado. Por exemplo, projeta-se um filtro passa-baixas para realizar a atenuação, ou corte, a partir de uma determinada frequência, ou seja, as componentes de frequência abaixo daquela

para a qual o filtro foi projetado passam por ele e, conseqüentemente, as componentes de frequência acima da frequência projetada são atenuadas. A frequência de corte é obtida quando o sinal de saída sofre uma atenuação de 3 dB, para filtros de primeira ordem, em outras palavras, a região de corte do filtro inicia-se na frequência em que o sinal de saída decai em 3 dB. Para os demais filtros, um raciocínio análogo pode ser empregado.

Em um filtro passa-baixas ideal (Figura 6a), o sinal é plano na faixa de passagem e, ao atingir a frequência de corte, muda abruptamente para a faixa de bloqueio, região na qual a atenuação do sinal é máxima. Porém, um circuito de filtro prático, logo em sua faixa de passagem realiza uma branda atenuação do sinal (cerca de 0,5 dB) e, diferentemente do ideal, possui uma faixa de transição entre a faixa de passagem e faixa de bloqueio. Mesmo na faixa de bloqueio, o espectro do sinal é não nulo Figura 6b. Espectro é a representação do sinal no domínio da frequência, desta maneira é mais fácil de visualizar as características de atenuação do filtro para cada frequência. A resposta de um filtro passa-baixas de 1ª ordem ideal é apresentada na Figura 6b, na qual observa-se que a atenuação do sinal após passar pelo filtro é de -20 dB/década.

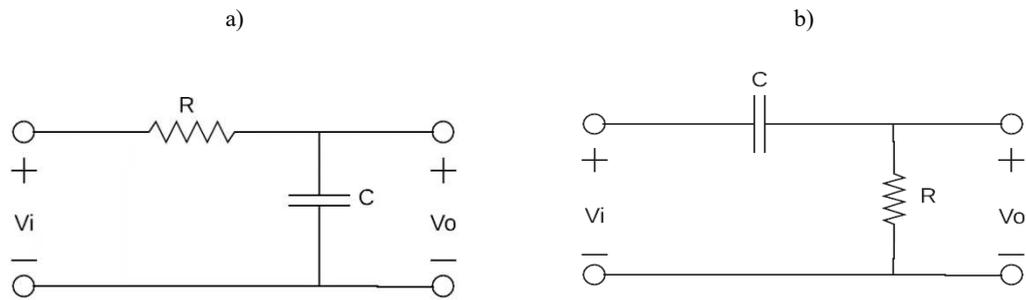
Figura 6 – Resposta de filtros passa-baixas: a) passivo ideal e b) de 1ª ordem.



Fonte: Adaptado de Sedra, Smith (2007) p. 679 e 680

Filtros podem ser implementados de diferentes maneiras. Um dos modos é conhecido como filtro passivo, pois utiliza apenas elementos passivos: resistor, capacitor e indutor. A classificação do filtro depende da posição dos elementos passivos no circuito como mostrado na Figura 7a e Figura 7b, passa-baixas e passa-altas, respectivamente.

Figura 7 – Filtros passivos: a) passa-baixas e b) passa-altas.



Fonte: Adaptado de Sedra, Smith (2007) p. 688

2.2.1 Filtro Ativo de 1ª ordem

Filtro ativo é uma outra forma de implementar filtro eletrônico e é constituído não só por componentes passivos, mas também por ativos, como o amplificador operacional (Amp-Op). Desta maneira, é possível aproveitar os benefícios do Amp Op, por exemplo, baixa impedância de saída que possibilita a ligação em cascata com outros filtros e a possibilidade de projetar um ganho para o sinal de entrada. Contudo, a adição deste elemento ativo limita a operação do filtro em altas frequências. Dois casos deste tipo de filtro podem ser visualizados na Figura 8, onde V_i e V_o representam as tensões de entrada e de saída, respectivamente. Além disso, é possível visualizar um filtro ativo passa-altas, o qual permite a passagem de uma determinada faixa de frequência do espectro do sinal a partir da frequência de corte projetada, atenuando as componentes de menor frequência. Nota-se que a disposição dos elementos passivos – resistor e capacitor – são determinantes para a distinção entre os filtros passa-altas e passa-baixas.

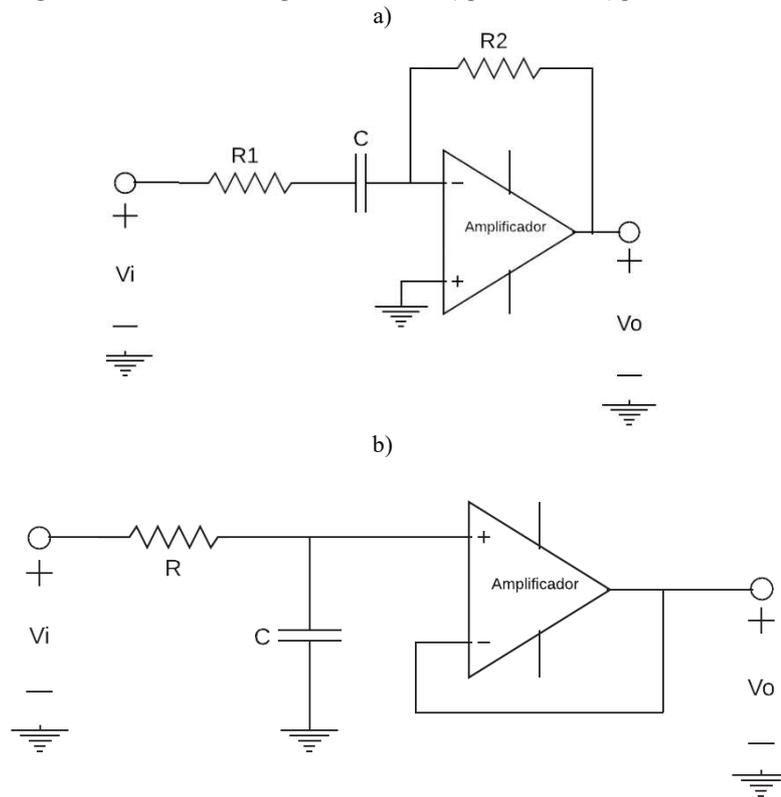
Para definir a equação que descreve o comportamento de um filtro ativo passa-baixas utiliza-se como exemplo, a circuito da Figura 8b. Neste, a faixa de passagem ou frequência de corte (f_c) é controlada pelo resistor R e o capacitor C, conforme

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C} \quad (6)$$

Portanto, ao manipular os valores de C e R, é possível calcular a frequência de corte do circuito. (BOYLESTAD, 2002).

A Figura 8 apresenta esquemáticos de filtros ativos de primeira ordem.

Figura 8 – Filtros ativos de primeira ordem: a) passa-altas e b) passa-baixas.

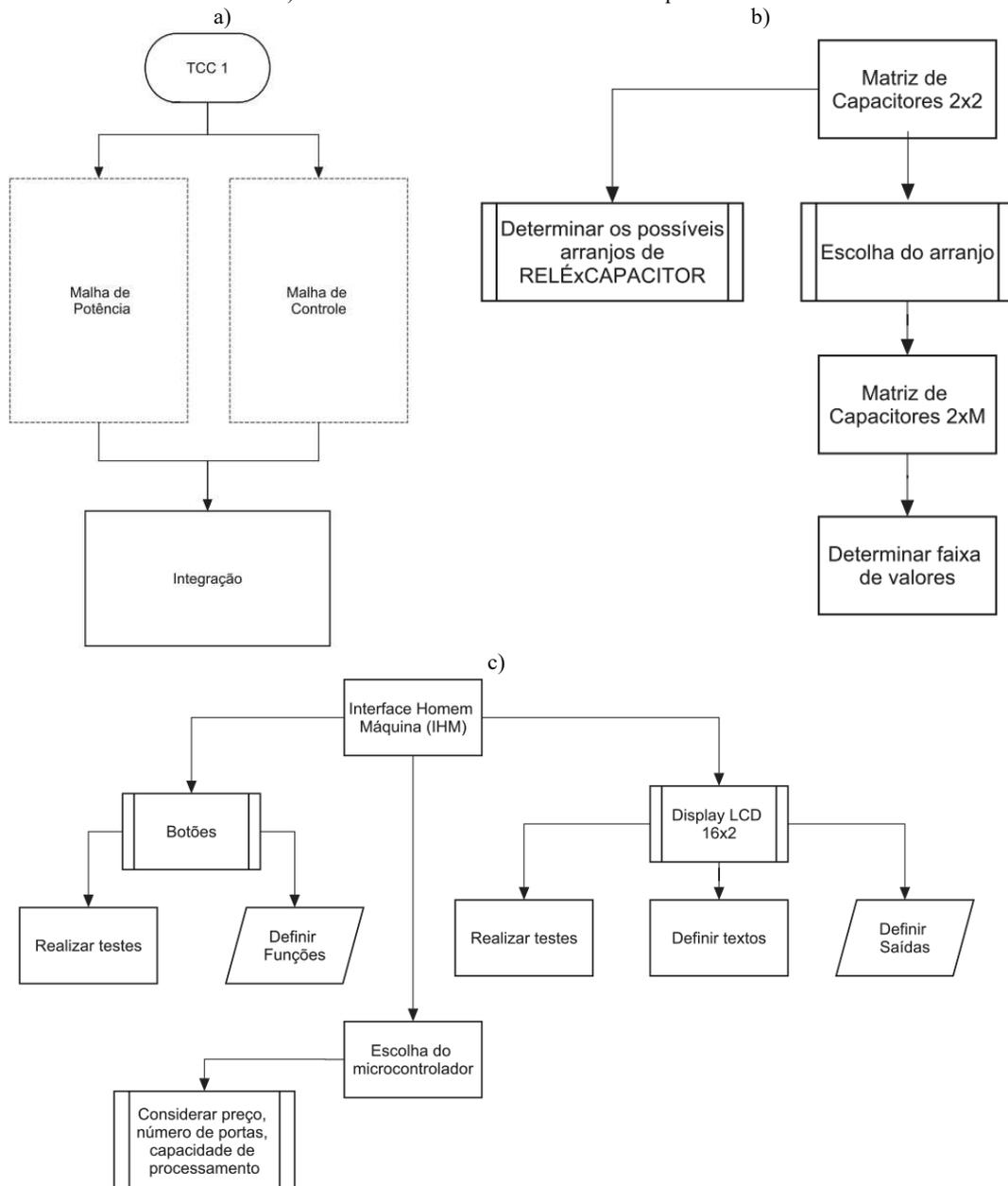


3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção é destinada a explicar acerca da metodologia que é empregada durante o desenvolvimento do trabalho, bem como apresentar os principais materiais envolvidos.

De maneira geral, o trabalho proposto visa integrar algumas áreas do curso de Engenharia Eletrônica, tais como; Eletrônica e Microcontroladores. O planejamento do módulo de capacitor com ajuste automático está estruturado como mostra a Figura 9.

Figura 9 – Fluxogramas do trabalho proposto: a) visão geral, b) desenvolvimento do algoritmo da matriz e c) funcionamento da interface homem-máquina.



Fonte: Autor

Na Figura 9a, a estrutura do trabalho inteiro é composta por dois blocos principais. O lado de potência refere-se a toda parte que envolve projeto de circuitos periféricos e utilização de componentes eletrônicos, tais como, resistores, transistores, optoacopladores e diodos, enquanto no eletrônico é destinado a parte de interação com a unidade de controle, a qual engloba o microcontrolador e o algoritmo executado por ele, sinais de controle dos relés, botões e *display* de cristal líquido. Na Figura 9b é separado em blocos específicos o desenvolvimento do algoritmo para determinar a faixa de capacitância e o funcionamento da matriz, iniciando-se com a dimensão 2x2 e, ao fim, generalizando-se para uma matriz com 2 linhas e M colunas, ou seja, 2xM.

Na Figura 9c observa-se a composição da interface homem-máquina que é o meio por onde o usuário interagirá com o dispositivo projetado. Ressalta-se que é preciso definir quais serão as funções dos botões e as saídas que o *display* mostrará em sua tela. Além disto, considera-se a escolha do microcontrolador.

3.1 Características do projeto

Os tipos de elementos capacitivos utilizados são eletrolíticos (1 μ F) e cerâmicos (22 nF e 120 pF), chaveados por relés eletromecânicos com tensão nominal de 6 V e três contatos (comum, normalmente aberto e normalmente fechado) que são controlados por um microcontrolador PIC 16F877A (33 pinos entrada/saída – E/S). A interface com o usuário é realizada através de três botões e um *display* LCD contendo 16 colunas e duas linhas empregando ao total 9 pinos do microcontrolador.

A alimentação do sistema será externa, por uma fonte DC de 12 V que forneça corrente máxima de 1 A. Para ajustar os níveis de tensões elétricas dos componentes eletrônicos do projeto serão utilizados reguladores de tensão LM7805 e LM7806 que mantêm a tensão em 5 V e 6 V, respectivamente.

A matriz quadrada de ordem dois é estruturada como mostra a Figura 5. A associação de cada unidade capacitiva é comandada pelo microcontrolador, o qual deve ser previamente programado com um algoritmo adequado, vide apêndice A Para a preservação do microcontrolador, há uma isolação das malhas (controle e potência) através de optoacopladores. Estes são responsáveis por acionar os relés eletromecânicos que, por sua vez, fazem a associação dos capacitores, representados por A e B na Figura 5.

O funcionamento da malha de potência, a qual envolve optoacopladores, relés eletromecânicos e capacitores, é avaliado, primeiramente, por meio de simulação de circuitos; software Multisim, ou outro compatível. De posse destes resultados, a próxima etapa é a

implementação dos circuitos em *proto-board* e, por fim, a confecção da placa de circuito impresso.

Para testar o funcionamento do algoritmo programado no microcontrolador, a entrada de dados acontece através dos botões, enquanto que a comunicação com usuário é via tela de cristal líquido - *display* LCD - 16x2. A sequência a ser realizada é: simulação do circuito, seguido de testes de funcionamento com os componentes reais, integração da malha de controle com a malha de entrada e saída de dados e, por último, desenvolvimento da placa de circuito impresso final.

O microcontrolador é o elemento responsável pelo processamento dos sinais elétricos provenientes dos botões, a fim de realizar a escolha do arranjo da matriz, bem como mostrar o valor final da capacitância no *display*. Neste trabalho será utilizado o microcontrolador PIC 16F877A com 40 pinos, possui memória EEPROM de 256 bytes, 33 portas de Entrada/Saída (E/S) digitais divididas em cinco grupos de portas: A, B, C, D e E. A porta A que possui 6 E/S e a porta E com 3 E/S podem ser programadas como entradas analógicas e serem lidas por um conversor analógico digital (MICROCHIP, 2013). O comando da matriz quadrada 2x2 necessita de 4 pinos de saída do PIC. Desta forma, 13 pinos serão utilizados para efetuar o controle do chaveamento e da interface com o usuário. Portanto, os 20 pinos remanescentes do microcontrolador possibilitam a adição de dez módulos da matriz quadrada de ordem 2.

3.1.1 Lista de Materiais

A lista dos principais materiais utilizados para o projeto é apresentada na Tabela 2. Este projeto foi contemplado com uma bolsa no valor de R\$ 1.000,00, pelo Edital 1/2018 – PROGRAD/PROREC – Apoio à Execução de Trabalhos de Conclusão De Curso – TCC.

Tabela 2 – Lista de materiais

Componente	Quantidade
Microcontrolador PIC 16F877A	1
Display LCD 16x2	1
Relé Eletromecânico 6V	4
Optoacoplador 4N25	4
Capacitor Cerâmico	4
Regulador de Tensão 7805	1
Regulador de Tensão 7806	1
Mini borne 2 polos para Placa de Circuito Impresso	1
Barra de Pin Head	3
Conector j4 Fêmea	1
Fonte bivolt de 12 V	1
Caixa Organizadora	1
Kit espaçadores M3	1
Push Buttons	3

Fonte: Autor.

3.2 Metodologia da Validação

Dois métodos para validar o funcionamento da matriz serão empregados. O primeiro consiste em utilizar a matriz de forma a avaliar a resposta em frequência de um filtro ativo passa-baixas de primeira ordem. Já o segundo, será baseado na medição direta da capacitância equivalente da associação dos elementos por um instrumento. Independentemente do método, todos os capacitores da matriz devem ter valores nominais iguais. Além disso, cada método deve ser ensaiado com os três valores comerciais de capacitância: 120 pF, 22 nF, 1 μ F.

3.2.1 Método 1 de Validação

O primeiro método utiliza a matriz de capacitores como o elemento capacitivo de um filtro ativo passa-baixas de primeira ordem, como apresentado na Figura 8b, com frequência de corte regulada para 10 kHz. A frequência de corte deverá ser determinada conforme equação (6.

O ensaio consiste em aplicar um sinal V_i senoidal, de amplitude 1 V de pico e frequência a partir de 100 Hz, na entrada do circuito do filtro ativo. O parâmetro a ser medido e registrado é o ganho de tensão A_V (em dB ou V/V) do filtro, que é a tensão na saída do filtro sobre a tensão de entrada. Para cada valor de frequência do sinal de V_i deve ser registrado seu respectivo valor de A_V . A faixa de frequência do sinal V_i será variado de 100 Hz a 100 kHz e a quantidade mínima de pontos nesta faixa é de quinze amostras. Este procedimento deve ser realizado para todas as combinações de capacitância da matriz.

Desta forma, ao medir o ganho de tensão do filtro para cada frequência, é possível determinar o valor da sua frequência de corte. Uma vez que, o valor da resistência é mantido fixa, a frequência de corte do filtro é controla pelo valor da capacitância equivalente conectada no circuito.

Dada a frequência de corte de 10 kHz, calcula-se os valores das resistências necessárias para todas as capacitâncias. A saber, os resistores comerciais escolhidos são: 132 k Ω ; 680 Ω e 16 Ω , para os capacitores 120 pF, 22 nF e 1 μ F, respectivamente.

3.2.2 Método 2 de Validação

O segundo método é a medição direta da capacitância equivalente da associação dos elementos por um instrumento. Além disso, deve ser realizada uma comparação entre o valor de capacitância medida na matriz de capacitores e a capacitância medida pela associação manual dos mesmos elementos capacitivos.

As medidas serão efetuadas utilizando o dispositivo *Agilent U1731A Medidor LCR*, se atentando às particularidades do produto e seguindo instruções conforme consta no manual. Serão utilizadas pilhas novas e será feita calibração em aberto do equipamento antes de realizar cada medida.

O procedimento será reproduzido com base no manual da fabricante (AGILENT TECHNOLOGIES, 2013) seguindo os seguintes passos:

- i. Pressionar a tecla para ligar;
- ii. Pressionar a tecla de seleção *L/C/R* e escolher *C*;
- iii. Conectar as pontas de teste nos terminais da associação de capacitores;
- iv. Selecionar a frequência de teste;
- v. Anotar o valor do display.

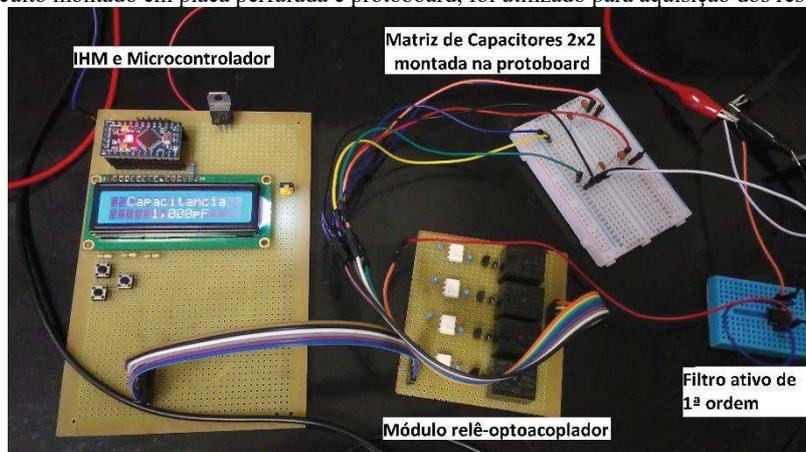
4 RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos através dos métodos de validação percorridos na seção 3.2. Utilizando a placa de testes foram realizados ambos os métodos e na placa final somente o segundo.

4.1 Versão preliminar

O circuito para aquisição dos resultados com botões, *display* e relés foi montado em placa perfurada, e a matriz de capacitores foi montada em *proto-board*, por oferecer mais agilidade na substituição dos capacitores, ambos podem ser visualizados na Figura 10. Devido a problemas com o microcontrolador PIC 16F877A foi utilizado para a coleta dos dados o Arduino Pro Mini que é um microcontrolador baseado no ATmega328p. Possui 14 saídas/entradas digitais (das quais 6 podem ser usadas como saídas PWM), 8 entradas analógicas e botão de *reset*. O programa utilizado neste microcontrolador foi adaptado diretamente do programa feito para o PIC 16F877A, apenas a sintaxe do código foi ajustada.

Figura 10 – Circuito montado em placa perfurada e proto-board, foi utilizado para aquisição dos resultados.

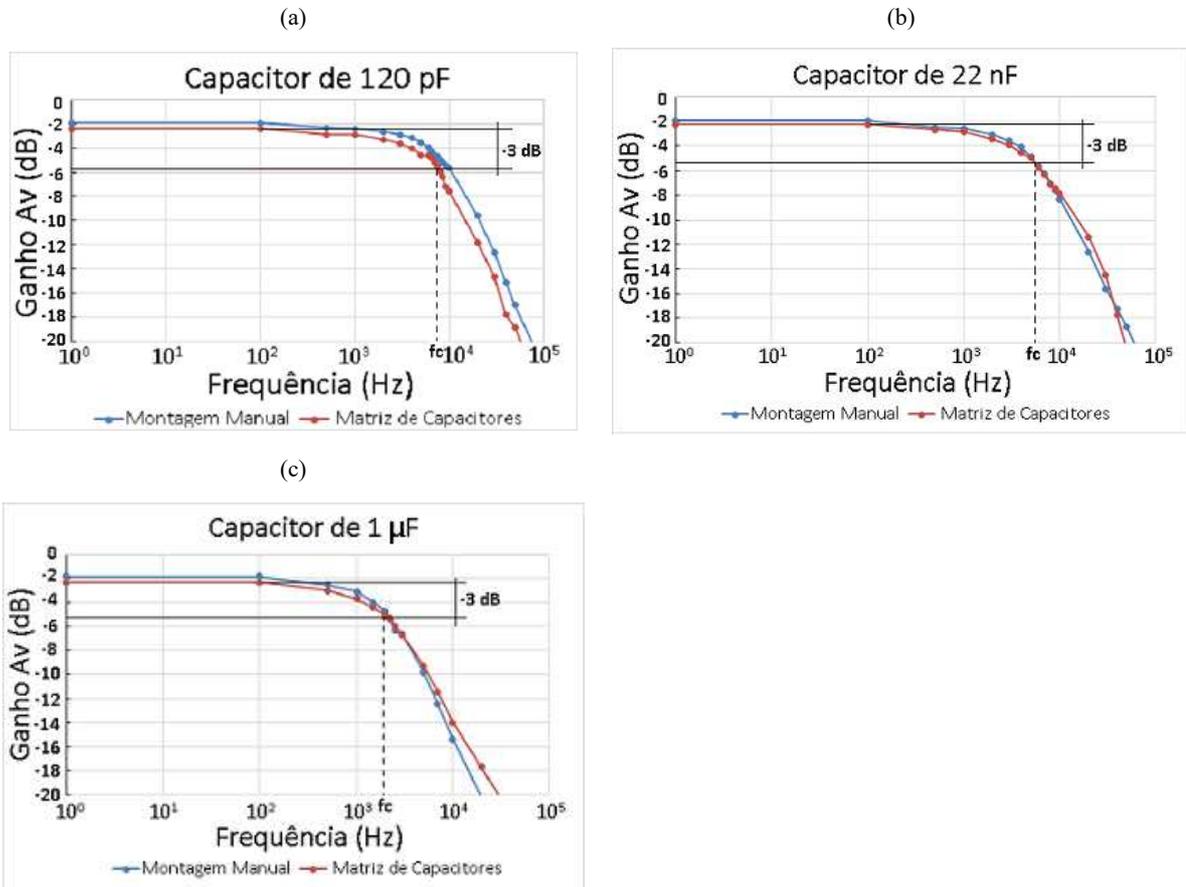


Fonte: Autor.

A resposta em frequência do filtro ativo passa-baixas de primeira ordem foi obtida com os capacitores associados de forma manual no circuito e também utilizando a matriz de capacitores, as curvas geradas podem ser visualizadas na Figura 11. É possível observar que as curvas não apresentam uma diferença significativa de valores entre os dois procedimentos nas regiões de passagem e de bloqueio, possibilitando a utilização da matriz de capacitores com ajuste automático para este fim. Além disso, a resposta do filtro é semelhante à curva teórica (Figura 6b). Para o circuito com capacitor de 120 pF a inclinação da curva na região do corte foi de 17,3 dB por década, para o de 22 nF a inclinação foi de 16 dB por década e para o de

1 μF a inclinação foi de 12,5 dB por década. Como demonstrado na Figura 11, a atenuação do filtro quando utilizado a matriz de capacitores ou o próprio capacitor é muito parecida.

Figura 11 – Resposta em frequência do filtro ativo passa-baixas de primeira ordem com capacitores associados de forma manual e com a matriz automática: a) Capacitor de 120 pF, b) Capacitor de 22 nF e c) capacitor de 1 μF .



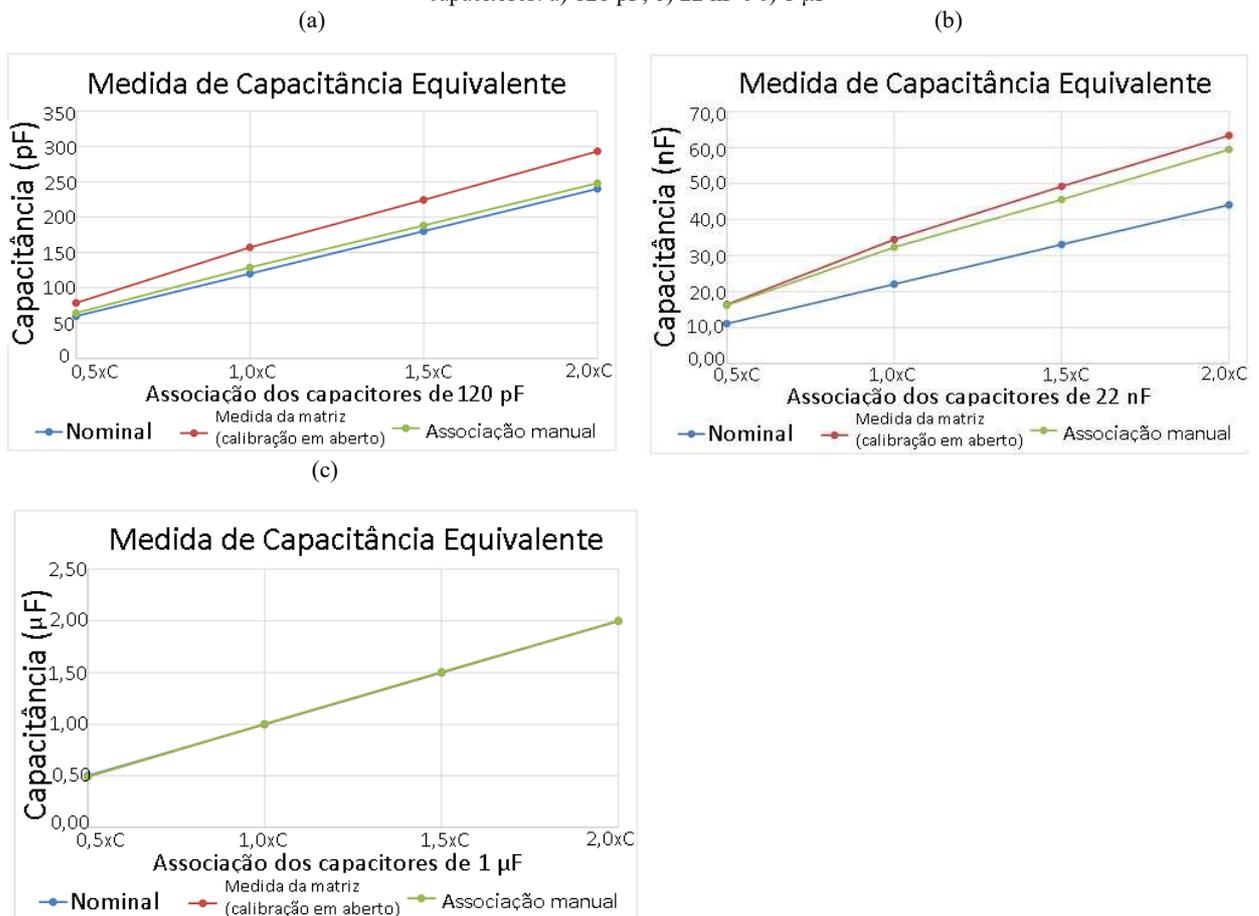
Há uma discrepância inerente ao se comparar os resultados medidos em uma associação de capacitores com resultados calculados. Esta diferença acontece devido a não idealidades, tanto no dispositivo utilizado para realizar a medida, quanto nos próprios objetos da medida.

Os capacitores cerâmicos utilizados possuem tolerância de 20%. Desta forma, não foi utilizado como critério de comparação o valor calculado de capacitância, e sim, os valores medidos na matriz de capacitores com ajuste automático e no circuito com associação de capacitores de forma manual.

Para valores muito pequenos de capacitância, ou seja, algumas centenas de picofarad, a chamada capacitância parasita tem uma influência considerável nos valores medidos, veja Figura 12a, este fenômeno acontece quando dois condutores paralelos estão relativamente próximos e existe um dielétrico entre eles, exatamente o mesmo efeito em que os capacitores são baseados. Para frequências baixas, de até uma centena de quilohertz, o efeito parasita não

fica tão evidente, porém, para altas frequências, apresenta distorções na ordem de picofarad, e se a capacitância equivalente estiver nesta mesma ordem de grandeza as medidas assumem um valor errôneo. Portanto, para valores de capacitância maiores, superiores a ordem de nanofarad, a matriz pode ser utilizada sem prejuízos se comparada à associação manual.

Figura 12 – Capacitância equivalente medida na matriz automática e na associação manual com diferentes valores comerciais de capacitores: a) 120 pF, b) 22 nF e c) 1 μ F



Fonte: Autor

Ressalta-se que o efeito da capacitância parasita pode ter se acentuado durante a aquisição das medidas de capacitância, pois a matriz de capacitores havia sido montada em uma *proto-board* com vários condutores para efetuar as interligações. Portanto, quando a matriz for montada em placa de circuito impresso, apesar das possíveis capacitâncias parasitas entre as trilhas, a ordem de grandeza deste fenômeno indesejado pode ser menor.

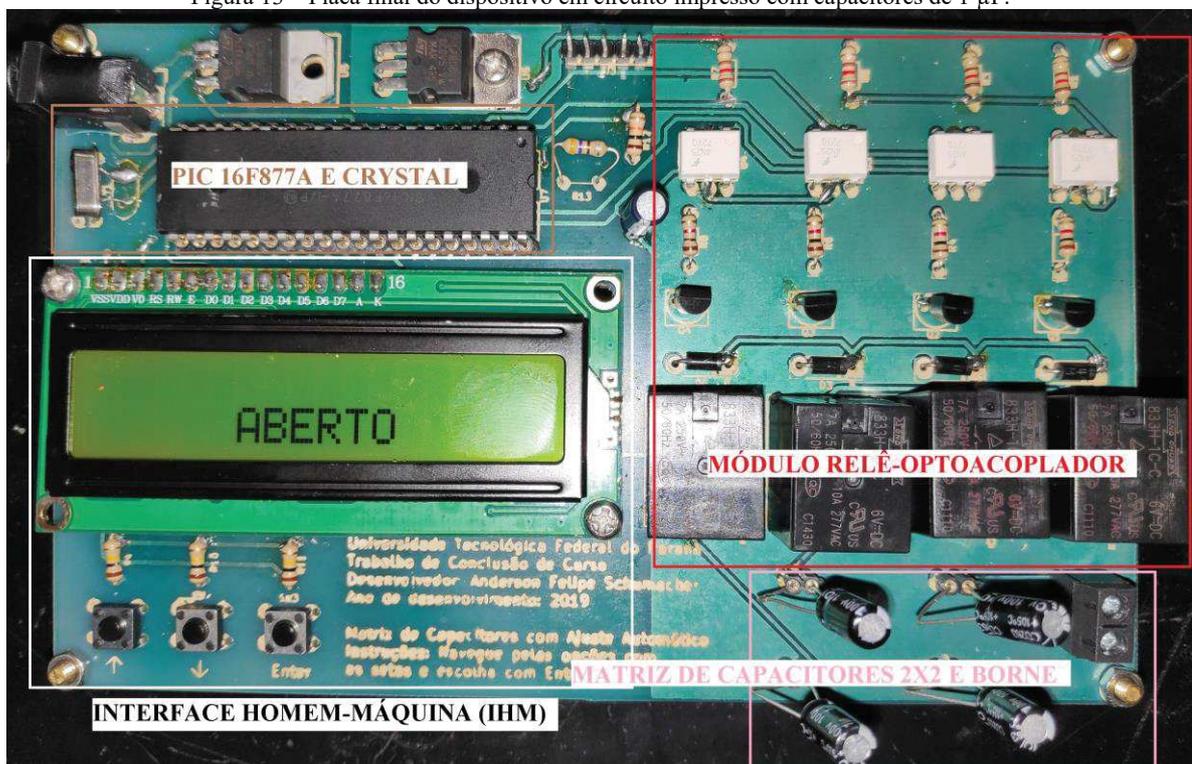
Devido a variação dos valores no visor do medidor LCR, por questão de padronização, os resultados foram coletados após uma estabilização dez segundos depois da conexão nos terminais da matriz. Os resultados coletados estão na Figura 12.

4.2 Versão Final da Placa

A placa de circuito impresso final do módulo é ilustrada na Figura 13. A validação do circuito se deu pelo método 2, conforme subseção 3.2.2, e os dados obtidos são apresentados na Figura 14. O esquema elétrico e o *layout* da placa podem ser vistos nos Apêndices , respectivamente.

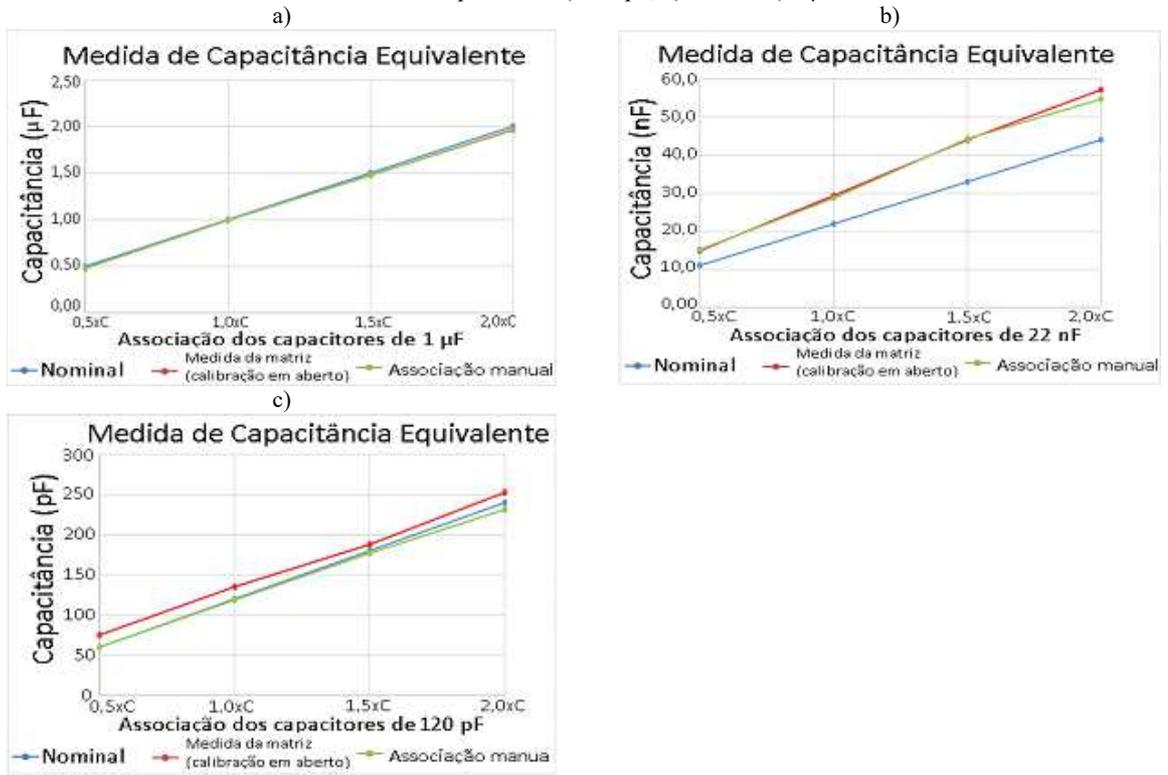
Durante o teste de funcionamento da placa, observou-se que, mesmo com circuito desligado, ao conectar os terminais do medidor (*LC meter*) nos bornes de saída do módulo, há uma capacitância parasita de 19,5 pF. No primeiro momento, quando as medidas foram feitas por meio da placa de teste, observou-se uma alteração dos valores de capacitância que foram atribuídos a uma possível capacitância parasita causada pela protoboard e os jumpers utilizados. Porém, agora com os resultados obtidos através da placa de circuito impresso, constatou-se que, realmente, há a presença de uma capacitância parasita e, descartou-se a possibilidade de esta estar relacionada com a protoboard e os jumpers. Portanto, existe uma capacitância parasita no circuito e, o seu valor é de 19,5 pF, nos modos de operação desligado ou/e em aberto.

Figura 13 – Placa final do dispositivo em circuito impresso com capacitores de 1 μ F.



Fonte: Autor.

Figura 14 – Capacitância equivalente medida nos bornes da PCB e na associação manual com diferentes valores comerciais de capacitores: a) 120 pF, b) 22 nF e c) 1 μF



Fonte: Autor

5 CONCLUSÃO

O dispositivo banco de capacitores com ajuste automático desenvolvido na configuração matriz 2x2 mostrou ser uma possível solução para aplicação de filtros ativos, indicando que pode ser empregado como uma ferramenta instrucional em disciplinas de Engenharia Elétrica e Eletrônica. Empregando o dispositivo como um elemento capacitivo de um filtro ativo de primeira ordem, foi possível avaliar a resposta em frequência do filtro, comparando-a com o resultado da associação manual de capacitores, para três valores de capacitância: 120 pF, 22 nF e 1 μ F. Para o capacitor de 1 μ F a diferença foi de +9,76 %, com o capacitor de 22 nF apresentou discrepância de +5,88 % e, para o capacitor de 120 pF, variou em -18,75 %, todas as variações são em relação à frequência de corte com associação manual. Não obstante, com o segundo método de validação foi obtido capacitâncias equivalentes com diferenças em torno de 0,2 % para os capacitores de 1 μ F, 6 % para os capacitores de 22 nF e valor máximo de 18,12 % para os capacitores de 120 pF.

De maneira semelhante, os resultados de capacitância equivalente com a placa de circuito impresso, pelo segundo método, apresentou desvios máximos de -0,12 %, 4,3 % e 20,32 %, para os capacitores de 1 μ F, 2 nF e 120 pF, respectivamente.

O produto apresentou um consumo máximo de energia de 3,55 Wh e necessita de uma fonte de alimentação com tensão na faixa de 8 V a 20 V e pelo menos 500 mA para funcionar adequadamente.

Como sugestões de melhorias futuras têm-se a utilização de um microcontrolador com menos portas e menos recursos, já que só é utilizado leitura e escrita de portas digitais, adicionar LEDs para indicar quais relés estão ligados, aumentar o número de capacitores e relés por módulo, utilizar apenas um regulador de tensão para ligar tanto o microcontrolador quanto os relés, aumentar o número de módulos capacitivos e relés, para assim, alcançar uma maior faixa de capacitância e também utilizar outras combinações de associação com diferentes disposições dos relés e diferentes valores de capacitância. Na alimentação do dispositivo, pode-se fazer uma fonte interna, de modo que, baste apenas um cabo simples para ligá-lo a tomada. Como indicado na seção 3.1, com as 20 portas remanescentes no microcontrolador utilizado – PIC 16F877A - é possível ligar mais 10 módulos iguais aos já utilizados, com 2 capacitores e dois relés cada, possibilitando alcançar a faixa de capacitância equivalente de $0,5C \leq C_{eq} \leq 12C$.

Dentre as dificuldades enfrentadas está que, não foi possível encontrar nenhum trabalho semelhante, trabalho algum que utilize um grupo de capacitores para alterar um parâmetro que não, o fator de potência. Isto torna o presente trabalho de certa forma original, porém exclui a

possibilidade de comparação de métodos e resultados. Consequentemente, houve dificuldades em encontrar possíveis aplicações para o dispositivo.

6 REFERÊNCIAS

AGILENT TECHNOLOGIES. Agilent U1731A/U1732A dual display handheld LCR meter user's and service guide. 6. Ed. Malaysia: [s.n], 2013. p. 11 e 22.

ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. **Fundamentos de circuitos elétricos**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. p. 196-197.

BOYLESTAD, R. L. **Introdução à análise de circuitos**. 12. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2012.

BRASIL. Agência nacional de energia elétrica. **Resolução normativa nº 414**: Condições gerais de fornecimento de energia elétrica de forma atualizada e consolidada. 2010. p. 130-134.

BRASIL. Agência nacional de energia elétrica. **Resolução normativa nº 547**: Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional. 2013.

BRASIL. Programa nacional de conservação de energia elétrica. **Manual de tarifação da energia elétrica**. 2011. p. 30-31.

CAPACITOR GUIDE. **Types of Capacitors**. Disponível em: <www.capacitorguide.com/types> Acesso em: 16 de abril de 2018.

COMPANHIA PARANAENSE DE ELETRICIDADE. **Fator de potência**: em busca da eficiência energética nas instalações elétricas. 2017.

CORREÇÃO de fator de potência. Apresenta tipos de banco de capacitores. Disponível em: <<http://www.awstrom.com.br/servicos/projetos-e-estudos-eletricos/correcao-do-fator-de-potencia>> Acesso em: 15 de abril de 2018.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações elétricas industriais**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. p. 176-181.

MICROCHIP. **PIC 16F87XA**: folha de dados. USA, 2013. p. 1.

MUNDO DA ELÉTRICA. **Tipos de Capacitores**. Disponível em: <<https://www.mundodaeletrica.com.br/tipos-de-capacitores/>> Acesso em: 16 de abril de 2018.

PEÑA, W.Y. et al. **Monitoreo, control y diagnóstico en bancos de capacitores automáticos en baja tensión**. Ingeniare. Rev. chil. ing., Arica, vol. 26, n. 1, p. 28-42, 2018.

PEREIRA, F. **Microcontroladores PIC**: técnicas avançadas. São Paulo: Érica, 2002. p. 17-19.

REIS, J. C. S. D.; KIKUCHI, G. T. **Banco de capacitores para correção de fator de potência em indústria**. São José dos Campos, 2015.

SABER ELÉTRICA. **Entenda o Funcionamento, Tipos e Para Que Serve o Capacitor**. Disponível em: <<https://www.sabereletrica.com.br/entenda-o-funcionamento-dos-capacitores/>> Acesso em: 16 de abril de 2018.

SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microeletrônica**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007. p. 678-689.

SIEMENS AG. **Soluções para correção do fator de potência**: catálogo. São Paulo, 2016.

WEG. **Controladores automáticos de fator de potência**. Disponível em: <<http://old.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Controls/Capacitores-e-Correcao-do-Fator-de-Potencia/Controladores-automaticos-do-Fator-de-Potencia>> Acesso em: 15 de abril de 2018.

WEG. **Controlador Automático de Fator de Potência PFW01**: Manual de Instalação, Operação e Manutenção. Jaraguá do Sul, 2013.

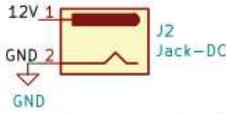
APÊNDICE A – CÓDIGO FONTE DO PROGRAMA UTILIZADO NO PIC 16F877A E ARDUINO PRO MINI

https://github.com/andersonschumacher/codigo_pic_16F877A.git

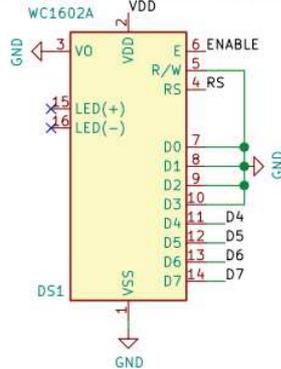
https://github.com/andersonschumacher/codigo_arduino_pro_mini.git

APÊNDICE B – ESQUEMA ELÉTRICO

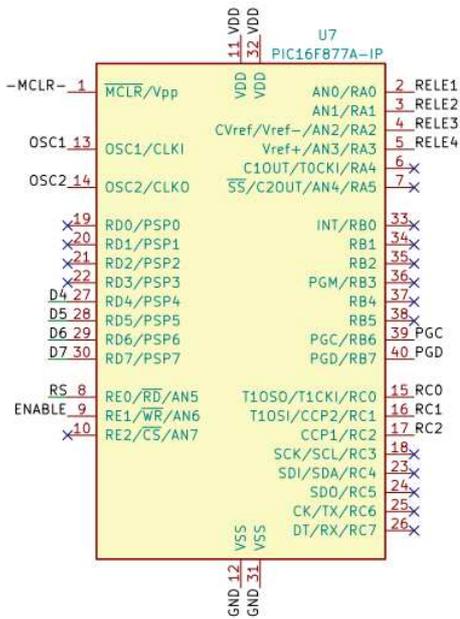
ENTRADA DE ALIMENTAÇÃO



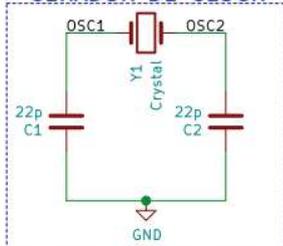
DISPLAY DE CRYSTAL LÍQUIDO



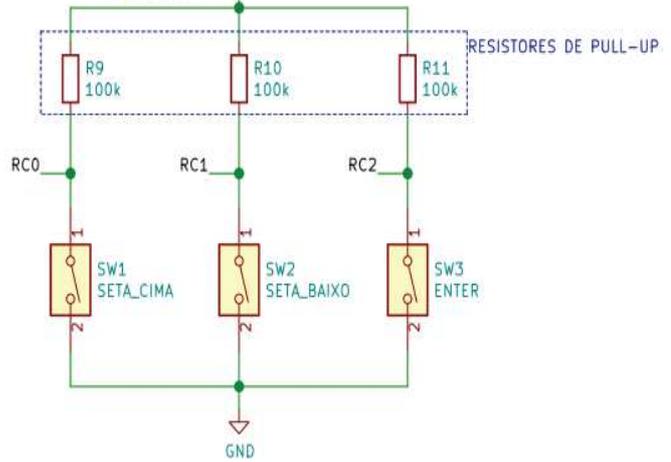
MICROCONTROLADOR PIC16F877A



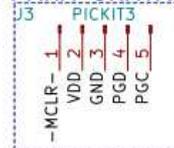
GERADOR DE CLOCK



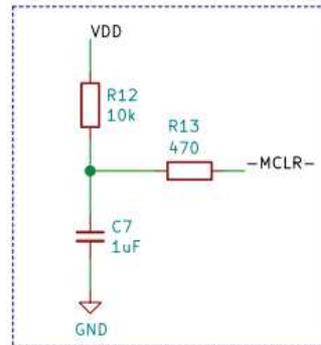
BOTÕES



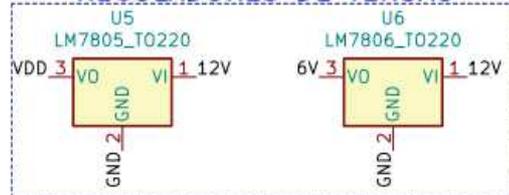
PINOS PARA GRAVAÇÃO PICKIT3



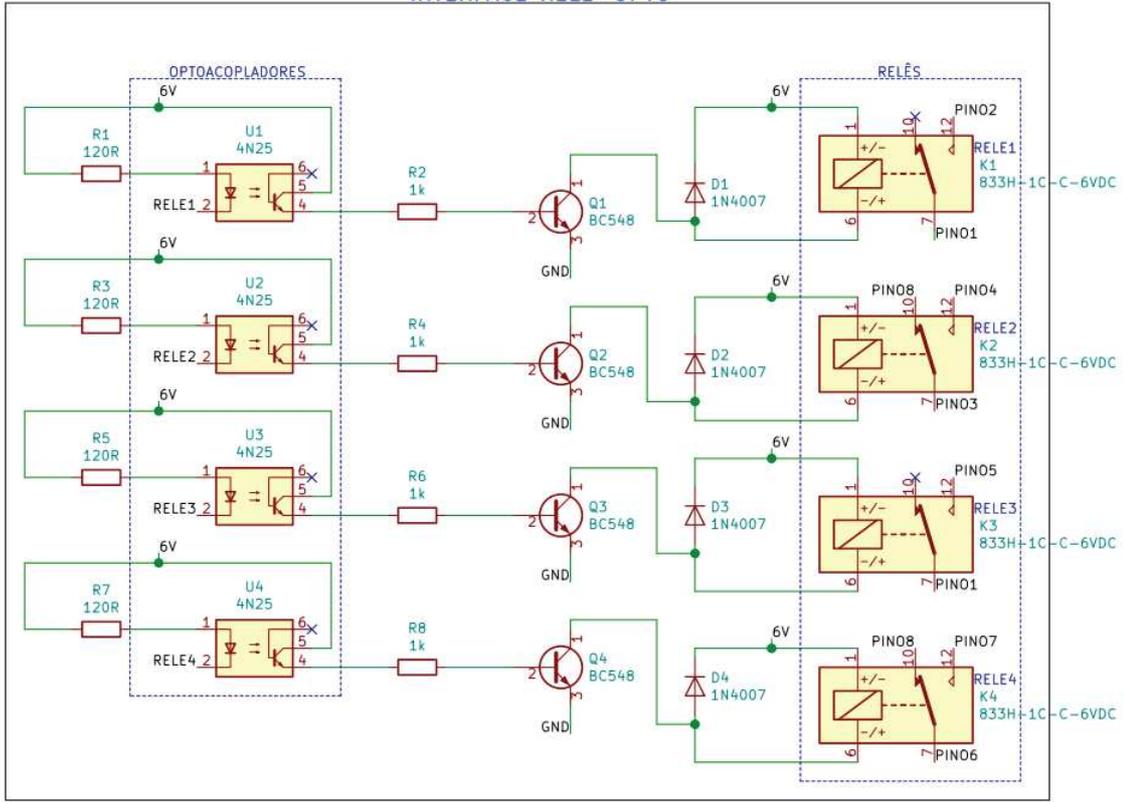
CIRCUITO DE PULL UP E ESTABILIZAÇÃO PARA PROGRAMAÇÃO



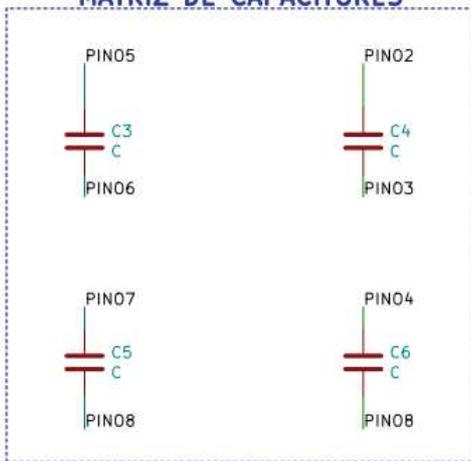
REGULADORES DE TENSÃO



INTERFACE RELE-ÓPTO



MATRIZ DE CAPACITORES

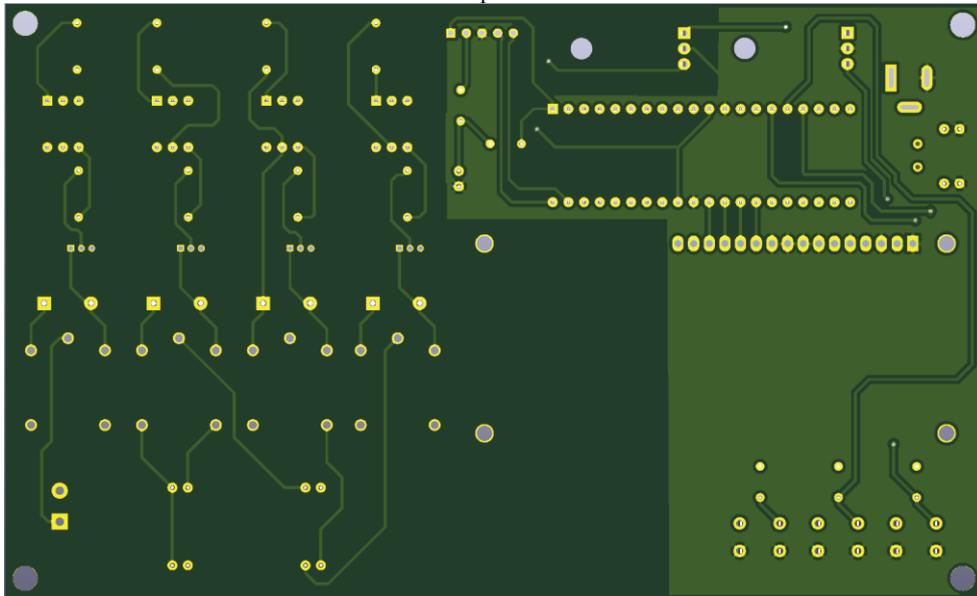


TERMINAIS PARA UTILIZAÇÃO DA MATRIZ



APÊNDICE C – PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

Vista posterior



Vista frontal

