

# CONTROLE DE EXCITAÇÃO ESTÁTICO MICROCONTROLADO DE GERADORES SÍNCRONOS

G. H. Alves<sup>1</sup>, L. Rogério Júnior, T. B. C. Alves<sup>1</sup>, L. Martins Neto<sup>1</sup>, F. A. S. Gonçalves<sup>1</sup>, L. A. Silva<sup>2</sup>, W. Gigo<sup>2</sup>, A. C. Lemos Junior<sup>2</sup>

Universidade Federal de Uberlândia<sup>1</sup>, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia/MG, Brasil  
Faculdade de Talentos Humanos<sup>2</sup>, Uberaba/MG, Brasil

E-mail: guilherme.henrique.alves@outlook.com, lucio.rogerio@hotmail.com, thiagocanuto.feelt@gmail.com, lmn@ufu.br, felipeadrianosg@gmail.com, lasilva@factus.edu.br, wgigo@factus.edu.br, antonioclj@gmail.com

**Resumo** - Este projeto aborda uma proposta para aplicação de um controle de excitação estático manual e automático, em um gerador síncrono de 2 kVA através de uma malha PID digital, utilizando um microcontrolador PIC16f877a da empresa *Microchip Technology*.

**Palavras Chave** - Sistema de Excitação, Gerador Síncrono, Regulador Automático de Tensão, Controle PID, Microcontrolador PIC

## MICROCONTROLLED STATIC EXCITATION CONTROL SYSTEM OF SYNCHRONOUS GENERATORS

**Abstract** - This project discusses a proposal for applying a control manual and automatic static excitation, in a synchronous generator 2 kVA through a digital PID loop using a PIC16f877a microcontroller company *Microchip Technology*.

**Keyword** - Excitation System, Synchronous Generator, Automatic Voltage Regulator, PID Control, PIC Microcontroller

### NOMECLATURA

Duty Cycle	Ciclo de trabalho do PWM.
PWM	Modulação por Largura de Pulso.
Amp Op	Amplificador Operacional.
Set Point (SP)	Valor Desejado.
MV	Variável Manipulada.
PV	Variável de Processo.
$V_l$	Tensão Entre Linhas.
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

## I. INTRODUÇÃO

Os avanços nos sistemas de controle da excitação nos últimos vinte e cinco anos tem sido influenciados pelas melhorias dos dispositivos eletrônicos. Desenvolvimentos nos circuitos analógicos integrados têm possibilitado a implementação de estratégias de controle complexas. O último desenvolvimento nos sistemas de excitação tem sido a introdução da tecnologia digital. Os tiristores continuam a serem usados no estágio de potência. As funções de controle, de proteção e lógicas têm sido implementadas digitalmente, essencialmente duplicando as funções previamente proporcionada pelo circuito analógico [1].

Os controles digitais deverão ser ainda extensivamente usados no futuro, já que eles fornecem um alternativa mais barata e possivelmente mais confiável que os controles analógicos. Além disso, eles possuem a vantagem de serem mais flexíveis, facilitando a implementação de estratégias de controle mais complexas, e permitindo a realização de interface com outras funções de controle e proteção do gerador [1].

Este artigo foi dividido em cinco partes: a introdução nesta seção; o controle da excitação na seção II, onde apresenta os dois principais circuitos utilizados no projeto; As ações básicas de controle na seção III, onde apresenta a forma que foi desenvolvido o algoritmo de controle; na seção IV apresenta os resultados práticos obtidos com o gerador síncrono de 2kVA em funcionamento à vazio; e finalmente a seção V, com as conclusões.

## II. CONTROLE DA EXCITAÇÃO

O regulador automático de tensão é um sistema inteligente de controle da saída de uma excitatriz de modo a gerar mudanças na tensão e energia reativa na forma desejada. Antes os sistemas de regulação de tensão era completamente manual. Assim, o operador observava a tensão terminal e ajustava o reostato de campo (o regulador de tensão) até observar a condição de saída pretendida. Na maioria dos sistemas modernos, o regulador automático de tensão é um controlador que detecta a tensão de saída do gerador, em seguida, inicia a ação corretiva, alterando as ações do controle de excitação no valor desejado [2].



Os sistemas de controle de excitação devem detectar com bastante rapidez as mudanças causadas pela entrada de carga e atuar no sistema de excitação com eficiência, para retornar as condições normais de funcionamento da máquina. Uma alternativa bastante eficaz para resolver esta situação, é a utilização de ferramentas com controle digital e drives com dispositivos semicondutores de potência.

Neste trabalho foi utilizado como principais componentes para estas tarefas um microcontrolador PIC 16f877a para medição e controle e o transistor MOSFET IRFP264 para o drive de acionamento do campo.

### A. Drive de Acionamento

O circuito drive de acionamento (figura 1) é composto por uma fonte CC de +180V/1A, para alimentação do indutor de campo do gerador síncrono, duas fontes menores de níveis +12V/100mA e -5V/100mA, para alimentação restante do circuito e um circuito oscilador PWM com ajuste manual, composto por um CI 555 na configuração astável, uma chave seletora para controle manual ou automático e um módulo drive utilizando como elemento chaveador o MOSFET IRFP264 de alta velocidade e capacidade de corrente de dreno contínua de até 38A. A figura 2 mostra o circuito em funcionamento para controle.

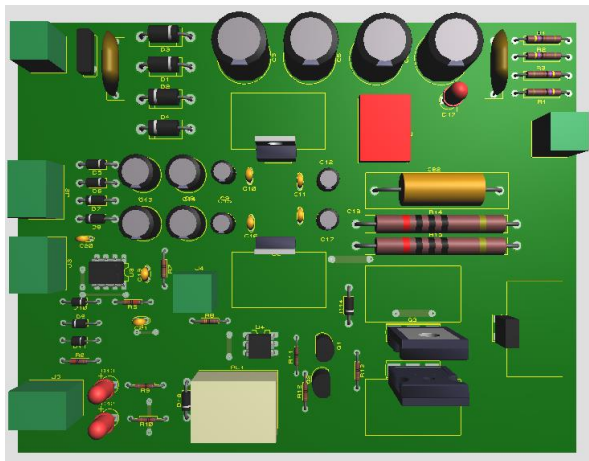


Fig. 1. PCI do drive de acionamento, software Proteus 8.0.

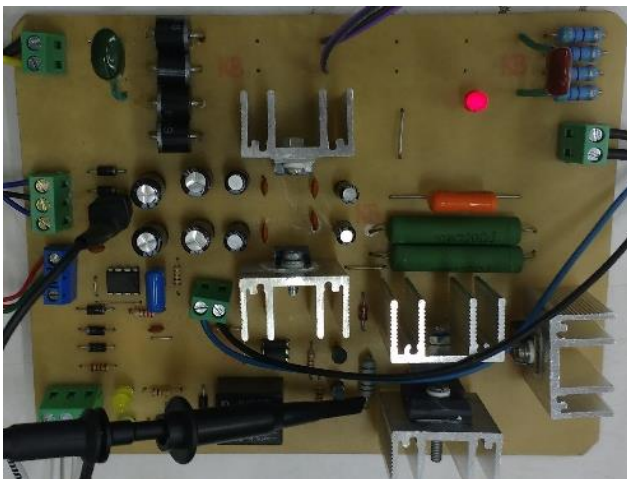


Fig. 2. Circuito drive em funcionamento.

O esquema elétrico completo do drive pode ser visto na figura 12, Apêndice I.

### B. Medição e Controle

O circuito de medição e controle é composto por um circuito de aquisição, atenuação e retificação do valor de tensão de linha dos terminais da máquina síncrona. Um transformador 220/12V amostra o sinal, que é retificado e enviado para um comparador composto por Amp Op LM324, que ajustam o valor medido entre 0 a 5V e envia para a porta analógica RA0 (pino 2), do microcontrolador PIC16f877a.

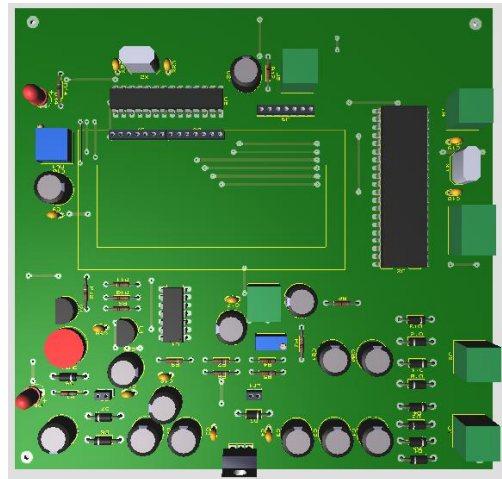


Fig. 3. PCI do sistema de controle, software Proteus 8.0.

Outro bloco do circuito realiza a tarefa de medição e amplificação do sinal de temperatura do estator através do sensor LM35 e dois Amp Op LM324 com ganho igual a 4.

Uma fonte de +6V alimenta todo o circuito de controle e amplificação, e um conjunto teclado alfanumérico 3x4 e display de cristal líquido 16x2 realizam a interface entre homem máquina para os ajustes dos ganhos PID e monitoração de tensão e temperatura do sistema.

Através das opções no menu do display de cristal líquido, existe a possibilidade de utilizar o controle PWM em malha fechada ou aberta conforme a necessidade do ajuste.

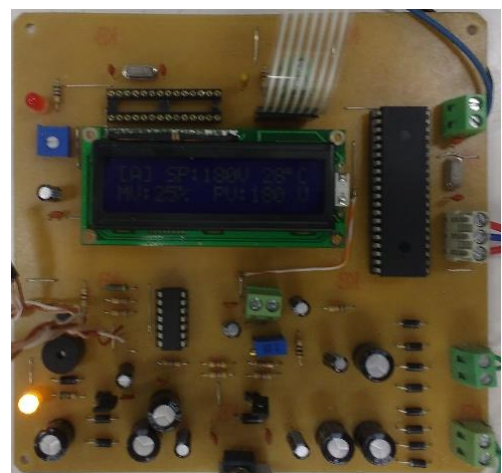


Fig. 4. Circuito de controle em funcionamento.

O esquema elétrico completo do drive pode ser visto na figura 13, Apêndice I.

### 1) Microcontrolador PIC16f877a

Para todo mecanismo de controle, foi utilizado um microcontrolador PIC 16f877a, invólucro DIP (*Dual in Line Package*) com 40 pinos, conforme mostra a figura abaixo:

As suas características principais são:

- \* Arquitetura da CPU tipo RISC;
- \* Apenas 35 instruções;
- \* Frequência de operação de até 20 MHz e 200 ns para os ciclos de instruções;
- \* Até 8K x 14 palavras de programação para memória flash;
- \* Até 368 x 8 bytes de dados para memória (RAM);
- \* Até 256 x 8 bytes de dados para EEPROM;
- \* Timer 0: Timer/contador de 8 bits prescaler;
- \* Timer 1: Timer/contador de 16 bits com prescaler, que pode ser incrementado durante o estado Sleep, via cristal externo;
- \* Timer 2: Timer/contador com 8 bits com registrador de período, prescaler e postscaler;
- \* Módulo CCP (Comparador, Captura e PWM):
- \* PWM com resolução máxima de 10 bits.
- \* Canal de conversão analógico para digital (A/D) de 8 até 10 bits de resolução;

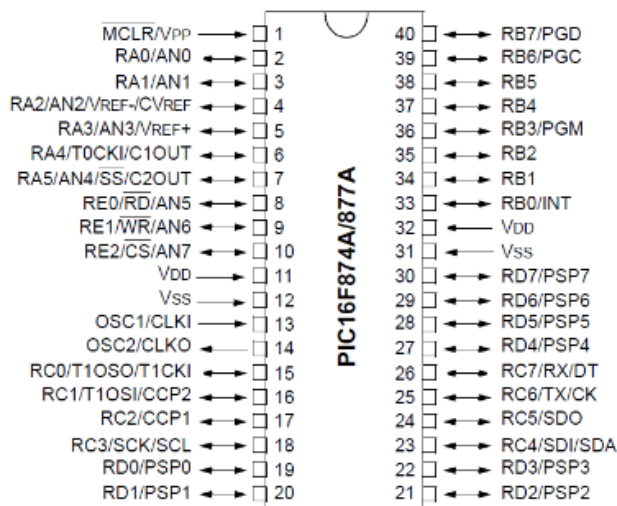


Fig. 5. Microcontrolador PIC16f877a invólucro DIP com 40 pinos [3].

### 2) Menu inicial e tela de monitoramento

O regulador possui um display de cristal líquido 16x2 com a função principal de interface entre o operador e a máquina.

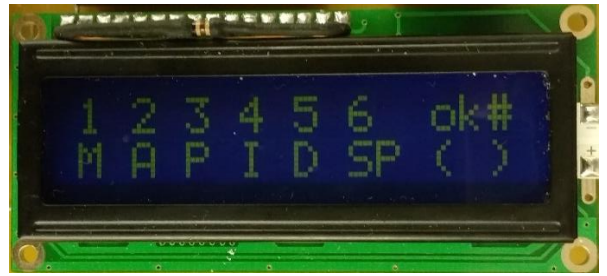


Fig. 6. Tela de menu, para inserir o Set Point, ganhos Kp, Ki, Kd e ajuste manual ou automático.

Através de um menu inicial de fácil operação, figura 6, pode se realizar todas as configurações pertinentes do controle automático, como ajustes de ganhos do PID, Set Point e inicialização do controle em manual ou automático, conforme a necessidade do operador.

Quando algum botão no teclado alfanumérico é pressionado, um sinal sonoro é ativado para facilitar a rotina de ajuste do operador local.

Toda vez que o controlador é ajustado para iniciar o controle, seja em manual ou automático, uma rotina de monitoração é apresentada no menu, para informar ao operador os valores atualizados do *Set Point* (SP), PWM (MV),  $V_l$  (PV) e temperatura do estator da máquina, conforme mostra a figura 7.



Fig. 7. Tela de monitoria do Set Point, MV, PV e temperatura do estator da máquina síncrona.

### 3) Configurações básicas da saída PWM com PIC16f877a

Utilizou-se como saída do microcontrolador o pino 17, configurado no registro *CCP1* do chip como modo PWM de 10 bits de resolução e período pré-ajustado em 1ms através do *prescaler* do *timer2* e da variável inicial de contagem de tempo como mostra a relação abaixo.

$$PWM \text{ Freq} = \frac{\text{Frequência do Cristal}}{(\text{Carga do timer2} + 1) * (\text{Timer2 Prescaler}) * 4}$$

O *prescaler* do *timer2* pode ser de 1, 4 ou 16.

A carga do *timer2* que também é chamada de período, pode ser neste microcontrolador de 0 a 1023 (10 bits).

No projeto utilizou-se o período em 249, o *prescaler* do *timer2* em 16 e a um cristal externo com frequência de 16 MHz. Com isso obtém-se uma frequência para o PWM de 1 kHz.

### III. AÇÕES BÁSICAS DE CONTROLE

Um controlador automático compara o valor real da grandeza de saída do processo (PV) com a grandeza de referência (Set Point), determina o desvio e produz um sinal de controle que reduzirá o desvio a zero ou a um valor pequeno. A maneira pela qual o controlador automático produz o sinal de controle é chamada *ação de controle* [4].

Neste projeto, o valor real de saída do processo é a tensão terminal do gerador síncrono, que é medido e calibrado para uma faixa proporcional de 0 à 5V e enviado para a porta analógica RA0 do PIC 16f877a. O Set Point é selecionado pelo operador no display de cristal líquido através do menu inicial, como mostra a figura 6. Para a ação de controle, foi implementado um controle PID digital.

#### A. Ação de Controle – Algoritmo PID genérico

A combinação das três ações de controle: proporcional, integral e derivativa é denominada como controle PID e combina a ação dos três controles individuais. Este controlador pode ser apresentado na seguinte equação abaixo (1):

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Ou em sua função de transferência (2) como:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i} + T_d s \right) \quad (2)$$

Onde:

$K_p$  = ganho proporcional

$T_d$  = tempo derivativo

$T_i$  = tempo integral

#### B. Algoritmo PID Baseado em Acumulação

Este tópico visa mostrar como foi criado o *firmware* para o sistema de controle PID microprocessado.

O processo basicamente consiste na aproximação de uma função de transferência no domínio contínuo, em um equivalente numérico que possa ser implementado numa linguagem de programação. Então, diversas técnicas numéricas podem ser utilizadas. A figura 8 mostra uma típica malha de controle digital.

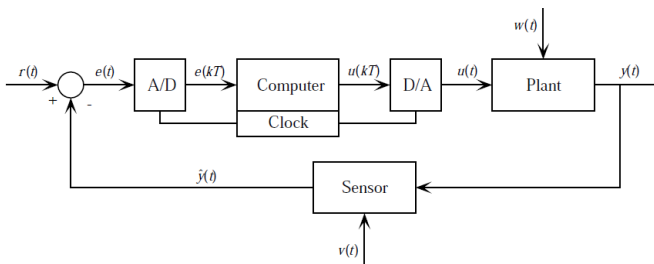


Fig. 8. Sistema em malha fechada de controle digital [5]

Numericamente, uma das formas baseadas na acumulação, a integral basicamente trata-se de uma acumulação de infinita de um somatório. Então, se ignorar o valor de tempo tendendo a zero entre dois intervalos, e adotar esse tempo sendo fixo (taxa de amostragem), a integral tomará a forma de um somatório discreto, onde a ideia principal é pegar o erro atual e adicionar ao valor acumulado anterior (3).

$$\int_a^b e(t) dt \cong \sum_{t=a}^b e[t]. dt \quad (3)$$

Para a operação de derivada, faz-se o inverso. A derivada por definição é a taxa de variação do erro decorrente, ou seja, a variação do erro em um intervalo de tempo tendendo a zero. Já a sua forma discreta pode ser aproximada conforme a equação (4), onde o valor de  $dt$  é igual a taxa de amostragem. A ação derivativa passa a ser uma subtração do erro corrente e do anterior dividido pela taxa de amostragem.

$$\frac{de(t)}{dt} \cong \frac{e[t+dt] - e[t]}{dt} \quad (4)$$

Podemos quantificar “ $dt$ ” como sendo o intervalo entre amostras, obtendo a operação integral (5) e derivativa discreta (6).

$$\int_a^b e(t) dt \cong \sum_{t=0}^n e[n]. ts \quad (5)$$

$$\frac{de(t)}{dt} \cong \frac{e[n] - e[n-1]}{ts} \quad (6)$$

Onde  $n$  representa a posição de uma dada amostra corrente  $ts$  é o tempo da taxa de amostragem.

Por fim, inserindo os valores dos ganhos das ações, pode-se obter a seguinte equação (7) discretizada de um compensador PID.

$$u[n] = K_p \cdot e[n] + K_i \cdot \sum_{k=0}^n e[k] + K_d \cdot (e[n] - e[n-1]) \quad (7)$$

Notas importantes da equação (7):

\*O termo  $ts$  por ser um valor constante, foi abstraído e inserido nos coeficientes  $K_i$  e  $K_d$ ;

\*O termo integral se traduz em um acumulador de amostras, e o termo derivativo em um subtrator do valor de erro corrente e do anterior.

O código baseado da equação (7), tem o nome de “algoritmo baseado em acumulação”, justamente por causa da forma de implementação numérica da integral. A sua simplicidade (7), justifica a implementação no projeto de qualquer microcontrolador de 8 bits.

### IV. RESULTADOS PRÁTICOS OBTIDOS – GERADOR À VAZIO

A figura 9 mostra o Regulador Automático de Tensão conectado ao gerador síncrono de 4 polos, 2KVA, com seu

eixo acionado através de um motor CC, a uma velocidade de 1800 RPM.

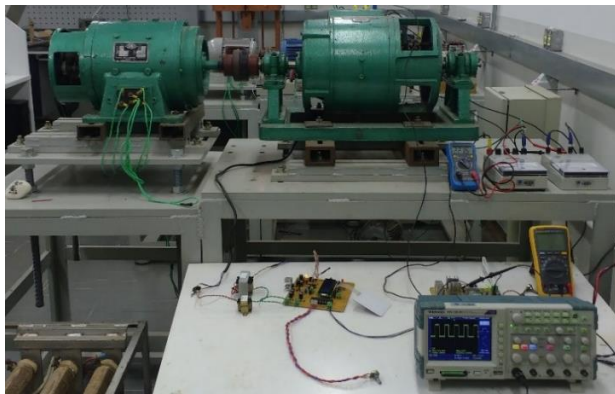


Fig. 9. Gerador Síncrono 2KVA em funcionamento através do Regulador de Tensão Microcontrolado.

Neste teste, realizou-se a partida de um motor de indução de 1cv e foi inserido através do menu inicial, o valor de Set Point igual a 220V e configurado o regulador em automático com ganhos de  $k_p = 1,1$  e  $k_i = 1,2$ . O valor da tensão eficaz terminal entre linhas, com o gerador síncrono à vazio foi de 221.4V depois de estabilizado, como mostrado na figura 10. O momento da partida foi registrado pelo osciloscópio, como mostra a figura 11. Observa-se a eliminação do afundamento de tensão em aproximadamente 206 ms.



Fig. 10. Medição do valor da tensão terminal do gerador ajustado para o Set Point de 220V.

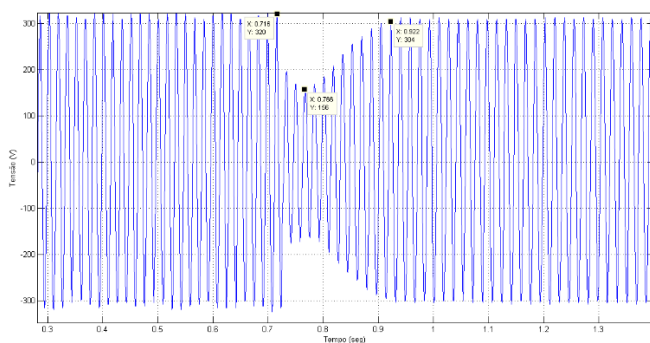


Fig 11. Ganhos  $k_p = 1,1$  e  $k_i = 1,2$  Medição feita pelo osciloscópio e plotagem dos pontos exportados no software Matlab. Fonte: Autor.

Para esse nível de tensão, com o gerador à vazio, a forma de onda do PWM no gate do MOSFET IRFP 264 foi de aproximadamente 30%, como mostrado na figura 11.

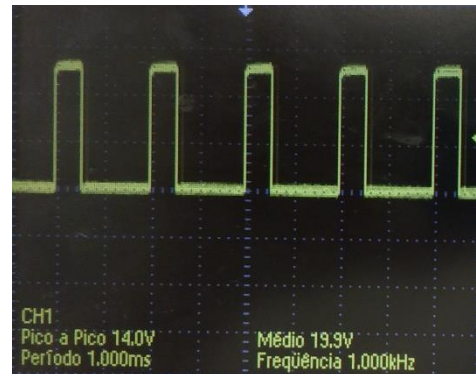


Fig. 12. Saída *duty cycle* 30% do PWM para acionar o MOSFET IRFP264.

## V. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma proposta interessante para construção de um regulador automático de tensão com baixo custo, ampla disponibilidade de componentes para reparo e bastante eficiente para pequenas potências, utilizando um microcontrolador *mid-range* (PIC16) de 8 bits. A interface entre usuário e máquina em conjunto do display de cristal líquido 16x2 e teclado alfanumérico 3x4, contribuiu para a flexibilidade da alteração dos ganhos do controlador PID pelo operador e monitoração das mudanças de tensão e temperatura do gerador.

Os resultados do controle de tensão de linha foram satisfatórios para o gerador síncrono de 2 kVA, operando com valores de  $V_l$  bem próximos do ajustado no display e aferidos no aparelho multímetro, comprovando eficiência deste projeto.

## REFERÊNCIAS

- [1] Guimarães, G. C. *Apostila do Curso de Dinâmicas de Sistemas Elétricos, Parte I. Modelagem de uma Máquina Síncrona e seus Controles para Estudo de Estabilidade Transitória*. UFU, Uberlândia, MG, 2008.
- [2] Anderson, P. M.; Fouad, A. A. *Power System Control and Stability*. New York: IEEE Press, 1994.
- [3] Microchip Technology - *Datasheet PIC 16F87XA*. Acessado em 05 de Fevereiro de 2016, em: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/3582C.pdf>
- [4] Ogata, K. *Engenharia de Controle Moderno*, Editora Prentice-Hall do Brasil, Rio de Janeiro, 2000.
- [5] Starr, G. P. *Introduction to Applied Digital Control, 2006*. Acessado em 01 de Junho de 2016, em: <http://www.me.unm.edu/~starr/teaching/me581/textboo.pdf>

# APÊNDICE I

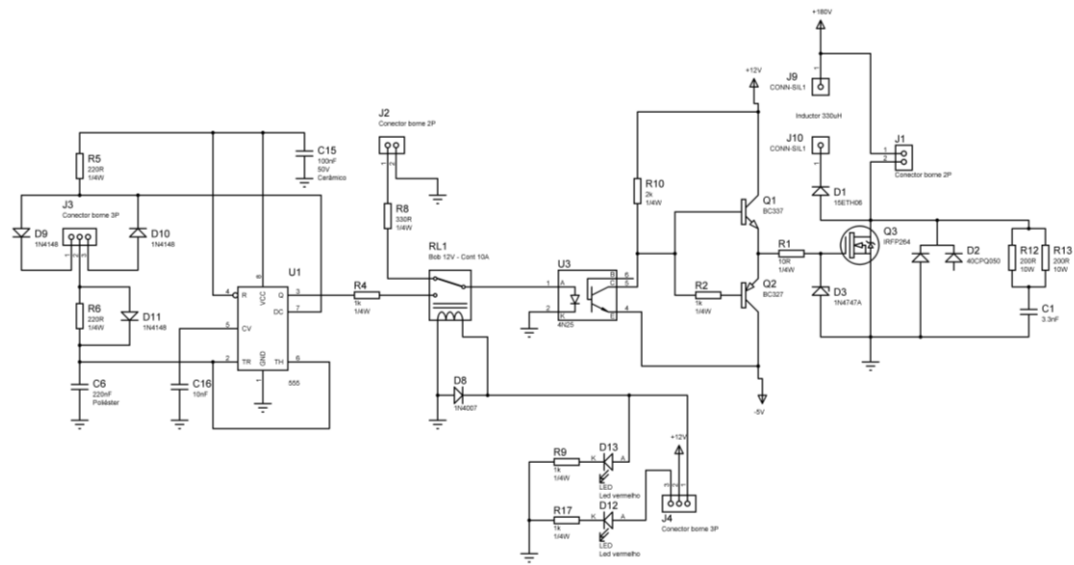


Fig. 13. Circuito drive de acionamento indutor do campo do gerador síncrono, com oscilador manual utilizando CI 555.

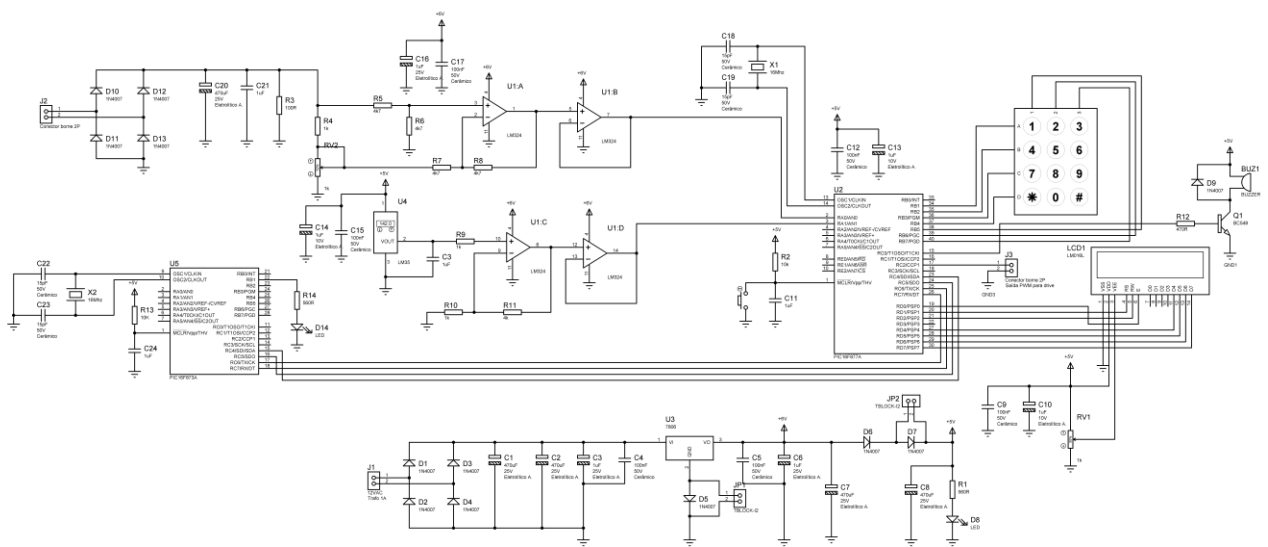


Fig. 14. Circuito de controle microcontrolado.