

## **MICROCONTROLADOR PARA CORREÇÃO AUTOMÁTICA DO FATOR DE POTÊNCIA E SELEÇÃO DE FILTRO PASSIVO**

**Diego Garcia Borges<sup>1</sup>**  
**Marcelo Semensato<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia/Campus Jataí/Engenharia Elétrica/ PIBITI-CNPQ,  
[diegoifg@ymail.com](mailto:diegoifg@ymail.com)

<sup>2</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia/Campus Jataí/Área de Indústria/  
[semensato@ymail.com](mailto:semensato@ymail.com)

### **Resumo**

O projeto consiste em um controlador automático para a correção do fator de potência de um conjunto de cargas genérica de até 30 A. Esse controle é feito utilizando um microcontrolador da família PIC, sendo o modelo PIC 16F877A.

O microcontrolador, juntamente ao seu algoritmo, visa manter o fator de potência do sistema dentro dos limites aceitáveis, realizando o chaveamento de um banco de capacitores para um conjunto de cargas monofásicas de uma bancada montada para ensaio.

Para realizar a correção, o microcontrolador PIC adquire através de sensores, sinais de tensão e corrente da rede de energia elétrica, e a partir da amostragem dos sinais realiza o cálculo do fator de potência e do capacitor ideal para a correção. A pesquisa consiste em algumas etapas, sendo: medição de sinais, aquisição e processamento, controle (correção) e visualização de dados. Esse projeto contempla diversas áreas da engenharia elétrica, como por exemplo, eletrônica, programação, microcontroladores, análise da qualidade de energia, processamento de sinais, dentre outros.

### **Palavras-chave:**

Microcontrolador, filtro passivo, correção do fator de potência, banco de capacitores.

### **INTRODUÇÃO**

Desde a década de 70, o consumo energético nacional tem mudado consideravelmente, visto que a eletro/eletrônica integrou-se na vida dos consumidores residenciais/comerciais.

Acontece, que esse novo tipo de carga, traz consigo uma característica de seus componentes, que é a não-linearidade entre tensão e corrente, provocando com isso, uma distorção na forma de sinal (tensão ou/e corrente).

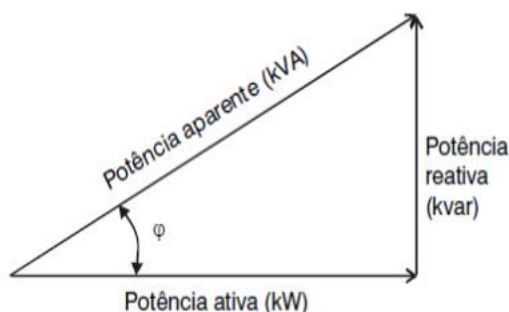
Essa nova topologia de cargas no sistema energético, altera a qualidade de energia, e provoca perturbações no sistema como um todo, como harmônicas e queda no fator de potência, sendo esse último, nosso foco de correção na pesquisa.

Dependendo do grau de distorções do sinal da rede elétrica, o microcontrolador ligará um filtro passivo passa-baixa na rede de energia para atenuar as distorções harmônicas e posteriormente realizará os cálculos para a correção do fator de potência.

## ► FATOR DE POTÊNCIA

Inicialmente, antes de compreender a ideia do fator de potência, precisamos entender os 3 componentes do fluxo de potência, sendo eles:

- **Potência Ativa (W):** Energia que realiza o trabalho útil, como calor, luz, movimento, etc. Sua unidade é o Watt (W).
- **Potência Reativa (Q):** Energia que não produz trabalho útil, sendo armazenada por componentes indutivos e capacitivos. Sua unidade é o volt ampère reativo (VAr).
- **Potência Aparente (S):** Energia resultante (vetor), composta pela potência ativa (W) e reativa (Q). Sua unidade é o volt ampère (VA).



**Figura 1: Triângulo de Potências.**

As potências ativa e reativa ocupam a rede elétrica, diminuindo a real capacidade de transmissão de potência ativa da rede, em função de potência reativa presente.

Sabemos que grande parte das máquinas elétricas, como motores, transformadores, dentre outros, utilizam energia ativa e reativa para seu funcionamento. A energia reativa, é responsável pela criação dos campos elétricos e magnéticos nos equipamentos (VIEIRA,1989), enquanto que a energia ativa realiza o trabalho útil, fazendo os motores girarem por exemplo.

A energia reativa provoca muitas perdas (figura 2), exigindo condutores com maior seção, transformadores de capacidade mais elevada, sem contar que a mesma provoca quedas de tensão no sistema de distribuição.



Figura 2: Perda de energia nos condutores devido ao baixo FP.

Fonte: CODI,2004.

O fator de potência é um índice de qualidade de energia cujo controle é de extrema importância, visto que o mesmo é monitorado pelos sistemas de medição da concessionária de energia, podendo ocorrer multas para o cliente caso esteja abaixo dos limites mínimos (Tabela 1).

Tabela 1: Fator de potência pelo mundo.

Fonte: AMORIM,2008.

PÁIS	FP Mínimo Permitido
Portugal	0,93
França	0,93
Bélgica	0,95
Alemanha	0,96
Suíça	0,93
Argentina	0,95
Coreia	0,93
Espanha	0,92
Brasil	0,92

Por definição, o fator de potência (equação 1) é o quociente entre a potência ativa e a potência aparente do sistema. A tensão e corrente lidas pelo microcontrolador para efetuar este cálculo são senoidais, pois os sensores utilizam filtros passa-baixa.

Esse fator corresponde a um valor adimensional entre 0 e 1. Quando o fator de potência é igual a zero (0), o fluxo de energia é inteiramente reativo, e a energia armazenada é devolvida totalmente à fonte em cada ciclo. Quando o fator de potência é 1, toda a energia fornecida pela fonte é consumida pela carga.

O fator de potência recebe a denominação de atrasado ou adiantado com o objetivo de evidenciar o sinal do ângulo de fase entre as ondas de corrente e tensão elétricas.

$$FP = \cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{\frac{1}{T} \int v(t) * i(t) dt}{V_{RMS} * I_{RMS}} \quad (1)$$

Sendo:

$$v(t) = V_p \cdot \text{sen}(wt) \text{ [V]}$$

$$i(t) = I_p \cdot \text{sen}(wt + \Phi) \text{ [A]}$$

Em circuitos alternados resistivos, as ondas de tensão e corrente estão em fase, alternando suas polaridades a cada semiciclo. Porém, quando temos cargas reativas, como indutores, capacitores ou circuitos com eletrônica de potência embutida, a energia armazenada nessas cargas provoca uma diferença de fase nas ondas de corrente e tensão do sistema (Figura 4).

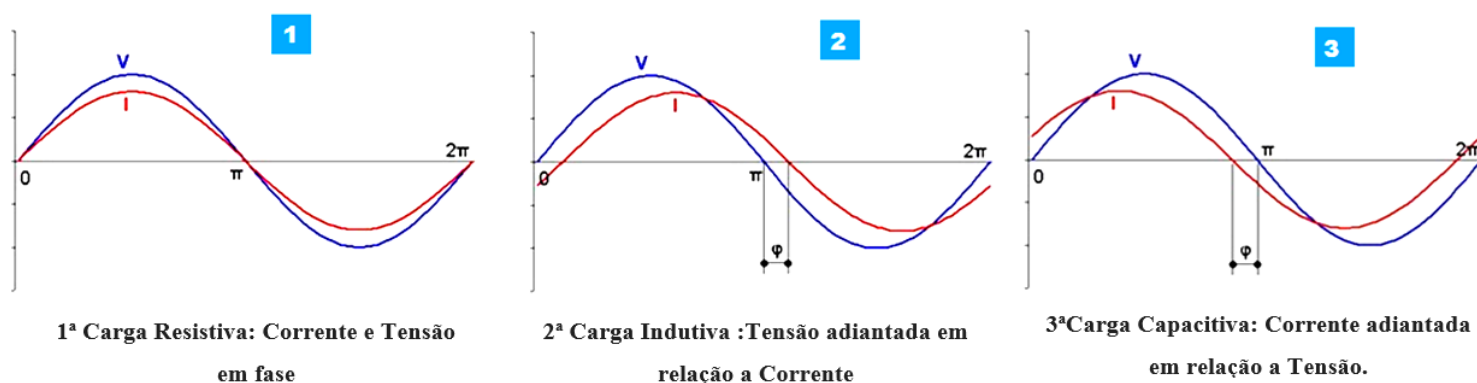


Figura 4: Formas de Onda.

Seria ideal obter um fator de potência resistivo, porém em um sistema real, quando utilizamos por exemplo cargas indutivas (motores, transformadores, reatores de iluminação, fornos de indução, etc.) isso se torna impossível.

Assim, visando corrigir um fator de potência atrasado e torná-lo o mais próximo de 1, utilizamos bancos de capacitores com energia reativa contrária a da carga indutiva no circuito.

Segundo dados da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), a cobrança devido ao baixo fator de potência de consumidores atendidos em tensão primária (M.T ou A.T) e classificados no sistema de tarifação horo-sazonal, baseia-se no consumo total de energia ativa e reativa acumuladas por hora de operação, ocasionando parcelas horárias de multa, totalizadas ao final de um mês de faturamento.

Dessa forma, percebemos a importância de se obter um controle dinâmico (em tempo real) do fator de potência. Pela legislação da ANEEL (2000) os consumidores multados são os que possuem fatores de potência horários inferiores a:

- 0,92 <sup>INDUTIVO</sup>, no período diurno e noturno (06:00 às 00:00 horas);
- 0,92 <sup>CAPACITIVO</sup>, na madrugada (00:00 às 06:00 horas).

Em um sistema real, quando seu fator de potência está baixo, isso significa que a energia consumida pelo grupo de cargas em operação, constitui-se de uma parcela de energia ativa (kWh) e uma parcela de energia reativa superior a 0,426 KVARh para cada kWh consumido, adotando como base a faixa permitida para o fator de potência estabelecida pela legislação atual.

Através da portaria nº 1.569 de 23 de dezembro de 1993 do DNAEE (Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, atualmente já extinto), em março de 1992 o decreto nº479, declarou o estabelecimento de um novo limite para o fator de potência (indutivo e capacitivo), com o objetivo de manter o FP o mais próximo do valor unitário, tanto pelas concessionárias de energia quanto pelo consumidor, e uma nova abordagem do ônus por baixo fator de potência, considerando os aspectos relevantes:

- ✓ Faturamento de energia reativa capacitiva excedente;
- ✓ Aumento do limite mínimo do FP, de 0,85 para 0,92;
- ✓ Novo critério de avaliação e faturamento, reduzindo o período de avaliação, de mensal para horário desde 1996.

#### ► CAUSAS E PROBLEMAS ORIGINADOS DO BAIXO FATOR DE POTÊNCIA

A correção do fator de potência é importante porque melhora o sistema elétrico como um todo, pois libera o sistema para uma maior transmissão de potência. O excesso de reativo na rede produz perdas desnecessárias e aumenta o custo do próprio sistema, pois é necessária a instalação de condutores com bitola maior e, em consequência, a estrutura física também deve ser reforçada, devido ao aumento dos cabos.

As causas de um baixo fator de potência no sistema são várias, dentre elas:

- ✓ **Reatores eletrônicos com baixo fator de potência**

Grande parte das lâmpadas eletrônicas necessitam de um reator para sua partida, dentre elas as lâmpadas de descarga (vapor de sódio, vapor de mercúrio, fluorescentes, etc.) precisam do auxílio de um reator magnético para seu funcionamento. Assim como transformadores e motores, reatores possuem bobinas que utilizam energia reativa. Como alternativa, pode-se usar reatores com alto fator de potência, mais conhecidos por compensados.

- ✓ **Motores de Indução operando em vazio**

O motor de indução seja operando a plena carga ou a vazio, consome a mesma demanda de reativo. O mesmo não acontece com a potência ativa, variando de acordo com a carga em seu eixo, sendo que para cargas pequenas temos baixa potência ativa consumida, e dessa forma um baixo fator de potência.

- ✓ **Transformadores operando a vazio, ou superdimensionados**

Transformadores, da mesma forma que motores de indução, consomem praticamente a mesma demanda reativa para sua magnetização (seja a vazio ou a plena carga), e com isso a potência reativa do sistema se torna relativamente alta se comparada com a potência ativa consumida quando opera com pouca carga.

- ✓ **Fornos de indução e fornos a arco elétrico;**

- ✓ **Máquinas de solda (MIG, TIG, etc.)**

A energia reativa é a grande vilã do nosso sistema elétrico, pois causa prejuízo operacional, impacto econômico e baixa qualidade de energia. Dessa forma, os principais problemas de um baixo fator de potência são:

✓ **Quedas de Tensão/Flutuações**

Com energia reativa em excesso, aumenta-se a intensidade da corrente elétrica no circuito, e devido ao aumento da corrente, temos perdas por efeito Joule (aquecimento) e consequente queda de tensão.

✓ **Sobrecargas na rede elétrica;**

✓ **Multas devido à alta incidência de potência reativa na rede de distribuição;**

✓ **Necessidade de aumento da bitola de condutores, devido ao aumento de corrente drenada;**

✓ **Redimensionamento de equipamentos de proteção**

► **ESTÁGIOS/IMPLEMENTAÇÃO DO PROJETO**

O projeto é dividido em 4 blocos que funcionam em conjunto, sendo eles:

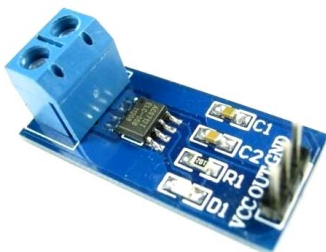
- Medição de Sinais;
- Aquisição e processamento;
- Controle;
- Visualização dos dados.

► **MEDIÇÃO DE SINAIS**

Na medição de sinais, utilizamos dois sensores de corrente ACS712, com alimentação de ambos em +5V, sendo um de 5A (sensibilidade 185mV/A) e 30A (sensibilidade 66mV/A).

Nesse sensor, quando uma corrente o atravessa, é produzida uma tensão a qual é utilizada pelo microcontrolador para a aquisição/interpretação de dados. O sensor ACS712 utiliza o princípio do efeito hall para seu funcionamento.

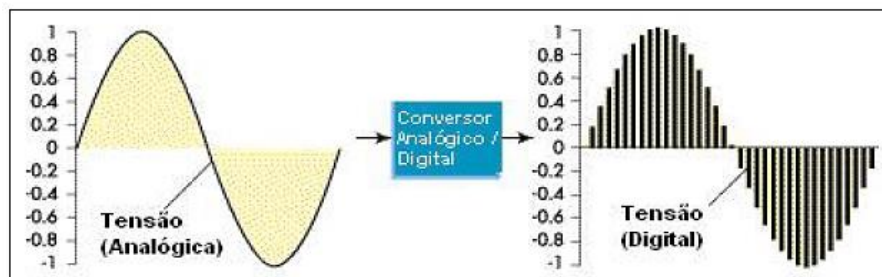
Os sensores por efeito hall, utilizam semicondutores, ao invés de bobinas, para realizarem o sensoriamento magnético. Ao conduzir uma corrente, e estando sob efeito de força magnética, o sensor consegue medir a variação do fluxo e dessa forma fornecer a corrente instantânea.



### ► AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO (AMOSTRAGEM DE SINAL)

Os sinais analógicos capturados a partir das portas AN0 e AN1 do PIC16F877A são amostrados, convertendo-se em sinais digitais através do conversor A/D do microcontrolador (Figura 6).

Após a conversão do sinal, os dados são processados pelo algoritmo implementado, e as grandezas de interesse são obtidas (Potência Ativa e Reativa).



**Figura 6: Conversão de sinal analógico para digital.**  
(Fonte: ISONI,2009)

Um processo importante na conversão analógico/digital, é a taxa de amostragem. Essa taxa representa a frequência na qual o conversor A/D captura o sinal analógico instantâneo de tensão e corrente referentes a um ciclo de onda completa ( $f=60\text{ Hz}$ ,  $T=16,7\text{ms}$ ) e os reconstrói em forma digital. Quanto maior for o número de amostras por ciclo, teremos uma maior precisão e confiabilidade nos resultados obtidos, pois o sinal adquirido representará mais fielmente o sinal analógico.

Com o sinal analógico reconstruído digitalmente, podemos mensurar o valor eficaz (RMS) de tensão e corrente em um intervalo de tempo.

Na atual pesquisa, fazemos uma análise de 12 ciclos de onda ( $T_{\text{total}}=200\text{ms}$ ), e adotamos como requisito de fidelidade uma (1) amostra de sinal a cada grau de leitura, totalizando 360 amostras por ciclo (21,6 KHz). Com isso, são analisadas 4320 amostras de tensão e corrente elétrica, aproximadamente uma amostra a cada 46,3 microssegundos.

### ► CONTROLE

O controle é feito pelo PIC16F877A que monitora constantemente níveis de tensão e corrente elétrica, e através de seu algoritmo (Apêndice 1) gravado realiza o cálculo instantâneo (resultante do intervalo de tempo) do fator de potência, chaveando através de relés (Figura 7), a conexão/retirada de capacitores em intervalos de tempo, afim de promover a correção da energia reativa indutiva, e elevar o fator de potência final.





**Figura 7: Bloco com relés, responsáveis pelo chaveamento do banco de capacitores no sistema.**

### ❖ CORREÇÃO AUTOMÁTICA DO FATOR DE POTÊNCIA POR BANCO DE CAPACITORES

A correção automática microcontrolada foi adotada, tendo em vista que a carga reativa pode ser variável. A correção do fator de potência é realizada conectando-se os capacitores em paralelo a carga indutiva (motores de indução e lâmpadas de descarga), de tal forma que a energia reativa indutiva da carga é suprida momentaneamente.

#### ▪ Bancada de Cargas

O objetivo principal da bancada de cargas é promover a variação da potência reativa, e com isso verificar se o circuito controlador consegue realizar a correção efetiva do fator de potência final, acionando a demanda de energia reativa capacitiva necessária no sistema.

A bancada do projeto utiliza cargas monofásicas, pois o objetivo de correção é para uma única fase. As cargas utilizadas compreendem:

**Tabela 2: Cargas usadas na bancada.**

Nº	Descrição	Qtd
1	Conjunto de Lâmpadas de Descarga Fluorescentes (40 W)	Variável
2	Motor WEG (F=60Hz; 1/2CV, $I_p/I_N=5,5$ ; Cat.N	01

É possível utilizar no projeto cargas até 30 A para tensões monofásicas. O banco de capacitor é usado no sistema toda vez que o grupo de cargas apresenta variação do fator de potência, devido ao acionamento de diversos componentes ao longo do tempo.

O valor nominal do banco de capacitores escolhido para a carga usada na pesquisa é de 1500 Var, e conta com 3 estágios de acionamento. Todos os estágios são acoplados em paralelo a carga, com o objetivo de fornecerem a energia reativa necessária para a devida correção. Os capacitores são todos ligados ao neutro, e o acoplamento à fase é feito pelo relé.

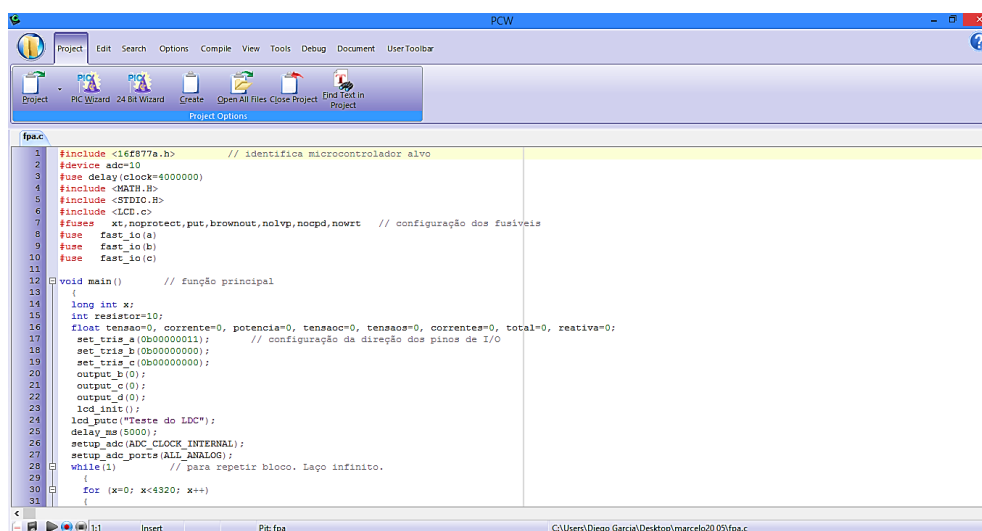


## ❖ SOFTWARES UTILIZADOS NO DESENVOLVIMENTO

### ► **Compilador C CCS®**

As instruções que compõem um programa são chamadas de instruções em linguagem de máquina, pois são representadas por 0's ou 1's, a única linguagem que uma máquina (computador) compreende. Dessa forma, um programa em linguagem C (alto nível) deve ser convertido em instruções de linguagem de máquina para que o PIC consiga executar.

Assim, para que a linguagem C fosse transformada em linguagem de máquina (hexadecimal), foi utilizado o compilador C CCS, que converte as instruções de alto nível (linguagem C) em um conjunto de instruções binárias (linguagem de máquina) que podem ser colocadas na memória do microcontrolador. Com isso, um programa é nada menos que um conjunto de instruções que são executadas sequencialmente.



**Figura 6: Tela do programa Compilador C CCS**

Durante os testes e estudos, quando o programa desenvolvido era compilado (executado), o próprio compilador C CCS gerava o arquivo em hexadecimal (.hex).

### ► **Proteus Professional®**

O software de desenho e simulação Proteus VSM é uma ferramenta bastante útil, que permite o desenho de circuitos empregando um entorno gráfico no qual é possível colocar os símbolos representativos dos componentes e realizar a simulação de seu funcionamento sem o risco de ocasionar danos aos circuitos na prática.

A simulação pode incluir instrumentos de medição e a inclusão de gráficos que representam os sinais obtidos na simulação.

Após escrever o programa em linguagem C, é necessário além de compilar o mesmo, testá-lo para verificar se tudo está de acordo com o planejado. Assim, o circuito é desenhado na ferramenta **ISIS** (programa destinado à montagem e simulação de circuitos digitais e analógicos, que contém diversas bibliotecas de microcontroladores e ferramentas para circuitos) e após isso testamos o mesmo, carregando no microcontrolador o arquivo hexadecimal originário da compilação, para analisar o seu funcionamento (Figura 7).

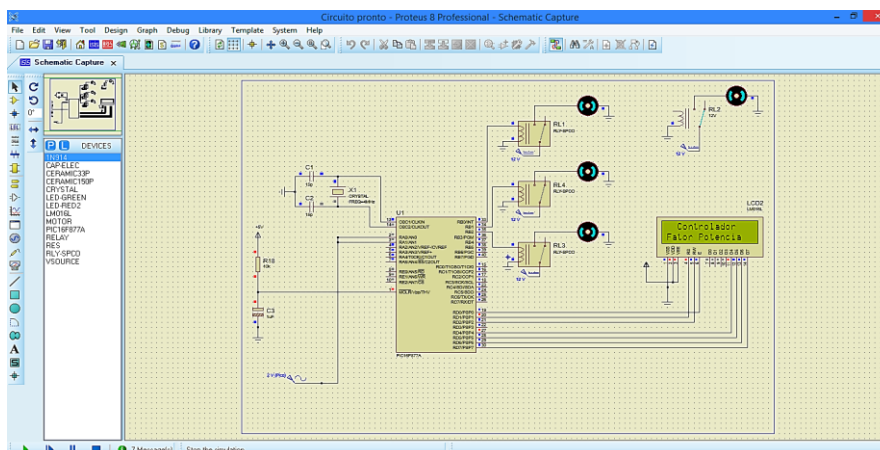


Figura 7: Circuito do Controlador de qualidade de energia no programa PROTEUS/ISIS.

Para o processo de gravação do microcontrolador PIC foram utilizados dois programas principais: O **CCS C Compiler**, para a compilação da linguagem C e geração do arquivo hexadecimal, e o **MPLAB®IDE**, que importa o arquivo hexadecimal e grava o código no microcontrolador.

O MPLAB®IDE é um programa distribuído gratuitamente pela Microchip Technology (fabricante dos microcontroladores PIC). O MPLAB IDE permite, entre outras coisas:

- ✓ Efetuar a simulação e o debug do programa;
- ✓ Gravar programas no microcontrolador.

Juntamente aos programas, a utilização de uma placa de gravação é fundamental. É essa placa que permitirá que os dados manipulados no computador sejam gravados de fato no microcontrolador. A seguir, tem-se na figura 8 a placa de gravação usada.



Figura 8: Placa de Gravação

## ► CONCLUSÃO

Diante das inovações dos últimos tempos, no que se diz respeito às tecnologias, o conhecimento tecnológico se tornou essencial. Mesmo um celular moderno ou um modelo novo de computador, nos fazem estar sempre antenados no que a tecnologia tem a nos oferecer de melhor. Em vista disso, é necessário que não somente a tecnologia evolua, mas também a qualidade da energia elétrica que alimenta essa tecnologia.

A correção do fator de potência tem uma importância cada vez maior no setor industrial e comercial, e com a era da sustentabilidade energética, possuir um maior aproveitamento de potência, significa preservação ambiental.

Essa pesquisa teve por objetivo, propor uma alternativa para a correção do fator de potência, de uma forma mais barata e microcontrolada. É notável a complexidade do tema, quanto a implantação do protótipo, quanto teórica, mais em vista das dificuldades, os resultados foram bastante satisfatórios.

Para projeto futuro, sugerimos a correção do fator de potência juntamente com um atenuador de harmônicas, fazendo com que o projeto realmente seja um corretor eficaz na qualidade de energia em todos os quesitos.

#### ► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SILVA, M. C. I. **Correção do fator de potência de cargas Industriais com dinâmica rápida** - Tese Mestrado-Universidade federal de minas gerais,Belo Horizonte,2009.
- [2] (EPCOS(3), 2007) EPCOS AG. Power Quality Solutions – Overview 2008: Power Factor Correction. Germany: EPCOS, 2007. 12 p.
- [3] (COTRIM(1), 2008) COTRIM, Ademaro A. M. B.; MORENO, Hilton (revisão e atualização técnica); GRIMONI, José Aquiles Baesso (revisão e atualização técnica). Compensação da energia reativa; STAROSTA, José (autoria). In: Instalações Elétricas. 5ª edição. São Paulo: Prentice Hall, 2008. cap. 14, pp. 419-434.
- [4] (CIRCUTOR(4), 200-?) CIRCUTOR, SA. Automatic capacitor banks with detuned filters–FR series. Barcelona: CIRCUTOR, (200-?). 9 p.

## APÊNDICE 1 –CÓDIGO DE CONTROLE IMPLEMENTADO

```
1: #include < 16f877a . h > // identifica microcontrolador alvo
2: #device adc = 10
3: #use delay ( clock = 4000000 )
4: #include < MATH . H >
5: #include < STDIO . H >
6: #include < LCD . c >
7: #fuses xt , noprotect , put , brownout , nolvp , nocpd , nowrt // configuração dos fusíveis
8: #use fast_io ( a )
9: #use fast_io ( b )
10: #use fast_io ( c )
11:
12: void main () // função principal
13: {
14: long int x ;
15: int resistor = 10 ;
16: float tensao = 0 , corrente = 0 , potencia = 0 , tensaoc = 0 , tensaos = 0 , correntes = 0 , total=
17: set_tris_a ( 0b00000011 ); // configuração da direção dos pinos de I/O
18: set_tris_b ( 0b00000000 );
19: set_tris_c ( 0b00000000 );
20: output_b ( 0 );
21: output_c ( 0 );
22: output_d ( 0 );
23: lcd_init ();
24: lcd_putc ( "Controlador\nFator de Potencia " );
25: delay_ms ( 5000 );
26: setup_adc ( ADC_CLOCK_INTERNAL );
27: setup_adc_ports ( ALL_ANALOG );
28: while ( 1 ) // para repetir bloco. Laço infinito.
29: {
30: for ( x = 0 ; x < 4320 ; x ++ )
31: {
32: set_adc_channel ( 0 );
33: delay_us ( 20 );
34: tensaoc = read_adc ();
35: set_adc_channel ( 1 );
36: delay_us ( 20 );
37: corrente = read_adc ();
38: corrente =( corrente - 512 );
39: tensaoc =( tensaoc - 512 );
40: tensaoc =( ( 5 * tensaoc ) / 189 . 44 );
41: tensao =( tensaoc * resistor );
42: tensaos =( tensaos +( tensao * tensao ));
43: corrente =( ( 5 * corrente ) / 67 . 584 );
44: correntes =( correntes +( corrente * corrente ));
45: potencia =( potencia +( tensao * corrente ));
46: }
47: tensao =( sqrt ( tensaos / 4320 ));
48: corrente =( sqrt ( correntes / 4320 ));
49: potencia =( potencia / 4320 );
50: printf ( lcd_putc , "\fPotencia:\n %1.2f" , potencia );
51: delay_ms ( 5000 );
52: total =( tensao * corrente );
53: reativa =( ( total * total )-( potencia * potencia ));
54: reativa =( sqrt ( reativa ));
55: tensaos = 0 ; correntes = 0 ; potencia = 0 ;
56: }
57: }
```