



Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Departamento de Engenharia Elétrica

Trabalho de Conclusão de Curso

**Técnica de Chaveamento Controlado para  
Transformadores Monofásicos**

Diogo Wallace Ferreira de Almeida

**Campina Grande - Pb**

**Novembro de 2006**



Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB

Diogo Wallace Ferreira de Almeida

Trabalho de Conclusão de Curso

**Técnica de Chaveamento Controlado para  
Transformadores Monofásicos**

Relatório apresentado à Coordenação de  
Graduação em Engenharia Elétrica da UFCG,  
como parte dos requisitos para obtenção do  
título de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2006

**Banca Examinadora**

---

**Francisco das Chagas Fernandes Guerra**  
Orientador:

---

**Luis Reyes Rosales Montero**  
Professor Convidado

Dedico essa conquista a meus pais  
Fragoso e Izabel, que em nenhum momento mediram  
esforços para que eu pudesse atingir meus objetivos  
e aos meus irmãos Flávio e Pablo pelo incentivo de  
fé e companheirismo.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a **Deus** por todos os momentos que nesta etapa de minha vida passei, que de forma tão generosa nunca me deixou faltar o pão espiritual e material. Dando-me força nas horas mais difíceis para enfrentar essa árdua jornada, mas também tão recompensadora ao qual, sem dúvida, me tornaram uma pessoa melhor e mais consciente dos meus direitos e deveres para com homem e cidadão;

Agradeço a meus pais **Francisco Almeida Fragoso** e **Maria Izabel Ferreira Fragoso** que sempre me mostram o caminho da verdade, do amor, respeito e esperança. E pelo apoio incondicional nesta longa jornada, sempre acreditando em meu sucesso.

Agradeço aos meus irmãos **Flávio Franklin Ferreira de Almeida** e **Pablo José Ferreira de Almeida** pelas incansáveis demonstrações de amor e incentivos de fé e companheirismo.

A **Hérica Francisca da Silva** pelo amor e carinho que a cada dia enche minha vida da alegria e esperança.

Ao meu irmão de fé **Luciney Silva**, que ao longo dessa caminhada sempre esteve ao meu lado.

A todos com quem morei, em especial a **Denis** e **Marcelo** com que tive o grande prazer dividir minha vida em Campina Grande

Ao professor **Chagas**, por acreditar em mim e sobre tudo por suas grandes lições de vida.

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Tensão aplicada e fluxo na condição de regime permanente. ....	9
Fig. 2. Método gráfico para determinação da corrente de magnetização. ....	9
Fig. 3. Fluxos no transformador durante condições transitórias. ....	13
Fig. 4. Método gráfico para determinação da corrente de inrush. ....	13
Fig. 5. Corrente de <i>inrush</i> típica de um transformador. ....	14
Fig. 6. Diagrama de estados. ....	16
Fig. 7. Vista frontal da CSuC. ....	16
Fig. 8. Circuito de sincronismo. ....	18
Fig. 9. Circuito de controle. ....	18
Fig. 10. Circuito atuador. ....	19
Fig. 11. ....	30
Fig. 12. ....	31
Fig. 13. ....	31
Fig. 14. ....	32
Fig. 15. ....	32
Fig. 16. ....	33
Fig. 17. ....	33
Fig. 18. Correntes de <i>inrush</i> experimentais. ....	34

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	5
<b>SUMÁRIO</b> .....	6
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	7
<b>1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS</b> .....	7
<b>1.2 - OBJETIVOS</b> .....	7
<b>2. CORRENTES DE EXCITAÇÃO E DE INRUSH</b> .....	7
<b>2.1-COMPONENTE DE MAGNETIZAÇÃO DA CORRENTE DE EXCITAÇÃO</b> .....	8
<b>2.3 - CORRENTE TOTAL DE EXCITAÇÃO</b> .....	10
<b>2.4 - CORRENTE DE INRUSH</b> .....	11
<b>3. CHAVE SÍNCRONA MICRO CONTROLADA (CSuC)</b> .....	15
<b>3.1 - CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS</b> .....	17
<b>3.2 - O FUNCIONAMENTO DO CIRCUITO</b> .....	17
<b>3.3 - ROTINA COMPUTACIONAL</b> .....	20
<b>4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b> .....	30
<b>5 - CONCLUSÃO</b> .....	35
<b>6 - BIBLIOGRAFIA</b> .....	36

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS**

Em regime permanente, as correntes de excitação dos transformadores apresentam valores não-superiores a 2% da corrente pico nominal. Entretanto, durante a energização, as correntes transitórias que surgem no primário podem alcançar grandes amplitudes (correntes de *inrush*), com amplo espectro harmônico, incluindo componentes de corrente contínua e harmônicos de segunda ordem. Tal comportamento é causado pela saturação do núcleo magnético do transformador. Assim, dispositivos de proteção rápidos podem atuar indevidamente, como se houvesse um defeito. Para que isto seja evitado, um dos procedimentos a serem utilizados consiste no que se denomina *chaveamento controlado*.

A aplicação de chaveamento controlado exige um atuador eletrônico que monitorea os sinais de tensão e/ou corrente do circuito primário. O controlador identifica o instante ideal para realizar a operação de chaveamento. O sinal de fechamento ou abertura é enviado para a chave através do controlador e atrasado por este de forma a atingir o instante indicado para o chaveamento.

Para que esta solução venha a ser eficaz, torna-se essencial o prévio conhecimento do fluxo residual do núcleo do transformador, o qual, conjuntamente com o instante de chaveamento, determinam as condições para as quais a energização ocorrerá sem altos níveis de correntes.

### **1.2 - OBJETIVOS**

O objetivo desse trabalho é o desenvolvimento e implementação de uma chave síncrona micro-controlada, como um método de chaveamento controlado de transformadores monofásico, ao qual seja capaz de ser utilizada como ferramenta para ensaios de correntes de *inrush*.

## **2. CORRENTES DE EXCITAÇÃO E DE INRUSH**

Sendo a tensão nominal aplicada aos terminais do enrolamento primário de um transformador com o secundário aberto, irá circular uma pequena corrente de excitação. Esta corrente consiste de duas componentes; a componente de perdas e a componente de

magnetização. A componente de perdas está em fase com a tensão aplicada e a sua magnitude depende das perdas em vazio do transformador. A componente de magnetização fica atrasada de 90° e a sua magnitude depende do número de espiras do enrolamento primário, a forma da curva de saturação do transformador e a máxima densidade de fluxo para a qual o transformador foi projetado.

## 2.1-COMPONENTE DE MAGNETIZAÇÃO DA CORRENTE DE EXCITAÇÃO

Estando o secundário do transformador aberto, ele pode ser tratado como um reator de núcleo de ferro. A equação diferencial do circuito pode ser escrita como:

$$v = Ri + N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

onde:

$v$  = valor instantâneo da tensão da fonte;

$i$  = valor instantâneo da corrente;

$R$  = resistência elétrica do enrolamento;

$\Phi$  = fluxo instantâneo que enlaça o enrolamento primário

$N_1$  = número de espiras do enrolamento primário

Normalmente a resistência,  $R$ , e a corrente,  $i$ , são pequenas, conseqüentemente o termo  $Ri$  de (1) tem um efeito muito pequeno e pode ser desprezado. Assim, a equação pode ser reescrita como:

$$v = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

A tensão da fonte é dada por:

$$v = V_{\max} \text{sen}(wt + \phi) \quad (3)$$

De (1) e (3), tem-se:

$$V_{\max} \text{sen}(wt + \phi) = \frac{d\Phi}{dt} \quad (4)$$

A solução da equação diferencial acima é:

$$\Phi = -\frac{V_{\max}}{\omega N_1} \cos(wt + \phi) = \Phi_t \quad (5)$$

A solução apresenta uma componente em regime permanente e outra transitória. A componente em regime permanente é senoidal e está atrasada da tensão aplicada de 90°. A Fig. 1 mostra a tensão aplicada e ao fluxo em função do tempo.

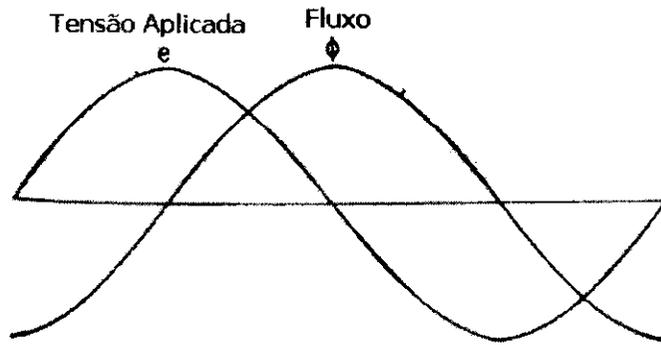


Fig. 1. Tensão aplicada e fluxo na condição de regime permanente.

Se não houvesse saturação do circuito magnético do transformador, a corrente de magnetização e o fluxo variariam numa proporção direta, resultando numa corrente de magnetização senoidal em fase com o fluxo, entretanto, o projeto econômico de um transformador requer que o núcleo trabalhe no joelho da curva de saturação. Sob esta condição a corrente de magnetização não é uma função senoidal e a sua forma depende da característica de saturação (curva  $B-H$ ) do circuito magnético do transformador. A forma de onda da corrente pode ser determinada através do gráfico, como mostra a Fig. 2. Na Fig. 2( b ) são mostrados a tensão aplicada e o fluxo atrasado em relação à tensão de  $90^\circ$ . Para qualquer fluxo o valor da corrente correspondente pode ser determinado a partir da curva  $B-H$  da Fig. 2 ( a ).

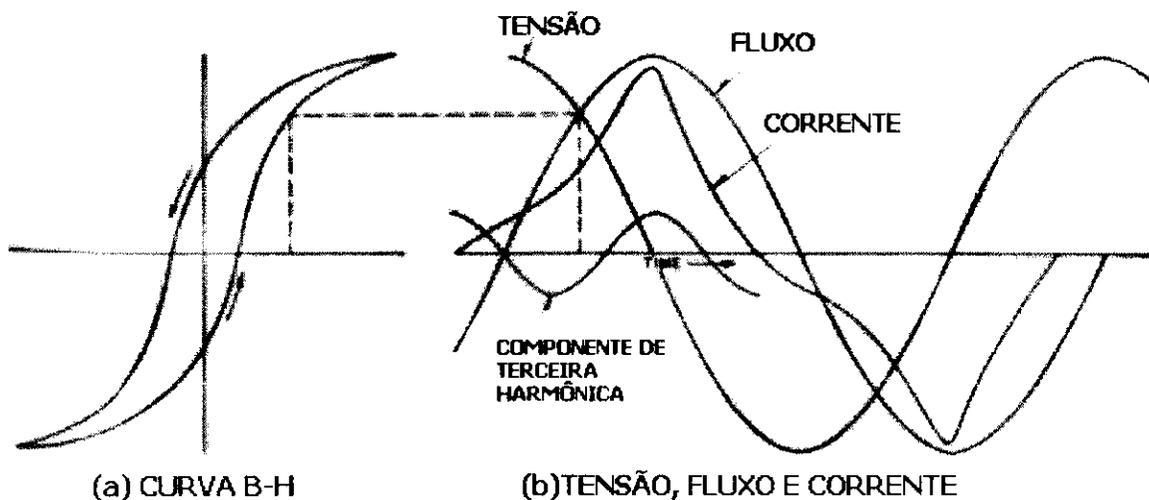


Fig. 2..Método gráfico para determinação da corrente de magnetização.

A corrente determinada desta maneira não está considerando a corrente de perda, entretanto, como ela é pequena não influi na corrente total. A Fig. 2( b ) mostra que apesar de o fluxo ser uma onda senoidal a corrente é uma onda distorcida. Uma análise

desta corrente mostra que ela contém componentes harmônicas ímpares de magnitudes apreciáveis. Na Fig. 2(b) é mostrada a corrente de 3ª harmônica. Num caso típico as harmônicas podem ter os seguintes valores percentuais: 45% de 3ª, 15% de 5ª e 3% de 7ª e valores menores para harmônicas mais elevadas. As componentes harmônicas são expressas em valores percentuais em relação ao valor da onda fundamental.

## 2.2 - COMPONENTE DE PERDAS DA CORRENTE DE EXCITAÇÃO

As perdas em vazio do transformador correspondem as perdas no ferro, uma pequena perda nos dielétricos e no cobre. Geralmente, são as perdas no ferro (perdas por histerese e perdas por corrente de Foucault) são relevantes.

Na prática as perdas no ferro são determinadas em testes de laboratório, entretanto, as equações que se seguem mostram o efeito qualitativo de vários fatores de perdas.

$$P_f = P_h + P_e \quad (6)$$

$$P_h = k_h f B_{\max}^x \quad (7)$$

$$P_e = k_e f^2 e^2 B_{\max}^x \quad (8)$$

onde:

$P_h$  = perda por histerese;

$P_e$  = perda por corrente de Foucault;

$f$  = frequência;

$e$  = espessura da laminação;

$B_{\max}$  = densidade de fluxo máximo;

$k_h$ ,  $k_e$  e  $x$  são fatores que dependem da qualidade do aço.

## 2.3 - CORRENTE TOTAL DE EXCITAÇÃO

Conforme visto nos itens anteriores, a corrente de excitação de um transformador é composta de componentes de perdas e de magnetização. Um transformador por razões econômicas deve ser projetado para trabalhar no joelho da curva de saturação na tensão nominal. Assim sendo, uma tensão acima da nominal acarretará o aumento da corrente de excitação.

## 2.4 - CORRENTE DE INRUSH

Para as condições de excitação normais, os transformadores utilizados nos sistemas elétricos de potência requerem, em regime permanente, uma corrente de magnetização da ordem de 0.5% a 2% da corrente nominal. Por causa da saturação no ferro, esta corrente é não senoidal. A quantidade de distorção depende da densidade de fluxo no qual o mesmo está operando.

Supondo que o transformador é desligado, permanece um fluxo residual no núcleo, determinado pelas propriedades de saturação e histerese magnética, bem como pelas condições segundo as quais a corrente foi interrompida.

Durante o processo de reenergização, surgem correntes transitórias significativamente maiores que as nominais, com duração de vários ciclos, de modo a poderem alcançar, nas condições mais desfavoráveis de ligamento, valores de pico iniciais superiores a 10 vezes o valor de pico da corrente de serviço. Esse efeito é conhecido como *inrush*. A intensidade e a duração deste fenômeno dependem dos seguintes fatores:

A corrente de inrush se desenvolve quando da energização do transformador e a sua magnitude depende dos seguintes fatores:

- ▶ Tamanho do transformador;
- ▶ Impedância equivalente da fonte;
- ▶ Propriedades magnéticas do núcleo;
- ▶ Fluxo magnético remanente;
- ▶ Momento da energização do transformador.

A corrente de inrush pode aparecer em todas as fases e no neutro aterrado. A magnitude é sempre diferente nas três fases, bem como no neutro. Em transformadores com núcleo de aço orientado, a magnitude pode atingir 5 a 10 vezes a corrente nominal quando a energização é feita pelo enrolamento externo (geralmente o lado de alta) e de 10 a 20 vezes quando a energização for pelo enrolamento interno (geralmente do lado de baixa).

Para analisar este fenômeno é mais fácil determinar primeiramente o fluxo no circuito magnético e depois a corrente. Este procedimento é recomendável porque a onda do fluxo magnético não se afasta muito da senoidal, enquanto que a onda da corrente é geralmente bastante distorcida.

A relação usada para determinar o fluxo transitório no núcleo do transformador imediatamente após a sua energização, é dada por:

$$\Phi = -\Phi_{\max} \cos(\omega t + \phi) + \Phi_t \quad (9)$$

Para  $t = 0$ , tem-se:

$$\Phi_o = -\Phi_{\max} \cos \phi + \Phi_{t_o} \quad (10)$$

Onde

- ▶  $\Phi_o$  : fluxo magnético remanente no núcleo do transformador;
- ▶  $-\Phi_{\max} \cos \phi$  : fluxo de regime permanente para  $t=0$ ;
- ▶  $\Phi_{t_o}$  : fluxo transitório inicial.

Na equação (10), o ângulo  $\phi$  determina o valor instantâneo da tensão da fonte no instante em que o transformador é energizado. Se o transformador for energizado quando a tensão da fonte for máxima positiva,  $\phi$  será igual a  $90^\circ$ . Considerando que um transformador com fluxo remanente nulo seja energizado no instante da tensão máxima positiva. Para esta condição  $\Phi_o$  e  $\cos \phi$  serão ambos iguais a zero, então  $\Phi_{t_o}$  será também igual a 0. O fluxo magnético no transformador, portanto, inicia-se sob condições normais e não haverá componente transitório.

Considerando-se, entretanto, um transformador com fluxo remanente nulo energizado no instante da tensão instantânea igual a 0, existirão as seguintes condições:

- ▶  $\phi = 0$
- ▶  $-\Phi_{\max} \cos \phi = \Phi_{\max}$
- ▶  $\Phi_{t_o} = \Phi_{\max}$

Substituindo em (9):

$$\Phi = -\Phi_{\max} \cos(\omega t) + \Phi_{\max} \quad (11)$$

O fluxo magnético dado por (11) é mostrado na Fig. 3(a). O fluxo magnético total é a soma de um fluxo senoidal e um fluxo contínuo, alcançando um valor de pico igual a duas vezes o fluxo normal máximo. Na Fig. 3(a) nota-se que não há nenhum decrescimento, pelo fato de não ter sido considerado a componente de perdas. A Fig. 3(b) mostra uma onda similar, na qual foi considerado um fluxo magnético remanente de 60% e energizado no instante da tensão instantânea nula.

Após a variação do fluxo magnético ter sido determinada pelo método descrito, a onda de corrente pode ser obtida graficamente conforme mostrado na Fig. 4. Neste caso foi considerado um transformador com fluxo remanente nulo energizado no instante da

tensão igual a 0. Para qualquer fluxo, a corrente correspondente pode ser determinado a partir da curva  $B-H$  do transformador. Note-se que apesar de o fluxo máximo ser somente duas vezes ao valor normal, a corrente atinge um valor muitas vezes maior do que o valor da corrente de excitação. Esta alta corrente é atingida por causa do alto grau de saturação do circuito magnético do transformador.

Nesta discussão as perdas foram desprezadas para simplificar o problema. As perdas são importantes num transformador real porque atenua a corrente máxima de *inrush* e reduz a corrente de excitação ao valor normal após um determinado período de tempo.

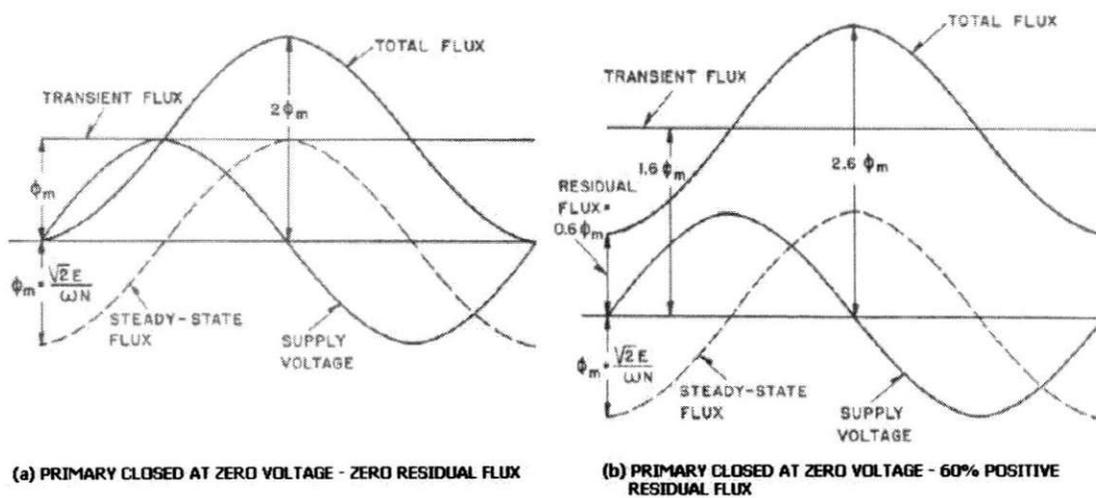


Fig. 3. Fluxos no transformador durante condições transitórias.

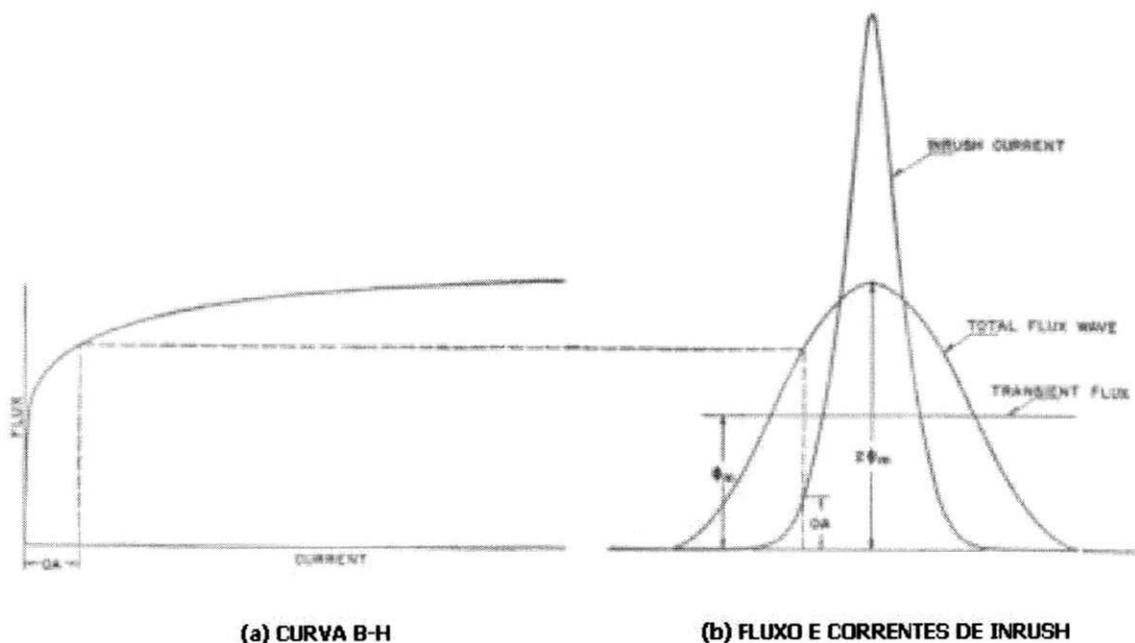


Fig. 4. Método gráfico para determinação da corrente de inrush

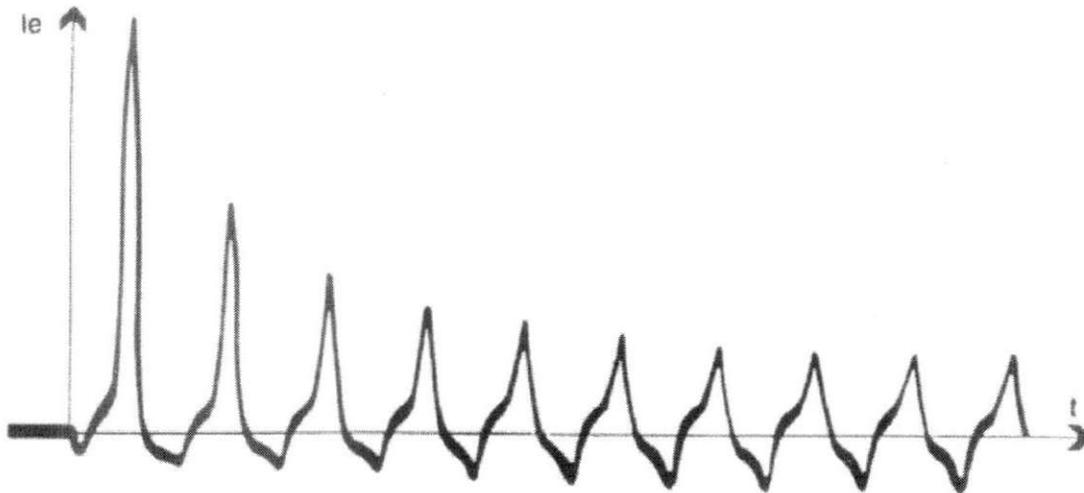


Fig. 5. Corrente de *inrush* típica de um transformador

A Fig. 5 mostra um oscilograma de uma corrente de *inrush* típica. A corrente transitória decai rapidamente durante poucos ciclos e em seguida cai mais vagarosamente. O coeficiente de amortecimento,  $R / L$ , para este circuito não é constante por causa da variação da indutância do transformador com saturação. Durante os ciclos iniciais o grau de saturação do núcleo é alto, resultando a indutância  $L$  baixa e conforme a saturação decresce a indutância aumenta, tornando o fator de amortecimento menor.

A análise de uma corrente de *inrush* típica mostra a presença de componentes harmônicas de várias ordens, conforme ilustra a Tabela 1.

Tabela 1. Componentes harmônicas

Harmônica	Amplitude ( % da fundamental)
2 <sup>a</sup>	63,0
3 <sup>a</sup>	26,8
4 <sup>a</sup>	5,1
5 <sup>a</sup>	4,1
6 <sup>a</sup>	3,7
7 <sup>a</sup>	2,4

As correntes de *inrush* podem ocasionar atuação indevida de fusíveis rápidos, bem como de relés de proteção diferenciais e de sobrecorrente instantâneos. Também pode ocorrer sobretensões causadas por fenômenos de ressonância harmônica, notadamente em sistemas de transmissão em corrente contínua.

O conhecimento do valor que esta corrente atingirá é importante para se determinar o estresse mecânico máximo que poderá ocorrer nos enrolamentos do transformador, bem como realizar de maneira adequada o projeto de proteção do sistema elétrico.

### 3. CHAVE SÍNCRONA MICRO CONTROLADA (CSuC)

Quando o transformador é energizado por uma chave comum, é impossível se ter controle sobre seu ângulo de gatilho ( $\theta$ ), sendo necessário para esta tarefa o uso de chaves síncronas. De modo mais tradicional, os circuitos de disparos analógicos têm seu ângulo de gatilhamento dado por um circuito temporizador que, além da desvantagem da sua imprecisão, o seu ajuste sempre se dá com o emprego do osciloscópio, tornando sua calibração trabalhosa em ensaios onde se faz necessário coletas de dados para vários ângulos de gatilho. Sendo assim a chave síncrona micro-controlada se apresenta como uma solução bastante prática, haja vista ser um equipamento compacto e preciso.

Na chave síncrona, foram implementadas as seguintes funções:

- ▶ Controle do ângulo de disparo entre 0 e 180°;
- ▶ Desligamento em modo manual e automático.

A lógica de funcionamento da CSuC é mostrada através da Fig. 6.

Ao se ligar a CSuC todas as variáveis de controle do uC são zeradas de modo que o sistema aguarda a escolha do ângulo de disparo que são ajustada pelos cursores “<” e “>”, ao se confirmar este valor escolhe-se o modo de desligamento, que são:

- ▶ **Manual:** Neste modo o ângulo de desligamento não é controlado e o instante de desligamento se dá tão somente pressionando os botões R (*reset*) ou D.
- ▶ **Automático:** Neste modo o ângulo de desligamento é controlado e de acordo com a quantidade de ciclos escolhido.

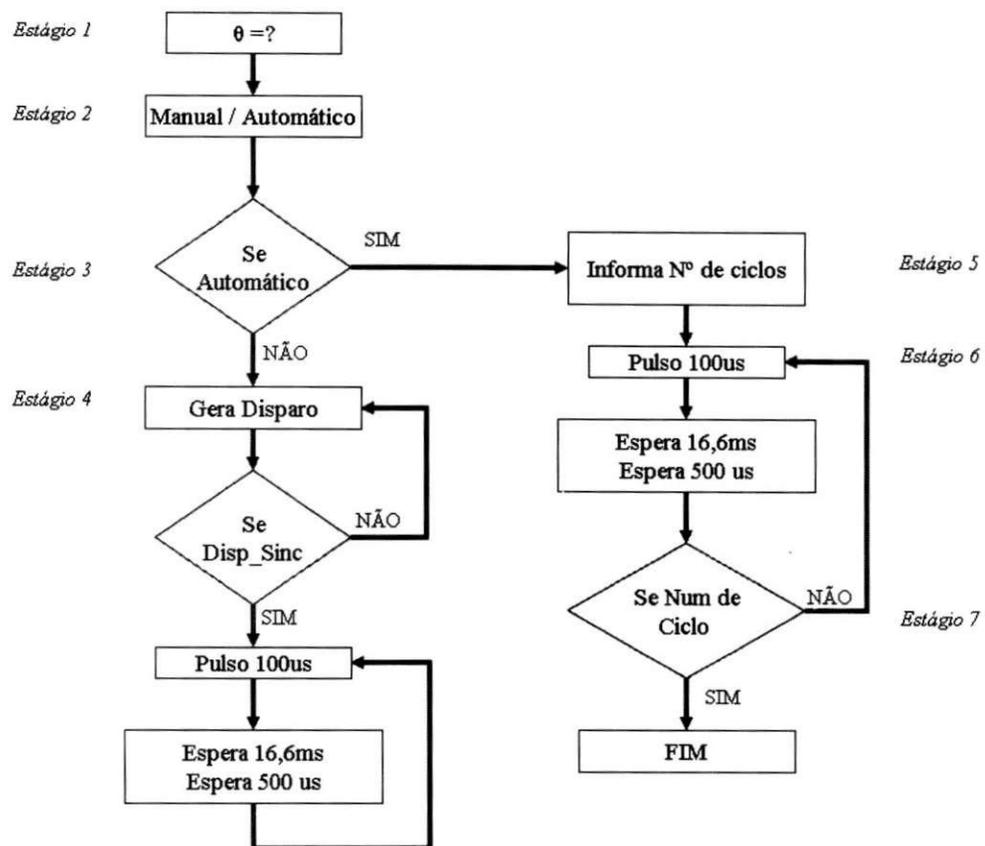


Fig. 6. Diagrama de estados.

Na Fig. 7 é mostrada uma foto da CSuC implementada:



Fig. 7. Vista frontal da CSuC

### 3.1 - CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS

- ▶ Alimentação: 220V
- ▶ Tensão máxima na chave: 400 V
- ▶ Corrente máxima,  $I_{máx} = 4$  A RMS
- ▶ Ângulo de gatilho:  $0 \leq \theta \leq 180^\circ$
- ▶ Ciclos de desligamento:  $\leq 10$
- ▶ Microcontrolador: PIC 16F628

### 3.2 - O FUNCIONAMENTO DO CIRCUITO

No ponto A do circuito da Fig. 8, tem-se uma amostra do sinal senoidal da fonte de alimentação, que tem a função de sincronizar o gatilho. Em seguida esse sinal de sincronismo é isolado eletricamente por um transformador 220 / 6V ao qual está ligado um circuito detector de zero através de um amplificador operacional (LM741) sem realimentação negativa. Neste caso, é gerada na saída (ponto B) uma onda quadrada com mesma frequência do sinal de entrada. A onda quadrada disponível em B passa por um circuito derivador RC, sendo produzido em C uma série de pulsos sempre que a onda quadrada muda de inclinação. Os pulsos no ponto C são aplicados à entrada de um amplificador não inversor (optoacoplador), que não conduz durante os pulsos negativos, obtendo-se no ponto D apenas os pulsos positivos do sinal de entrada. O sinal em D é aplicado a um amplificador inversor, produzindo um sinal no ponto E, que é o complemento do sinal de entrada. Uma vez o sinal de sincronismo estando condicionado o ponto de E é ligado a pino 17 do micro controlador PIC 16F628 onde acontece todo o processamento digital.

O sinal de saída do PIC “atuador” é conectado a um optoacoplador, obtendo no ponto F pulsos devidamente amplificados. O sinal de F é aplicado ao primário de um transformador de pulsos, utilizado como isolamento para disparar um TRIAC. Assim, estabelece-se condução no circuito ao qual o transformador acha-se ligado assim o ângulo inicial da tensão de alimentação.



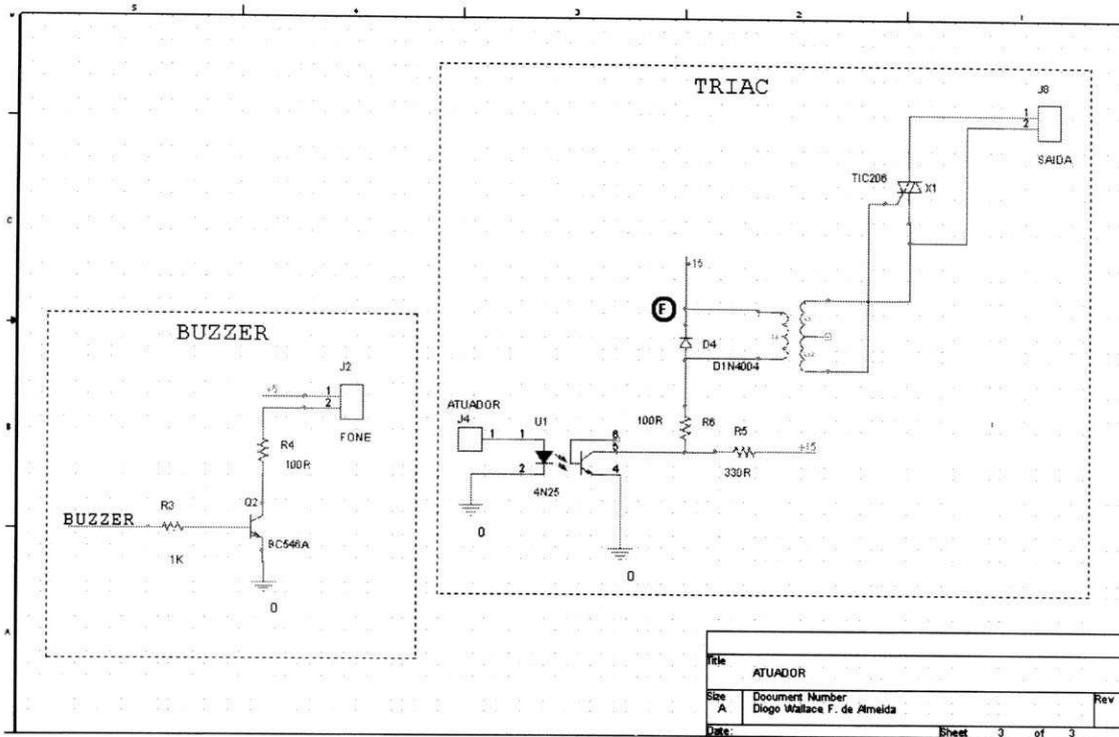


Fig. 10. Circuito atuador.

### 3.3 - ROTINA COMPUTACIONAL

A rotina computacional executada pelo PIC foi implementada utilizando o emulador PIC CDLite, em seguida é mostrado a código fonte.

'Define pinagem utilizada pelo lcd

```
DEFINE LCD_DREG PORTB
DEFINE LCD_DBIT 4
DEFINE LCD_RSREG PORTB
DEFINE LCD_RSBIT 3
DEFINE LCD_EREG PORTB
DEFINE LCD_EBIT 2
DEFINE LCD_BITS 4
DEFINE LCD_LINES 2
DEFINE LCD_COMMANDUS 2000
DEFINE LCD_DATAUS 50
```

'Defeni variáveis utilizada no programa

```
BUF1      VAR BYTE
BUF2      VAR BYTE
BUF3      VAR BYTE
BUF4      VAR BYTE
```

```
ANGULO    VAR BYTE
MANUAL    VAR BIT
EST       VAR BYTE
NCICLO    VAR BYTE
CONT1     VAR BYTE
CONT2     VAR BYTE
RETARDO   VAR WORD
```

```
CH_MAIS   VAR PORTA.4
CH_MENOS  VAR PORTA.3
CH_CONF   VAR PORTA.2
CH_DISP   VAR PORTA.1
SINC      VAR PORTA.0
```

```
BEEP      VAR PORTB.0
TRIAC     VAR PORTB.1
```

```
CMCON = 7
VRCON = 0
OPTION_REG.7 = 1      'Enable PORTB pull-ups
```

Clear

```
TRISA = %00011111
TRISB = %00000000
PORTB = 0
```

Input CH\_MAIS

Input CH\_MENOS  
Input CH\_CONF  
Input CH\_DISP  
Input SINC

Output TRIAC  
Output BEEP

EST = 1  
NCICLO = 1  
ANGULO = 0  
MANUAL = 1  
cont2 = 0

GoSub MONTATELA

\*\*\*\*\*

"Verifica se as chaves iniciar foi pressionada.  
'se pressionada desvia para o ponto (DESV\_INI).

**Inicio:**

Pause 25

Button CH\_MAIS,0,100,10,BUF1,1,DESV\_MAIS

Button CH\_MENOS,0,100,10,BUF2,1,DESV\_MENOS

Button CH\_CONF,0,100,10,BUF3,1,DESV\_CONF

Select Case EST

Case 3

IF CH\_DISP = 0 Then DESV\_DISP

Case 6

IF CH\_DISP = 0 Then DESV\_DISP

End Select

GoTo INICIO

\*\*\*\*\*

BOTÃO MAIS

\*\*\*\*\*

DESV\_MAIS:

```
Select Case EST
  Case 1
    IF ANGULO < 180 Then
      ANGULO = ANGULO + 1
    EndIF

  Case 2
    Toggle MANUAL

  Case 5
    IF NCICLO < 10 Then
      NCICLO = NCICLO + 1
    EndIF
End Select

GoSub MONTATELA

Pause 150

IF CH_MAIS = 1 Then INICIO
  GoTo DESV_MAIS
```

\*\*\*\*\*

BOTÃO MENOS

\*\*\*\*\*

DESV\_MENOS:

```
Select Case EST
  Case 1
    IF ANGULO > 0 Then
      ANGULO = ANGULO - 1
    EndIF

  Case 2
    Toggle MANUAL

  Case 5
    IF NCICLO > 0 Then
      NCICLO = NCICLO - 1
    EndIF
End Select

GoSub MONTATELA

Pause 150

IF CH_MENOS = 1 Then INICIO
  GoTo DESV_MENOS
```

\*\*\*\*\*

## BOTÃO CONF

\*\*\*\*\*

DESV\_CONF:

```
IF CH_CONF = 1 Then INICIO_CONF           'Espera o botão ser liberado
    Pause 100
    GoTo DESV_CONF
```

INICIO\_CONF:

```
    Select Case EST
        Case 1
            EST = 2

        Case 2
            IF MANUAL = 1 Then
                EST = 3
            Else
                EST = 5
            EndIF

        Case 5
            EST = 6
```

End Select

GoSub MONTATELA

GoTo INICIO

\*\*\*\*\*

## BOTÃO DISP

\*\*\*\*\*

DESV\_DISP:

```
IF CH_DISP = 1 Then INICIO_DISP      'Espera o botão ser liberado
    Pause 100
    GoTo DESV_DISP
```

INICIO\_DISP:

RETARDO = ANGULO \* 47

```
    Select Case EST
        Case 3
            EST = 4

        Case 6
            EST = 7
```

End Select

GoSub MONTATELA

```
IF MANUAL = 1 Then      'Verifica se esta no modo manual ou auto
    GoTo LOOP_SINC_MANUAL
Else
    GoTo LOOP_SINC_AUTO
EndIF
```

```
*****  
MODULO MANUAL
```

```
*****
```

```
LOOP_SINC_MANUAL:  
  IF SINC = 0 Then LIB_PULSO_MANUAL 'Espera a passagem pelo zero  
  GoTo LOOP_SINC_MANUAL
```

```
LIB_PULSO_MANUAL:
```

```
  PauseUs RETARDO
```

```
LOOP_PULSO_MANUAL:  
  TRIAC = 1  
  PauseUs 100  
  TRIAC = 0  
  IF CH_DISP = 0 Then PARAR  
    PauseUs 566  
    GoTo LOOP_PULSO_MANUAL
```

\*\*\*\*\*

MODO AUTOMATICO

LOOP\_SINC\_AUTO:

cont2 = 0

IF SINC = 0 Then LIB\_PULSO\_AUTO

'Espera a passagem pelo zero

GoTo LOOP\_SINC\_AUTO

LIB\_PULSO\_AUTO:

PauseUs RETARDO

LOOP\_PULSO\_AUTO:

For CONT1 = 1 TO 25

TRIAC = 1

PauseUs 100

TRIAC = 0

IF CH\_DISP = 0 Then PARAR

PauseUs 556

Next CONT1

CONT2 = CONT2 + 1

IF CONT2 = NCICLO Then PARAR

GoTo LOOP\_PULSO\_AUTO

\*\*\*\*\*

PARAR:

IF CH\_DISP = 1 Then DESV\_PARAR

'Espera o botão ser liberado

Pause 100

GoTo PARAR

DESV\_PARAR:

TRIAC = 0

Select Case EST

Case 4

EST= 3

Case 7

EST = 6

End Select

GoSub MONTATELA

GoTo INICIO

\*\*\*\*\*

## MONTATELA

\*\*\*\*\*

MONTATELA:

Sound BEEP,[120,5]

BEEP = 0

Select Case EST

Case 1

LCDOut \$fe,1,"ANGULO GATILHO"  
LCDOut \$fe,\$C0,"ANG= ",#ANGULO, " GRAUS"

Case 2

LCDOut \$fe,1,"MODO OPERACAO:"  
IF MANUAL = 1 Then  
    LCDOut \$fe,\$C0,"> MANUAL"  
Else  
    LCDOut \$fe,\$C0,"> AUTOMATICO"  
EndIF

Case 3

LCDOut \$fe,1,"ANG=",#ANGULO, " - MANUAL"  
LCDOut \$fe,\$C0,"PRES (D) INICIAR"

Case 4

LCDOut \$fe,1,"ANG=",#ANGULO, " - MANUAL"  
LCDOut \$fe,\$C0,"PRES. (D) PARAR"

Case 5

LCDOut \$fe,1,"NUMERO DE CICLOS"  
LCDOut \$fe,\$C0,"NC= ",#NCICLO

Case 6

LCDOut \$fe,1,"ANG=",#ANGULO, " - NC=",#NCICLO  
LCDOut \$fe,\$C0,"PRES. (D) INICIAR"

Case 7

LCDOut \$fe,1,"ANG=",#ANGULO, " - NC=",#NCICLO  
LCDOut \$fe,\$C0,"PRES. (D) PARAR"

End Select

Return

End

#### 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados experimentais para aferição do ângulo de gatilho foram realizados com o auxílio de um osciloscópio digital do tipo **DSO3202A**, da Agilent<sup>®</sup>, conectado com via porta USB com um microcomputador.

Sendo assim são mostrados em seguida os resultados obtidos para alguns testes realizados:

##### MODO MANUAL

► **Ângulo de gatilho,  $\theta = 0^\circ$ .**

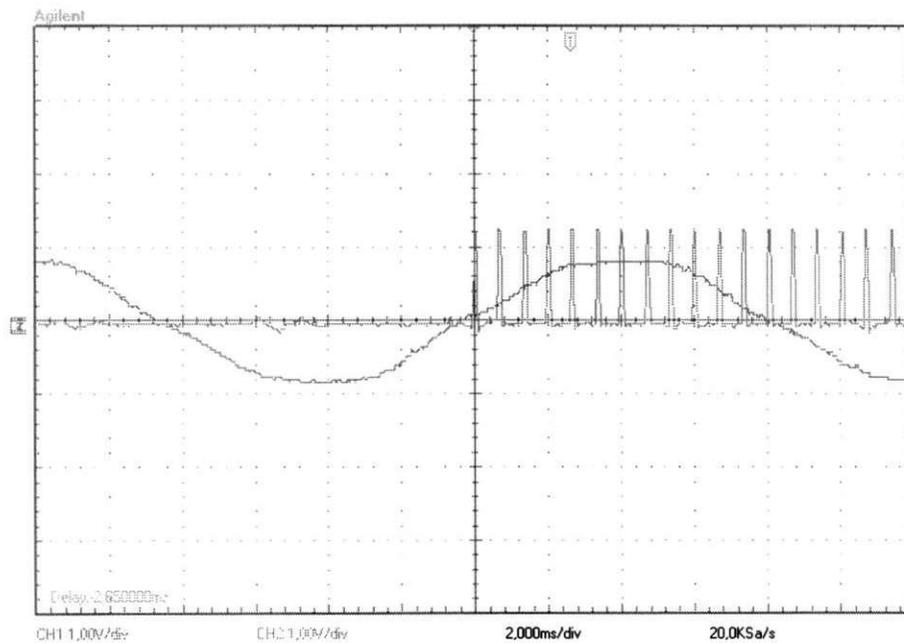


Fig. 11

► **Ângulo de gatilho,  $\theta = 30^\circ$ .**

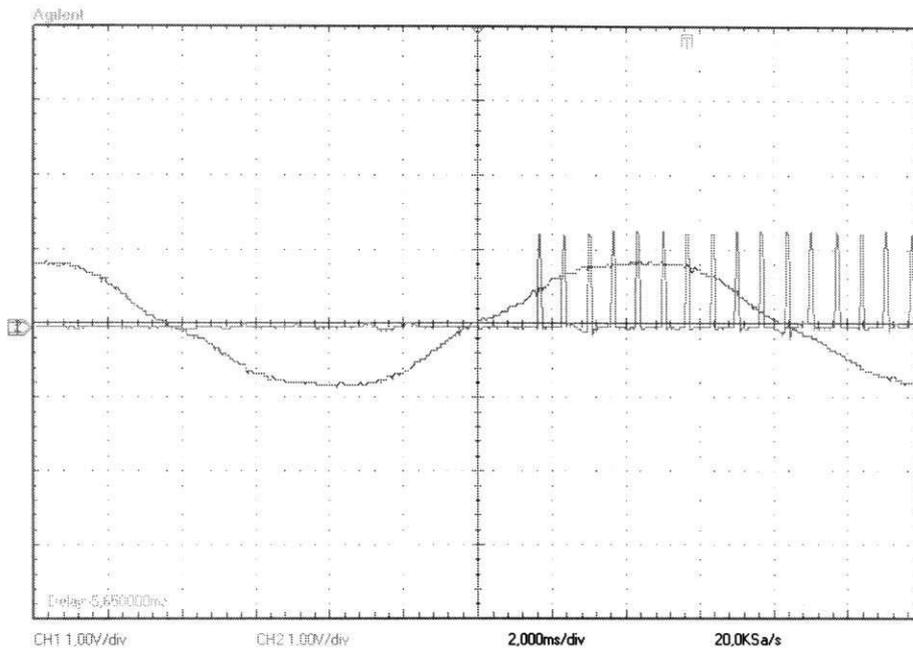


Fig. 12

► **Ângulo de gatilho,  $\theta = 60^\circ$ .**

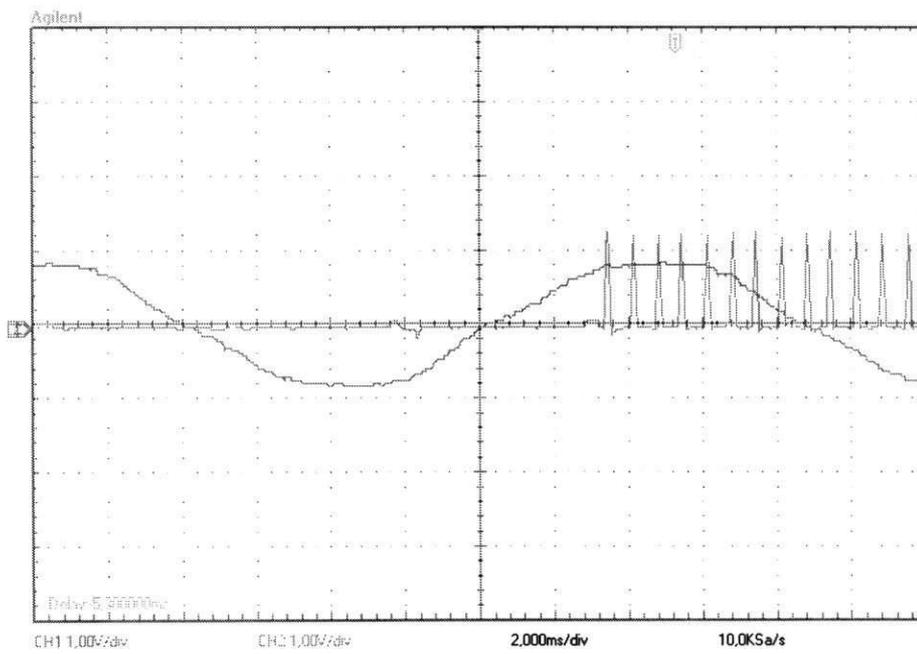


Fig. 13

► **Ângulo de gatilho,  $\theta = 90^\circ$ .**

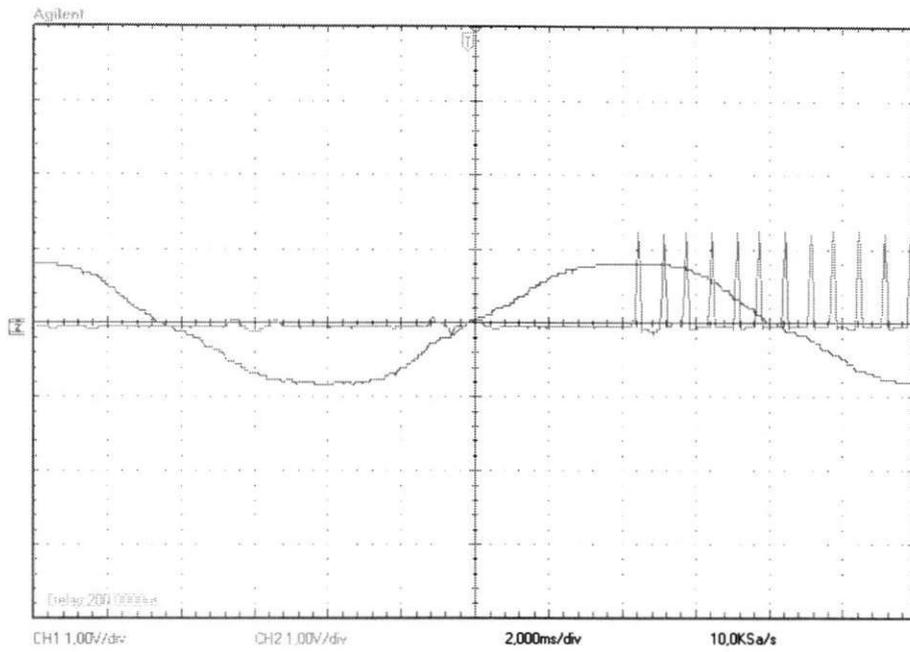


Fig. 14

► **Ângulo de gatilho,  $\theta = 150^\circ$ .**

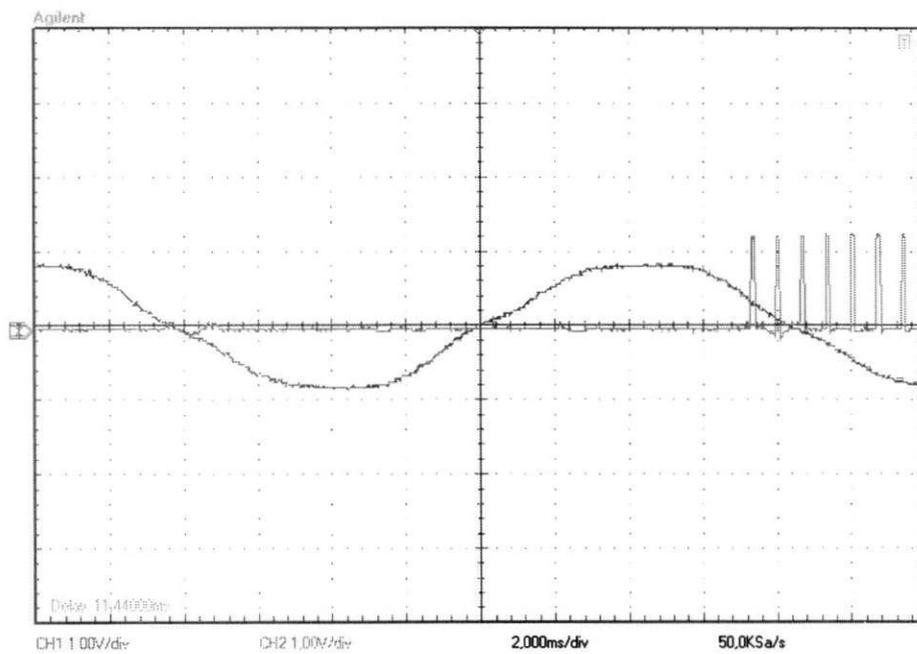


Fig. 15

## MODO AUTOMÁTICO

► **Ângulo de gatilho,  $\theta = 0^\circ$ .**

► **Número de Ciclos = 2.**

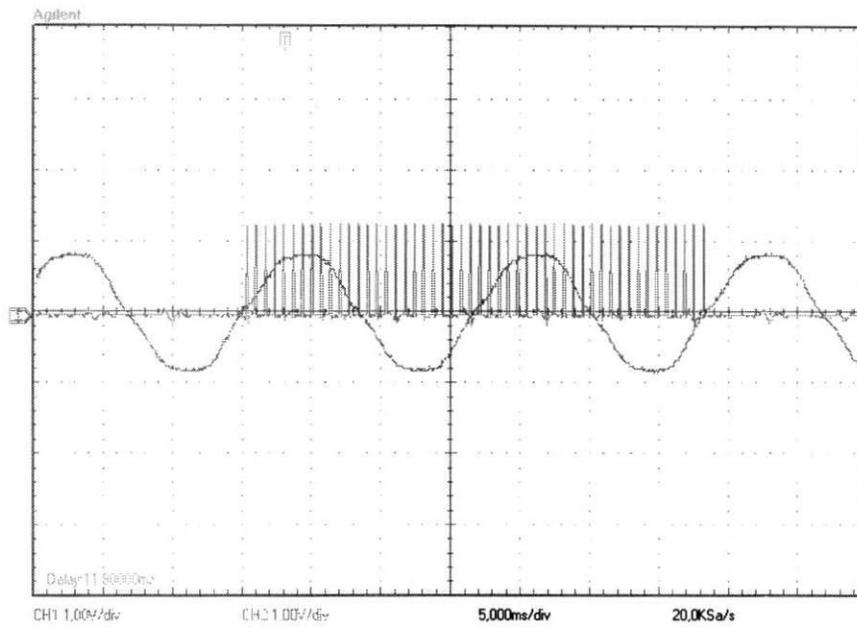


Fig. 16

► **Ângulo de gatilho,  $\theta = 30^\circ$ .**

► **Número de Ciclos = 5.**

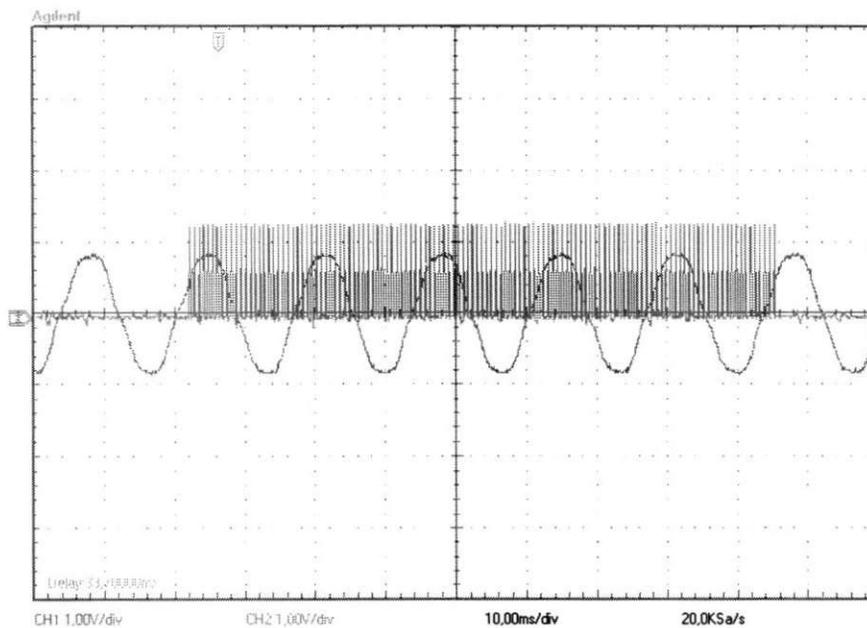


Fig. 17

Para a validação da chave síncrona foi realizado o ensaio de corrente *inrush*, no qual foram feitos cinco ensaios, verificando as correntes para os ângulos de gatilho de 0°, 30°, 45°, 60° e 90°. A Fig. 18 mostra os seguintes oscilogramas:

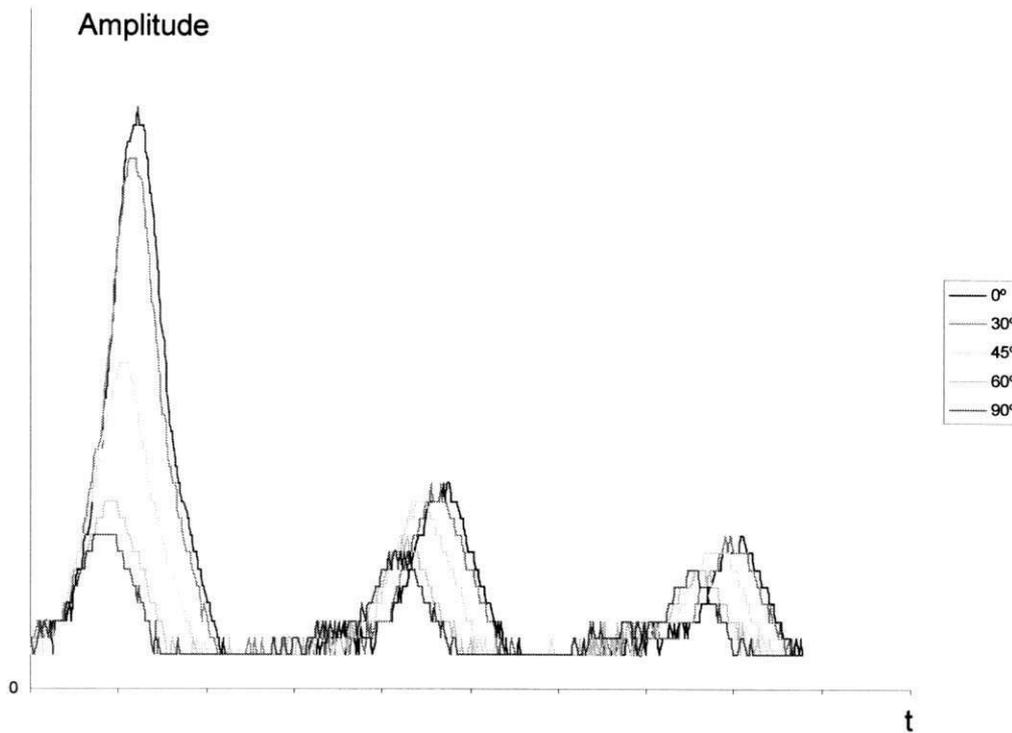


Fig. 18. Correntes de *inrush* experimentais.

Assim, tem-se a seguinte relação de sobrecorrente, em percentagem da corrente de regime permanente, *versus* o ângulo de disparo da chave síncrona,  $\theta$ .

Tabela 2. Corrente de *inrush* *versus* ângulo de gatilhamento.

Ângulo de disparo, $\theta$ (°)	1ª Pico (%)	2ª Pico (%)	3ª Pico (%)
0°	386%	71%	29%
30°	343%	57%	14%
45°	171%	29%	14%
60°	57%	14%	0%
90°	29%	5%	0%

## 5 - CONCLUSÃO

Neste trabalho, a redução da corrente de energização é alcançada pelo emprego de um controlador eletrônico para chaveamento controlado. Para o pior caso, onde a chave é acionada em  $0^\circ$ , foi obtido um pico de corrente de 386% maior que a corrente de regime permanente. Para o melhor caso ( $90^\circ$ ), o valor de pico de corrente chegou a um valor de 30% acima da corrente de *inrush*.

A chave síncrona evita atuações indevidas do sistema de proteção, bem como reduz as solicitações dielétricas e eletromecânicas impostas ao transformador devido a operações de manobra. O isolamento do transformador é assim poupado e sua vida útil tende a ser prolongada.

Assim, com a utilização deste dispositivo as correntes de *inrush* sofreram notável redução, demonstrando que os desenvolvimentos efetuados podem ser extensivos aos processos de chaveamento em sistemas de potência..

## **6 - BIBLIOGRAFIA**

- [1] Apolônio, R., Modelagem e chaveamento controlado de transformadores: Análise computacional e validação experimental (Tese de Doutorado), Roberto Apolônio – Uberlândia, 2004.
- [2] MicroEngineering Labs, PicBasic Pro Compiler, Colorado Springs, USA, 2000.
- [3] Sato, F., Proteção de Sistemas de Energia Elétrica, Notas de Aula, DSEE / UNICAMP, Campinas, SP, 2005.
- [4] Guerra, F. C. F., Proteção de Sistemas Elétricos, Notas de Aula, DEE / UFCG, Campina Grande, PB.
- [5] Garbelotti, M. V., Sistema digital para manobra sincronizada de disjuntores - estudo e especialização funcional, Ed. Ver, São Paulo, 2006.