

NELSON JUE WONG

Acionamento de motor de indução monofásico PSC com inversor de frequência aplicados a máquinas de lavar roupas domésticas.

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia de São
Carlos, da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase
em Eletrônica

ORIENTADOR: Profº. Dr. Diógenes Pereira Gonzaga

São Carlos

2010

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES
TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO,
PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

W872a Wong, Nelson Jue
Acionamento de motor de indução monofásico PSC com
inversor de frequência aplicados a máquinas de lavar
roupas domésticas / Nelson Jue Wong ; orientador Diógenes
Pereira Gonzaga. -- São Carlos, 2010.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em
Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica) -- Escola
de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2010.

1. Motores de indução. 2. Inversor de frequência.
3. Máquina de lavar roupa. 4. Motor PSC. I. Título.

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus Pais.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Diógenes Pereira Gonzaga, meu orientador, pelo compartilhamento de experiências, tanto acadêmicas quanto de vida.

Aos colegas da Whirlpool S.A. pelo apoio e resposta a dúvidas quanto ao projeto.

À empresa Whirlpool S.A., por ceder os equipamentos necessários para os ensaios cujos resultados são mostrados nesta monografia.

A todos que colaboraram direta ou indiretamente, na realização deste trabalho.

Sumário

Conteúdo

iii

| | |
|---|-----|
| Resumo..... | vi |
| Abstract | vii |
| 1 Apresentação e Relevância do Tema..... | 1 |
| 1.1 Histórico do processo de lavar roupas..... | 1 |
| 1.2 Histórico do motor de indução monofásico | 3 |
| 1.3 Relevância do tema | 5 |
| 2 Revisão Conceitual..... | 6 |
| 2.1 Motor de indução monofásico..... | 6 |
| 2.1.1 Introdução..... | 6 |
| 2.1.2 Motor de indução monofásico com partida por fase auxiliar (Split-Phase) | 11 |
| 2.1.3 Motor de indução monofásico com partida por capacitor | 13 |
| 2.1.4 Motor de indução monofásico com partida por capacitor permanente (PSC)..... | 15 |
| 2.1.5 Motor de indução monofásico com dois capacitores | 16 |
| 2.2 Ponte Retificadora..... | 17 |
| 2.2.1 Funcionamento | 18 |
| 2.3 Ponte Inversora de Frequencia | 19 |
| 2.4 Modulação PWM | 20 |
| 2.4.1 Sinal de Referência..... | 20 |
| 2.4.2 Sinal de Portadora | 21 |
| 3 Desenvolvimento..... | 22 |
| 3.1 Motor PSC de máquina de lavar roupa | 22 |
| 3.2 Desenvolvimento do Protótipo..... | 24 |
| 3.2.1 Micro controlador MC9S08AW60 e PWM | 25 |
| 3.2.2 Módulo PWM Alinhado na Borda | 28 |
| 3.2.3 Estrutura Inversor IRAMS10UP60B..... | 29 |
| 3.3 Estrutura do programa em linguagem C para gerar os sinais PWM | 30 |
| 4 Resultados | 32 |
| 5 Conclusão | 38 |
| PCB Layout..... | 39 |
| Diagrama Elétrico do Projeto | 40 |
| Lista de abreviaturas e siglas..... | 41 |

| | |
|----------------------------------|----|
| Anexo I..... | 42 |
| Anexo II | 46 |
| 6 Referência Bibliográfica | 54 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Máquina lavadora de roupas proposta por Hamilton Smith [1] | 2 |
| Figura 2 - Máquina lavadora de roupas patenteada por Alva J. Fisher [1] | 2 |
| Figura 3 - Lavadora de roupas moderna..... | 3 |
| Figura 4 – a) Dispositivo de Walter Baily. b) Réplica do quarto modelo de Galileo Ferraris. c) Protótipo do motor de Nikola Tesla, respectivamente [2]..... | 4 |
| Figura 5 - Representação Física e Esquemática de um Motor de Indução Monofásico [4]. | 6 |
| Figura 6 - Ondas espaciais de força magnetomotriz de um motor de indução monofásico [4]. ... | 7 |
| Figura 7 - Representação das ondas de força magnetomotriz por fasores espaciais [4]. | 8 |
| Figura 8 - Características de Conjugado versus Velocidade de um Motor Monofásico [4]. | 9 |
| Figura 9 - Campo magnético pulsante B gerado por alimentação monofásica [5]..... | 10 |
| Figura 10 - Campo magnético girante B formado por alimentação bifásica [5]. | 10 |
| Figura 11 - Motor de Fase Auxiliar – Diagrama de Ligações [4]. | 11 |
| Figura 12 - Motor de Fase Auxiliar – Relações de Fase [4]..... | 12 |
| Figura 13 - Motor de Fase Auxiliar – Característica conjugado-velocidade [4]..... | 12 |
| Figura 14 - Motor com partida a capacitor – Diagrama de Ligações [4]. | 13 |
| Figura 15 - Motor com partida a capacitor –Relações de Fase [4]..... | 14 |
| Figura 16 - Motor com partida a capacitor – Característica conjugado-velocidade [4]. | 14 |
| Figura 17 - Motor com Capacitor Permanente – Diagrama de Ligações [4]. | 15 |
| Figura 18 - Motor com Capacitor Permanente: Característica conjugado-velocidade [4]. | 16 |
| Figura 19 - Motor com Capacitor de Partida e de Funcionamento – Diagrama de Ligações [4]. | 16 |
| Figura 20 - Motor com dois capacitores – Característica conjugado-velocidade [4]..... | 17 |
| Figura 21 - Funcionamento Ponte Completa semi-ciclo positivo. | 18 |
| Figura 22 - Funcionamento Ponte Completa semi-ciclo negativo. | 19 |
| Figura 23 - Forma de onda na saída de um inversor. | 20 |
| Figura 24 - Circuito de um inversor trifásico. | 20 |
| Figura 25 - Comparação para gerar um sinal PWM..... | 21 |
| Figura 26 - Esquema de ligação do motor de indução monofásico usado na máquina de lavar roupas. | 23 |
| Figura 27 - Capacitor e Motor PSC WEG usado nas máquinas de lavar roupas. | 23 |
| Figura 28 - Esquema de ligação do motor de indução monofásico usado na máquina de lavar roupas sem o capacitor permanente. | 24 |
| Figura 29 - Diagrama do circuito completo para o acionamento do motor PSC através de inversor de frequência. | 25 |
| Figura 30 - Componentes integrados. Retificador GBJ2006. Micro controlador MC9S08AW60. Inversor IRAMS10UP60B, respectivamente. | 25 |
| Figura 31 - Sinais modulados por Largura de Pulso. | 26 |
| Figura 32 - Sinais PWM com mesmo período e largura de pulso diferentes. | 27 |
| Figura 33 - Diagrama de blocos do temporizador. | 28 |

| | |
|---|----|
| Figura 34 – Comparação de saída de sinal PWM. | 29 |
| Figura 35 - Esquemático interno do inversor IRAMS10UP60B [10]. | 30 |
| Figura 36 - Motor funcionando com o capacitor..... | 32 |
| Figura 37 - Sinal das tensões defasadas geradas pelo osciloscópio. Cálculo da defasagem. | 33 |
| Figura 38 - das tensões defasadas geradas pelo osciloscópio. Cálculo da defasagem. | 33 |
| Figura 39 - Cálculo da defasagem. | 34 |
| Figura 40 - Foto do Protótipo (vista superior)..... | 35 |
| Figura 41 - Foto do Protótipo (vista inferior)..... | 35 |
| Figura 42 - Lógica de acionamento das chaves..... | 36 |
| Figura 43 - Sinal de PWM gerado pelo micro..... | 36 |
| Figura 44 - Sinal de PWM defasado em relação ao anterior gerado pelo micro para entrada no Driver do inversor. | 37 |
| Figura 45 - Tensões de saída do inversor defasadas para alimentação do motor PSC sem capacitor. | 37 |

Resumo

Em máquinas de lavar roupas e outras aplicações domésticas, o motor de indução monofásico é o mais usado. Os motores de indução monofásicos necessitam de dois enrolamentos estatóricos para criação de um campo magnético girante: um enrolamento principal e um enrolamento auxiliar. No motor de indução de fase dividida com capacitor permanente (PSC) tem sua construção consistindo de dois enrolamentos permanentes (normalmente enrolados com fio da mesma bitola e com o mesmo número de espiras, isto é, idênticos) com seus eixos deslocados de 90° elétricos no espaço. O fato de seus enrolamentos serem idênticos, ou seja, o enrolamento auxiliar não tem uma relação de resistência/reatância mais alta do que o enrolamento principal, as duas correntes não ficam fora de fase para criação de um campo magnético girante, desta forma para ter o deslocamento angular no tempo entre as duas correntes é obtido por meio de um capacitor em série com o enrolamento auxiliar. O objetivo deste trabalho é utilizar um circuito inversor de frequência para fazer o acionamento do motor PSC. Neste trabalho, iremos retirar o capacitor permanente e sua função será realizada pela ponte inversora de frequência, gerando duas senoides defasadas 90° no tempo uma em relação à outra.

Abstract

In washing machines and other household applications, the single-phase induction motor is the most used. Induction motors require two-phase stator windings to create a rotating magnetic field: a main winding and an auxiliary winding. In the permanent split capacitor motor (PSC) has its construction consisting of two windings permanent with their axes displaced 90° electrical at space. The fact that its windings are identical, the auxiliary winding has a resistance / reactance higher than the main winding, the two currents are not out of phase to create a rotating magnetic field, so the phase shift in the two currents is obtained by insert a capacitor in series with the auxiliary winding. The objective of this monograph is to use a frequency inverter circuit to drive the PSC motor. Will be removed the permanent capacitor and its function will be performed by frequency inverter bridge, generating two sinusoids 90° out of phase in time.

1 Apresentação e Relevância do Tema

Esta dissertação tem como objeto de estudo o acionamento do motor de indução monofásico usado em uma máquina de lavar roupas domésticas. Por este motivo, é interessante que se apresente o funcionamento deste eletrodoméstico tão comum atualmente. Neste capítulo será apresentado um breve histórico do processo de lavagem de roupas e um breve histórico do motor de indução monofásico que é o motor mais usado atualmente nas máquinas de lavar roupas.

1.1 Histórico do processo de lavar roupas

O processo de lavagem de roupas é tão antigo quanto a existência das roupas. A medida que a humanidade foi evoluindo, este processo também evoluiu. Há relatos de que em sociedades antigas já havia métodos de lavagem que usavam areias abrasivas e pedras encontradas nas margens de rios para a lavagem das roupas. Há também notas históricas sobre os marinheiros do período das grandes navegações que, para lavar suas roupas, colocavam-nas em um saco permeável que era amarrado ao navio. O choque do saco com o casco do navio e a ação das ondas permitiam que, passado um determinado tempo, as roupas ficassem menos sujas.

Os relatos acima mostram que já era conhecido desde a antiguidade o fato que o choque das roupas contra algo permitia a extração de sujeira. Em outras palavras, para que se lave roupas é interessante que elas sejam esfregadas. Baseado nesta idéia, Nathaniel Briggs patenteou em 1797 uma máquina de lavar roupas. Pouco se sabe sobre esta máquina, mas especula-se que ela nada mais era que uma tábua de esfregar roupas. De qualquer forma, com ela não seria mais necessário procurar pedras ou areias abrasivas para a lavagem de roupas. No entanto, o processo continuava individual, ou seja, cada peça de roupa demandaria uma atenção especial.

Na tentativa de poder tratar o conjunto de roupas sujas como um todo e automatizar o processo de esfregá-las, foi criada por Hamilton Smith a máquina de lavar rotativa, patenteada em 1858. Esta máquina consiste de um tambor rotativo movido manualmente onde eram colocadas as roupas. A movimentação do tambor permitia que as roupas se chocassem contra as paredes e contra elas mesmas de forma que, com isto, fossem esfregadas [1]. Nestas máquinas já eram usados alguns princípios que são usados até hoje. Uma máquina destas é mostrada na Figura 1.



Figura 1 - Máquina lavadora de roupas proposta por Hamilton Smith [1]

No entanto, as máquinas manuais requeriam muito esforço do usuário. Para resolver este inconveniente no início do século XX foi criada por Alva J. Fisher uma máquina de lavar rotativa movida a motor elétrico. Esta máquina, conhecida como Thor, contava também com um par de cilindros rotativos que, ao se passar a roupa entre eles, faziam com que o excesso de umidade fosse extraído. A máquina de Fisher é mostrada na Fig. 2.

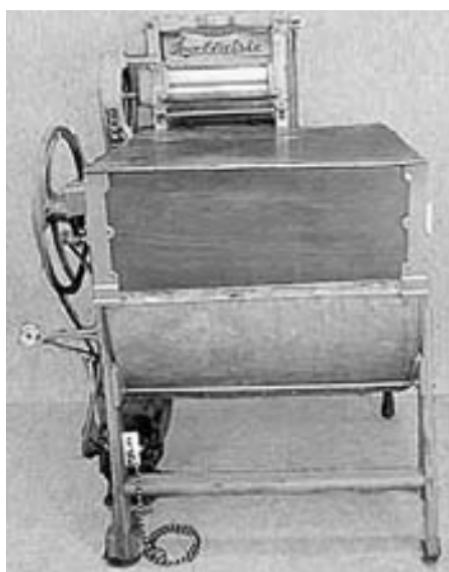


Figura 2 - Máquina lavadora de roupas patenteada por Alva J. Fisher [1]

As máquinas do início do século XX não eram totalmente automatizadas. Era necessário que elas fossem enchidas e esvaziadas manualmente. Além disso, não havia muitas normas de segurança visando o usuário, de forma que muitas vezes ele era sujeito a choques elétricos. Além disso, algumas vezes a água entrava em contato com o motor, causando curtos circuitos e até mesmo pequenos incêndios.

Com o passar do século XX, as máquinas de lavar roupas foram se modernizando, incorporando itens de segurança do usuário e novas tecnologias disponíveis, se tornando cada vez mais seguras e confiáveis. Atualmente, elas se tornaram mecanismos complexos em que há grande aplicação de eletrônica e teoria de controle. Uma máquina de lavar moderna é mostrada na Fig.3. Seu princípio de funcionamento é baseado tanto na ação mecânica quanto na potencialização da ação química de produtos adequados para a lavagem de roupas.

Para o futuro, espera-se que a máquina seja equipada com uma variedade de sensores e dispositivos que permitam o reconhecimento de todas as características da roupa colocada em seu interior tais quais peso, tipo de roupa, nível de sujeira, etc. Com isto, bastaria ao usuário carregar a máquina e acioná-la, sem ter que fazer nenhuma outra decisão. A máquina tomaria todas as decisões que implicassem em remoção da sujeira de roupas com o menor consumo possível de água, energia elétrica e produtos químicos.



Figura 3 - Lavadora de roupas moderna

1.2 Histórico do motor de indução monofásico

Em 1879, Walter Baily apresentou, em uma exposição realizada na cidade de Londres, um dispositivo eletromecânico que possuía três eletroímãs. Estes eletroímãs, que estavam ligados em estrela, eram chaveados manualmente na rede elétrica e causavam a rotação de um disco de cobre que ficava sustentado por uma haste, acima das bobinas.

A partir deste evento, o engenheiro italiano Galileo Ferraris iniciou seus trabalhos sobre campo magnético girante. Em 1885 através de seu protótipo comprovou que se dois enrolamentos diferentes defasados de 90° elétricos fossem percorridos por duas correntes

separadas, podiam criar campos magnéticos independentes e que quando combinados, produziam campo magnético girante sem necessidade de chaveamento externo, utilizando-se uma fonte de alimentação monofásica ou bifásica. Após o protótipo de Galileo Ferraris, Nikola Tesla desenvolveu em 1888, outro motor de indução bifásico.

A partir dos protótipos de Ferraris e Tesla, surgiu em 1893, o primeiro motor monofásico produzido em escala industrial projetado pela BBC (Brown Boveri Company), mais precisamente pelo engenheiro eletricitista Charles Eugene Lancelot Brown, o qual foi membro fundador da companhia juntamente com Walter Boveri [2].

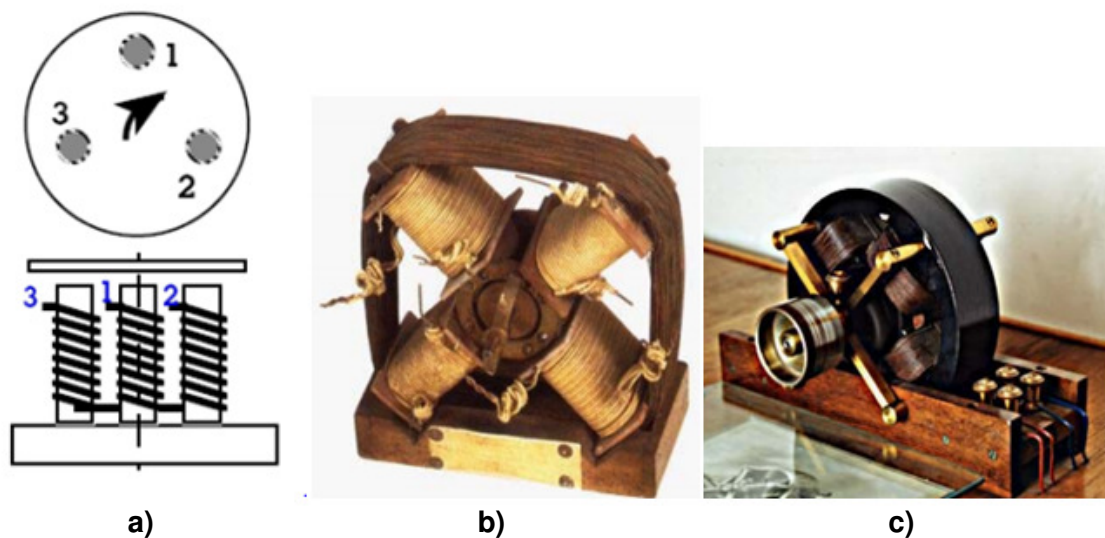


Figura 4 – a) Dispositivo de Walter Baily. b) Réplica do quarto modelo de Galileo Ferraris. c) Protótipo do motor de Nikola Tesla, respectivamente [2].

Quando comparamos o motor de indução monofásico com o motor de indução trifásico, verificamos que o monofásico, apresenta algumas desvantagens: menor rendimento, maior corrente elétrica, inexistência de torque de partida capaz de acionar o rotor da máquina sem a utilização de enrolamento auxiliar além de ser mais pesado e volumoso.

Apesar de todas essas desvantagens, o motor de indução monofásico ainda é um dos motores mais empregados em aplicações residenciais e comerciais, como por exemplo, máquinas de lavar, refrigeradores, secadoras e bombas, fato justificado pela instalação elétrica desses estabelecimentos comerciais e residências – C.A monofásica ou bifásica.

1.3 Relevância do tema

Nos dias de hoje, o uso de conversores estáticos para acionamentos de motores é uma tendência. Utilizam-se conversores para controlar a partida do motor a fim de evitar correntes excessivas e, em alguns casos, para controlar o rendimento da máquina. Em máquinas de lavar roupa será possível controlar a velocidade quando temos variação de carga (roupas), controlando a amplitude da tensão de saída para que o motor opere no escorregamento no qual se maximize o rendimento.

O uso de acionamentos eletrônicos vem aumentando em aplicações residenciais, motivado pelos benefícios que traz, como conservação de energia e eficiência energética. Esta demanda é pressionada por normas e consumidores, especialmente porque a eficiência energética é um ponto importante nos dias atuais.

2 Revisão Conceitual

2.1 Motor de indução monofásico

2.1.1 Introdução

Um motor monofásico é composto de duas partes principais, o estator e o rotor. O estator se localiza na carcaça do motor, tendo geralmente uma forma cilíndrica. O rotor é montado em um eixo que tem dois rolamentos fixos, um em cada uma de suas extremidades. A carcaça do motor tem suas placas unidas a estes rolamentos, prendendo-os. Quando os rolamentos do eixo do rotor são acoplados às placas da carcaça, estas passam a suportar o peso do rotor. Os enrolamentos do estator são fios de cobre isolados, geralmente por verniz ou poliéster.

No estator, existem dois enrolamentos ligados em paralelo, ambos ligados à mesma fonte CA monofásica, para que seja produzida a rotação no motor. Um desses enrolamentos do estator, normalmente de impedância apreciável para manter baixa a corrente de funcionamento, é chamado de enrolamento principal ou de funcionamento e é distribuído nas ranhuras, uniformemente espaçado em volta do estator. O outro enrolamento, eletricamente em paralelo com o enrolamento principal, é o enrolamento auxiliar ou de partida, que é também distribuído uniformemente em volta do estator, mas que começa em ranhuras defasadas de 90° elétricos do início do enrolamento principal.

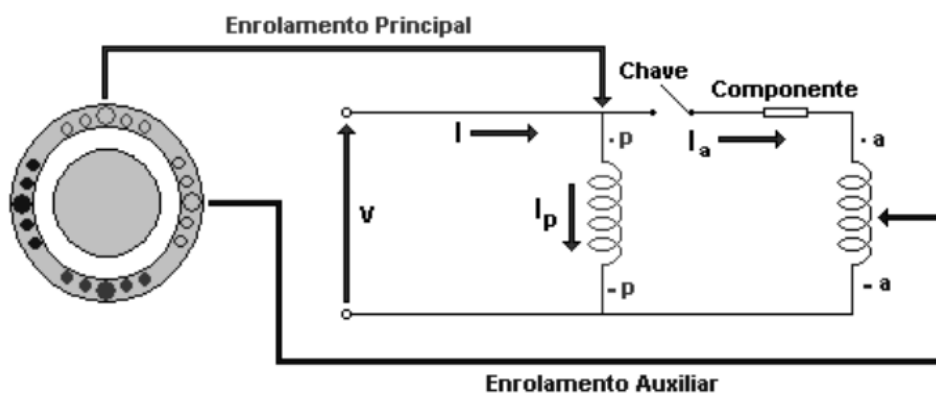


Figura 5 - Representação Física e Esquemática de um Motor de Indução Monofásico [4].

O enrolamento auxiliar tem normalmente sua corrente e impedância ajustadas em relação à tensão de linha, de modo que o campo produzido neste enrolamento seja adiantado em relação ao campo produzido pelo enrolamento principal, de forma a obter uma quadratura temporal de correntes, haja vista que espacialmente, por construção física, já há uma quadratura.

Com a máquina em repouso, ao se aplicar uma corrente alternada em seu enrolamento de estator, produz-se no mesmo uma onda fmm estacionária no espaço mas pulsante em módulo, cuja intensidade alterna em polaridade e varia senoidalmente com o tempo.

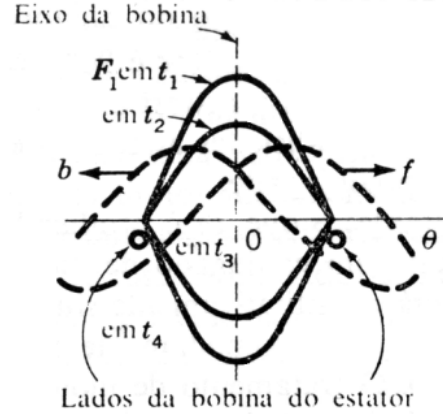


Figura 6 - Ondas espaciais de força magnetomotriz de um motor de indução monofásico [4].

A Fig. 6 mostra esquematicamente os lados concentrados de uma bobina estatórica de um motor monofásico elementar. F_1 é a onda espacial de fmm do estator e θ é o ângulo espacial elétrico contabilizado a partir do eixo da bobina.

Então:

$$F_1 = F_{1(pico)} \cdot \cos(\theta) \quad (1.1)$$

Sendo $F_{1(pico)}$ o valor instantâneo da onda de fmm no eixo da bobina, ele varia cossenoidalmente no tempo com a corrente de estator. Então:

$$F_{1(pico)} = F_{1(máx)} \cdot \cos(\omega t) \quad (1.2)$$

Onde $F_{1(máx)}$ é o valor de pico equivalente à máxima corrente instantânea. Assim, ao substituir a Eq. 1.2 na Eq. 1.1, obtém-se a onda de fmm como uma função de tempo e espaço, conforme pode ser visto abaixo:

$$F_1 = F_{1(máx)} \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(\theta)$$

ou

$$F_1 = 0,5 \cdot F_{1(máx)} \cdot \cos(\theta - \omega t) + 0,5 \cdot F_{1(máx)} \cdot \cos(\theta + \omega t) \quad (1.3)$$

Analisando a Eq. 1.3, nota-se que cada um de seus termos descreve uma função cossenoidal do ângulo θ com um valor de pico equivalente à metade da amplitude máxima da onda pulsante e um ângulo de fase temporal ωt . O ângulo ωt significa a rotação ao redor do

entreferro à velocidade ω (rad.ele/seg.) para cada uma das ondas, sendo que ambas caminham em direções opostas (“ $\theta-\omega t$ ” equivale à direção de θ crescente enquanto “ $\theta+\omega t$ ” equivale à direção de θ decrescente).

A distribuição espacial da fmm (F1) pulsante do estator correspondente a diversos instantes de tempo mostrada na figura anterior pode ser decomposta em duas ondas progressivas de sentidos opostos (f e b – forward e backward) e amplitudes constantes. Pode ainda ser representada por um fasor espacial de comprimento variável, apontando para cima durante metade do período e para baixo em outra metade, composto pela soma de dois fasores com módulo constante igual à metade desse fasor pulsante original e girando à velocidade ω em sentidos opostos (“ $\theta-\omega t$ ” e “ $\theta+\omega t$ ”) [3]. As figuras seguintes representam o comportamento fasorial destas forças magnetomotriz no plano complexo, como forma de enxergar a decomposição de um sinal pulsante (de módulo variável) em dois fasores girantes de mesmo módulo e velocidade (Fig. 7), e o comportamento de conjugado por velocidade produzido por ambos os campos separadamente e somados, produzindo um conjugado resultante (Fig. 8).

Se o rotor do motor de indução monofásico estiver em situação de repouso, as ondas de fluxo de entreferro f e b, resultantes da combinação das fmm de correntes estator e rotor, serão iguais, portanto os conjugados produzidos por cada uma dessas ondas de fluxo serão também iguais em magnitude e terão sentido contrário. Desta forma, nenhum conjugado resultante de partida é produzido. Se o rotor do motor de indução monofásico estiver girando, todavia, cada um dos campos componentes produzirá uma característica conjugado X velocidade semelhante àquela do motor de indução polifásico. Assim, as propriedades resultantes de conjugado versus velocidade serão dadas pela soma algébrica dessas duas curvas componentes, conforme é ilustrado pela Fig. 8.

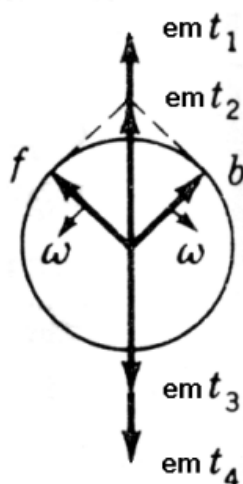


Figura 7 - Representação das ondas de força magnetomotriz por fasores espaciais [4].

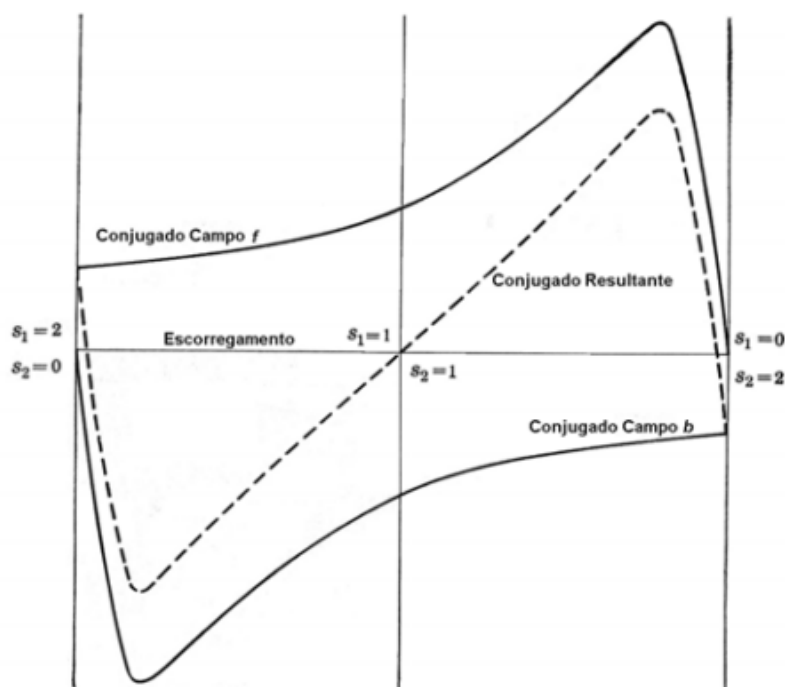


Figura 8 - Características de Conjugado versus Velocidade de um Motor Monofásico [4].

As curvas de conjugado horário e anti-horário aparecem em linhas cheias na faixa que vai desde o escorregamento nulo (velocidade síncrona) até o escorregamento 2,0, isto é, velocidade síncrona no sentido oposto. O conjugado resultante dos dois campos magnéticos girantes em oposição está representado em linha tracejada, na figura 8, indicando que, se o escorregamento do rotor puder ser alterado desde o valor unitário, para o rotor bloqueado, até algum outro valor, aparecerá um conjugado líquido horário ou anti-horário, conforme o sentido resultante [4].

Deduz-se, assim, que o conjugado resultante para um motor monofásico é nulo apenas para o escorregamento unitário, ou seja, rotor parado. Uma vez girando em um dos sentidos, o motor monofásico continuará a girar neste sentido devido ao conjugado líquido resultante, produzido para esquerda ou para a direita (b ou f) do ponto de equilíbrio visto na figura anterior. Interessante notar que, na velocidade síncrona, o conjugado resultante é negativo.

Este é exatamente o mesmo comportamento dos antigos veículos com motor a explosão, que necessitavam de uma manivela para partir. Os motores de indução monofásicos também precisam de artifícios para seu acionamento, por isso é que eles são classificados de acordo com seus métodos de partida que serão estudados logo a frente. A escolha do motor apropriado é baseada nas necessidades de conjugado de partida e de rotação nominal da carga, e nas limitações na corrente de partida e de funcionamento da linha de alimentação do motor.

A Fig. 9 mostra a formação do campo magnético devido a uma só fase. Como se vê, este campo é pulsante, tendo sempre a mesma direção e não permitindo a indução de correntes significativas nos enrolamentos rotóricos.

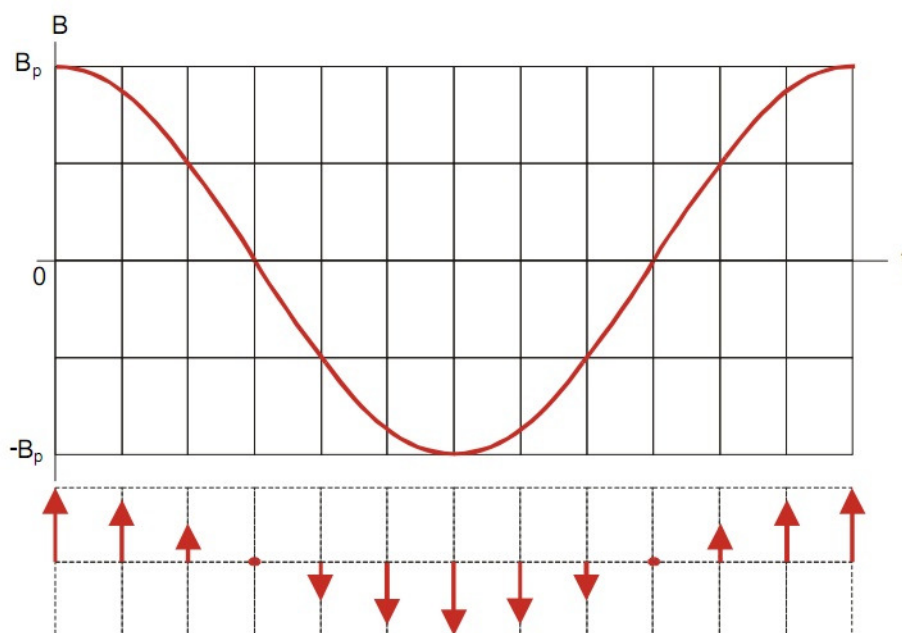


Figura 9 - Campo magnético pulsante B gerado por alimentação monofásica [5].

Porém, se de alguma forma se puder conseguir um segundo campo com defasagem de 90° em relação à alimentação, se terá um sistema bifásico clássico, com a conseqüente formação de um campo girante capaz de promover a partida, como mostra a Fig. 10.

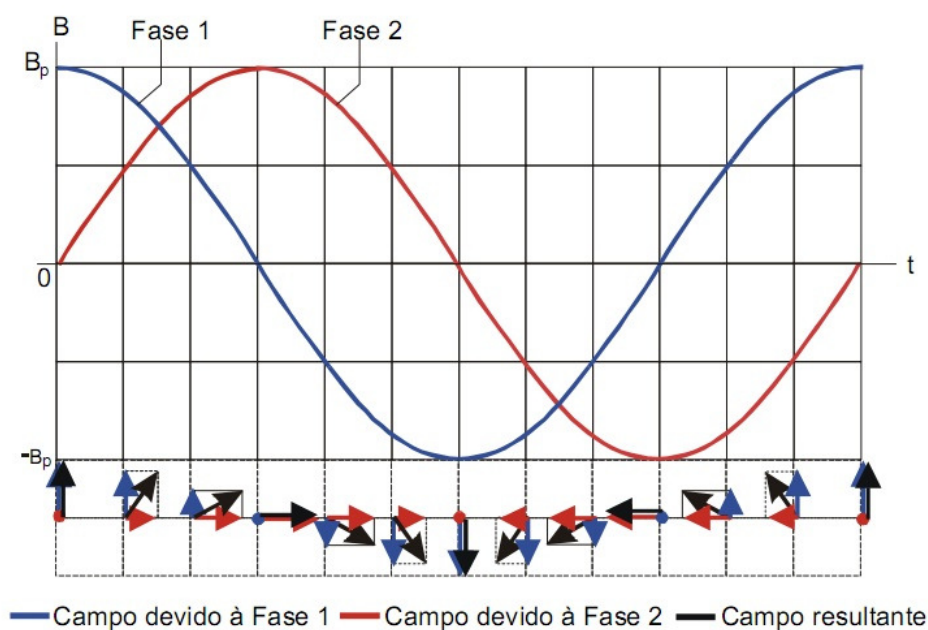


Figura 10 - Campo magnético girante B formado por alimentação bifásica [5].

Existem várias maneiras de proporcionar esta defasagem. Cada uma delas corresponde a um determinado tipo de motor monofásico, como consequência, surgiu uma classificação dos motores monofásicos baseada nos métodos empregados para partida.

2.1.2 Motor de indução monofásico com partida por fase auxiliar (Split-Phase)

Os motores de fase auxiliar têm dois enrolamentos de estator, um enrolamento principal m e um enrolamento auxiliar a , com seus eixos deslocados de 90° elétricos no espaço. Eles são ligados conforme é mostrado na Fig. 11. O enrolamento auxiliar tem uma relação de resistência/reatância mais alta do que o enrolamento principal, de modo que as duas correntes ficam fora de fase como indicado no diagrama fasorial da Fig. 12, representativo de condições de partida.

Como a corrente do enrolamento auxiliar I_a está adiantada relativamente à corrente do enrolamento principal I_m , o campo do estator primeiro atinge um máximo ao longo do eixo do enrolamento auxiliar e então, mais adiante no tempo, atinge um máximo ao longo do eixo do enrolamento principal. As correntes dos enrolamentos são equivalentes a correntes bifásicas não simétricas, e o motor é equivalente a um motor bifásico não simétrico (Campo elíptico) [4].

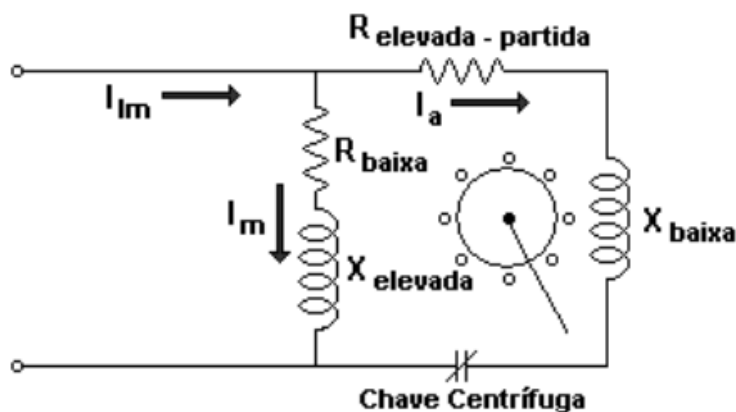


Figura 11 - Motor de Fase Auxiliar – Diagrama de Ligações [4].

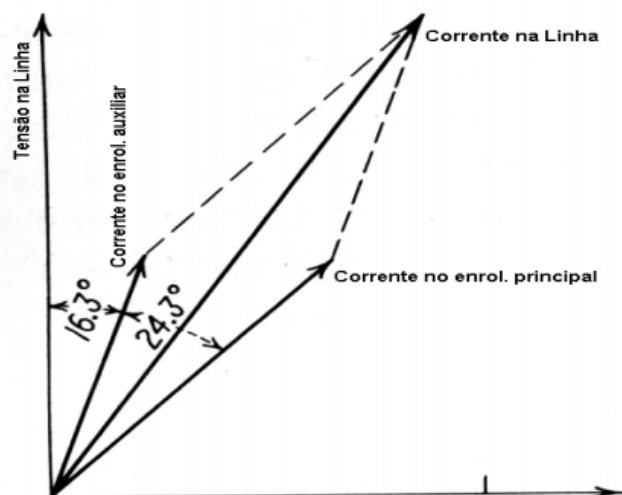


Figura 12 - Motor de Fase Auxiliar – Relações de Fase [4].

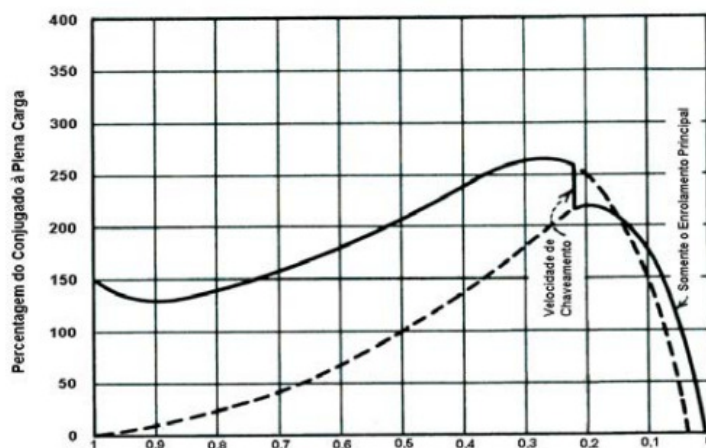


Figura 13 - Motor de Fase Auxiliar – Característica conjugado-velocidade [4].

O resultado é um campo de estator girante, que faz o motor partir. Após a partida do motor, o enrolamento auxiliar é desligado, usualmente por meio da chave centrífuga, que opera a cerca de 75% da velocidade síncrona. O modo simples de obter a alta relação de resistência-para-reatância para o enrolamento auxiliar é enrolá-lo com um fio condutor mais fino do que o enrolamento principal, um procedimento permitido porque este enrolamento está no circuito somente durante a partida [4].

Nos motores de fase auxiliar, a corrente de partida com rotor bloqueado varia entre 5 e 7 vezes a corrente nominal, e o conjugado de partida entre 1,0 e 2,0 vezes o conjugado nominal.

2.1.3 Motor de indução monofásico com partida por capacitor

Podem ser usados capacitores para melhorar o desempenho de partida, o desempenho de funcionamento normal, ou ambos, dependendo do tamanho e das ligações do capacitor.

O motor com capacitor de partida é também um motor de fase auxiliar, mas o deslocamento angular no tempo entre as duas correntes é obtido por meio de um capacitor em série com um enrolamento auxiliar, como é mostrado na Fig. 14.

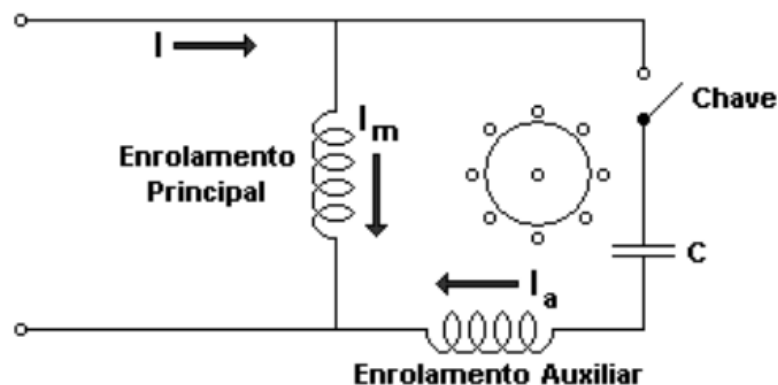


Figura 14 - Motor com partida a capacitor – Diagrama de Ligações [4].

Novamente o enrolamento auxiliar é desligado após o motor ter partido, portanto o enrolamento auxiliar e o capacitor são projetados com mínimo custo para serviço intermitente. Este fato é importante ao se trabalhar com motores convencionais, haja vista que a manutenção do enrolamento auxiliar em operação pode ocasionar danos permanentes ao motor. O enrolamento auxiliar se aquece, decorrente de condutores de pequeno diâmetro, feitos para operar apenas durante a partida do motor [4].

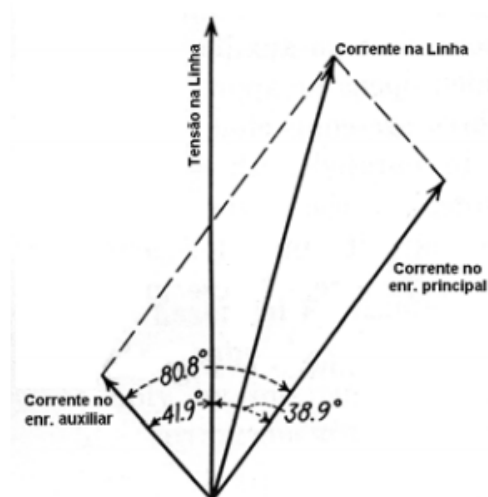


Figura 15 - Motor com partida a capacitor –Relações de Fase [4].

Utilizando um capacitor de partida de valor apropriado, pode-se conseguir que a corrente do enrolamento auxiliar I_a com rotor parado esteja adiantada relativamente à corrente do enrolamento principal I_m de aproximadamente 90° elétricos, como aconteceria em um motor bifásico simétrico.

Na realidade, o melhor compromisso entre os diversos fatores como conjugado de partida, corrente de partida e custo corresponde a um ângulo de fase algo menor do que 90° . Uma característica conjugado-velocidade típica é mostrada na Fig. 16. Devido ao seu conjugado de partida elevado, de 3,5 a 4,5 vezes o conjugado nominal, e à sua corrente de partida reduzida para uma mesma máquina se comparado a outros métodos convencionais, este sistema possui o melhor desempenho de acionamento. É interessante notar que o valor do capacitor é dimensionado para as condições iniciais de rotor parado (escorregamento unitário) [4].

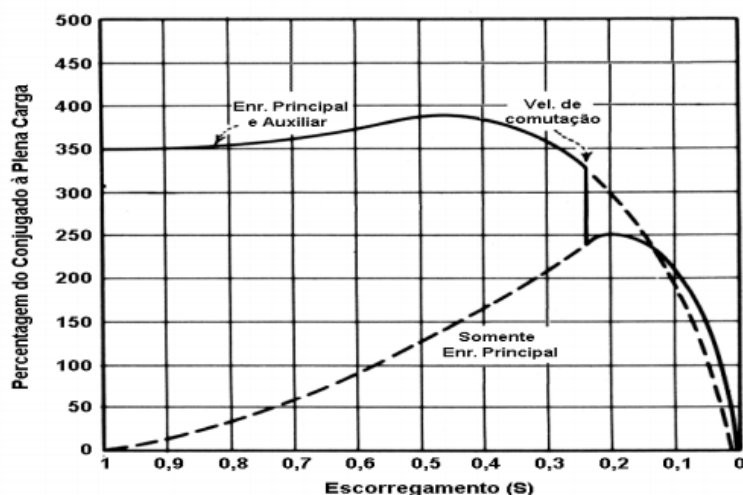


Figura 16 - Motor com partida a capacitor – Característica conjugado-velocidade [4].

2.1.4 Motor de indução monofásico com partida por capacitor permanente (PSC)

No motor de capacitor permanente, o capacitor e o enrolamento auxiliar não são desligados após a partida; a construção pode ser simplificada pela omissão da chave, e o fator de potência, rendimento, e pulsações de conjugado podem ser melhorados.

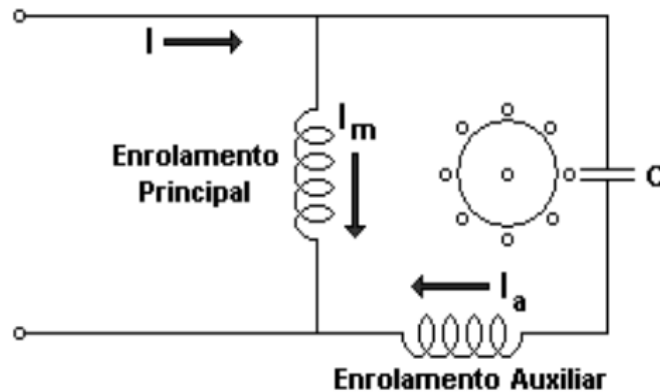


Figura 17 - Motor com Capacitor Permanente – Diagrama de Ligações [4].

O enrolamento auxiliar e o capacitor podem ser projetados para perfeita operação bifásica a qualquer carga desejada. O campo pulsante contrário seria então eliminado, com a resultante melhora em rendimento. As pulsações em conjugado na frequência dupla de estator também seriam eliminadas, pois o capacitor seria como um reservatório que armazena energia para diminuir as pulsações na potência de entrada fornecida pela linha monofásica.

O resultado é um motor sem vibração (silencioso). O conjugado de partida precisa ser sacrificado porque a capacitância é necessariamente um compromisso entre os valores de melhor partida e de melhor funcionamento normal. No instante da partida, a corrente no ramo capacitivo é muito baixa e a consequência é que esse motor tem um conjugado de partida muito baixo, cerca de 50% do conjugado nominal. A característica conjugado-velocidade é mostrada abaixo na Fig. 18.

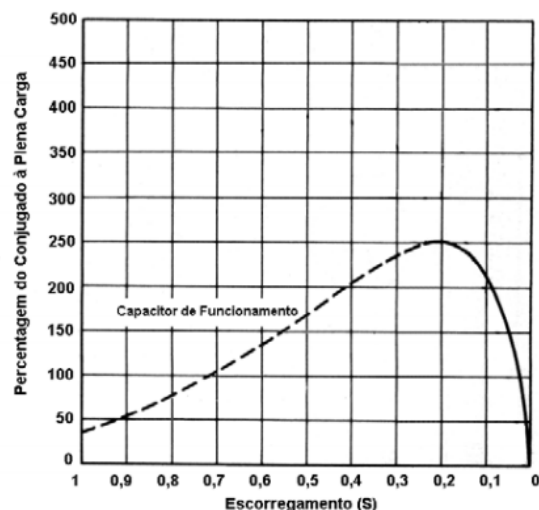


Figura 18 - Motor com Capacitor Permanente: Característica conjugado-velocidade [4].

2.1.5 Motor de indução monofásico com dois capacitores

Se dois capacitores são usados, um para partida e outro para o funcionamento, pode ser obtido um desempenho excelente na partida e durante o funcionamento, já que o motor a duplo capacitor combina as vantagens da operação otimizada de um motor com capacitor permanente com o conjugado de partida elevado de um motor com partida a capacitor, mantendo os sistemas mecânicos de controle. Um modo de conseguir esse resultado é mostrado na figura seguinte.

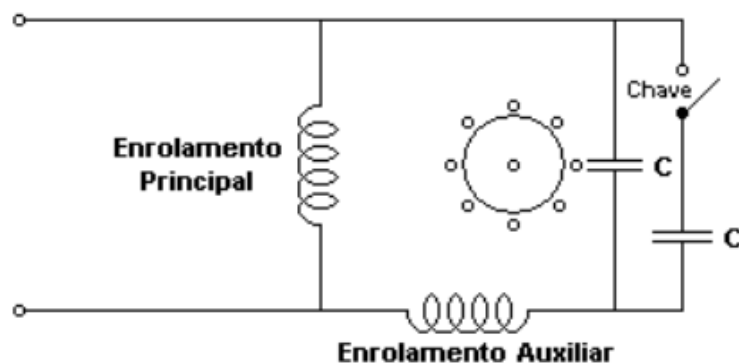


Figura 19 - Motor com Capacitor de Partida e de Funcionamento – Diagrama de Ligações [4].

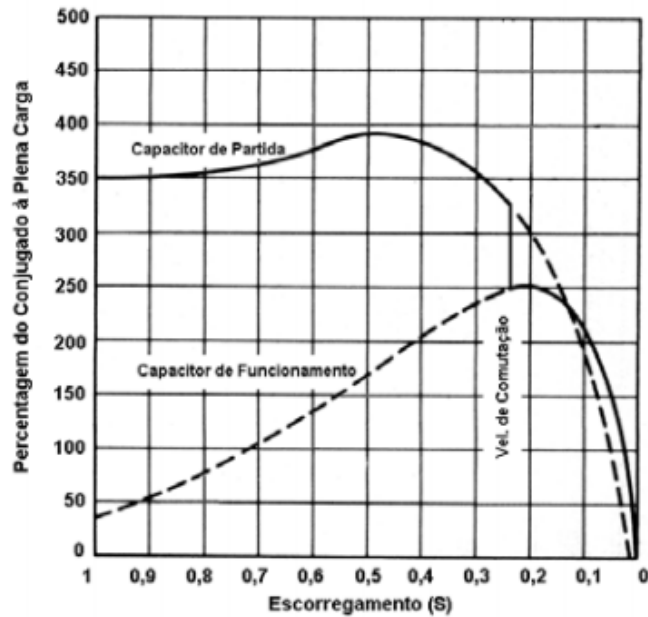


Figura 20 - Motor com dois capacitores – Característica conjugado-velocidade [4].

O pequeno valor de capacitância necessário para satisfazer as condições ótimas de funcionamento é permanentemente ligado em série com o enrolamento auxiliar. O valor de capacitor muito maior exigido para a partida é obtido por um capacitor ligado em paralelo com o capacitor permanente e em série com a chave centrífuga (o capacitor de partida é de 3 a 5 vezes maior que o de funcionamento). Esse capacitor de partida é desligado quando o rotor atinge uma velocidade de aproximadamente 75% a nominal [4].

Como precisa conduzir corrente somente durante o período de partida, o capacitor é um tipo eletrolítico para CA, compacto, especial, feito para serviço de partida de motores, com uma especificação típica de $300\mu\text{F}$ para um motor de $\frac{1}{2}$ cv. Para o mesmo motor, o capacitor permanentemente ligado tem uma especificação típica de $40\mu\text{F}$; como ele opera continuamente, o capacitor é um típico CA a óleo, semelhante ao do PSC. Este método, de modo geral, é o de mais cara implementação dentre os métodos convencionais [6].

2.2 Ponte Retificadora

A energia elétrica disponível nas tomadas residenciais e comerciais apresentam-se sob forma de corrente alternada senoidal. Para utilizar uma ponte inversora de frequência é necessário converter a tensão da rede alternada (CA) em tensão contínua (CC). O circuito retificador de onda completa em ponte é mais comum e usado na construção de fontes retificadoras para realizar essa conversão.

2.2.1 Funcionamento

A Fig. 21 mostra o funcionamento de um retificador completo no semi-ciclo positivo. Quando a tensão no secundário for positiva no ponto “A” em relação ao ponto “B” a corrente flui passando pelo diodo D1 da ponte, pois, a corrente deve seguir o sentido da seta dos diodos. Depois a corrente passa pela carga R_L , volta pelo terra para o terminal negativo da ponte e encontra dois diodos com setas habilitando a corrente a circular, mas, a corrente vai para o potencial mais baixo que é ponto “B” do transformador via diodo D2, a corrente segue em direção ao terminal negativo. Na verdade o diodo D1 está inversamente polarizado, pois o potencial mais alto está no catodo [7].

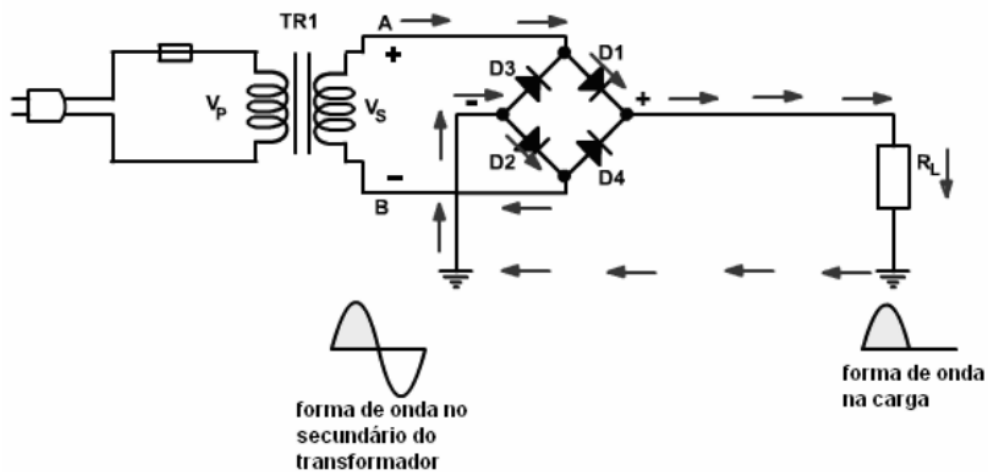


Figura 21 - Funcionamento Ponte Completa semi-ciclo positivo.

Já no semi-ciclo negativo representado pela Fig. 22, é quando a tensão no secundário for positiva no ponto “B” em relação ao ponto “A” a corrente flui passando pelo diodo D4 da ponte, pois, a corrente deve seguir o sentido da seta dos diodos. Depois a corrente passa pela carga R_L , volta pelo terra para o terminal negativo da ponte e encontra dois diodos com setas habilitando a corrente a circular, mas, a corrente vai para o potencial mais baixo que é ponto “A” do transformador via diodo D3, a corrente segue em direção ao terminal negativo. Na verdade o diodo D2 está inversamente polarizado, pois o potencial mais alto está no catodo.

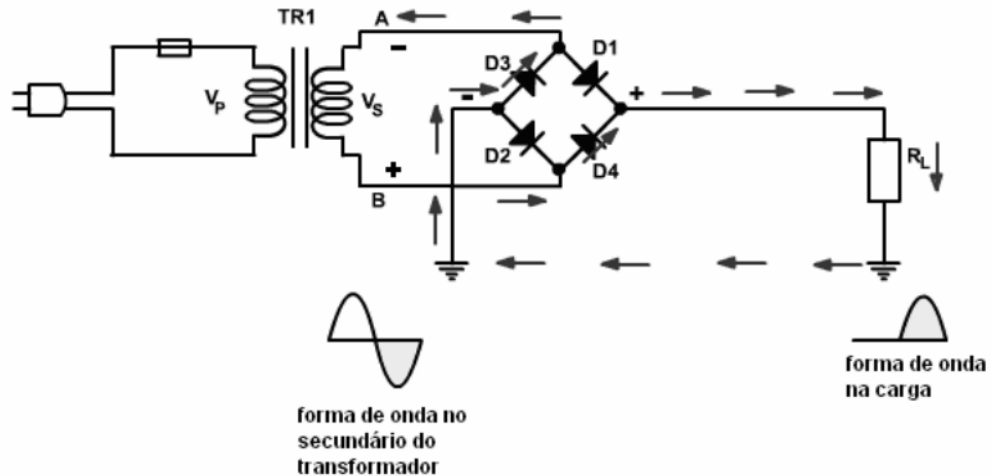


Figura 22 - Funcionamento Ponte Completa semi-ciclo negativo.

Capacitor de filtro: Para completar o circuito é necessário colocar um capacitor em paralelo com a carga para filtrar a tensão pulsante na saída como no circuito de meia onda, no entanto este capacitor poderá ser menor do que o usado no circuito de meia onda. O valor do capacitor usado no circuito de onda completa é aproximadamente metade do valor do capacitor usado no circuito de meia onda.

2.3 Ponte Inversora de Frequência

Na ponte inversora de frequência, a tensão retificada CC é novamente convertida em CA. Os transistores chaveiam várias vezes por ciclo, gerando um trem de pulsos com largura variável (PWM). Esta saída de tensão pulsada, sendo aplicada em um motor (carga indutiva), irá gerar uma forma de onda de corrente bem próxima da senoidal através do enrolamento do motor.

O sinal da saída do inversor nada mais é que do que uma sequência rápida de pulsos cuja potência média é muito próxima de uma senóide, mostrada na Fig. 23. A partir disso pode-se obter uma tensão analógica a partir de um sinal digital.

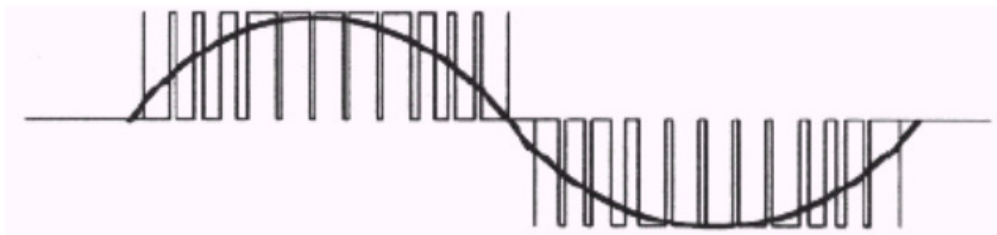


Figura 23 - Forma de onda na saída de um inversor.

Na Fig. 24, é representada a ligação de um circuito inversor trifásico capaz de gerar três fases.

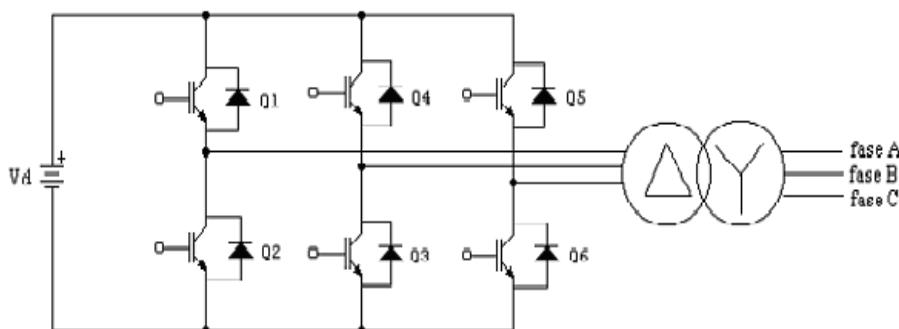


Figura 24 - Circuito de um inversor trifásico.

2.4 Modulação PWM

Na maioria das aplicações industriais necessita-se ter variação de velocidade no motor a ser acionado. Isso é possível controlando-se a tensão na saída, no caso de motores CC ou controlando-se a tensão e a frequência, no caso de motores CA. Para isso, utilizam-se conversores CC-CC e CC-CA.

Uma técnica largamente aplicada nesses acionamentos é a modulação por largura de pulso, que consiste na comparação de dois sinais de tensão, um de baixa frequência (referência) e o outro de alta frequência (portadora), resultando em um sinal alternado com frequência fixa e largura de pulso variável [8].

2.4.1 Sinal de Referência

Para se obter um sinal na saída do acionamento de forma desejada, é necessário compará-lo com um sinal de tensão, chamado sinal de referência, que seja a imagem da tensão de saída buscada. Nos conversores CC-CA o sinal de referência é senoidal, pois o que se busca

na saída é uma tensão alternada. Portanto, se é desejado uma frequência de 60Hz na saída, deve-se aplicar um sinal de referência com as mesmas características.

2.4.2 Sinal de Portadora

É um sinal de alta frequência, em ordem de KHz que é responsável pela definição da frequência de chaveamento e razão cíclica. Deve ser no mínimo 2 vezes maior que o sinal de referência (Teorema de Nyquist), mas na prática, é necessário pelo menos 10 vezes para que se tenha uma boa reprodução do sinal na saída do conversor. Este sinal será responsável pela frequência de chaveamento dos interruptores (semicondutores) do circuito de potência do acionamento [7]. Em Conversores CA-CA, normalmente utiliza-se como portadora um sinal triangular.

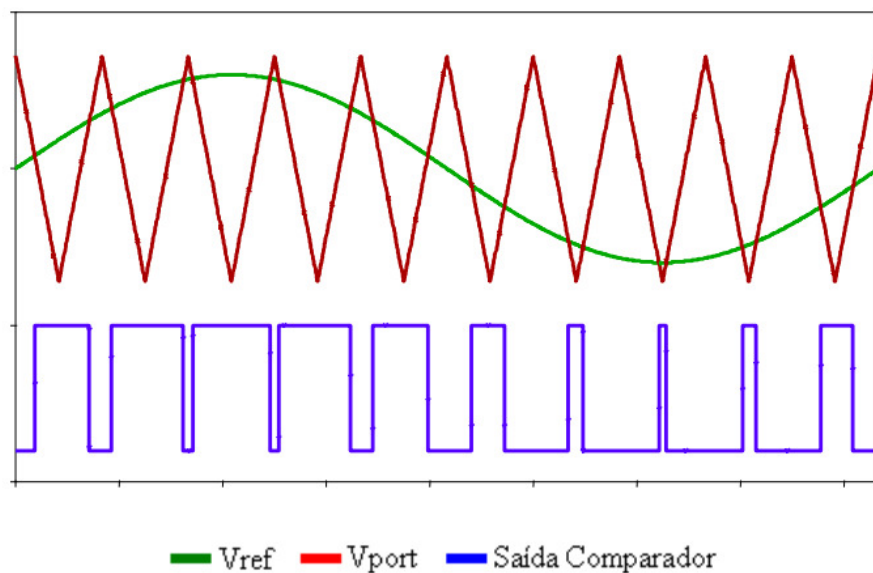


Figura 25 - Comparação para gerar um sinal PWM.

3 Desenvolvimento

Em máquinas de lavar roupa o uso de motor de indução monofásico do tipo com capacitor permanente é o mais comum e adequado pois ele pode ter seu sentido de rotação invertido quando funcionando a plena carga e à velocidade nominal, uma característica importante para a etapa de agitação de uma máquina de lavar roupas.

Para garantir que o motor de indução monofásica parta, são usadas principalmente duas técnicas. A primeira delas, como foi visto anteriormente, é o uso de um enrolamento auxiliar alocado no estator e ligado em paralelo com o enrolamento principal. Este enrolamento auxiliar é feito de forma que a fase de sua impedância seja diferente da fase da impedância do enrolamento principal, o que pode ser obtido pelo uso de condutores de dimensões diferentes em cada enrolamento. Desta forma, a corrente através desse enrolamento é defasada, causando o mesmo efeito de se usar um enrolamento bifásico, conforme foi feito por Tesla. A segunda forma é colocar um enrolamento auxiliar ligado em série com um capacitor, e este conjunto é posto em paralelo com o enrolamento principal. Desta forma, é obtido o mesmo efeito de defasagem, permitindo que a máquina parta.

3.1 Motor PSC de máquina de lavar roupa

No caso do motor usado na máquina de lavar roupa, há dois enrolamentos iguais, além de uma bobina externa e um capacitor, ligados conforme é mostrado na Figura 26.

No motor usado nas máquinas de lavar roupas e para estudo desse trabalho, os enrolamentos do motor são feitos de forma que cada um impulse o motor para um lado. Sendo assim, eles são chamados de enrolamento CW (clockwise) e CCW (counterclockwise). Quando a fonte de alimentação é ligada entre os terminais CW e GND, o enrolamento CW será o principal. O outro enrolamento, ligado em série com a bobina externa e o capacitor, funcionará como enrolamento auxiliar. Isto fará com que o motor gire no sentido horário. No caso em que a alimentação é feita entre os terminais CCW e GND, o enrolamento CCW é o enrolamento principal, e o CW será o enrolamento auxiliar, tendo a corrente defasada pelo conjunto formado pelo capacitor e pela bobina externa.

A possibilidade de fazer com que o motor gire para os dois lados apenas mudando os terminais em que a alimentação é ligada é bastante interessante para o caso da máquina de lavar roupas uma vez que, durante a agitação, esta possibilidade faz com que a roupa seja esfregada de uma forma melhor do que se o motor girasse apenas para um dos lados.

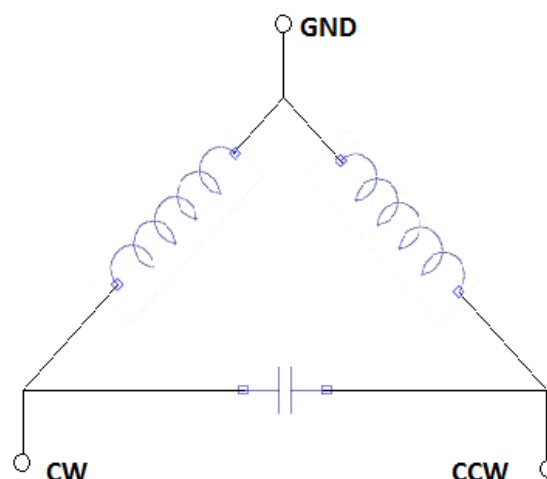


Figura 26 - Esquema de ligação do motor de indução monofásico usado na máquina de lavar roupas.



Figura 27 - Capacitor e Motor PSC WEG usado nas máquinas de lavar roupas.

Com esse trabalho pretende-se acionar o motor (PSC), usado em máquinas de lavar roupas domésticas, através de um inversor de frequência e portanto retirando o capacitor, pois os métodos eletrônicos de partida utilizam circuitos da eletrônica de potência para efetuar um controle do sinal de tensão de alimentação do motor em cada enrolamento, desta forma poderemos criar a defasagem nas tensões de alimentação que até então era feita pelo capacitor ligado em série com um dos enrolamentos.

Pelo fato do motor PSC usado nas lavadoras possuir dois enrolamentos permanentes enrolados com fio de mesma bitola e com o mesmo número de espiras, isto é, são idênticos. Quando motor parte e funciona devido ao deslocamento existente entre as correntes defasados dois enrolamentos deslocados no tempo e no espaço criado pelo capacitor como visto anteriormente, ele funciona como uma máquina alimentada por uma única fonte de tensão (monofásica).

Quando a máquina PSC é acionada por um inversor sem usar o capacitor e ela é alimentada por tensões balanceadas defasadas de 90° geradas pelo inversor de frequência, desta forma ela se tornará uma máquina simétrica e devido à isso ela passa a gerar um campo magnético girante uniforme e conseqüentemente terá um torque uniforme e a eliminação da distorção harmônica na corrente. Apesar de ser o mesmo motor isso ocorre pelo fato de a assimetria ocorrer devido à inserção do capacitor, que forma um circuito ressonante com a indutância do motor e, conseqüentemente, eleva a tensão do enrolamento auxiliar.

Nesta forma de acionamento, com o inversor de frequência, o motor PSC passa a ser visto como uma máquina bifásica. A vantagem é que o motor passa a ser alimentado por tensões balanceadas e, assim, permitindo um melhor aproveitamento da máquina.

O esquema da Fig. 28 mostra a configuração dos enrolamento CW (clockwise) e CCW (counterclockwise) agora sem o capacitor, como ele será visto para o acionamento com inversor.

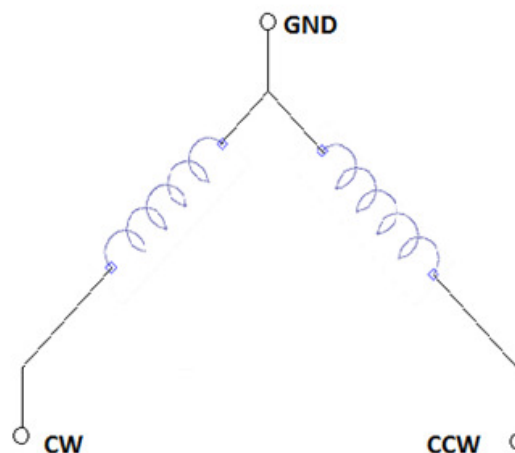


Figura 28 - Esquema de ligação do motor de indução monofásico usado na máquina de lavar roupas sem o capacitor permanente.

3.2 Desenvolvimento do Protótipo

A obtenção dos sinais defasados de 90° para a alimentação do motor é conseguida através do circuito da Fig.29. Onde a primeira etapa do circuito é uma ponte retificadora onda completa que é responsável por retificar o sinal CA “das tomadas”, e dois capacitores de filtro

que forma uma fonte CC simétrica, pois há um ponto de terra de referência. Temos então uma tensão contínua $+V/2$ (positiva) e uma $-V/2$ (negativa) em relação à terra, formando o que chamamos de “barramento CC”. O barramento CC alimenta a segunda etapa, constituída de um inversor de frequência, e através de uma lógica de controle gerada pelo micro controlador, gera as tensões de alimentação defasadas de 90° para alimentar o motor WEG $\frac{1}{4}$ CV tipo PSC.

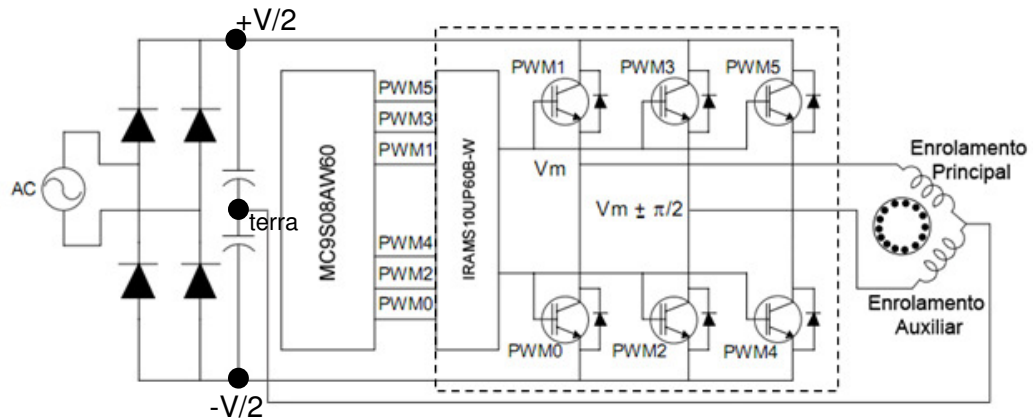


Figura 29 - Diagrama do circuito completo para o acionamento do motor PSC através de inversor de frequência.

Os componentes principais e necessários para o funcionamento do circuito estudado nesse trabalho são a ponte GBJ2006-F, o barramento CC formado pelos dois capacitores, o microcontrolador MC9S08AW60 junto com aplicativo CodeWarrior for Microcontrollers para programação, ambos da Freescale e o a ponte inversora IRAMS10UP60B-W.



Figura 30 - Componentes integrados. Retificador GBJ2006. Micro controlador MC9S08AW60. Inversor IRAMS10UP60B, respectivamente.

Nos capítulos anteriores abordamos os aspectos do motor PSC, agora vamos discutir o funcionamento desses componentes eletrônicos para realizar o acionamento do motor sem o capacitor.

3.2.1 Micro controlador MC9S08AW60 e PWM

O microcontrolador MC9S08AW60 já possui um suporte para o módulo PWM e vamos explicar um pouco da estrutura e funcionamento (temporizador) desse micro.

A partir do módulo de geração de Modulação por Largura de Pulso (PWM) do MC9S08AW60 é possível gerar um sinal analógico, apesar de sua saída ser um sinal digital que assume apenas os níveis lógicos alto (um) e baixo (zero). A saída gerada é uma onda quadrada, com frequência constante e largura de pulso variável. Estes conceitos estão diretamente relacionados com o período fixo e o ciclo ativo (duty cycle) respectivamente.

A frequência de uma onda pode ser definida como a quantidade de vezes que ela se repete no tempo. E o período é cada pedaço dessa onda que irá se repetir. O duty cycle define o tempo de sinal ativo (nível lógico alto) em um período fixo. Assim, quando temos um duty cycle de 100%, temos nível lógico alto por todo o período. Um duty cycle de 50% define a metade do período em nível lógico alto e a outra metade em nível lógico baixo. Se uma saída TTL for utilizada, a tensão média de saída em um duty cycle de 50% será 2,5V. Estes conceitos são demonstrados na Fig. 31. Devemos lembrar que o PWM nem sempre possui estado inicial positivo, podendo iniciar o período com nível lógico baixo.

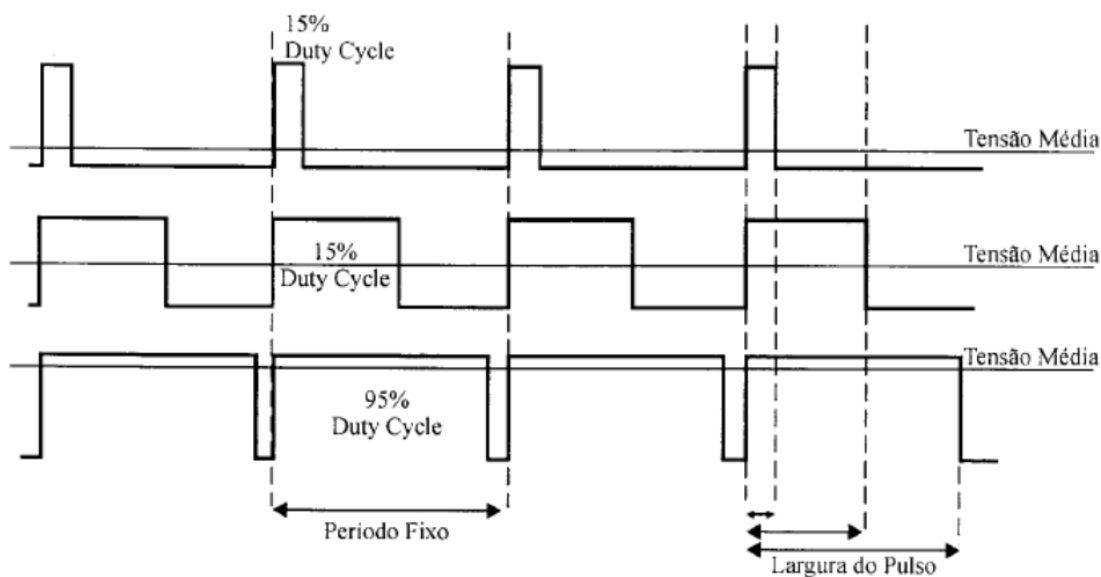


Figura 31 - Sinais modulados por Largura de Pulso.

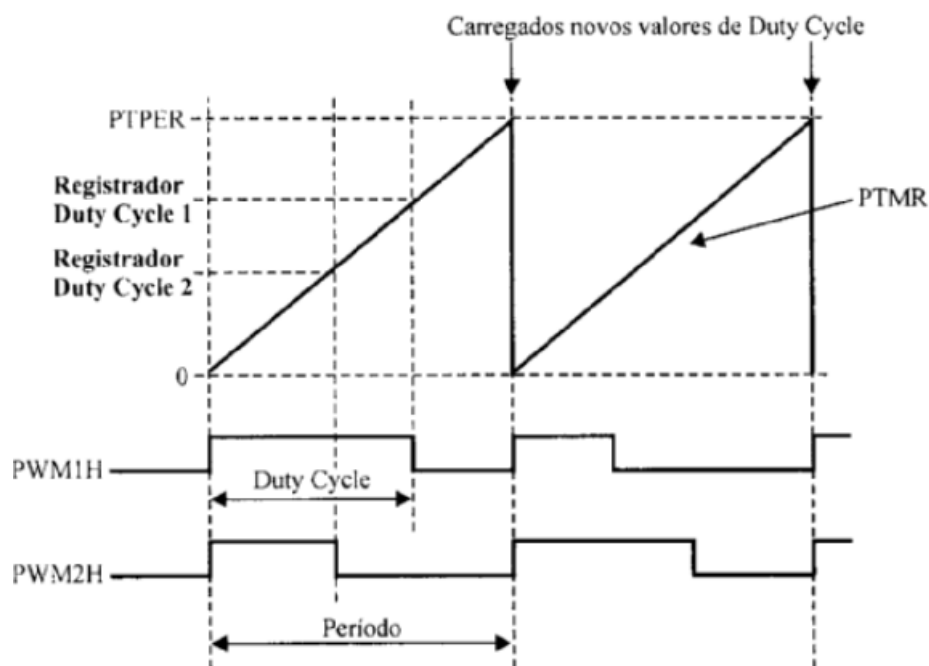


Figura 32 - Sinais PWM com mesmo período e largura de pulso diferentes.

Este microcontrolador utiliza o temporizador (interrupção de estouro de tempo) como base de tempo para o período do PWM.

Para que este método seja aplicado, existe a necessidade da utilização de pelo menos 2 registradores. O registrador que será incrementado e o registrador que conterá o valor a ser atingido. Os microcontroladores da linha HCS08 normalmente possuem 1 ou 2 temporizadores. Os registradores relativos a estes temporizadores apresentam nomes semelhantes, tendo apenas o número no temporizador para diferenciá-los. Os três registradores de configuração do temporizador neste microcontrolador são: TPMxSC, TPMxCNT e TPMxMOD, sendo os dois últimos de 16 bits. Devemos substituir o x do nome dos registradores pelo número do temporizador, no caso do MC9S08AW60, 1 ou 2 [9].

Abaixo é apresentado o diagrama de blocos do temporizador destes microcontroladores.

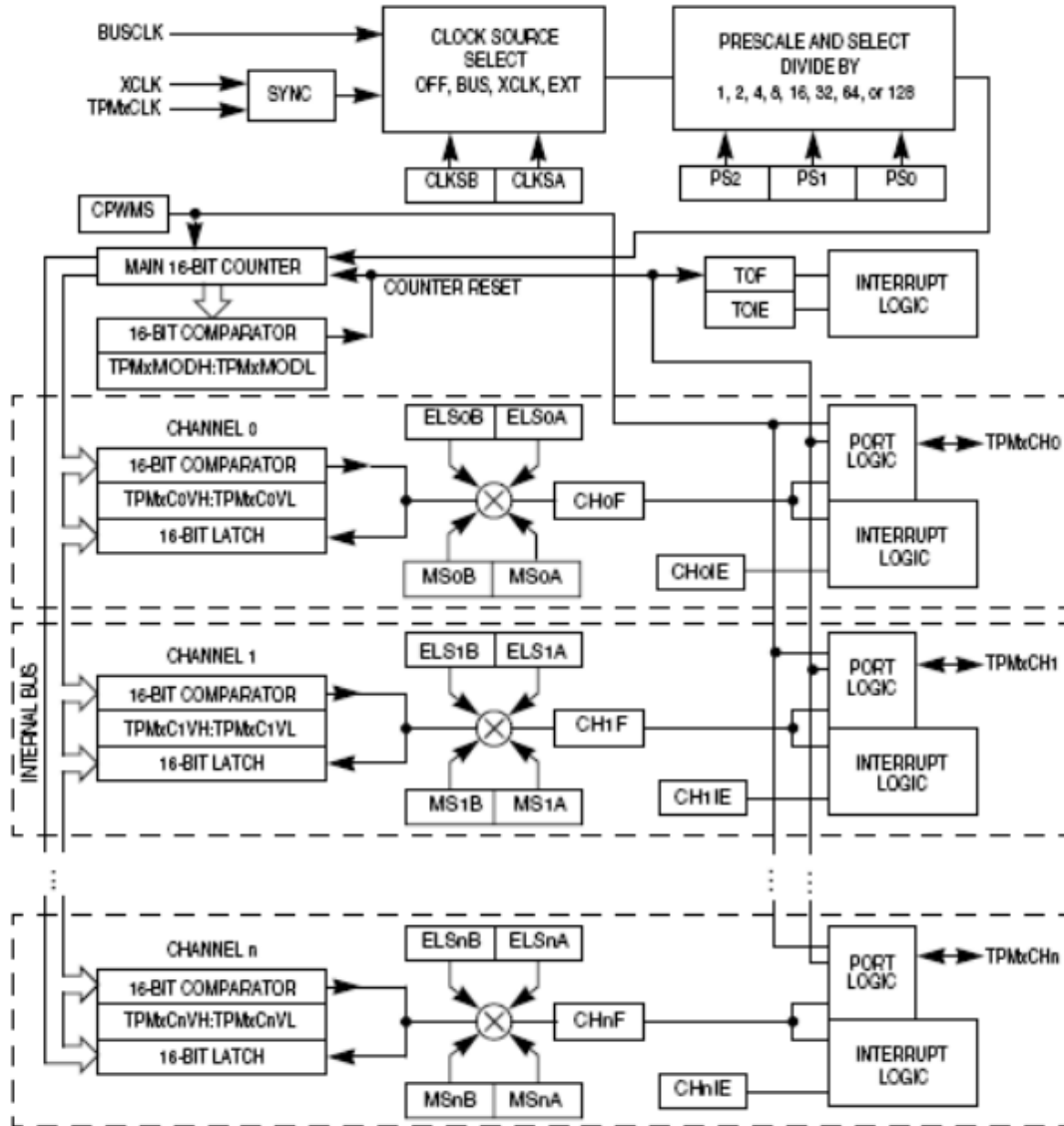


Figura 33 - Diagrama de blocos do temporizador.

3.2.2 Módulo PWM Alinhado na Borda

Este tipo de saída PWM utiliza o contador operando em modo progressivo (CPWMS = 0) e pode ser utilizado quando outros canais no mesmo módulo TPM são configurados para captura de entrada ou comparação de saída. O período do sinal PWM é determinado pelo valor dos registradores de módulo (TPMxMODH: TPMxMODL). O ciclo de trabalho (duty cycle) é determinado pelo conteúdo dos registradores de valor do canal (TPMxCnVH: TPMxCnVL). A polaridade do sinal PWM é determinada pelo bit de controle ELSnA. Casos de ciclos de trabalho de 0 e 100% são possíveis.

Como é demonstrado na figura abaixo, o valor da comparação de saída no registrador de canal TPM determina a largura de pulso (duty cycle) do sinal PWM. O tempo entre o estouro de

tempo do módulo ($TPMxCNT = TPMxMOD$) e a comparação de saída é a largura do pulso. Se $ELSnA = 0$, o evento de estouro de tempo irá forçar o sinal do PWM para nível lógico alto e a comparação de saída irá forçar o sinal do PWM para nível lógico baixo. Se $ELSnA = 1$, o evento de estouro de tempo irá forçar o sinal do PWM para nível lógico baixo e a comparação de saída irá forçar o sinal do PWM para nível lógico alto.

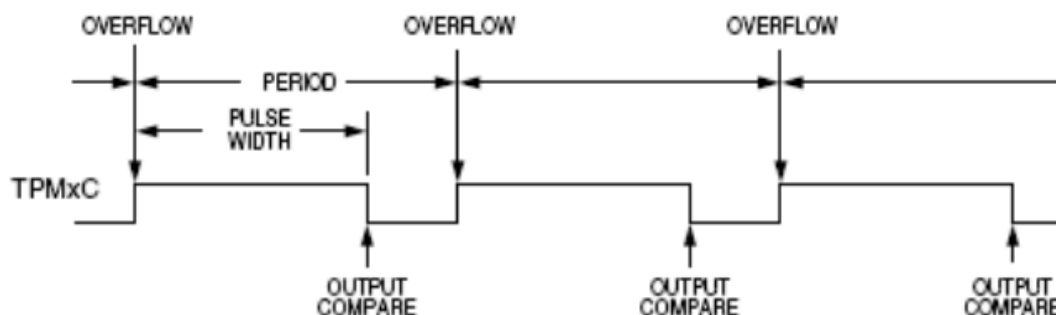


Figura 34 – Comparação de saída de sinal PWM.

Quando o registrador de valor do canal ($TPMxCnVH:TPMxCnVL$) for escrito para $0x0000$, o ciclo ativo passará a ser 0%. Ao configurar o registrador de valor do canal para valores maiores do que o registrador de módulo ($TPMxMODH:TPMxMODL$) o ciclo ativo passará para 100%.

3.2.3 Estrutura Inversor IRAMS10UP60B

O acionamento implementado neste trabalho faz o uso do inversor IRAMS10UP60B, pois esse componente já é usado e conhecido em outros projetos da empresa Whilpool S.A. Onde em seu Driver IC recebe os sinais de controle do microcontrolador, nos pinos 15 e 16 os sinais “high” (na cor magenta) e 18 e 19 os “low” (na cor amarela), conforme o esquemático interno mostrado na Fig.35.

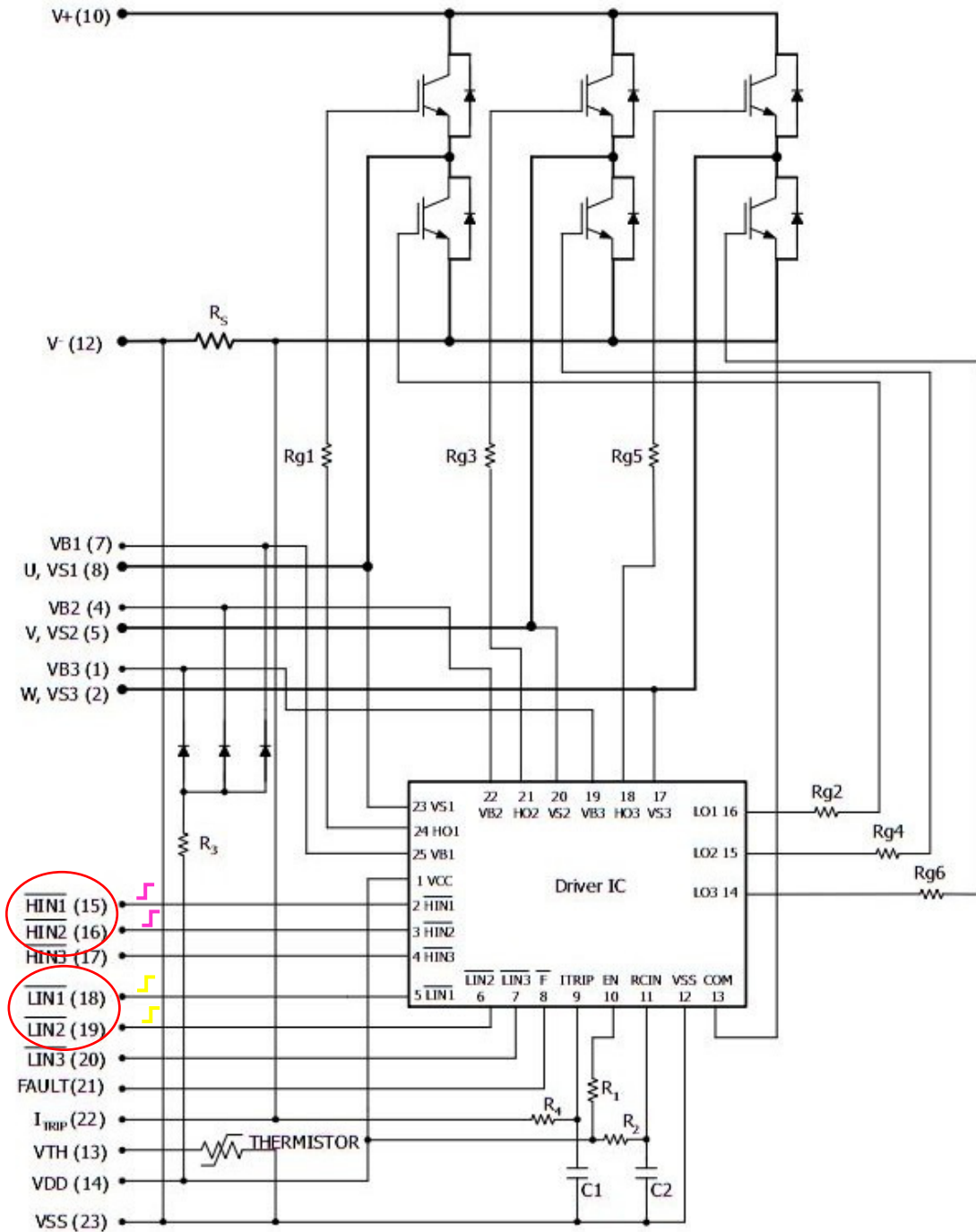


Figura 35 - Esquemático interno do inversor IRAMS10UP60B [10].

3.3 Estrutura do programa em linguagem C para gerar os sinais PWM

Uma das vantagens de um código escrito na linguagem C é a possibilidade do desenvolvimento modular de cada função, ou seja, é possível desenvolver cada função isoladamente e no final realizar a chamada dessas funções no programa principal. Neste trabalho

será explicado a técnica usada para geração dos sinais PWM utilizando o módulo PWM do micro controlador MC9S08AW60.

A etapa do programa para gerar o sinal PWM do microcontrolador para o driver do inversor tem a lógica da utilização de uma tabela com os níveis de condução e não condução para geração da senóide utilizando ponteiro e contador, também é necessário uma outra tabela com os valores dos *duty cycles* para controlar o tempo *on-off* do sinal, através da interrupção dos temporizadores TPM, visto anteriormente.

As senoides do motor são controlados pelos PWMs do TIMER2 e utiliza-se um multiplicador e um divisor do contador para as senoides do motor.

```
unsigned char sin_cnt_MUL;
```

```
#define
```

```
sin_cnt_DIV          127  divisao
```

```
unsigned char sin_motor_on = 0;
```

São definidos os números de pontos da tabela da senoide para ser feita a comparação.

```
#define sin_motor_nro_pts 200
```

```
unsigned char sin_cnt_MH = 0;
```

```
unsigned char sin_cnt_MAH = 0;
```

```
unsigned int sin_snt_M_FREE_RUNNER_MH = 0;
```

```
unsigned int sin_snt_M_FREE_RUNNER_MAH = 0;
```


4 Resultados

Para verificar a teoria do motor PSC descrita nos capítulos anteriores, primeiramente foi feito a medida da defasagem (o ângulo) gerada pelo capacitor ligado em série com um dos enrolamentos, como mostrado na Fig. 36. A existência das correntes defasadas entre os dois enrolamentos, o motor partiu e funcionou.

O capacitor utilizado no ensaio é do fabricante WEG de capacitância $45\mu\text{F}$ e o motor também é da WEG com as seguintes especificações nominais:

Potência: $\frac{1}{4}$ CV

Tensão/Frequência: 127V/60Hz

Corrente: 3,3 A

Rotação: 1625 RPM

Temperatura: 40°C

Classe de Isolação: F

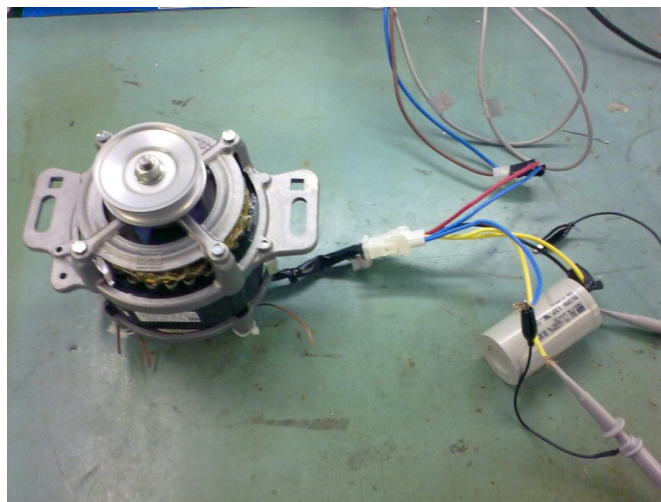


Figura 36 - Motor funcionando com o capacitor.

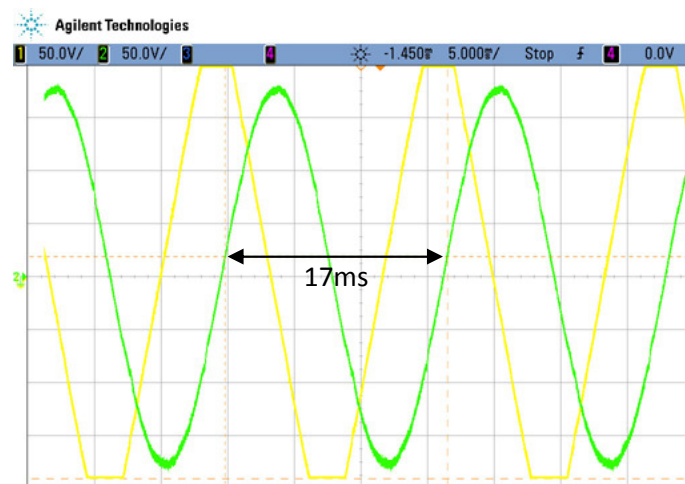


Figura 37 - Sinal das tensões defasadas geradas pelo osciloscópio. Cálculo da defasagem.

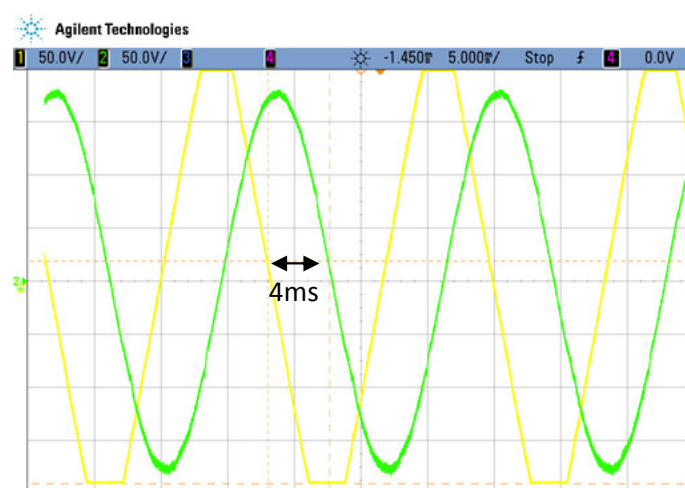


Figura 38 - das tensões defasadas geradas pelo osciloscópio. Cálculo da defasagem.

As duas imagens das senóides foram geradas com o auxílio do osciloscópio da marca Agilent. Para calcular a defasagem dos dois sinais pelo osciloscópio foi usada os conceitos básicos de leitura de osciloscópio, em que quando duas senóides de mesmo período são analisadas simultaneamente em um osciloscópio, a diferença entre as duas quanto ao tempo em que elas cruzam o eixo horizontal é uma informação importante, sendo chamada de “defasagem” entre as duas ondas.

A diferença de fase em graus entre duas formas de onda senoidais pode ser determinada por uma simples regra de três. Sabe-se da trigonometria que a função senoidal pode ser mapeada em uma circunferência, então a cada ciclo completo da senóide tem-se 360°. A medida da defasagem “X” (em graus) é determinada observando-se os tempos T e T’, na tela do osciloscópio.

Utilizando os cursores do osciloscópio medimos aproximadamente o tempo T de uma ciclo completo (360°) como é mostrada na Fig. e novamente com os cursores medimos o T' a defasagem dos sinais .

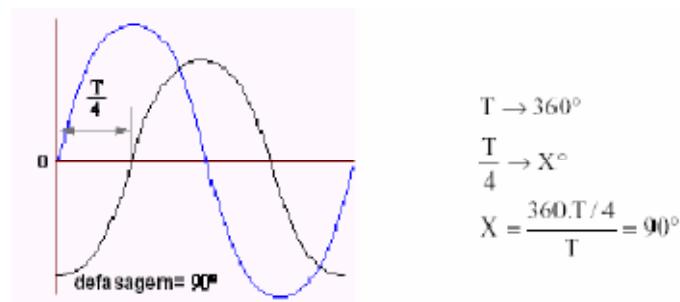


Figura 39 - Cálculo da defasagem.

Aplicando este método, foi calculado a defasagem entre os sinais causado pelo capacitor e esse valor foi de aproximadamente 85°.

$$\frac{17m}{4m} = \frac{360^\circ}{x}$$

$$x \cong 85^\circ$$

Este ensaio foi feito com o motor sem carga como mostra na Fig.36, Obteve-se um ângulo muito próximo de 90°, podendo dessa forma obter o resultado esperado.

As Fig.40 e Fig.41 são fotos do protótipo das vistas superior e inferior, respectivamente. Na vista superior temos os componentes PTH (pin through hole), como o retificador de onda completa, os dois capacitores 820μF/200V, o microcontrolador e a ponte inversora de frequência. Na vista inferior temos os componentes SMDs (superficial mounting device) soldados.

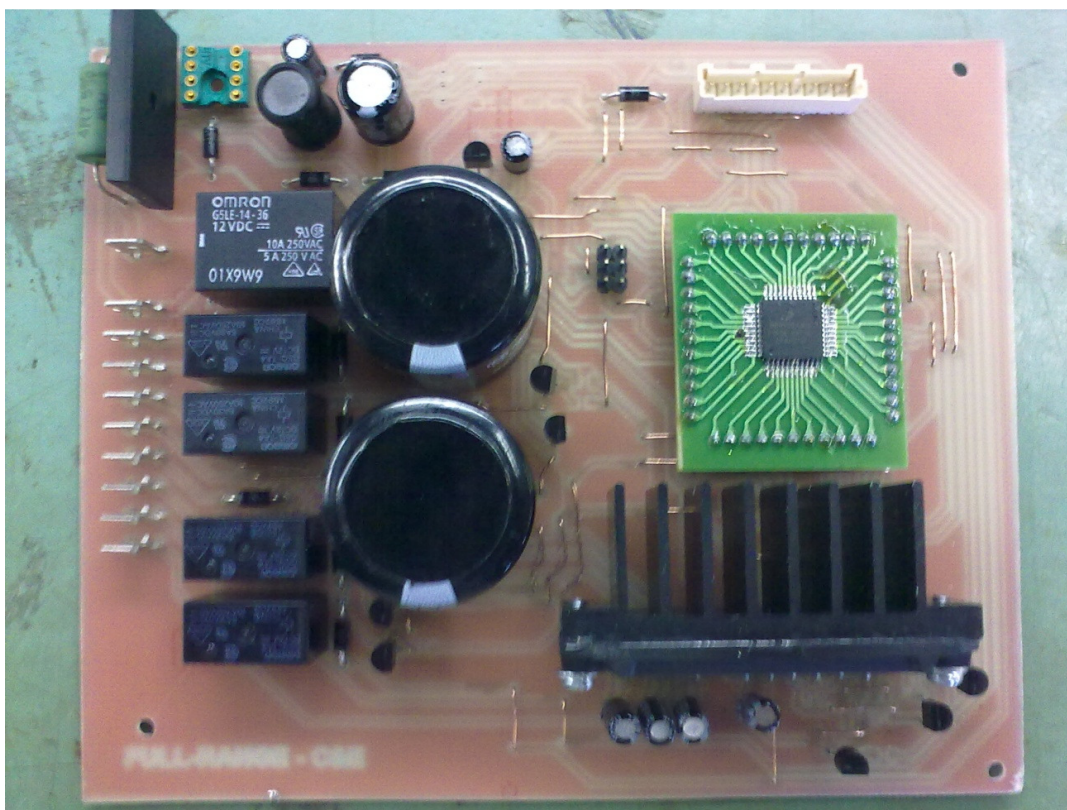


Figura 40 - Foto do Protótipo (vista superior).

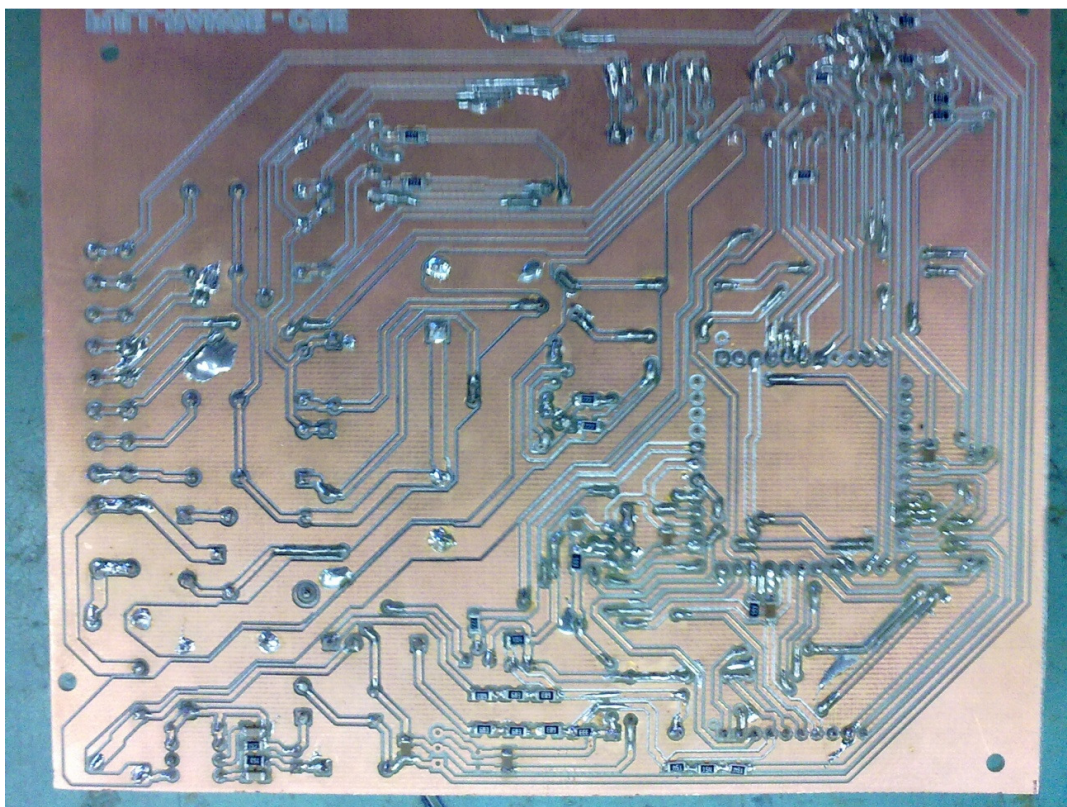


Figura 41 - Foto do Protótipo (vista inferior).

Nas Fig 43. e Fig.44, capturadas através do osciloscópio mostram as saídas do microcontrolador, os sinais PWM gerados por ele para controlar o chaveamento, onde os pulsos de cor magenta são os responsáveis pelas portas “high”, a tensão V+ e os amarelos pela porta “low” a tensão V-, ou seja, controle do ciclo positivo e negativo respectivamente.

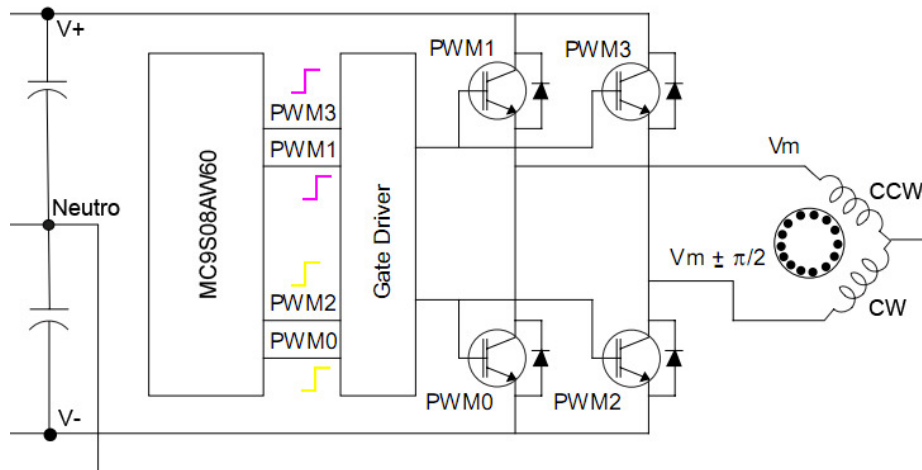


Figura 42 - Lógica de acionamento das chaves.

Podemos verificar a defasagem aplicando o mesmo método (“regra de três”) utilizado.

$$\frac{16,5m}{4m} = \frac{360^\circ}{x_1}$$

$$x_1 \cong 87,3^\circ$$

Uma defasagem bem próxima de 90°.

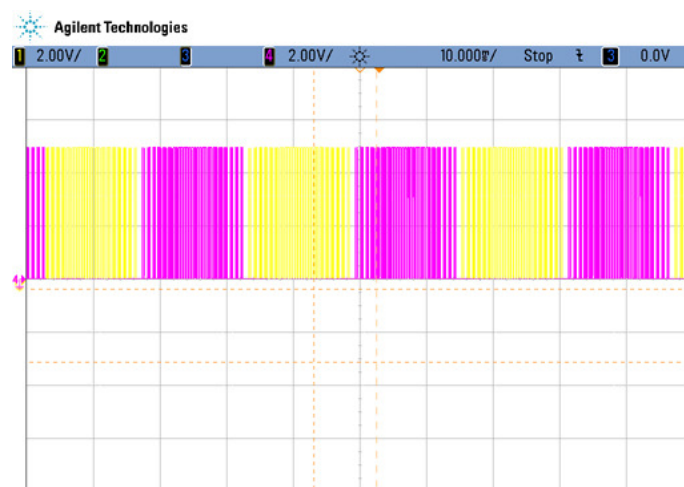


Figura 43 - Sinal de PWM gerado pelo microcontrolador.

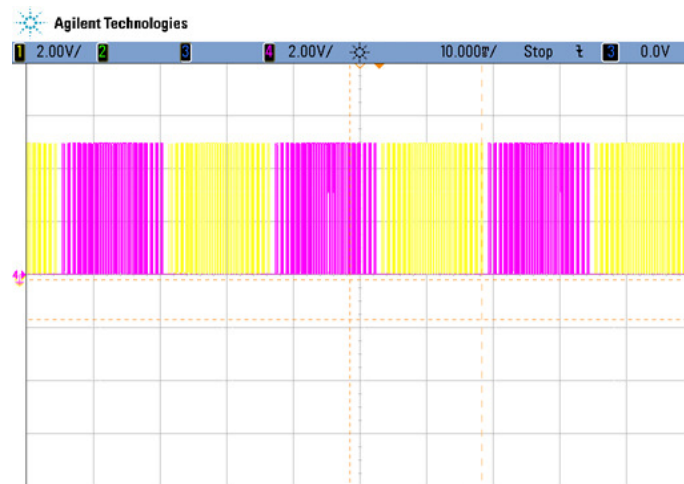


Figura 44 - Sinal de PWM defasado em relação ao anterior gerado pelo microcontrolador para entrada no Driver do inversor.

Já na Fig. 45 obtivemos as tensões da saída do inversor e novamente foi verificada a defasagem.

$$\frac{16,3m}{3,9m} = \frac{360^\circ}{x_2}$$

$$x_2 \cong 86^\circ$$

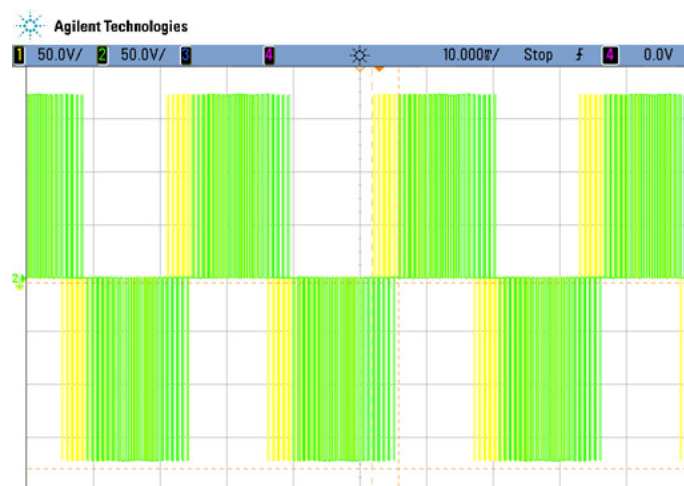


Figura 45 - Tensões de saída do inversor defasadas para alimentação do motor PSC sem capacitor.

O motor foi alimentado pelas tensões geradas na Fig.44 com ângulos deslocados de aproximadamente 86° , e o motor partiu e funcionou de forma aceitável para esse trabalho. Desta forma, foi retirado capacitor do circuito externo que fazia a ligação em série com os enrolamentos CW e CCW.

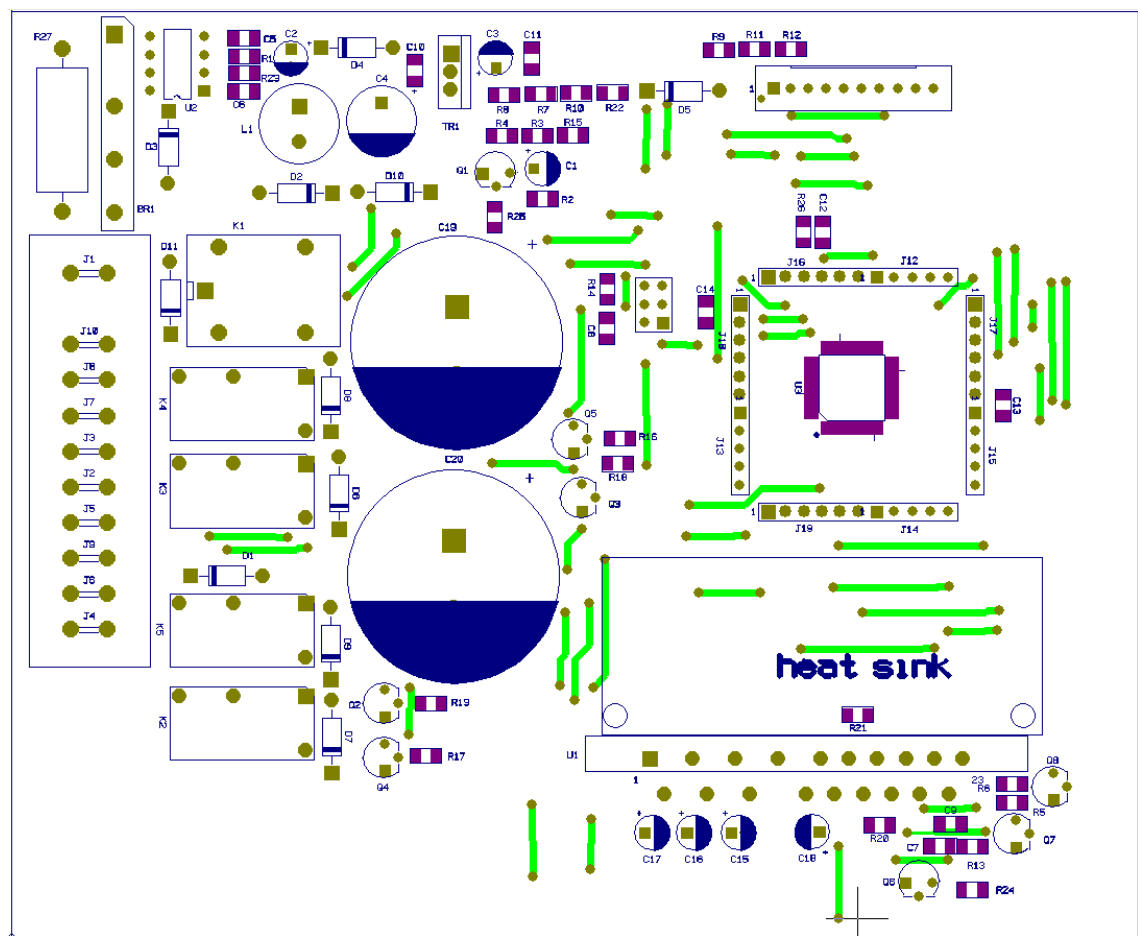
5 Conclusão

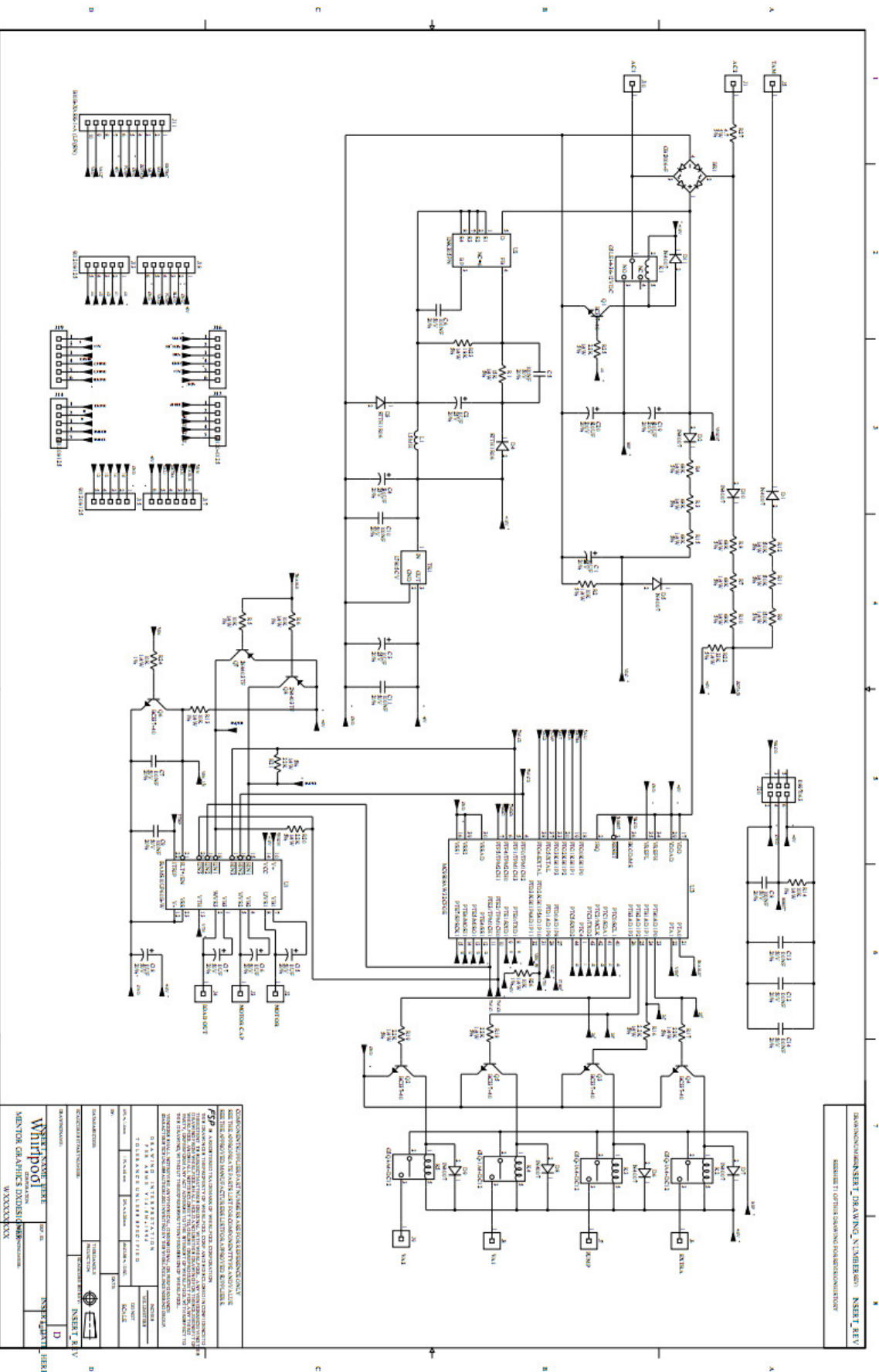
O objetivo desta monografia foi usar o inversor para gerar duas tensões defasadas para o acionamento do motor, deste modo fazendo a função do capacitor, e conseqüentemente ele será retirado do circuito externo.

No trabalho foi possível atingir o objetivo, fazer funcionar o motor de indução monofásico PSC sem utilizar o capacitor, alimentando-o com tensões defasadas de 90° geradas pelo de inversor de frequência. Embora a utilização dos inversores atualmente esteja focada no controle de motores de indução trifásicos, estudos promissores estão em desenvolvimento para a aplicação desses conversores em motores de indução monofásicos para a substituição de componentes mecânicos que reduzem a confiabilidade deste motor como a chave centrífuga, o capacitor de partida e o capacitor permanente, conforme visto neste trabalho.

Com o acionamento através de inversor é possível também fazer o controle de velocidade deste tipo de motor, permitindo um melhor desempenho e aumentando a sua área de aplicação. O controle de velocidade para máquinas de lavar roupa é essencial para ter sua performance de lavagem alta, pois com esse controle podemos melhorar as etapas de agitação e centrifugação. Na agitação o motor da máquina é ligado intermitentemente nos dois sentidos de rotação. Desta forma, as roupas se chocam contra o agitador e contra o cesto, o que é análogo ao ato de esfregar as roupas. Já na centrifugação, que é a última das etapas, tem como objetivo tirar o excesso de água das roupas. E em ambas as etapas a variação de velocidade do motor tem uma influencia significativa no resultado do processo de lavagem.

PCB Layout





Lista de abreviaturas e siglas

PSC – Permanent Split Capacitor

Fmm- Força magneto motriz

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

PWM – Pulse Width Modulation

GND – Ground

CW – Clock wise

CCW- Counter Clock wise

TTL – Transistor-Transistor Logic

PTH - Pin Throught Hole

SMD - Superficial Monting Device

Anexo I

Tabela das senoides

NroPontos
(TIMER 2):

200

0,01

0,00005

20000

PWM : periodo frequencia

0,05

Tempos da
interrupcao :
RATE :

1332

0,95

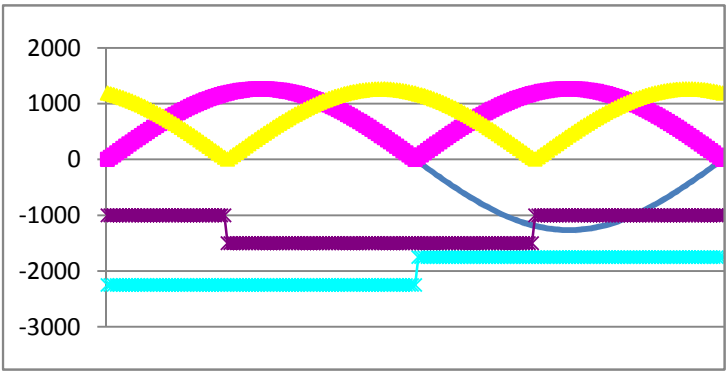
1265,4

THETA =

-70

THETA = -1,221730476

| | TABELA_1 | SIN | SIN+THETA | | ABS(SIN) | | TAB_PNT_MI | TAB_SIN_MH | | ABS(SIN+90) | | TAB_PNT_MI | TAB_SIN_MH |
|----|-------------|------|-----------|--------|----------|-------|------------|------------|--|-------------|-------|------------|------------|
| 0 | 0 | 0 | -1190 | 0x0, | 0 | -2250 | 0, | 0x0, | | 1190 | -1000 | 1, | 0x4A6, |
| 1 | 0,031410759 | 39 | -1175 | 0x27, | 39 | -2250 | 0, | 0x27, | | 1175 | -1000 | 1, | 0x497, |
| 2 | 0,06279052 | 79 | -1160 | 0x4F, | 79 | -2250 | 0, | 0x4F, | | 1160 | -1000 | 1, | 0x488, |
| 3 | 0,094108313 | 119 | -1144 | 0x77, | 119 | -2250 | 0, | 0x77, | | 1144 | -1000 | 1, | 0x478, |
| 4 | 0,125333234 | 158 | -1126 | 0x9E, | 158 | -2250 | 0, | 0x9E, | | 1126 | -1000 | 1, | 0x466, |
| 5 | 0,156434465 | 197 | -1107 | 0xC5, | 197 | -2250 | 0, | 0xC5, | | 1107 | -1000 | 1, | 0x453, |
| 6 | 0,187381315 | 237 | -1087 | 0xED, | 237 | -2250 | 0, | 0xED, | | 1087 | -1000 | 1, | 0x43F, |
| 7 | 0,218143241 | 276 | -1067 | 0x114, | 276 | -2250 | 0, | 0x114, | | 1067 | -1000 | 1, | 0x42B, |
| 8 | 0,248689887 | 314 | -1045 | 0x13A, | 314 | -2250 | 0, | 0x13A, | | 1045 | -1000 | 1, | 0x415, |
| 9 | 0,278991106 | 353 | -1022 | 0x161, | 353 | -2250 | 0, | 0x161, | | 1022 | -1000 | 1, | 0x3FE, |
| 10 | 0,309016994 | 391 | -998 | 0x187, | 391 | -2250 | 0, | 0x187, | | 998 | -1000 | 1, | 0x3E6, |
| 11 | 0,33873792 | 428 | -973 | 0x1AC, | 428 | -2250 | 0, | 0x1AC, | | 973 | -1000 | 1, | 0x3CD, |
| 12 | 0,368124553 | 465 | -947 | 0x1D1, | 465 | -2250 | 0, | 0x1D1, | | 947 | -1000 | 1, | 0x3B3, |
| 13 | 0,397147891 | 502 | -920 | 0x1F6, | 502 | -2250 | 0, | 0x1F6, | | 920 | -1000 | 1, | 0x398, |
| 14 | 0,425779292 | 538 | -892 | 0x21A, | 538 | -2250 | 0, | 0x21A, | | 892 | -1000 | 1, | 0x37C, |
| 15 | 0,4539905 | 574 | -864 | 0x23E, | 574 | -2250 | 0, | 0x23E, | | 864 | -1000 | 1, | 0x360, |
| 16 | 0,481753674 | 609 | -834 | 0x261, | 609 | -2250 | 0, | 0x261, | | 834 | -1000 | 1, | 0x342, |
| 17 | 0,509041416 | 644 | -804 | 0x284, | 644 | -2250 | 0, | 0x284, | | 804 | -1000 | 1, | 0x324, |
| 18 | 0,535826795 | 678 | -773 | 0x2A6, | 678 | -2250 | 0, | 0x2A6, | | 773 | -1000 | 1, | 0x305, |
| 19 | 0,562083378 | 711 | -741 | 0x2C7, | 711 | -2250 | 0, | 0x2C7, | | 741 | -1000 | 1, | 0x2E5, |
| 20 | 0,587785252 | 743 | -708 | 0x2E7, | 743 | -2250 | 0, | 0x2E7, | | 708 | -1000 | 1, | 0x2C4, |
| 21 | 0,612907054 | 775 | -675 | 0x307, | 775 | -2250 | 0, | 0x307, | | 675 | -1000 | 1, | 0x2A3, |
| 22 | 0,63742399 | 806 | -641 | 0x326, | 806 | -2250 | 0, | 0x326, | | 641 | -1000 | 1, | 0x281, |
| 23 | 0,661311865 | 836 | -606 | 0x344, | 836 | -2250 | 0, | 0x344, | | 606 | -1000 | 1, | 0x25E, |
| 24 | 0,684547106 | 866 | -571 | 0x362, | 866 | -2250 | 0, | 0x362, | | 571 | -1000 | 1, | 0x23B, |
| 25 | 0,707106781 | 894 | -535 | 0x37E, | 894 | -2250 | 0, | 0x37E, | | 535 | -1000 | 1, | 0x217, |
| 26 | 0,728968627 | 922 | -499 | 0x39A, | 922 | -2250 | 0, | 0x39A, | | 499 | -1000 | 1, | 0x1F3, |
| 27 | 0,750111107 | 949 | -462 | 0x3B5, | 949 | -2250 | 0, | 0x3B5, | | 462 | -1000 | 1, | 0x1CE, |
| 28 | 0,770513243 | 975 | -425 | 0x3CF, | 975 | -2250 | 0, | 0x3CF, | | 425 | -1000 | 1, | 0x1A9, |
| 29 | 0,790155012 | 999 | -387 | 0x3E7, | 999 | -2250 | 0, | 0x3E7, | | 387 | -1000 | 1, | 0x183, |
| 30 | 0,809016994 | 1023 | -349 | 0x3FF, | 1023 | -2250 | 0, | 0x3FF, | | 349 | -1000 | 1, | 0x15D, |
| 31 | 0,827080574 | 1046 | -311 | 0x416, | 1046 | -2250 | 0, | 0x416, | | 311 | -1000 | 1, | 0x137, |
| 32 | 0,844327926 | 1068 | -272 | 0x42C, | 1068 | -2250 | 0, | 0x42C, | | 272 | -1000 | 1, | 0x110, |
| 33 | 0,860742027 | 1089 | -233 | 0x441, | 1089 | -2250 | 0, | 0x441, | | 233 | -1000 | 1, | 0xE9, |
| 34 | 0,87630668 | 1108 | -194 | 0x454, | 1108 | -2250 | 0, | 0x454, | | 194 | -1000 | 1, | 0xC2, |
| 35 | 0,891006524 | 1127 | -155 | 0x467, | 1127 | -2250 | 0, | 0x467, | | 155 | -1000 | 1, | 0x9B, |
| 36 | 0,904827052 | 1144 | -115 | 0x478, | 1144 | -2250 | 0, | 0x478, | | 115 | -1000 | 1, | 0x73, |
| 37 | 0,917754626 | 1161 | -76 | 0x489, | 1161 | -2250 | 0, | 0x489, | | 76 | -1000 | 1, | 0x4C, |
| 38 | 0,929776486 | 1176 | -36 | 0x498, | 1176 | -2250 | 0, | 0x498, | | 36 | -1000 | 1, | 0x24, |
| 39 | 0,940880769 | 1190 | 4 | 0x4A6, | 1190 | -2250 | 0, | 0x4A6, | | 4 | -1500 | 0, | 0x4, |
| 40 | 0,951056516 | 1203 | 44 | 0x4B3, | 1203 | -2250 | 0, | 0x4B3, | | 44 | -1500 | 0, | 0x2C, |
| 41 | 0,960293686 | 1215 | 83 | 0x4BF, | 1215 | -2250 | 0, | 0x4BF, | | 83 | -1500 | 0, | 0x53, |
| 42 | 0,968583161 | 1225 | 123 | 0x4C9, | 1225 | -2250 | 0, | 0x4C9, | | 123 | -1500 | 0, | 0x7B, |
| 43 | 0,975916762 | 1234 | 162 | 0x4D2, | 1234 | -2250 | 0, | 0x4D2, | | 162 | -1500 | 0, | 0xA2, |
| 44 | 0,982287251 | 1242 | 202 | 0x4DA, | 1242 | -2250 | 0, | 0x4DA, | | 202 | -1500 | 0, | 0xCA, |
| 45 | 0,987688341 | 1249 | 241 | 0x4E1, | 1249 | -2250 | 0, | 0x4E1, | | 241 | -1500 | 0, | 0xF1, |
| 46 | 0,992114701 | 1255 | 280 | 0x4E7, | 1255 | -2250 | 0, | 0x4E7, | | 280 | -1500 | 0, | 0x118, |
| 47 | 0,995561965 | 1259 | 318 | 0x4EB, | 1259 | -2250 | 0, | 0x4EB, | | 318 | -1500 | 0, | 0x13E, |
| 48 | 0,998026728 | 1262 | 357 | 0x4EE, | 1262 | -2250 | 0, | 0x4EE, | | 357 | -1500 | 0, | 0x165, |
| 49 | 0,99950656 | 1264 | 395 | 0x4F0, | 1264 | -2250 | 0, | 0x4F0, | | 395 | -1500 | 0, | 0x18B, |
| 50 | 1 | 1265 | 432 | 0x4F1, | 1265 | -2250 | 0, | 0x4F1, | | 432 | -1500 | 0, | 0x1B0, |



| | | | | | | | | | | | | |
|-----|--------------|------|------|---------------|------|-------|----|--------|------|-------|----|--------|
| 51 | 0,99950656 | 1264 | 469 | 0x4F0, | 1264 | -2250 | 0, | 0x4F0, | 469 | -1500 | 0, | 0x1D5, |
| 52 | 0,998026728 | 1262 | 506 | 0x4EE, | 1262 | -2250 | 0, | 0x4EE, | 506 | -1500 | 0, | 0x1FA, |
| 53 | 0,995561965 | 1259 | 542 | 0x4EB, | 1259 | -2250 | 0, | 0x4EB, | 542 | -1500 | 0, | 0x21E, |
| 54 | 0,992114701 | 1255 | 578 | 0x4E7, | 1255 | -2250 | 0, | 0x4E7, | 578 | -1500 | 0, | 0x242, |
| 55 | 0,987688341 | 1249 | 613 | 0x4E1, | 1249 | -2250 | 0, | 0x4E1, | 613 | -1500 | 0, | 0x265, |
| 56 | 0,982287251 | 1242 | 647 | 0x4DA, | 1242 | -2250 | 0, | 0x4DA, | 647 | -1500 | 0, | 0x287, |
| 57 | 0,975916762 | 1234 | 681 | 0x4D2, | 1234 | -2250 | 0, | 0x4D2, | 681 | -1500 | 0, | 0x2A9, |
| 58 | 0,968583161 | 1225 | 714 | 0x4C9, | 1225 | -2250 | 0, | 0x4C9, | 714 | -1500 | 0, | 0x2CA, |
| 59 | 0,960293686 | 1215 | 747 | 0x4BF, | 1215 | -2250 | 0, | 0x4BF, | 747 | -1500 | 0, | 0x2EB, |
| 60 | 0,951056516 | 1203 | 779 | 0x4B3, | 1203 | -2250 | 0, | 0x4B3, | 779 | -1500 | 0, | 0x30B, |
| 61 | 0,940880769 | 1190 | 809 | 0x4A6, | 1190 | -2250 | 0, | 0x4A6, | 809 | -1500 | 0, | 0x329, |
| 62 | 0,929776486 | 1176 | 840 | 0x498, | 1176 | -2250 | 0, | 0x498, | 840 | -1500 | 0, | 0x348, |
| 63 | 0,917754626 | 1161 | 869 | 0x489, | 1161 | -2250 | 0, | 0x489, | 869 | -1500 | 0, | 0x365, |
| 64 | 0,904827052 | 1144 | 897 | 0x478, | 1144 | -2250 | 0, | 0x478, | 897 | -1500 | 0, | 0x381, |
| 65 | 0,891006524 | 1127 | 925 | 0x467, | 1127 | -2250 | 0, | 0x467, | 925 | -1500 | 0, | 0x39D, |
| 66 | 0,87630668 | 1108 | 952 | 0x454, | 1108 | -2250 | 0, | 0x454, | 952 | -1500 | 0, | 0x3B8, |
| 67 | 0,860742027 | 1089 | 977 | 0x441, | 1089 | -2250 | 0, | 0x441, | 977 | -1500 | 0, | 0x3D1, |
| 68 | 0,844327926 | 1068 | 1002 | 0x42C, | 1068 | -2250 | 0, | 0x42C, | 1002 | -1500 | 0, | 0x3EA, |
| 69 | 0,827080574 | 1046 | 1026 | 0x416, | 1046 | -2250 | 0, | 0x416, | 1026 | -1500 | 0, | 0x402, |
| 70 | 0,809016994 | 1023 | 1049 | 0x3FF, | 1023 | -2250 | 0, | 0x3FF, | 1049 | -1500 | 0, | 0x419, |
| 71 | 0,790155012 | 999 | 1070 | 0x3E7, | 999 | -2250 | 0, | 0x3E7, | 1070 | -1500 | 0, | 0x42E, |
| 72 | 0,770513243 | 975 | 1091 | 0x3CF, | 975 | -2250 | 0, | 0x3CF, | 1091 | -1500 | 0, | 0x443, |
| 73 | 0,75011107 | 949 | 1110 | 0x3B5, | 949 | -2250 | 0, | 0x3B5, | 1110 | -1500 | 0, | 0x456, |
| 74 | 0,728968627 | 922 | 1129 | 0x39A, | 922 | -2250 | 0, | 0x39A, | 1129 | -1500 | 0, | 0x469, |
| 75 | 0,707106781 | 894 | 1146 | 0x37E, | 894 | -2250 | 0, | 0x37E, | 1146 | -1500 | 0, | 0x47A, |
| 76 | 0,684547106 | 866 | 1163 | 0x362, | 866 | -2250 | 0, | 0x362, | 1163 | -1500 | 0, | 0x48B, |
| 77 | 0,661311865 | 836 | 1178 | 0x344, | 836 | -2250 | 0, | 0x344, | 1178 | -1500 | 0, | 0x49A, |
| 78 | 0,63742399 | 806 | 1192 | 0x326, | 806 | -2250 | 0, | 0x326, | 1192 | -1500 | 0, | 0x4A8, |
| 79 | 0,612907054 | 775 | 1204 | 0x307, | 775 | -2250 | 0, | 0x307, | 1204 | -1500 | 0, | 0x4B4, |
| 80 | 0,587785252 | 743 | 1216 | 0x2E7, | 743 | -2250 | 0, | 0x2E7, | 1216 | -1500 | 0, | 0x4C0, |
| 81 | 0,562083378 | 711 | 1226 | 0x2C7, | 711 | -2250 | 0, | 0x2C7, | 1226 | -1500 | 0, | 0x4CA, |
| 82 | 0,535826795 | 678 | 1235 | 0x2A6, | 678 | -2250 | 0, | 0x2A6, | 1235 | -1500 | 0, | 0x4D3, |
| 83 | 0,509041416 | 644 | 1243 | 0x284, | 644 | -2250 | 0, | 0x284, | 1243 | -1500 | 0, | 0x4DB, |
| 84 | 0,481753674 | 609 | 1250 | 0x261, | 609 | -2250 | 0, | 0x261, | 1250 | -1500 | 0, | 0x4E2, |
| 85 | 0,4539905 | 574 | 1255 | 0x23E, | 574 | -2250 | 0, | 0x23E, | 1255 | -1500 | 0, | 0x4F7, |
| 86 | 0,425779292 | 538 | 1260 | 0x21A, | 538 | -2250 | 0, | 0x21A, | 1260 | -1500 | 0, | 0x4EC, |
| 87 | 0,397147891 | 502 | 1263 | 0x1F6, | 502 | -2250 | 0, | 0x1F6, | 1263 | -1500 | 0, | 0x4EF, |
| 88 | 0,368124553 | 465 | 1264 | 0x1D1, | 465 | -2250 | 0, | 0x1D1, | 1264 | -1500 | 0, | 0x4F0, |
| 89 | 0,33873792 | 428 | 1265 | 0x1AC, | 428 | -2250 | 0, | 0x1AC, | 1265 | -1500 | 0, | 0x4F1, |
| 90 | 0,309016994 | 391 | 1264 | 0x187, | 391 | -2250 | 0, | 0x187, | 1264 | -1500 | 0, | 0x4F0, |
| 91 | 0,278991106 | 353 | 1262 | 0x161, | 353 | -2250 | 0, | 0x161, | 1262 | -1500 | 0, | 0x4EE, |
| 92 | 0,248689887 | 314 | 1259 | 0x13A, | 314 | -2250 | 0, | 0x13A, | 1259 | -1500 | 0, | 0x4EB, |
| 93 | 0,218143241 | 276 | 1254 | 0x114, | 276 | -2250 | 0, | 0x114, | 1254 | -1500 | 0, | 0x4E6, |
| 94 | 0,187381315 | 237 | 1249 | 0xED, | 237 | -2250 | 0, | 0xED, | 1249 | -1500 | 0, | 0x4E1, |
| 95 | 0,156434465 | 197 | 1242 | 0xC5, | 197 | -2250 | 0, | 0xC5, | 1242 | -1500 | 0, | 0x4DA, |
| 96 | 0,125333234 | 158 | 1233 | 0x9E, | 158 | -2250 | 0, | 0x9E, | 1233 | -1500 | 0, | 0x4D1, |
| 97 | 0,094108313 | 119 | 1224 | 0x77, | 119 | -2250 | 0, | 0x77, | 1224 | -1500 | 0, | 0x4CB, |
| 98 | 0,06279052 | 79 | 1213 | 0x4F, | 79 | -2250 | 0, | 0x4F, | 1213 | -1500 | 0, | 0x4BD, |
| 99 | 0,031410759 | 39 | 1202 | 0x27, | 39 | -2250 | 0, | 0x27, | 1202 | -1500 | 0, | 0x4B2, |
| 100 | 1,22515E-16 | 0 | 1189 | 0x0, | 0 | -2250 | 0, | 0x0, | 1189 | -1500 | 0, | 0x4A5, |
| 101 | -0,031410759 | -40 | 1174 | 0xFFFFFFF8D, | 40 | -1750 | 1, | 0x28, | 1174 | -1500 | 0, | 0x496, |
| 102 | -0,06279052 | -80 | 1159 | 0xFFFFFFF80, | 80 | -1750 | 1, | 0x50, | 1159 | -1500 | 0, | 0x487, |
| 103 | -0,094108313 | -120 | 1143 | 0xFFFFFFF88, | 120 | -1750 | 1, | 0x78, | 1143 | -1500 | 0, | 0x477, |
| 104 | -0,125333234 | -159 | 1125 | 0xFFFFFFF61, | 159 | -1750 | 1, | 0x9F, | 1125 | -1500 | 0, | 0x465, |
| 105 | -0,156434465 | -198 | 1106 | 0xFFFFFFF3A, | 198 | -1750 | 1, | 0xC6, | 1106 | -1500 | 0, | 0x452, |
| 106 | -0,187381315 | -238 | 1086 | 0xFFFFFFF12, | 238 | -1750 | 1, | 0xEE, | 1086 | -1500 | 0, | 0x43E, |
| 107 | -0,218143241 | -277 | 1066 | 0xFFFFFFFEEB, | 277 | -1750 | 1, | 0x115, | 1066 | -1500 | 0, | 0x42A, |
| 108 | -0,248689887 | -315 | 1044 | 0xFFFFFFFEC5, | 315 | -1750 | 1, | 0x13B, | 1044 | -1500 | 0, | 0x414, |
| 109 | -0,278991106 | -354 | 1021 | 0xFFFFFFF9E, | 354 | -1750 | 1, | 0x162, | 1021 | -1500 | 0, | 0x3FD, |
| 110 | -0,309016994 | -392 | 997 | 0xFFFFFFF78, | 392 | -1750 | 1, | 0x188, | 997 | -1500 | 0, | 0x3E5, |
| 111 | -0,33873792 | -429 | 972 | 0xFFFFFFF53, | 429 | -1750 | 1, | 0x1AD, | 972 | -1500 | 0, | 0x3CC, |
| 112 | -0,368124553 | -466 | 946 | 0xFFFFFFF2E, | 466 | -1750 | 1, | 0x1D2, | 946 | -1500 | 0, | 0x3B2, |
| 113 | -0,397147891 | -503 | 919 | 0xFFFFFFF09, | 503 | -1750 | 1, | 0x1F7, | 919 | -1500 | 0, | 0x397, |
| 114 | -0,425779292 | -539 | 891 | 0xFFFFFFFDE5, | 539 | -1750 | 1, | 0x21B, | 891 | -1500 | 0, | 0x37B, |
| 115 | -0,4539905 | -575 | 863 | 0xFFFFFFFDC1, | 575 | -1750 | 1, | 0x23F, | 863 | -1500 | 0, | 0x35F, |
| 116 | -0,481753674 | -610 | 833 | 0xFFFFFFF9E, | 610 | -1750 | 1, | 0x262, | 833 | -1500 | 0, | 0x341, |
| 117 | -0,509041416 | -645 | 803 | 0xFFFFFFF7B, | 645 | -1750 | 1, | 0x285, | 803 | -1500 | 0, | 0x323, |

| | | | | | | | | | | | | |
|-----|--------------|-------|-------|-----------------|------|-------|----|--------|------|-------|----|--------|
| 118 | -0,535826795 | -679 | 772 | 0xFFFFFFFFD59, | 679 | -1750 | 1, | 0x2A7, | 772 | -1500 | 0, | 0x3D4, |
| 119 | -0,562083378 | -712 | 740 | 0xFFFFFFFFD38, | 712 | -1750 | 1, | 0x2C8, | 740 | -1500 | 0, | 0x2E4, |
| 120 | -0,587785252 | -744 | 707 | 0xFFFFFFFFD18, | 744 | -1750 | 1, | 0x2EB, | 707 | -1500 | 0, | 0x2C3, |
| 121 | -0,612907054 | -776 | 674 | 0xFFFFFFFFFCF8, | 776 | -1750 | 1, | 0x308, | 674 | -1500 | 0, | 0x2A2, |
| 122 | -0,63742399 | -807 | 640 | 0xFFFFFFFFCD9, | 807 | -1750 | 1, | 0x327, | 640 | -1500 | 0, | 0x280, |
| 123 | -0,661311865 | -837 | 605 | 0xFFFFFFFFCBB, | 837 | -1750 | 1, | 0x345, | 605 | -1500 | 0, | 0x25D, |
| 124 | -0,684547106 | -867 | 570 | 0xFFFFFFFFC9D, | 867 | -1750 | 1, | 0x363, | 570 | -1500 | 0, | 0x23A, |
| 125 | -0,707106781 | -895 | 534 | 0xFFFFFFFFC81, | 895 | -1750 | 1, | 0x37F, | 534 | -1500 | 0, | 0x216, |
| 126 | -0,728968627 | -923 | 498 | 0xFFFFFFFFC65, | 923 | -1750 | 1, | 0x39B, | 498 | -1500 | 0, | 0x1F2, |
| 127 | -0,75011107 | -950 | 461 | 0xFFFFFFFFC4A, | 950 | -1750 | 1, | 0x3B6, | 461 | -1500 | 0, | 0x1CD, |
| 128 | -0,770513243 | -976 | 424 | 0xFFFFFFFFC30, | 976 | -1750 | 1, | 0x3D0, | 424 | -1500 | 0, | 0x1A8, |
| 129 | -0,790155012 | -1000 | 386 | 0xFFFFFFFFC18, | 1000 | -1750 | 1, | 0x3E8, | 386 | -1500 | 0, | 0x182, |
| 130 | -0,809016994 | -1024 | 348 | 0xFFFFFFFFC00, | 1024 | -1750 | 1, | 0x400, | 348 | -1500 | 0, | 0x15C, |
| 131 | -0,827080574 | -1047 | 310 | 0xFFFFFFFFBEE9, | 1047 | -1750 | 1, | 0x417, | 310 | -1500 | 0, | 0x136, |
| 132 | -0,844327926 | -1069 | 271 | 0xFFFFFFFFBD3, | 1069 | -1750 | 1, | 0x42D, | 271 | -1500 | 0, | 0x10F, |
| 133 | -0,860742027 | -1090 | 232 | 0xFFFFFFFFBBE, | 1090 | -1750 | 1, | 0x442, | 232 | -1500 | 0, | 0xE8, |
| 134 | -0,87630668 | -1109 | 193 | 0xFFFFFFFFBAB, | 1109 | -1750 | 1, | 0x455, | 193 | -1500 | 0, | 0xC1, |
| 135 | -0,891006524 | -1128 | 154 | 0xFFFFFFFFB98, | 1128 | -1750 | 1, | 0x468, | 154 | -1500 | 0, | 0x9A, |
| 136 | -0,904827052 | -1145 | 114 | 0xFFFFFFFFB87, | 1145 | -1750 | 1, | 0x479, | 114 | -1500 | 0, | 0x72, |
| 137 | -0,917754626 | -1162 | 75 | 0xFFFFFFFFB76, | 1162 | -1750 | 1, | 0x48A, | 75 | -1500 | 0, | 0x4B, |
| 138 | -0,929776486 | -1177 | 35 | 0xFFFFFFFFB67, | 1177 | -1750 | 1, | 0x499, | 35 | -1500 | 0, | 0x23, |
| 139 | -0,940880769 | -1191 | -5 | 0xFFFFFFFFB59, | 1191 | -1750 | 1, | 0x4A7, | 5 | -1000 | 1, | 0x5, |
| 140 | -0,951056516 | -1204 | -45 | 0xFFFFFFFFB4C, | 1204 | -1750 | 1, | 0x4B4, | 45 | -1000 | 1, | 0x2D, |
| 141 | -0,960293686 | -1216 | -84 | 0xFFFFFFFFB36, | 1216 | -1750 | 1, | 0x4CD, | 84 | -1000 | 1, | 0x54, |
| 142 | -0,968583161 | -1226 | -124 | 0xFFFFFFFFB36, | 1226 | -1750 | 1, | 0x4CA, | 124 | -1000 | 1, | 0x7C, |
| 143 | -0,975916762 | -1235 | -163 | 0xFFFFFFFFB2D, | 1235 | -1750 | 1, | 0x4D3, | 163 | -1000 | 1, | 0xA3, |
| 144 | -0,982287251 | -1243 | -203 | 0xFFFFFFFFB25, | 1243 | -1750 | 1, | 0x4DB, | 203 | -1000 | 1, | 0xCB, |
| 145 | -0,987688341 | -1250 | -242 | 0xFFFFFFFFB1E, | 1250 | -1750 | 1, | 0x4E2, | 242 | -1000 | 1, | 0xF2, |
| 146 | -0,992114701 | -1256 | -281 | 0xFFFFFFFFB18, | 1256 | -1750 | 1, | 0x4EB, | 281 | -1000 | 1, | 0x119, |
| 147 | -0,995561965 | -1260 | -319 | 0xFFFFFFFFB14, | 1260 | -1750 | 1, | 0x4EC, | 319 | -1000 | 1, | 0x13F, |
| 148 | -0,998026728 | -1263 | -358 | 0xFFFFFFFFB11, | 1263 | -1750 | 1, | 0x4EF, | 358 | -1000 | 1, | 0x166, |
| 149 | -0,99950656 | -1265 | -396 | 0xFFFFFFFFB0F, | 1265 | -1750 | 1, | 0x4F1, | 396 | -1000 | 1, | 0x18C, |
| 150 | -1 | -1266 | -433 | 0xFFFFFFFFB0E, | 1266 | -1750 | 1, | 0x4F2, | 433 | -1000 | 1, | 0x1B1, |
| 151 | -0,99950656 | -1265 | -470 | 0xFFFFFFFFB0F, | 1265 | -1750 | 1, | 0x4F1, | 470 | -1000 | 1, | 0x1D6, |
| 152 | -0,998026728 | -1263 | -507 | 0xFFFFFFFFB11, | 1263 | -1750 | 1, | 0x4EF, | 507 | -1000 | 1, | 0x1FB, |
| 153 | -0,995561965 | -1260 | -543 | 0xFFFFFFFFB14, | 1260 | -1750 | 1, | 0x4EC, | 543 | -1000 | 1, | 0x21F, |
| 154 | -0,992114701 | -1256 | -579 | 0xFFFFFFFFB18, | 1256 | -1750 | 1, | 0x4EB, | 579 | -1000 | 1, | 0x243, |
| 155 | -0,987688341 | -1250 | -614 | 0xFFFFFFFFB1E, | 1250 | -1750 | 1, | 0x4E2, | 614 | -1000 | 1, | 0x266, |
| 156 | -0,982287251 | -1243 | -648 | 0xFFFFFFFFB25, | 1243 | -1750 | 1, | 0x4DB, | 648 | -1000 | 1, | 0x288, |
| 157 | -0,975916762 | -1235 | -682 | 0xFFFFFFFFB2D, | 1235 | -1750 | 1, | 0x4D3, | 682 | -1000 | 1, | 0x2AA, |
| 158 | -0,968583161 | -1226 | -715 | 0xFFFFFFFFB36, | 1226 | -1750 | 1, | 0x4CA, | 715 | -1000 | 1, | 0x2CB, |
| 159 | -0,960293686 | -1216 | -748 | 0xFFFFFFFFB40, | 1216 | -1750 | 1, | 0x4CD, | 748 | -1000 | 1, | 0x2EC, |
| 160 | -0,951056516 | -1204 | -780 | 0xFFFFFFFFB4C, | 1204 | -1750 | 1, | 0x4B4, | 780 | -1000 | 1, | 0x30C, |
| 161 | -0,940880769 | -1191 | -810 | 0xFFFFFFFFB59, | 1191 | -1750 | 1, | 0x4A7, | 810 | -1000 | 1, | 0x32A, |
| 162 | -0,929776486 | -1177 | -841 | 0xFFFFFFFFB67, | 1177 | -1750 | 1, | 0x499, | 841 | -1000 | 1, | 0x349, |
| 163 | -0,917754626 | -1162 | -870 | 0xFFFFFFFFB76, | 1162 | -1750 | 1, | 0x48A, | 870 | -1000 | 1, | 0x366, |
| 164 | -0,904827052 | -1145 | -898 | 0xFFFFFFFFB87, | 1145 | -1750 | 1, | 0x479, | 898 | -1000 | 1, | 0x382, |
| 165 | -0,891006524 | -1128 | -926 | 0xFFFFFFFFB98, | 1128 | -1750 | 1, | 0x468, | 926 | -1000 | 1, | 0x39E, |
| 166 | -0,87630668 | -1109 | -953 | 0xFFFFFFFFBAB, | 1109 | -1750 | 1, | 0x455, | 953 | -1000 | 1, | 0x3B9, |
| 167 | -0,860742027 | -1090 | -978 | 0xFFFFFFFFBBE, | 1090 | -1750 | 1, | 0x442, | 978 | -1000 | 1, | 0x3D2, |
| 168 | -0,844327926 | -1069 | -1003 | 0xFFFFFFFFBD3, | 1069 | -1750 | 1, | 0x42D, | 1003 | -1000 | 1, | 0x3EB, |
| 169 | -0,827080574 | -1047 | -1027 | 0xFFFFFFFFBEE9, | 1047 | -1750 | 1, | 0x417, | 1027 | -1000 | 1, | 0x403, |
| 170 | -0,809016994 | -1024 | -1050 | 0xFFFFFFFFC00, | 1024 | -1750 | 1, | 0x400, | 1050 | -1000 | 1, | 0x41A, |
| 171 | -0,790155012 | -1000 | -1071 | 0xFFFFFFFFC18, | 1000 | -1750 | 1, | 0x3E8, | 1071 | -1000 | 1, | 0x42F, |
| 172 | -0,770513243 | -976 | -1092 | 0xFFFFFFFFC30, | 976 | -1750 | 1, | 0x3D0, | 1092 | -1000 | 1, | 0x444, |
| 173 | -0,75011107 | -950 | -1111 | 0xFFFFFFFFC4A, | 950 | -1750 | 1, | 0x3B6, | 1111 | -1000 | 1, | 0x457, |
| 174 | -0,728968627 | -923 | -1130 | 0xFFFFFFFFC65, | 923 | -1750 | 1, | 0x39B, | 1130 | -1000 | 1, | 0x46A, |
| 175 | -0,707106781 | -895 | -1147 | 0xFFFFFFFFC81, | 895 | -1750 | 1, | 0x37F, | 1147 | -1000 | 1, | 0x47B, |
| 176 | -0,684547106 | -867 | -1164 | 0xFFFFFFFFC9D, | 867 | -1750 | 1, | 0x363, | 1164 | -1000 | 1, | 0x48C, |
| 177 | -0,661311865 | -837 | -1179 | 0xFFFFFFFFCBB, | 837 | -1750 | 1, | 0x345, | 1179 | -1000 | 1, | 0x49B, |
| 178 | -0,63742399 | -807 | -1193 | 0xFFFFFFFFCD9, | 807 | -1750 | 1, | 0x327, | 1193 | -1000 | 1, | 0x4A9, |
| 179 | -0,612907054 | -776 | -1205 | 0xFFFFFFFFCF8, | 776 | -1750 | 1, | 0x308, | 1205 | -1000 | 1, | 0x4B5, |
| 180 | -0,587785252 | -744 | -1217 | 0xFFFFFFFFD18, | 744 | -1750 | 1, | 0x2EB, | 1217 | -1000 | 1, | 0x4C1, |
| 181 | -0,562083378 | -712 | -1227 | 0xFFFFFFFFD38, | 712 | -1750 | 1, | 0x2C8, | 1227 | -1000 | 1, | 0x4CB, |
| 182 | -0,535826795 | -679 | -1236 | 0xFFFFFFFFD59, | 679 | -1750 | 1, | 0x2A7, | 1236 | -1000 | 1, | 0x4D4, |
| 183 | -0,509041416 | -645 | -1244 | 0xFFFFFFFFD7B, | 645 | -1750 | 1, | 0x285, | 1244 | -1000 | 1, | 0x4DC, |
| 184 | -0,481753674 | -610 | -1251 | 0xFFFFFFFFD9E, | 610 | -1750 | 1, | 0x262, | 1251 | -1000 | 1, | 0x4E3, |

| | | | | | | | | | | | | |
|-----|--------------|------|-------|----------------|-----|-------|----|--------|------|-------|----|--------|
| 185 | -0,4539905 | -575 | -1256 | 0xFFFFFFFFDC1, | 575 | -1750 | 1, | 0x23F, | 1256 | -1000 | 1, | 0x4E8, |
| 186 | -0,425779292 | -539 | -1261 | 0xFFFFFFFFDE5, | 539 | -1750 | 1, | 0x21B, | 1261 | -1000 | 1, | 0x4ED, |
| 187 | -0,397147891 | -503 | -1264 | 0xFFFFFFFFE09, | 503 | -1750 | 1, | 0x1F7, | 1264 | -1000 | 1, | 0x4F0, |
| 188 | -0,368124553 | -466 | -1265 | 0xFFFFFFFFE2E, | 466 | -1750 | 1, | 0x1D2, | 1265 | -1000 | 1, | 0x4F1, |
| 189 | -0,33873792 | -429 | -1266 | 0xFFFFFFFFE53, | 429 | -1750 | 1, | 0x1AD, | 1266 | -1000 | 1, | 0x4F2, |
| 190 | -0,309016994 | -392 | -1265 | 0xFFFFFFFFE78, | 392 | -1750 | 1, | 0x188, | 1265 | -1000 | 1, | 0x4F1, |
| 191 | -0,278991106 | -354 | -1263 | 0xFFFFFFFFE9E, | 354 | -1750 | 1, | 0x162, | 1263 | -1000 | 1, | 0x4EF, |
| 192 | -0,248689887 | -315 | -1260 | 0xFFFFFFFFEC5, | 315 | -1750 | 1, | 0x13B, | 1260 | -1000 | 1, | 0x4EC, |
| 193 | -0,218143241 | -277 | -1255 | 0xFFFFFFFFEEB, | 277 | -1750 | 1, | 0x115, | 1255 | -1000 | 1, | 0x4E7, |
| 194 | -0,187381315 | -238 | -1250 | 0xFFFFFFFFF12, | 238 | -1750 | 1, | 0xEE, | 1250 | -1000 | 1, | 0x4E2, |
| 195 | -0,156434465 | -198 | -1243 | 0xFFFFFFFFF3A, | 198 | -1750 | 1, | 0xC6, | 1243 | -1000 | 1, | 0x4DB, |
| 196 | -0,125333234 | -159 | -1234 | 0xFFFFFFFFF61, | 159 | -1750 | 1, | 0x9F, | 1234 | -1000 | 1, | 0x4D2, |
| 197 | -0,094108313 | -120 | -1225 | 0xFFFFFFFFF88, | 120 | -1750 | 1, | 0x78, | 1225 | -1000 | 1, | 0x4C9, |
| 198 | -0,06279052 | -80 | -1214 | 0xFFFFFFFFFB0, | 80 | -1750 | 1, | 0x50, | 1214 | -1000 | 1, | 0x4BE, |
| 199 | -0,031410759 | -40 | -1203 | 0xFFFFFFFFFD8, | 40 | -1750 | 1, | 0x28, | 1203 | -1000 | 1, | 0x4B3, |
| 200 | -2,4503E-16 | -1 | -1190 | 0xFFFFFFFFFF, | 1 | -1750 | 1, | 0x1, | 1190 | -1000 | 1, | 0x4A6, |

Anexo II

Código do programa em C

```

/*****

int.c

*****/

/*****

INCLUDES

*****/

#include "derivative.h"

#include "int.h"

/*****

VARIÁVEIS GLOBAIS (tem de ter o EXTERN no arquivo .h)

*****/

unsigned int    int_slt_cntr = 0;

unsigned int    int_FREE_COUNTER = 0;

unsigned int    int_FREE_COUNTER_T2 = 0;

unsigned int    int_FREE_COUNTER_T3 = 0;

/*****

VARIÁVEIS LOCAIS

*****/

/*****

TABELAS DOS SENOS E VARIÁVEIS DE CONTROLE GLOBAL

*****/

// SENOIDES DO MOTOR- Ponte 3, controlado pelos PWMs do TIMER2

// multiplicador e divisor do contador das senoides do motor

unsigned char   sin_cnt_MUL;                // já inicia com a menor frequencia

#define          sin_cnt_DIV                127// para usar 2^x, isso facilita a divisao

// controle do estado do motor

unsigned char   sin_motor_on = 0;           // 0 = DESLIGADO, (diferente de 0) = LIGADO

// nro de pontos da tabela da senoide das cargas

#define          sin_motor_nro_pts 200// contador que aponta para a posicao da tabela da
senoide das cargas

unsigned char   sin_cnt_MH = 0;

unsigned char   sin_cnt_MAH = 0;

unsigned int    sin_snt_M_FREE_RUNNER_MH = 0;

*****/

```

[illegible]


```
0x4CB, 0x4D4, 0x4DC, 0x4E3, 0x4E8, 0x4ED, 0x4F0, 0x4F1, 0x4F2, 0x4F1, 0x4EF, 0x4EC,
0x4E7, 0x4E2, 0x4DB, 0x4D2, 0x4C9, 0x4BE, 0x4B3, 0x4A6};
```

```
// SENOIDE DAS CARGAS - Ponte 3, controlado pelos PWMs do TIMER2
```

```
// nro de pontos da tabela da senoide das cargas
```

```
#define sin_loads_nro_pts 250
```

```
// contador que aponta para a posicao da tabela da senoide das cargas
```

```
unsigned char sin_loads_cnt;
```

```
// semiciclo que esta ativo na senoide das cargas
```

```
unsigned char sin_load_semiciclo;
```

```
// tabela da senoide das cargas
```

```
unsigned int sin_loads[]={ 0x0, 0x7, 0xF, 0x16, 0x1E, 0x25, 0x2D, 0x34, 0x3B, 0x43,
0x4A, 0x52, 0x59, 0x61, 0x68, 0x6F, 0x77, 0x7E, 0x86, 0x8D, 0x94, 0x9B, 0xA3, 0xAA,
0xB1, 0xB8, 0xBF, 0xC6, 0xCD, 0xD4, 0xDB, 0xE2, 0xE9, 0xF0, 0xF7, 0xFE, 0x105, 0x10B,
0x112, 0x119, 0x11F, 0x126, 0x12C, 0x133, 0x139, 0x140, 0x146, 0x14C, 0x152, 0x159,
0x15F, 0x165, 0x16B, 0x171, 0x177, 0x17C, 0x182, 0x188, 0x18E, 0x193, 0x199, 0x19E,
0x1A3, 0x1A9, 0x1AE, 0x1B3, 0x1B8, 0x1BD, 0x1C2, 0x1C7, 0x1CC, 0x1D1, 0x1D5, 0x1DA,
0x1DF, 0x1E3, 0x1E7, 0x1EC, 0x1F0, 0x1F4, 0x1F8, 0x1FC, 0x200, 0x204, 0x208, 0x20B,
0x20F, 0x212, 0x216, 0x219, 0x21C, 0x21F, 0x222, 0x225, 0x228, 0x22B, 0x22E, 0x230,
0x233, 0x235, 0x238, 0x23A, 0x23C, 0x23E, 0x240, 0x242, 0x244, 0x246, 0x248, 0x249,
0x24B, 0x24C, 0x24D, 0x24E, 0x24F, 0x250, 0x251, 0x252, 0x253, 0x253, 0x254, 0x254,
0x255, 0x255, 0x255, 0x255, 0x255, 0x255, 0x255, 0x255, 0x254, 0x254, 0x253, 0x252,
0x251, 0x250, 0x24F, 0x24E, 0x24D, 0x24C, 0x24B, 0x249, 0x248, 0x246, 0x244, 0x242,
0x240, 0x23E, 0x23C, 0x23A, 0x238, 0x235, 0x233, 0x230, 0x22E, 0x22B, 0x228, 0x225,
0x222, 0x21F, 0x21C, 0x219, 0x216, 0x212, 0x20F, 0x20B, 0x208, 0x204, 0x200, 0x1FC,
0x1F8, 0x1F4, 0x1F0, 0x1EC, 0x1E7, 0x1E3, 0x1DF, 0x1DA, 0x1D5, 0x1D1, 0x1CC, 0x1C7,
0x1C2, 0x1BD, 0x1B8, 0x1B3, 0x1AE, 0x1A9, 0x1A3, 0x19E, 0x199, 0x193, 0x18E, 0x188,
0x182, 0x17C, 0x177, 0x171, 0x16B, 0x165, 0x15F, 0x159, 0x152, 0x14C, 0x146, 0x140,
0x139, 0x133, 0x12C, 0x126, 0x11F, 0x119, 0x112, 0x10B, 0x105, 0xFE, 0xF7, 0xF0, 0xE9,
0xE2, 0xDB, 0xD4, 0xCD, 0xC6, 0xBF, 0xB8, 0xB1, 0xAA, 0xA3, 0x9B, 0x94, 0x8D, 0x86,
0x7E, 0x77, 0x6F, 0x68, 0x61, 0x59, 0x52, 0x4A, 0x43, 0x3B, 0x34, 0x2D, 0x25, 0x1E,
0x16, 0xF, 0x7 };
```

```
/*****
```

```
FUNCOES
```

```
*****/
```

```
/*
```

```
** =====
```

```
** Interrupt handler : isrVtpmlovf
```

```
**
```

```
** Description :
```

```
** User interrupt service routine.
```

```
** Parameters : None
```

```
** Returns : Nothing
```

```
** =====
```

```
*/
```

```
__interrupt void isrVtpmlovf(void)
```

```
{
```

```
    unsigned int add_val_MH;
```

```
    unsigned int add_val_MAH;
```

```

        (void)TPM1SC;

TPM1SC_TOF = 0;

if (sin_motor_on){

    /***** PONTE 2 *****/

    //

    //      PONTE 2      LIN2      TPM1CH0

    //                      HIN2      TPM1CH2

    //

    // calculando o incremento do MH

    sin_snt_M_FREE_RUNNER_MH++;

    add_val_MH = sin_snt_M_FREE_RUNNER_MH;

    add_val_MH *= sin_cnt_MUL;                                // recebe FREE_RUNNER

* MUL

    add_val_MH /= sin_cnt_DIV;                                // o sin_cnt_DIV tem
de ser 2^x pra ser mais rapido

    // cuidando dos PWMs

    // incrementando o ponteiro da tabela

    sin_cnt_MH = (unsigned char)(add_val_MH);

    if (sin_cnt_MH > sin_motor_nro_pts){

        sin_snt_M_FREE_RUNNER_MH = 0;

        sin_cnt_MH = 0;

    }

    // carregando os valores de estouro...

    if (sin_MH_PONTE[sin_cnt_MH]){

        TPM1C0V = sin_MH[sin_cnt_MH];

        TPM1C2V = 0;

    } else {

        TPM1C0V = 0;

        TPM1C2V = sin_MH[sin_cnt_MH];

    }

    /***** PONTE 3 *****/

    //

    //      PONTE 3      LIN2      TPM1CH1

    //                      HIN2      TPM1CH3

    //

    // calculando o incremento do MAH

    sin_snt_M_FREE_RUNNER_MAH++;

```

```

        add_val_MAH = sin_snt_M_FREE_RUNNER_MAH;

        add_val_MAH *= sin_cnt_MUL;                                // recebe FREE_RUNNER
* MUL

        add_val_MAH /= sin_cnt_DIV;                                // o sin_cnt_DIV tem
de ser 2^x pra ser mais rapido

        // incrementando o ponteiro da tabela

        sin_cnt_MAH = (unsigned char)(add_val_MAH);

        if (sin_cnt_MAH > sin_motor_nro_pts){

            sin_snt_M_FREE_RUNNER_MAH = 0;

            sin_cnt_MAH = 0;

        }

        // carregando os valores de estouro...

        if (sin_MAH_PONTE[sin_cnt_MAH]){

            TPM1C1V = sin_MAH[sin_cnt_MAH];

            TPM1C3V = 0;

        } else {

            TPM1C1V = 0;

            TPM1C3V = sin_MAH[sin_cnt_MAH];

        }

    } else {                // se o motor_on estiver = 0

        TPM1C0V = 0;        // TPM1C0V desligado

        TPM1C1V = 0;        // TPM1C1V desligado

        TPM1C2V = 0;        // TPM1C2V desligado

        TPM1C3V = 0;        // TPM1C3V desligado

    }

}

/* end of isrVtpm1ovf */

/*
** =====
**      Interrupt handler : isrVtpm2ovf
**
**
**      Description :
**
**          User interrupt service routine.
**
**      Parameters   : None
**
**      Returns      : Nothing
**
** =====
*/

```

```

/*

TEMPOS ENVOLVIDOS NO TIMER 2

    estouro do TIMER2 = 33,257us                BASE TEMPO

    estouro do int_FREE_COUNTER setado em 7517 -> aproximados (249,99us)

    int_FREE_COUNTER_T2 roda livre -> FREE RUNNER (incrementa a cada 250us)

    int_FREE_COUNTER_T3 roda livre -> FREE RUNNER (incrementa a cada 250us)

*/

__interrupt void isrVtpm2ovf(void)
{
    (void)TPM2SC;

    TPM2SC_IOF = 0;

    // gerando as bases de tempo int_FREE_COUNTER

    int_FREE_COUNTER++;

    if (int_FREE_COUNTER >= 7517){

        int_FREE_COUNTER = 0;                // estouro para dar aprox
250us

        if (int_slc_cntr) int_slc_cntr--;    // decrementa o slc_counter se ele
nao for ZERO

    }

    if (!int_FREE_COUNTER) int_FREE_COUNTER_T2++;        // pode ser
usado se necessario . . .

    //if (!int_FREE_COUNTER) int_FREE_COUNTER_T3++;

    // ve se acabou a tabela e comeca denovo

    if(!sin_loads_cnt){

        sin_load_semiciclo = !sin_load_semiciclo;

        sin_loads_cnt = sin_loads_nro_pts;

    }

    // decide que canal esta ativo

    if (sin_load_semiciclo){

        TPM2C0V = 0;

        TPM2C1V = sin_loads[sin_loads_cnt];

    } else {

        TPM2C0V = sin_loads[sin_loads_cnt];

        TPM2C1V = 0;

```

```

    }

    // apronta o apontador da tabela do seno para proxima vez
    sin_loads_cnt--;
}

/* end of isrVtpm2ovf */

/*****

int.h

*****/

/*****

EXTERNS DAS VARIÁVEIS GLOBAIS, DEFINES EXTERNOS

*****/

extern const unsigned char    *sin_MH_PONTE;
extern const unsigned int     *sin_MH;
extern const unsigned char    *sin_MAH_PONTE;
extern const unsigned int     *sin_MAH;
extern const unsigned char    sin_MAH_PONTE_1[];
extern const unsigned char    sin_MAH_PONTE_2[];
extern const unsigned int     sin_1[];
extern const unsigned int     sin_2[];
extern unsigned int           int_slt_cntr;
extern unsigned int           int_FREE_COUNTER;      // contador livre
extern unsigned int           int_FREE_COUNTER_T2;
extern unsigned int           int_FREE_COUNTER_T3;

// controle do estado do motor (FREQ e LIGADO/DESLIGADO)
extern unsigned char          sin_cnt_MUL;           // multiplicador (controle de freq motor)
extern unsigned char          sin_motor_on;          // 0 = DESLIGADO, (diferente de 0) = LIGADO

*****/

PROTÓTIPOS DE FUNÇÕES DO ARQUIVO .c

*****/

_interrupt void isrVtpm2ovf(void);

/*
** =====
**
**      Interrupt handler : isrVtpm2ovf

```

```

**
**      Description :
**
**          User interrupt service routine.
**
**      Parameters   : None
**
**      Returns      : Nothing
**
** =====
**/
__interrupt void isrVtpmlovf(void);
/*
** =====
**
**      Interrupt handler : isrVtpmlovf
**
**
**      Description :
**
**          User interrupt service routine.
**
**      Parameters   : None
**
**      Returns      : Nothing
**
** =====
**/

```

6 Referência Bibliográfica

- [1] WHIRLPOOL. A invenção dos eletrodomésticos. Tech. rep., Whirlpool S.A., 2005.
- [2] PELIZARI – Ademir Pelizari, Um Estudo da Influência das Configurações dos enrolamentos no desempenho de motores de indução monofásicos com capacitor de partida, Tese de Mestrado – USP, 2009.
- [3] GONZAGA – Gonzaga, Diógenes Pereira, Notas de Aula Motor de Indução Monofásico – EESC-USP, 2007.
- [4] KOSOW - Kosow, I. L.; “Máquinas Elétricas e Transformadores”; 13a Edição, 1998; Editora Globo.
- [5] NEVES – Eurico G. de Castro Neves, Máquinas e Transformadores Elétricos.
- [6] FITZGERALD – Fitzgerald, Kingsley Jr., Umans, Electric Machinery, Ed. McGraw-Hill, 1992.
- [7] RASHID – Muhammad H. Rashid, Power electronics, 2a ed., Ed. Prentice Hall, 1993.
- [8] J.A. Pomilio – Eletrônica de Potência Cap.2 – DSCE – FEEC –UNICAMP, 2009
- [9] Data sheet, Freescale, MC9S08AW60, December 2005.
- [10] Data sheet, International Rectifier, IRAMS10UP60B, July 2005.
- [11] N. Mohan, T. M. Undeland e W. P. Robbins: “Power Electronics, Converters, Applications and Design”, 2nd Edition, John Willey & Sons, USA, 1994