

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

Departamento de Eletrônica e de Computação

Sistema de Injeção de Onda Portadora na rede elétrica para o Sistema de Medição Centralizada.

Autor:

Letícia Ramos Lemos

Orientador:

Prof. Joarez Bastos Monteiro, D. Sc. - UFRJ

Orientador:

Fabio Cavaliere de Souza, D. Sc. - Eletrobras - Cepel

Examinador:

Prof. Fernando Antônio Pinto Baruqui, D. Sc - UFRJ

Examinador:

Cesar Jorge Bandim, M. Sc- Eletrobras - Cepel

DEL

Julho de 2010

Aos meus pais.

AGRADECIMENTO

À Deus, pelas bênçãos concedidas.

Aos meus pais, agradeço por todo amor, compreensão, paciência, apoio, confiança, conselhos e tempo dedicados à mim.

Ao pesquisador Fabio Cavaliere de Souza pelo apoio, orientação e ensinamentos durante a realização deste projeto.

Ao professor Joarez Bastos Monteiro pelos conselhos, pela orientação e pela disponibilidade.

Ao Alberto, por todo amor, apoio e paciência dos últimos anos.

Aos pesquisadores Cesar Jorge Bandim e José Eduardo da Rocha Alves pelos conselhos e incentivo.

Aos profissionais do Laboratório de Medição de Energia Elétrica da Eletrobras - Cepel, Mario Abreu, Edmilson Maia e Luiz Fernando pelo apoio, conselhos e principalmente pela paciência.

Aos professores do Laboratório de Processamento Analógico e Digital de Sinais pelo incentivo e ajuda.

Aos colegas de turma, em especial ao Alberto, Amanda, Aninha, Fernando, Hugo, Isabel, Jorginho, Julia, Pedro Brito, Pedro Coelho e Priscilla. Obrigada pelos anos de estudo, descontração e principalmente pela amizade.

RESUMO

Ao longo dos anos noventa, o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Eletrobras - Cepel) desenvolveu o Sistema de Telecomando Centralizado (STC) com o objetivo de controlar cargas e transmitir informações relacionadas à aplicação de tarifas diferenciadas dependentes do horário de consumo. Era composto por dois enlaces de comunicação: radio frequência e rede de distribuição. Estes enlaces estabeleciam um canal de comunicação que possibilitava a transmissão de comandos entre a concessionária e os medidores de energia ou cargas das unidades consumidoras. Entre os equipamentos pertencentes a este sistema está o Transmissor de Onda Portadora (TOP), responsável pela injeção desses comandos na rede elétrica de baixa tensão.

Neste período, desenvolveu ainda o Sistema de Medição Centralizada (SMC) cuja primeira implementação visou a aplicação de conceitos de automação e leitura e à diminuição do espaço físico necessário às instalações dos painéis de medição. Posteriormente, serviu como instrumento de redução de perdas não-técnicas para as empresas de distribuição de energia elétrica, uma vez que os equipamentos de medição foram instalados nos postes de energia elétrica. Além disso, antes de ser entregue aos consumidores, a energia passou a ser medida o que dificulta a ocorrência de ações fraudulentas cometidas quando estes equipamentos estavam localizados dentro das residências.

O objetivo deste trabalho é atualizar o equipamento Transmissor de Onda Portadora (TOP) pertencente ao STC, utilizando novas tecnologias para executarem as funções de controle originalmente implementadas em lógica discreta, bem como a substituição do estágio de potência por IGBT's. A atualização do equipamento procura melhorar seu desempenho e baixar o custo de implementação, através da redução dos componentes com conseguinte diminuição do espaço físico ocupado pela implementação anterior. O novo TOP será aplicado ao Sistema de Medição Centralizada para fornecer um canal de comunicação que permita a atualização das informações nos terminais de consultas individuais.

A adaptação do equipamento foi executada em etapas substituindo-se um novo bloco por vez na primeira versão do TOP, com o objetivo de facilitar a depuração do circuito desenvolvido. Os blocos desenvolvidos foram: gerador de onda portadora, o sensor de proteção e a etapa de injeção do sinal.

Palavras-Chave: medição centralizada, transmissor onda portadora, medição de energia elétrica, comunicação de dados.

ABSTRACT

Throughout the 90's, the Electrical Engineering Research Center (Eletrobras-Cepel) developed the Centralized Telecontrol System (STC) in order to control loads and to transmit information related to the application of differentiated tariffs depending on the time of consumption. It was composed of two communications links: frequency radio and distribution network. Both provide a communication channel allowing the transmission of commands between the electricity companies and the energy meters. One of the equipments, of this system, is the Ripple Transmitter (TOP), principal equipment which purpose is to inject these commands in the electrical network.

In that period it Cepel also developed the Centralized Metering System (SMC) which first implementation focused on the application of the following concepts: automation, measurement reading and reduction of the necessary physical space to the installations of the measurement panels. Later, it served as instrument to reduce non-technical losses for the distribution electrical energy companies since the measuring devices were installed on power poles. In addition, before being delivered to consumers, the energy is measured which decreases the occurrence of fraudulent actions committed when those equipments were located within the residences.

The purpose of this work is to bring up to date the Carrier Signal Transmitter belonging to the STC, using new technologies to carry out the control functions originally implemented in discrete logic as well as the replacement of the power transistors using IGBT's. This new version of the equipment aims to improve its performance and to lower the cost of implementation through the reduction of the numbers of components. This modification will also reduce the space occupied by the old version of the transmitter in the distribution network. The new version of TOP will be applied to the Centralized Measurement System to provide a communication channel.

The adaptation of the equipment was performed in phases by replacing a new block at a time in the first version of the TOP in order to facilitate the debugging of the circuit developed. The blocks were: a carrier wave generator, the sensor protection and step injection signal.

Keywords: centralized metering, carrier signal transmitter, electrical energy metering, data communication.

SIGLAS

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Cepel – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

STC – Sistema de Telecomando Centralizado

SMC – Sistema de Medição Centralizada

TOP – Transmissor de Onda Portadora

Inmetro - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

ROP – Receptor de Onda Portadora ou Receptor de Telecomando

EOC – Estação de Operação e Controle

ERB – Estação de Rádio Base

UMC – Unidade de Medição e Comunicação

UM – Unidade de Medição

MM – Módulos de Medição

TCCC – Terminal de Consulta ao Consumo Coletivo

TCCI – Terminal de Consulta ao Consumo Individual

UPL – Unidade local leitura e programação

MAC – Módulo de Alimentação e Controle

MTC – Módulo de Comunicação e Controle

ASK – Amplitude Shift Keying

IEC – International Electrotechnical Commission

MOSFET – Metal Oxide Field Effect Transistor

IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor

Sumário

1. 1. Introdução.....	xi
1.1 – Tema.....	xi
1.2 – Histórico.....	xi
1.2.1 – Sistema de Telecomando Centralizado.....	xi
1.2.2 – Sistema de Medição Centralizada.....	xiii
1.3 - Regulamentação Técnica Metrológica.....	xix
1.4 – Objetivo.....	xix
1.5 – Organização.....	xx
2. Especificação do Transmissor de Onda Portadora.....	xxi
2.1 – Arquitetura da primeira implementação do transmissor.....	xxi
2.2 – Gerador de frequência.....	xxii
2.3 – Etapa de injeção.....	xxiv
2.3.1 – Estimativa de carga vista pelo neutro.....	xxvi
2.4 – Bloco de proteção.....	xxvii
2.5 – Resumo da especificação.....	xxviii
3. Implementação do transmissor.....	xxix
3.1 – Metodologia.....	xxix
3.2 – Estudo e especificação do microcontrolador (PIC).....	xxix
3.3 – Implementação do gerador de frequência.....	xxxii
3.4 – Implementação do sensor de sobrecorrente.....	xxxii
3.5 – Estudo e especificação da etapa de potência.....	xxxv
3.6 – Integração dos blocos do transmissor.....	xxxviii
4. Resultados.....	xli
4.1 – Confeção da placa.....	xli
4.2 – Operação do circuito.....	xli
4.2.1 – Snubber.....	xlii
4.2.2 – Sensor de proteção.....	xlvi
4.2.3 – Cargas.....	xlvi
4.3 – Compactação do conjunto.....	xlvi
4.4 – Redução de custos.....	li
5. Novos desenvolvimentos.....	lv
6. Conclusão.....	lvii
Bibliografia.....	lviii

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Nível dos harmônicos para a rede de 60Hz.....	xxiii
Tabela 2.2: Especificação geral do TOP.....	xxviii
Tabela 4.1: Orçamento do TOP antes da atualização.....	li
Tabela 4.2: Orçamento do TOP depois da atualização.....	lii
Tabela 4.3: Consumo do TOP após a atualização.....	liii

1. 1. Introdução

1.1 – Tema

O tema do trabalho é a proposição de um sistema de transmissão de dados via rede elétrica visando aplicação no Sistema de Medição Centralizada (SMC) desenvolvido pelo Eletrobras - Cepel.

O objetivo é prover ao Sistema de Medição Centralizada um canal de comunicação que permita a atualização das informações nos terminais de consultas individuais criando condições de atender futuramente aos requisitos mínimos funcionais especificados pela Regulamentação Técnica Metrológica [1],[2] estabelecida pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Inmetro).

1.2 – Histórico

1.2.1 – Sistema de Telecomando Centralizado

No início da década de noventa, o Sistema de Telecomando Centralizado (STC) foi concebido para controlar cargas e transmitir informações relacionadas à sinalização tarifária (aplicação de tarifas diferenciadas dependentes do horário de consumo). Seu objetivo era estabelecer um canal de comunicação que possibilitasse a transmissão de comandos entre as concessionárias e medidores de energia ou cargas.

Na figura 1.1 é apresentada a configuração da primeira versão do STC, composta por dois enlaces de comunicação: radio frequência e rede de distribuição. O primeiro enlace utilizava uma emissora de rádio comercial (rádio Metropolitana) para transmitir a informação até os equipamentos localizados junto aos transformadores de distribuição de média para baixa tensão. Estes equipamentos são denominados de receptor de rádio e transmissor de onda portadora (TOP).

O módulo de interface entre enlaces era responsável por processar o sinal de radio. Ele demodulava a informação recebida pelo receptor de rádio e a enviava para o TOP para realizar algumas transmissões consecutivas em um intervalo de tempo de 1 minuto.

No segundo enlace, o transmissor TOP injetava na rede de baixa tensão uma portadora, de frequência baixa (210 Hz), onda quadrada, correspondendo ao nível lógico

“1” do sinal a ser transmitido até a unidade receptora do telecomando (ROP), localizado na residência do consumidor. Esta decodificava a informação recebida pela rede e acionava a unidade de controle de cargas ou medidores a fim de validar o comando recebido.

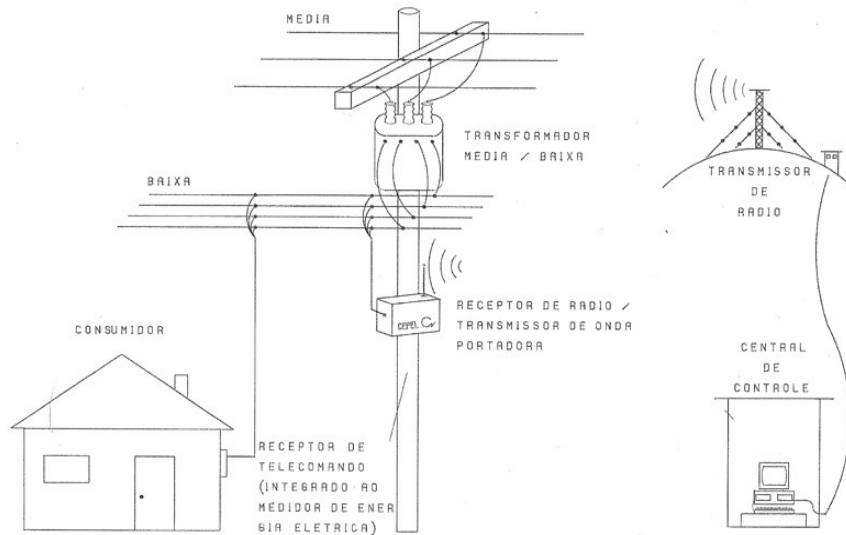


Figura 1.1: Sistema de Telecomando Centralizado

O receptor de telecomando ou onda portadora (ROP) possuía alguns programas de chaveamento que continham o horário de acionamento e de finalização e dias da semana em que o programa deveria atuar. Ele tinha como base um relógio interno que podia ser ajustado remotamente. Este relógio contava quartos de hora ao invés da hora cheia e, por isso, os horários utilizados para determinar o chaveamento variavam entre 0 e 96, correspondendo às 24 horas do dia.

Como pode ser visto nas figuras 1.2 (a) e (b), existiam dois comandos básicos: o acerto de hora e o envio de programa para o receptor. O protocolo de comunicação baseava-se na transmissão de bits referentes ao endereçamento do receptor, número da programação, quarto de hora de início e fim da programação. A chegada de um comando era detectada pelo “Start Bit” (figura 1.3).

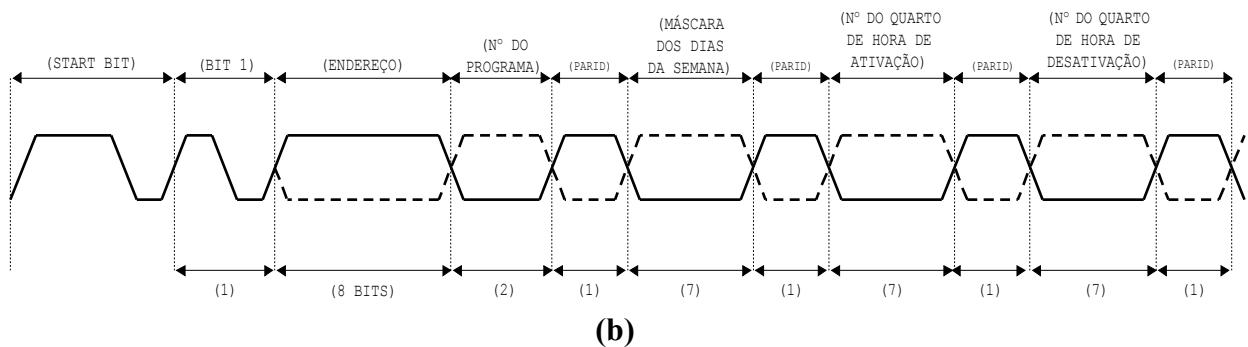
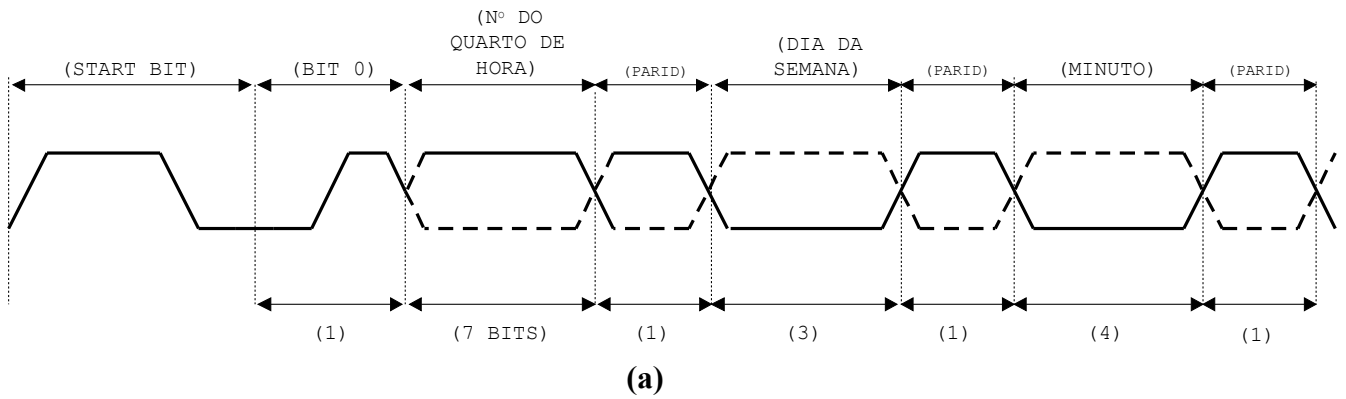


Figura 1.2: (a) Formato do Frame “Hora” (b) Formato do Frame “Programa”

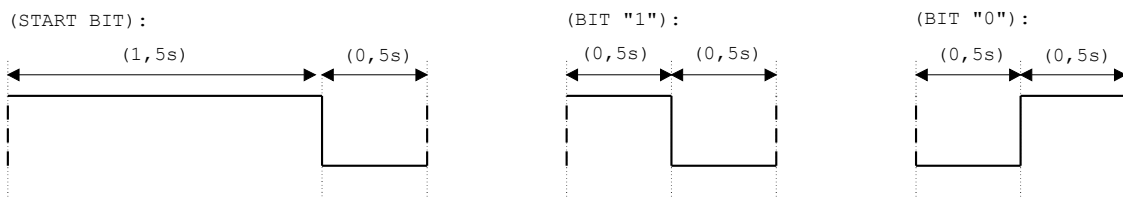


Figura 1.3: Formato do “Start Bit”

1.2.2 – Sistema de Medição Centralizada

O Eletrobras - Cepel também desenvolveu o conceito de Sistema de Medição Centralizada (SMC) no sentido de modernizar o processo de medição de energia elétrica. Inicialmente foi feita uma primeira implementação que realizava apenas a medição de energia e leitura automática. Posteriormente, novas funções foram

incorporadas ao medidor com o objetivo de atender às necessidades das concessionárias de energia elétrica.

Dentre essas funções estão a capacidade de armazenamento de curvas de carga de cada consumidor; capacidade de conexão e desconexão remota de consumidores. Serviu também como instrumento de redução de perdas não-técnicas para as empresas de distribuição de energia elétrica, uma vez que os equipamentos de medição foram instalados nos postes de energia elétrica e, antes de ser entregue aos consumidores, a energia passou a ser medida dificultando a ocorrência de ações fraudulentas cometidas quando estes equipamentos estavam localizados dentro das residências. Com isso foi possível minimizar as perdas das concessionárias e melhorar a qualidade do fornecimento de energia.

A externalização dos medidores gerou a necessidade de criar um canal de comunicação com os usuários para informá-los do seu consumo. Como será visto, mais adiante, na seção 1.3, o Inmetro criou algumas regras a respeito da transmissão da informação de consumo para o consumidor.

No SMC, o TOP permanecerá com a mesma função de transmitir informação para o receptor de onda portadora (ROP), mas o conteúdo dessa informação será diferente. Ele deixará de enviar informação a respeito da programação para transmitir o consumo atualizado do usuário. Por sua vez o receptor de onda portadora (ROP) irá, ao receber essa mensagem, disponibilizá-la para consulta em um terminal na residência do consumidor.

Analogamente ao STC, no SMC a interligação do sistema também é feita por dois enlaces de comunicação: radio frequência e rede de distribuição, sendo o primeiro enlace, agora, bidirecional.

A figura 1.4 apresenta o diagrama em blocos do sistema SMC que, na sua configuração completa, é constituído de uma estação de operação e controle (EOC), uma estação de radio base (ERB), unidades de medição e comunicação (UMC), unidades de medição (UM), módulos de medição (MM), terminais de consulta ao consumo coletivos e individuais (TCCC/TCCI) além de unidades de programação e leitura (UPL) que se comunicam com a UMC e podem ou não comunicar com as UM's. Além disso, o sistema contém o transmissor (TOP), operando de forma análoga ao do STC, e o receptor de onda portadora (ROP) responsáveis pela comunicação entre a UMC/UM e TCCC/TCCI. O protocolo de comunicação entre o ROP e o TOP para essa

aplicação ainda não foi desenvolvido, mas deve manter a atualização de dia e hora e os bits responsáveis pelo endereçamento do receptor.

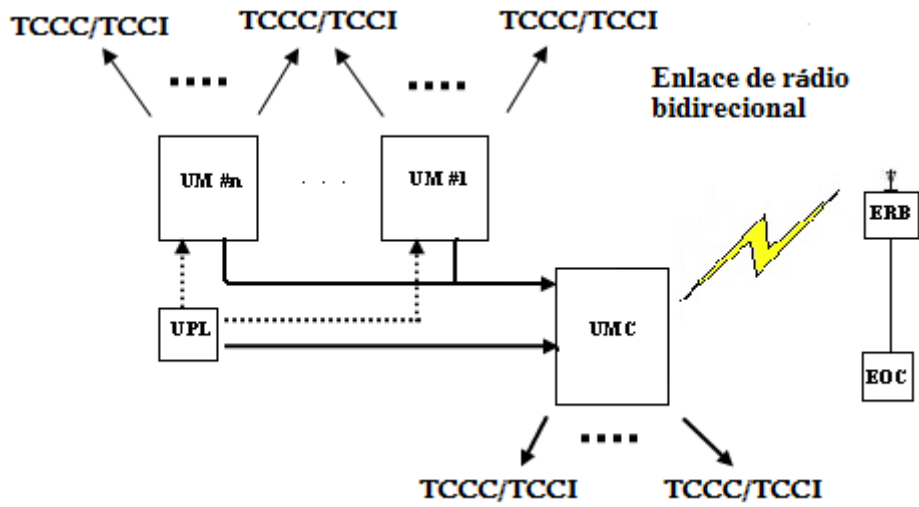


Figura 1.4: Diagrama em bloco do SMC

A figura 1.5 apresenta a instalação do SMC.

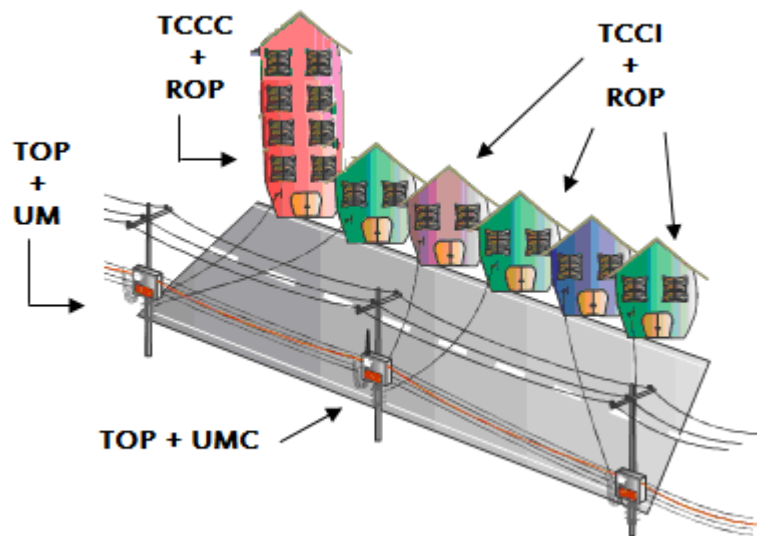


Figura 1.5: Instalação do SMC

EOC e ERB

A estação de operação e controle (EOC) é composta por um microcomputador e pelo software de administração do SMC. Este software integra todas as funções necessárias para operação do sistema, a interface do operador, processamento e envio de comandos, a análise das respostas recebidas e geração de relatórios. A estação de rádio base (ERB) é composta por um microcontrolador e por um transceptor de rádio para comunicar com a UMC. A EOC envia um comando para a ERB que o reenvia para UMC. Após o processamento do comando, a resposta é enviada até a ERB com destino à EOC.

UM

Como pode ser visto na figura 1.6, cada UM é composta por vários MM e por um módulo de alimentação e controle (MAC). Os MM são módulos de medição de consumo de energia elétrica, cada um associado a um único consumidor, e possuem dispositivos que possibilitam a conexão ou desconexão de cada usuário. O MAC é um módulo que realiza a interface de comunicação entre as UM e UMC.

As UM são instaladas em postes ou no interior de edifícios. A quantidade de módulos de medição (MM) no seu interior e o número usuários que podem ser atendidos por uma única UM variam de acordo com a rede local e o planejamento da concessionária de energia.

Em uma instalação piloto em Porto Velho, Roraima, por exemplo, as 19 UM atendem a 58 consumidores.

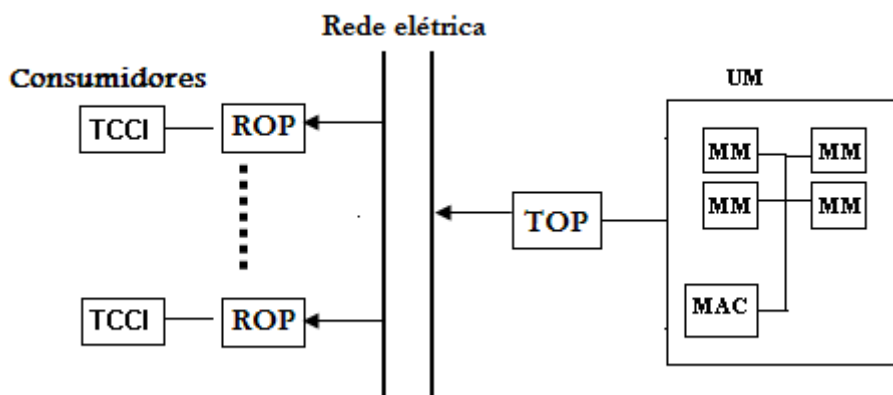


Figura 1.6: Diagrama em bloco da UM

UMC

Assim como a UM, a UMC também é composta por módulos de medição (MM) e um módulo de controle (MAC) e ainda possui um módulo de comunicação e totalização (MTC). O MTC é responsável por medir a energia fornecida pelo transformador de distribuição para a rede secundária. O diagrama em blocos da UMC está representado na figura 1.7.

A UMC é instalada junto ao transformador da rede de distribuição (figura 1.8) e além de concentrar a informação de consumo de energia de todas as UM, ela possui um elemento de comunicação de rádio que recebe os comandos da estação (ERB) e transmite as informações para as demais UM via rede de distribuição usando PLC ou via rádio. Esta solução cabe ao fabricante do sistema.

Observe que a UMC está conectada às três fases da rede para medição da energia entregue às unidades consumidoras. O módulo de controle (MAC) realiza a comunicação entre as UM e a UMC.

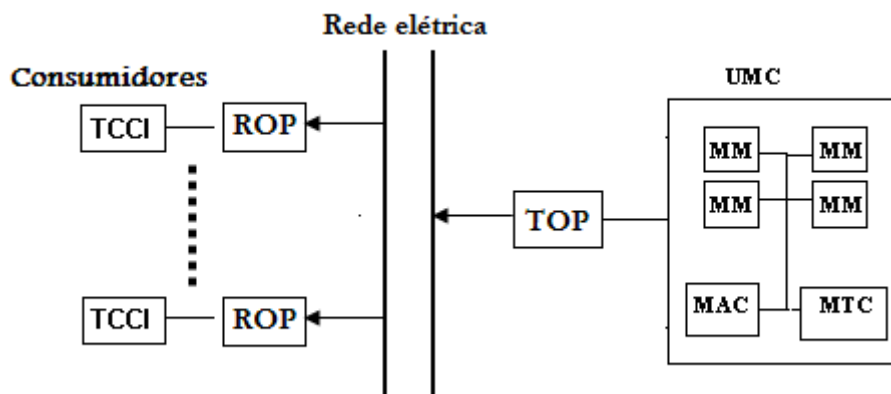


Figura 1.7: Diagrama em bloco da UMC

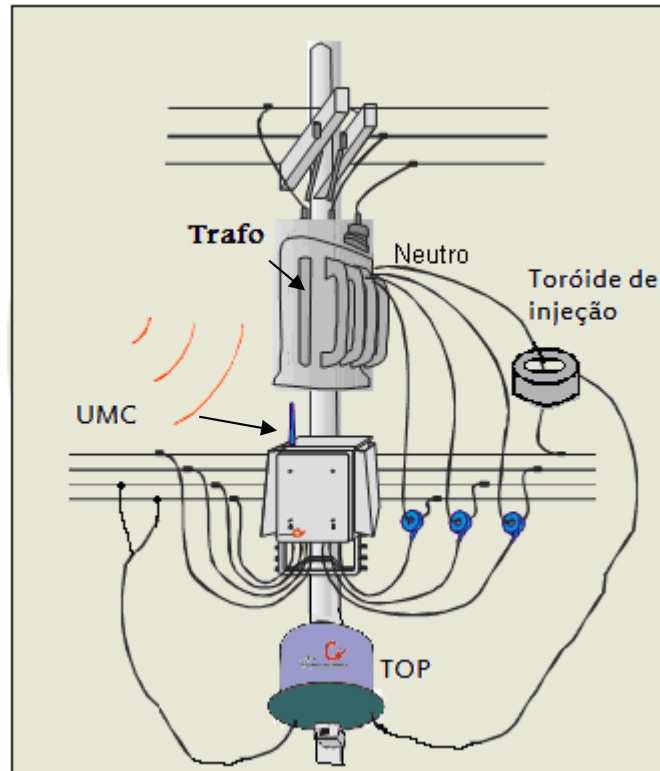


Figura 1.8: Instalação da UMC

Quando um comando é enviado pela EOC, ele contém o endereço específico do MM para o qual ele é destinado. Diante disso, cada UMC realiza um processo para ver se ele é dirigido a ela. Identificada a UMC, esta reenvia o comando às UM da sua rede que realizam o mesmo processo de identificação até verificar qual MM é o destino do comando. A resposta do MM segue o caminho inverso até chegar à EOC.

TCCC/TCCI

O terminal de consulta pode ser coletivo (TCCC) ou individual (TCCI). O TCCC é instalado na área comum do edifício para atender a um grupo de consumidores. O TCCI fica localizado na residência do consumidor. Ambos são utilizados pelo consumidor para visualizar seu consumo de energia. Cada terminal se comunica com a UMC/UM através de um sistema de injeção de onda portadora na rede elétrica (TOP).

Este canal de comunicação permite a implementação de funções tais como o desligamento de cargas nos horários de pico e a aplicação de tarifas diferenciadas. Estas podem ser estendidas para outras aplicações como conexão ou desconexão de consumidores inadimplentes e controle de iluminação pública, por exemplo.

1.3 - Regulamentação Técnica Metrológica

A Portaria Inmetro nº371 de 28 de setembro de 2007 estabelece as condições mínimas às quais o SMC deve satisfazer para realizar a medição eletrônica externa tais como:

- todos os ensaios do SMC devem ser realizados levando-se em consideração as condições de referência para temperatura, tensão, frequência e forma de onda.
- o erro percentual dos módulos de medição deve estar abaixo do valor máximo admissível.

Com relação a esse trabalho, destaca-se ainda a obrigatoriedade de instalar um dispositivo individual (TCCC/TCCI) na unidade consumidora que forneça a totalização do consumo de energia elétrica e que deve ser atualizado constantemente.

A Portaria Inmetro nº011 de 13 de janeiro de 2009 determina os requisitos técnicos de software para que o SMC possa estabelecer comunicação com a unidade consumidora (TCCC/TCCI). O software deve permitir a transferência de informações entre componentes do sistema comprovando a identidade dos dispositivos envolvidos nesse processo. Ele também deve garantir a integridade e confidencialidade da troca dessas informações entre a unidade consumidora e o SMC.

Os dados transmitidos via rede elétrica do SMC para o TCCC/TCCI devem incluir todas as informações necessárias à apresentação da medição no dispositivo receptor: um ou mais valores de medição, unidade de medida e uma informação temporal. Além disso, o dispositivo individual deve ser atualizado em no máximo um minuto para cada kWh consumido.

1.4 – Objetivo

O objetivo deste trabalho é propor um sistema de injeção de onda portadora para o Sistema de Medição Centralizada baseado no Transmissor de Onda Portadora do STC que realize a comunicação entre o TCCC/TCCI e a UMC/UM, e que permita, no futuro, atender às exigências descritas na seção 1.3, usando técnicas mais modernas e confiáveis de implementação.

Como o STC foi desenvolvido no início da década de noventa, ele conta com uma tecnologia ultrapassada baseada em lógica discreta. Na época, dispositivos

microcontroladores não dispunham das funcionalidades existentes atualmente, o que tornaria o projeto inviável comercialmente para a aplicação mencionada. Hoje, diversas famílias de microcontroladores são capazes de processar dados até 32 bits e possuem uma extensa variedade de periféricos internos e um conjunto de instruções. Isto possibilita uma melhora na relação custo/benefício do sistema.

Além disso, a etapa de excitação do circuito de injeção consome muita potência para excitar os transistores de potência porque foi projetada com transistores que exigem uma polarização com correntes elevadas. Atualmente, os dispositivos de potência trabalham com valores menores de correntes e são mais rápidos no processo de chaveamento. Com a substituição desses transistores, será possível economizar potência demandada pelo circuito.

Dessa maneira, a atualização do Transmissor de Onda Portadora irá melhorar seu desempenho além de reduzir seu custo e o espaço físico ocupado na rede de distribuição.

1.5 – Organização

Este texto tem estrutura em 6 capítulos. O Capítulo 2 apresenta a especificação do Transmissor de Onda Portadora. Já o Capítulo 3 explica como o transmissor foi implementado. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos até a presente data. Finalmente, o capítulo 5 apresenta futuros desenvolvimentos para este trabalho e o capítulo 6, a conclusão.

2. Especificação do Transmissor de Onda Portadora

Como vimos anteriormente, o objetivo do STC era estabelecer um canal de comunicação que possibilitasse a transmissão de comandos entre as concessionárias e medidores de energia ou cargas. Entre os equipamentos pertencentes ao STC estão o receptor de rádio e o transmissor de onda portadora (TOP). O receptor de rádio decodifica a informação extraindo o comando a ser executado, e aciona o transmissor de onda portadora que injeta, na rede de baixa tensão, um sinal que é transmitido até a unidade receptora do telecomando. O TOP transmite sinal de baixa frequência (210 Hz), onda quadrada, com modulação do tipo Amplitude Shift Keying (ASK).

O sinal da onda portadora é injetado no neutro da rede induzindo tensões equivalentes nas três fases. A amplitude deste sinal foi estipulada em 1% da tensão da rede para evitar a distorção harmônica. Mais a respeito deste processo será visto no item 2.2.

2.1 – Arquitetura da primeira implementação do transmissor

Como pode ser visto na Figura 2.1, o equipamento foi dividido em três blocos: gerador de frequência, bloco de proteção e bloco de injeção.

Para facilitar a compreensão apresentaremos a seguir o funcionamento de cada bloco em etapas.

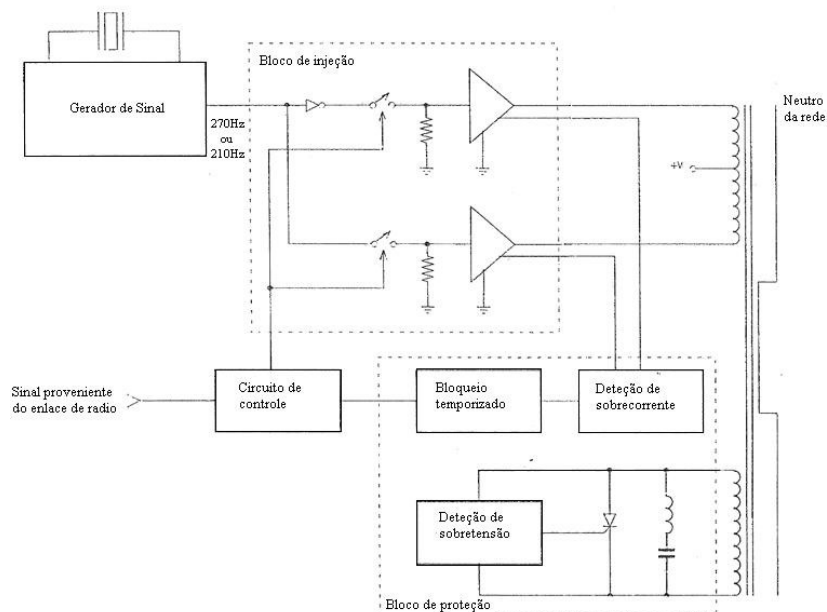


Figura 2.1: Diagrama em blocos do transmissor

2.2 – Gerador de frequência

A função deste bloco é gerar frequências programáveis que sejam estáveis e precisas. Além disso, o equipamento não deve produzir interferências quando conectado à rede de 60 Hz.

Vimos na seção 1.2.1 que no STC a função do TOP era enviar a programação do controle de cargas para os receptores de onda portadora (ROP). O ROP era capaz de identificar se um determinado comando era destinado a ele e armazenar a programação recebida. Como essa tarefa não exigia um envio rápido da informação, o TOP podia transmitir em baixa frequência atingindo longas distâncias. Dessa maneira era possível operar com atenuação reduzida do sinal e, assim, atender mais consumidores utilizando apenas um transmissor (TOP).

A tabela 2.1 apresenta os níveis máximos permitidos dos harmônicos em relação à frequência fundamental de 60Hz. Esses valores foram extraídos da norma elaborada pela IEC (International Electrotechnical Commission) [3]. A escolha da frequência da onda portadora foi baseada em trabalho anterior [4] onde se observou uma atenuação menor que 3dB para frequências abaixo de 300Hz. Por isso, a princípio iremos manter a configuração utilizada pelo STC e injetar uma onda quadrada de 210Hz com amplitude máxima da componente fundamental de 1% do nível de tensão da rede (127V).

Ordem do harmônico	Frequência	Nível de tensão
2	120 Hz	2%
3	180 Hz	7%
4	240 Hz	1,5%
5	300 Hz	8%

Tabela 2.1: Nível dos harmônicos para a rede de 60Hz

Desta forma, considerando 1% do sinal da rede de 127V, teremos

$$V_{\text{pico}} = 1,27 \times \sqrt{2} = 1,796V$$

Sabemos que a decomposição em Série de Fourier de uma onda quadrada simétrica, de amplitude A, é dada por:

$$\frac{4A}{\pi} \times \left(\text{sen}\omega t + \frac{1}{3}\text{sen}3\omega t + \frac{1}{5}\text{sen}5\omega t - \dots \right)$$

Assim, para que a distorção harmônica introduzida pela frequência fundamental (210Hz) do sinal de onda portadora seja inferior a 1%, a amplitude de A da onda quadrada deverá ser no máximo:

$$\frac{4A}{\pi} = 1,796 \therefore A = 1,41V$$

Entretanto, como vimos na seção 1.3 é necessário obedecer a alguns requisitos mínimos para que o SMC possa operar satisfatoriamente. Entre estes requisitos está a necessidade de atualizar o TCCC/TCCI em no máximo um minuto para cada kWh consumido. Neste caso, a frequência da onda portadora deverá ser modificada futuramente e por isso é importante que ela seja facilmente programável.

2.3 – Etapa de injeção

É composto de circuitos para injeção do sinal na rede de 60Hz.

Em um primeiro momento, o sinal gerado no bloco anterior será defasado em 180° . Tanto o sinal original quanto o sinal invertido são necessários uma vez que a injeção do sinal é feita através do chaveamento de dois transistores na frequência da portadora, numa configuração “*push-pull*” com transformador.

Como mencionado anteriormente, a transmissão é feita a partir da injeção da onda portadora no primário do transformador. A figura 2.2 apresenta o esquema do funcionamento deste bloco. A presença do resistor no emissor é importante para garantir a proteção do circuito e, por isso, a tensão neste ponto é monitorada para verificar um possível surto de corrente.

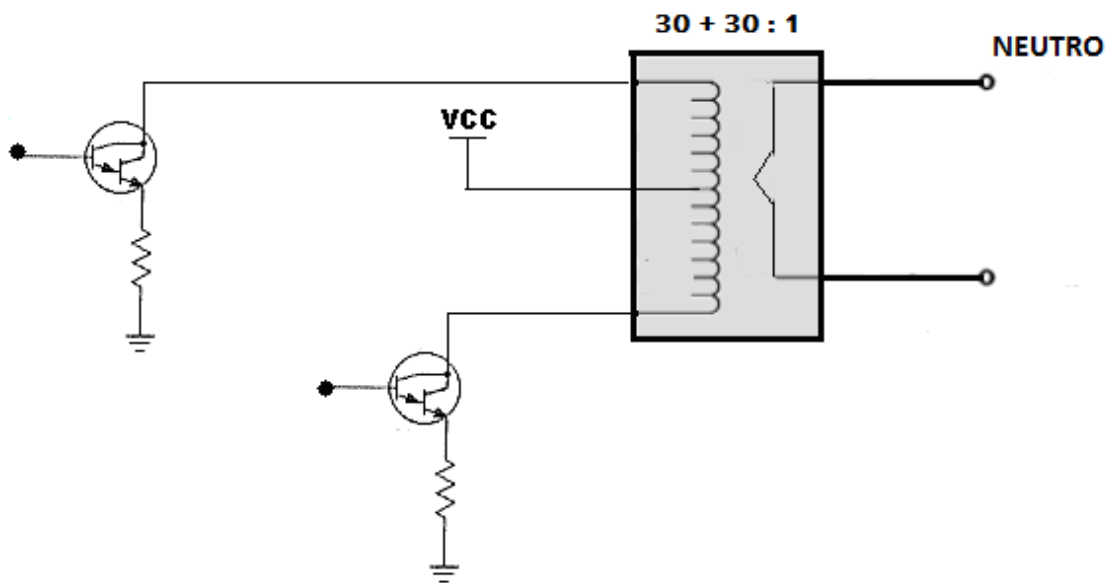


Figura 2.2: Etapa de Potência

Durante este processo, a onda portadora de 210Hz é injetada no neutro da rede através do toróide de injeção. Considerando que o transformador disponível tem relação de espiras de 30 + 30 : 1, para que a amplitude do sinal de onda portadora não ultrapasse o valor máximo calculado na seção 2.2, a tensão aplicada no primeiro deverá ser inferior a:

$$V_{pico} \leq A_{max} \times 30$$

$$V_{pico} \leq 1,41 \times 30$$

$$V_{pico} \leq 42.3V$$

Sendo assim, a tensão de alimentação da etapa de injeção deverá ser inferior à soma da tensão máxima do primário com a queda de tensão máxima no resistor do emissor.

A figura 2.3 apresenta o toróide de injeção, utilizado na primeira implementação do Transmissor de Onda Portadora (TOP), e a figura 2.4 ilustra este processo.



Figura 2.3: Toróide de injeção

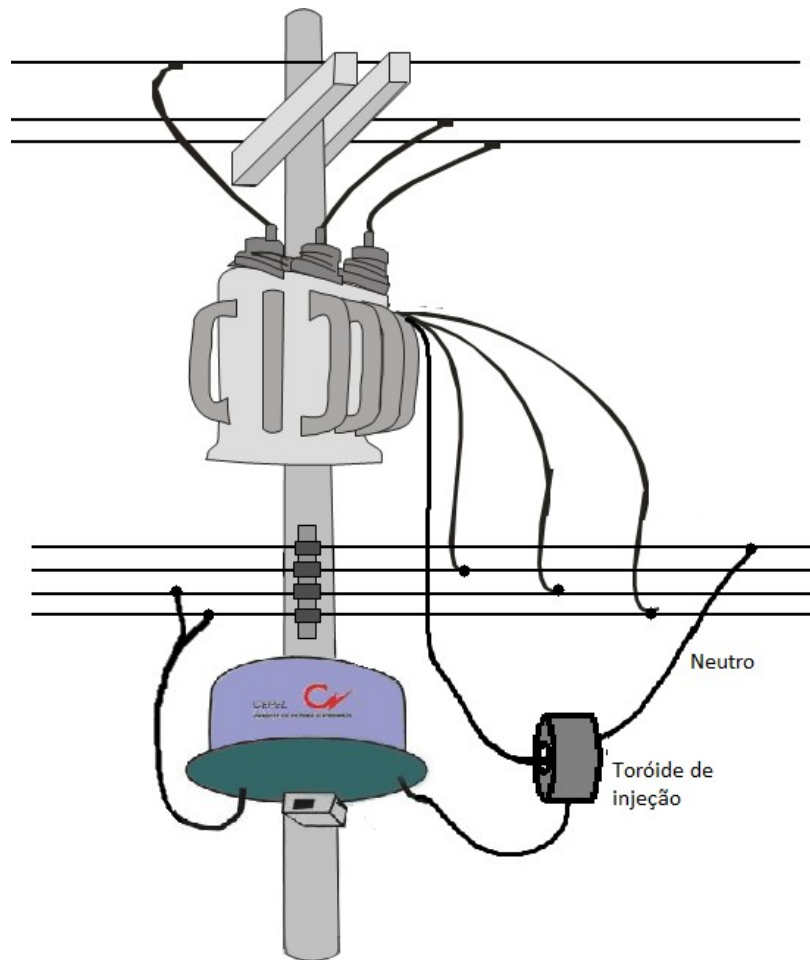


Figura 2.4: Injeção da onda portadora no secundário do transformador trifásico da rede de baixa tensão

2.3.1 – Estimativa de carga vista pelo neutro

Para efeito de cálculo, vamos considerar um transformador de 112,5 kVA. Sabendo que a tensão é de 127 V em cada fase, o cálculo da impedância em carregamento máximo em cada fase é dado por:

$$I_{\text{fase}} = \left[\frac{112.5 \text{ kVA}}{3} \right] \div 127 \text{ V} = 295 \text{ A/fase}$$

$$Z_{\text{fase}} = \frac{127}{295} \approx 0,45 \Omega$$

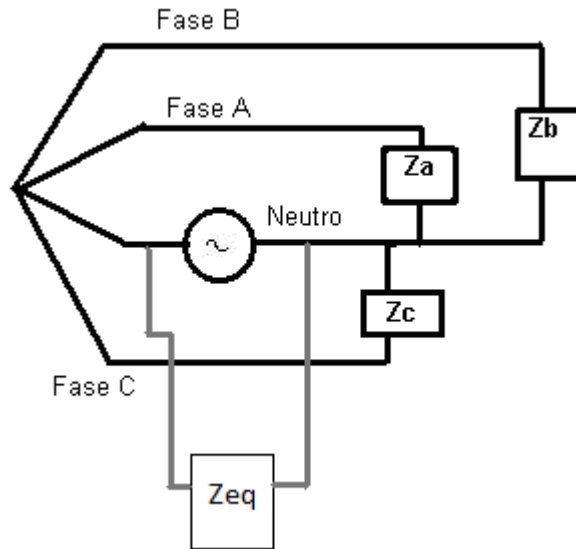


Figura 2.5: Rede trifásica

Considerando cargas balanceadas, podemos calcular a impedância equivalente vista pela fonte:

$$Z_{eq} = \frac{Z_{\phi}}{3} = \frac{0,45}{3} = 0,15 \Omega ; \text{ onde } Z_{\phi} \text{ é impedância da fase.}$$

2.4 – Bloco de proteção

É composto de um sensor de sobrecorrente que protege o transmissor contra surto de corrente no secundário do transformador da rede de distribuição resultante de um curto circuito na rede. Ele deve ser ativado pela presença de um valor de corrente maior que o esperado no emissor do transistor de potência responsável pelo chaveamento do sinal. Nesta condição, o sinal proveniente do gerador é bloqueado durante alguns segundos enquanto o valor da corrente permanecer acima do limite esperado. Ao final deste tempo, a tensão no emissor é verificada novamente e se a condição de sobrecorrente permanecer, o sinal volta a ser bloqueado.

A estimativa deste valor foi realizada considerando a impedância vista pela rede (cálculo realizado na seção 2.3). Para $0,15 \Omega$, observou-se após testes (seção 4.2.3) que a tensão média no emissor era aproximadamente 1V. Com a condição de curto circuito na rede, admitiu-se uma tensão um pouco mais elevada de aproximadamente 1,5 V.

Os circuitos de chaveamento apresentam elevados valores de corrente e tensão, necessitando, portanto, de circuitos de auxílio que garantam proteção aos dispositivos semicondutores envolvidos na injeção.

Como o circuito de injeção é uma carga indutiva, o seu chaveamento induz *spikes* (picos) de tensão sobre os transistores. Por esta razão, é necessária a utilização do circuito *snubber* para dissipar a energia armazenada nos indutores. Estes circuitos são conectados aos coletores dos transistores de potência responsáveis pela injeção dos sinais.

2.5 – Resumo da especificação

A tabela 2.2 resume a especificação geral do transmissor de onda portadora (TOP).

Frequência do sinal injetado	210 Hz
Amplitude máxima de onda quadrada no neutro	1,41 V
Tensão máxima no emissor	1,5 V
V _{cc} máximo	44 V

Tabela 2.2: Especificação geral do TOP

3. Implementação do transmissor

3.1 – Metodologia

Neste capítulo apresentaremos o desenvolvimento de uma nova configuração para o Transmissor de Ondas Portadoras (TOP) baseado no sistema existente. Como vimos no capítulo anterior, o TOP é dividido em três blocos: gerador de frequência, circuito de proteção e o circuito de injeção da onda no neutro da rede.

Depois de analisar o funcionamento do transmissor, decidimos implementar cada bloco de funções em etapas, partindo do estágio mais simples: o gerador de frequência. A divisão em etapas simplifica o processo de pesquisa e facilita a correção de possíveis erros no sistema, uma vez que cada etapa foi testada através da substituição dos componentes da versão antiga do TOP pelo circuito desenvolvido.

Em um segundo momento, desenvolvemos o sensor de sobrecorrente. Essa escolha veio da possibilidade de substituir os estágios de comparação e de temporização do sensor utilizando os periféricos internos do PIC. Além disso, este sensor interfere diretamente na etapa de injeção do circuito e, por isso, era essencial sua implementação.

A terceira fase do projeto foi a especificação dos componentes do circuito de injeção do sinal no neutro da rede. Posteriormente realizamos a integração dos três blocos: gerador de frequência, sensor de sobrecorrente e etapa de injeção.

3.2 – Estudo e especificação do microcontrolador (PIC)

Inicialmente estudamos os microcontroladores PIC a fim de conhecer sua lógica de processamento e os periféricos internos úteis ao nosso projeto. Com este aprendizado, consideramos a viabilidade de implementar em um único PIC o bloco de gerador de frequência e em seguida, o circuito de proteção.

Verificamos que para implementar o transmissor de onda portadora seria necessário utilizar a unidade de temporização do PIC e para o circuito de proteção, o

conversor analógico-digital. A justificativa para o uso de cada um desses periféricos será dada mais adiante.

O PIC 16F913 da Microchip foi escolhido por atender às necessidades do projeto além de estar disponível no laboratório. Ele possui conversor analógico-digital de 10 bits e 5 canais, 3 unidades de temporização, 3 unidades de entrada/saída e frequência de operação máxima de 20MHz. A figura 3.1 apresenta o diagrama em bloco do PIC.

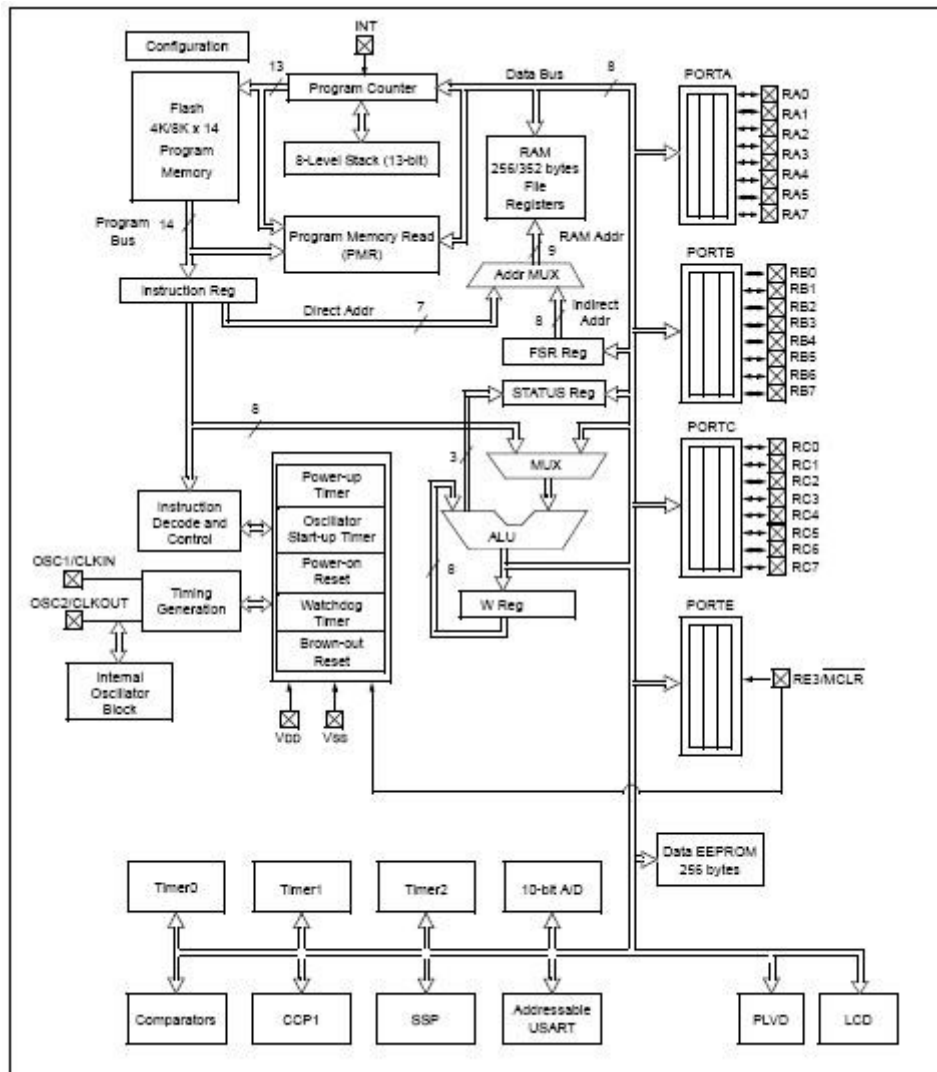


Figura 3.1: Diagrama em blocos do PIC 16F913

Para programar e gravar o microcontrolador foram utilizados o PIC Compiler e o LabTools ICD2BR respectivamente. Este último funciona integrado com o MPLAB IDE v7.61.

O PIC Compiler é um software que oferece as ferramentas necessárias para desenvolver programas na linguagem C e possui bibliotecas específicas para

microcontroladores da Microchip. Além disso, ele disponibiliza exemplos de utilização de cada função existente prontos para serem compilados facilitando a aprendizagem.

O MPLAB IDE v7.61 é um software mais completo que o PIC Compiler. Além de possuir um editor de texto para escrever o código fonte e compilá-lo, ele permite testar e posteriormente gravar o microcontrolador. A gravação do componente necessita da integração do software com o kit LabTools ICD2BR. Trata-se de um gravador/depurador que possui um soquete para leitura e gravação de PIC's de 8, 18, 28 e 40 pinos.

Já para simular o funcionamento do circuito, usamos a versão demo do Proteus v6. Este programa possui um ambiente de simulação de circuitos digitais, analógicos e microcontroladores conhecido como ISIS.

3.3 – Implementação do gerador de frequência

A unidade de temporização do microcontrolador é capaz de gerar sinais em intervalos de tempo regulares. Tendo em vista essa funcionalidade, geramos uma rotina de interrupção para o temporizador, capaz de gerar dois sinais defasados de 180° e ambos com frequência de 210Hz.

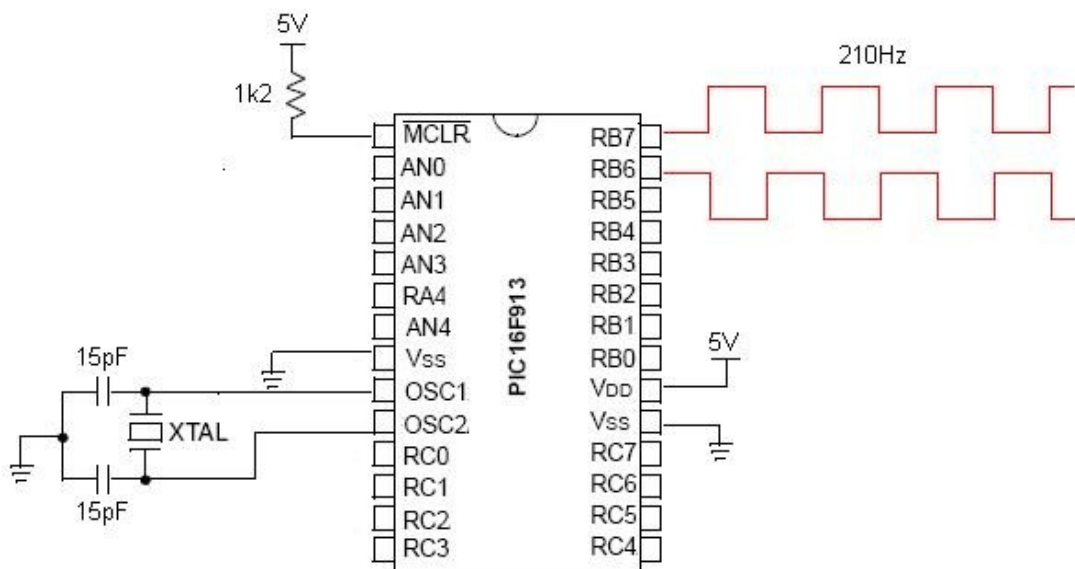


Figura 3.2: Esquema do gerador de onda portadora

Na primeira implementação do TOP, utilizava-se uma lógica discreta que permitia a síntese de um conjunto de frequências programáveis através de *jumpers*. A partir do momento em que o microcontrolador passa a realizar esta função, o processo de síntese das frequências desejadas é simplificado uma vez que será feito via software sem necessidade de alteração no circuito.

Após a gravação do PIC, o circuito foi montado e testado com sucesso. Com isso, realizamos uma integração deste circuito com o TOP. Retiramos os componentes que faziam parte do bloco gerador de onda portadora e os substituímos pelo circuito desenvolvido. O PIC passou, então, a gerar duas ondas quadradas e entregá-las ao *driver* excitador do TOP.

Com o gerador de onda portadora em funcionamento, a próxima etapa foi desenvolver o bloco de proteção.

3.4 – Implementação do sensor de sobrecorrente

Como vimos no capítulo anterior, o sensor de sobrecorrente é composto de duas etapas: uma de comparação e outra de temporização. A etapa de comparação verifica se a tensão no emissor do transistor de potência utilizado no chaveamento na onda da portadora está acima do valor limite. Quando isto ocorre, um temporizador é ativado e envia um comando para interromper a transmissão da onda portadora durante alguns segundos.

Tanto a etapa de comparação quanto a de temporização foram implementadas no PIC. No entanto, adicionamos uma rotina que monitora novas amostras da mesma entrada analógica antes de interromper a geração do sinal. A obtenção dessas amostras tem o propósito de identificar que não ocorreu apenas um *glitch* na entrada do circuito. A figura 3.3 apresenta o fluxograma deste processo.

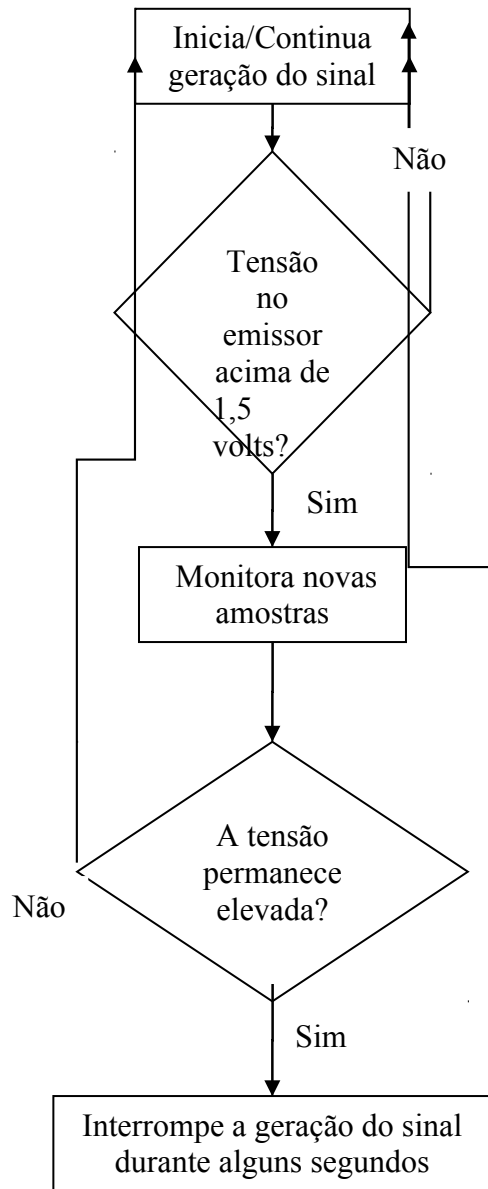


Figura 3.3: Fluxograma do sensor de sobrecorrente

A etapa de comparação do sensor foi realizada utilizando-se o conversor analógico digital do microcontrolador. A leitura da tensão no emissor do transistor seria realizada pela entrada analógica do PIC e um conversor de 8 bits apresentaria seu valor digital. Apesar do PIC16F913 possuir um conversor AD de 10 bits, durante o desenvolvimento do trabalho, o PIC foi programado para converter em 8 bits o que facilitou a manipulação dos dados utilizando apenas um registrador para receber os dados da conversão. A resolução de 8 bits é satisfatória para a aplicação em questão.

Foi implementada uma rotina utilizando duas entradas analógicas do PIC que são selecionadas alternadamente. As duas entradas (canais AN0 e AN1 da figura 3.4) são

necessárias porque o objetivo é monitorar os dois transistores responsáveis pela etapa de injeção. Na lógica de programação do PIC o tempo gasto entre a escolha do canal a ser monitorado e apresentação do resultado da conversão A/D é de 10 μ s.

Então comparamos cada valor de tensão convertido pelo conversor com uma palavra de 8 bits correspondendo ao valor da tensão limite. Na figura 3.4, que mostra o esquema desta configuração, pode-se observar a inclusão de um circuito RC antes das entradas analógicas do PIC. Este circuito é necessário monitorar a tensão sobre o resistor sensor uma vez que após algum tempo o capacitor se carrega com o valor médio da tensão do emissor.

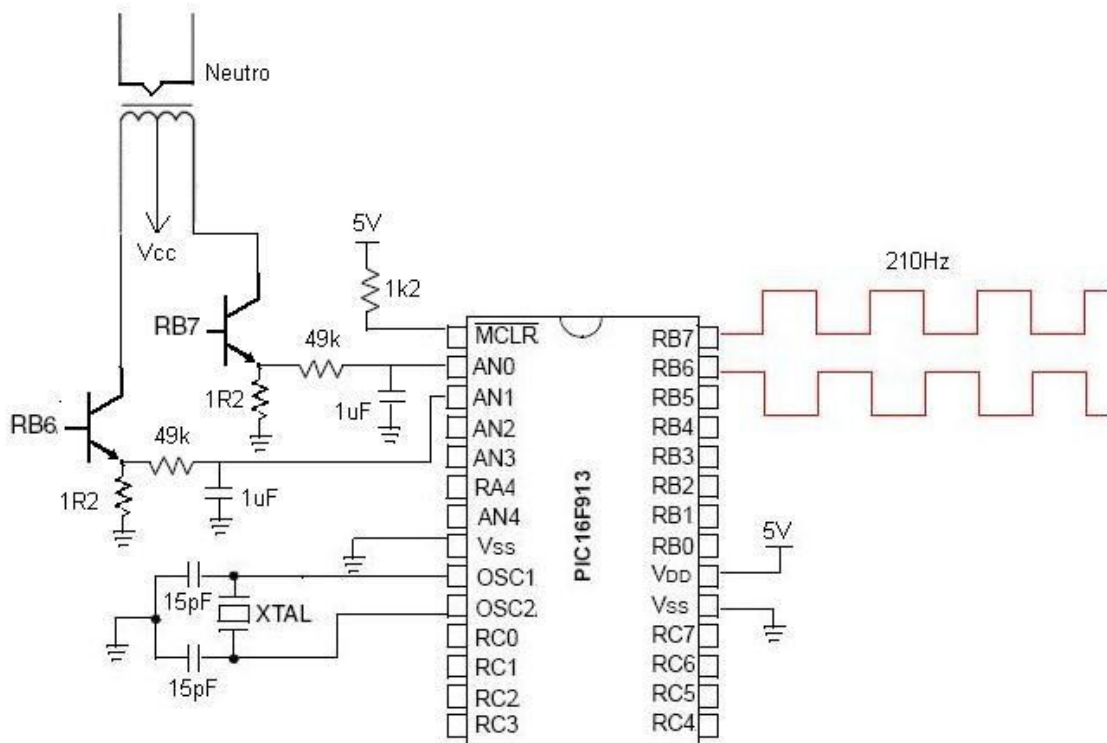


Figura 3.4: Esquema do sensor de sobrecorrente

Vimos na seção 2.4 que a tensão máxima permitida no emissor do transistor de potência é de 1,5 V. Caso essa tensão ultrapassasse o limite, são realizadas novas amostras da mesma entrada analógica. Assegurada a condição de curto do sistema, a conversão analógica digital e o gerador de onda portadora implementado anteriormente são interrompidos.

Após um intervalo de cinco segundos, o gerador do sinal de 210Hz é ativado novamente para que seja realizada uma nova leitura da tensão no emissor. Se a tensão

permanecer acima de 1,5 V, a geração do sinal continua bloqueada para impedir a injeção do sinal na rede.

É importante ressaltar que o sensor de sobrecorrente foi projetado de forma que seja acionado assim que a entrada monitorada apresente valor acima do esperado.

Durante a fase de teste do sensor (figura 3.5), utilizamos uma fonte de tensão DC ligada às entradas analógicas do PIC para simular a condição de curto. Desta forma era possível manipular os valores de tensão das duas entradas analógicas para assegurar que a lógica de programação do PIC estava correta.

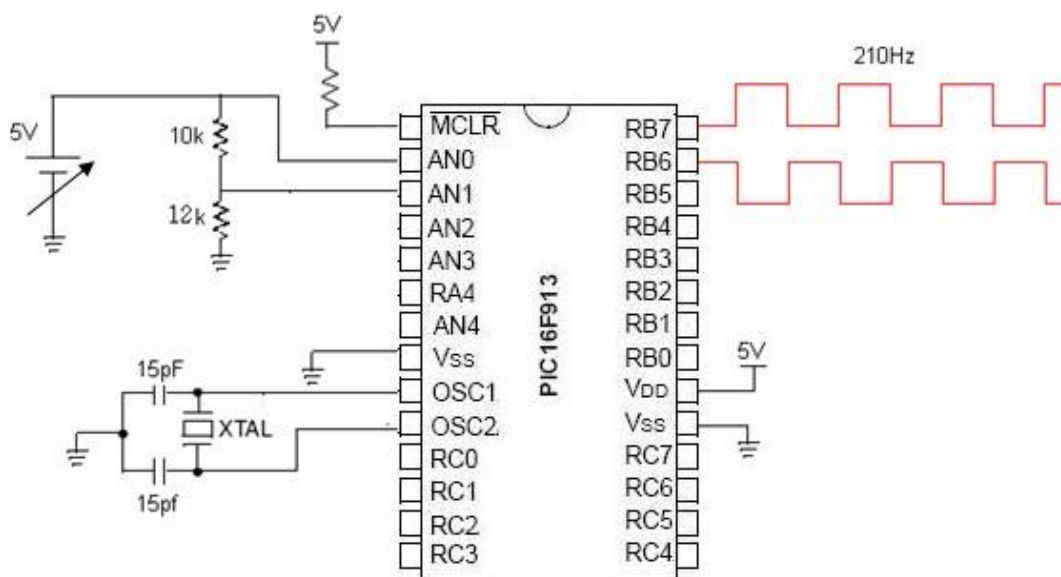


Figura 3.5: Exemplo do teste realizado para simulação de curto

O gerador de onda portadora e o sensor de sobrecorrente integrados funcionaram corretamente. No entanto, para verificar se o sensor funcionaria corretamente integrado à etapa de injeção do transmissor, seria necessário implementá-la também.

3.5 – Estudo e especificação da etapa de potência

Com estes dois blocos em funcionamento, foi realizada uma pesquisa na área de dispositivos de potência com o objetivo de apresentar uma configuração mais compacta e segura do circuito de injeção.

Visando diminuir o espaço físico ocupado pelo TOP e o consumo, além de modernizar o sistema, foi iniciada uma investigação para eliminar a etapa de ganho de corrente *driver* excitador utilizando outro tipo de dispositivo acionado por tensão como por exemplo: MOSFET (Metal Oxide Field Effect Transistor) e o IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor).

O IGBT foi escolhido uma vez que ele pode operar em frequências maiores que os transistores bipolares de potência além de suportar maiores tensões e correntes que os MOSFET's de potência. A principal diferença entre essa estrutura do IGBT (figura 3.6) e a de um MOSFET é a inclusão de um substrato P onde é conectado o terminal de coletor. Esta mudança tem como efeito a inclusão de características bipolares ao dispositivo como, por exemplo, baixa perda de potência quando em condução.

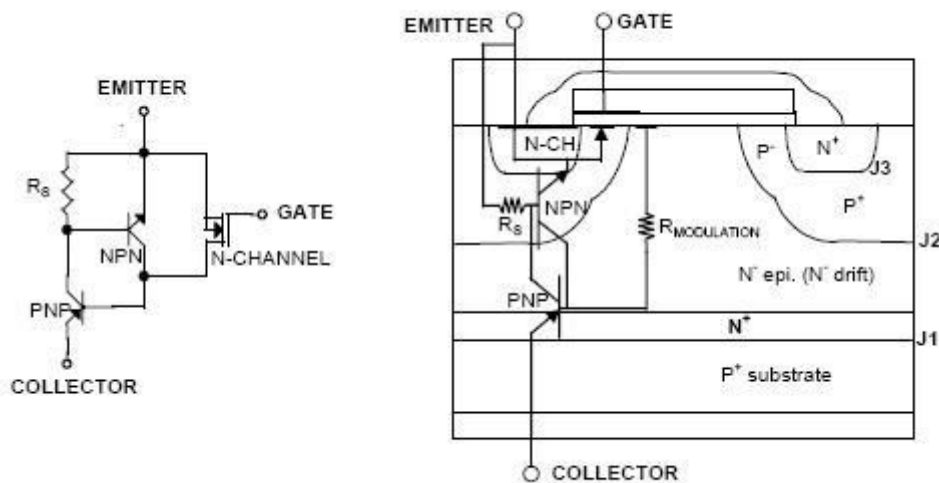


Figura 3.6: Estrutura do IGBT

Neste trabalho o IGBT será utilizado como uma chave substituindo o transistor de potência (2N6547) presente na primeira versão do TOP, alternando os estados de condução (*On-state*) e corte (*Off-state*) os quais são controlados pela tensão de porta. O comportamento do IGBT pode ser visto nos gráficos da figura 3.7.

No estado de condução o transistor parte de V_{ce} (tensão entre coletor e emissor) alto e V_{ge} (tensão entre porta e emissor) igual a zero. Uma corrente constante carrega a porta, provocando um aumento linear da tensão da porta. Com a queda da tensão entre coletor e emissor (V_{ce}), a corrente de polarização de porta é usada para carregar C_{ge} , e a tensão de porta permanece constante.

Mais tarde, quando a tensão entre o coletor e o emissor cai, C_{gc} aumenta de valor de tal forma que, uma pequena variação de V_{ce} é suficiente para levar a um aumento da corrente de porta. Somente quando a corrente I_c necessária à carga se reduz novamente é que a tensão de porta aumenta.

Quando o IGBT é desligado, a tensão de porta inicialmente decresce quase que linearmente, aumentando a tensão V_{ce} . Como existe uma fonte de polarização que está drenando corrente da porta, a tensão porta-emissor se mantém constante.

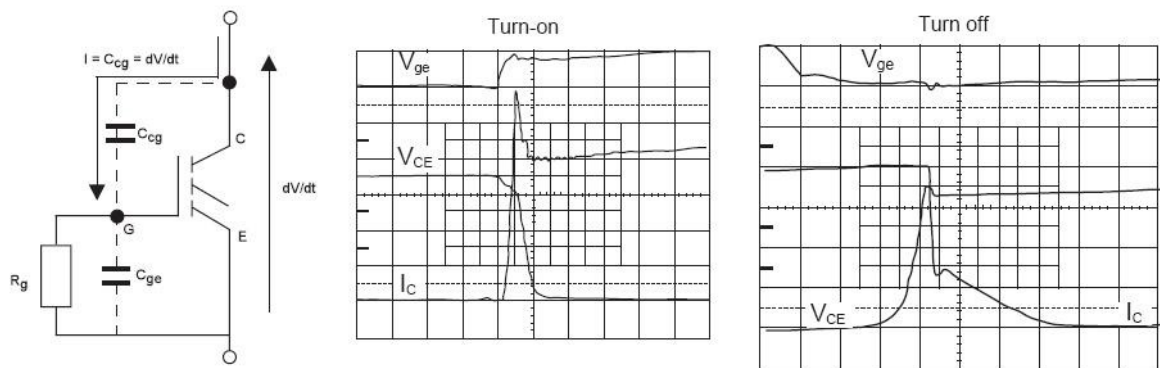


Figura 3.7: Comportamento do IGBT

Com base nas especificações do sistema, foi escolhido o IRG4PC30UD. Este IGBT suporta até 600 volts em seu coletor e trabalha com valores de corrente até 23 A além de dissipar até 100 watts de potência.

Como vimos na seção 2.5, a tensão de alimentação (V_{cc}) da etapa de injeção deve ser inferior a 44 V. Considerando a relação de espiras de 30 + 30 :1 e a amplitude máxima da onda portadora igual a 1,41 V, adotamos V_{cc} de 33V.

Para comutar dispositivos como MOSFET e IGBT, ou seja, colocar em condução e bloquear, utilizam-se *drivers* que são circuitos eletrônicos responsáveis por acionar estes dispositivos. Estes circuitos fornecem níveis de tensão e de corrente adequados para que o chaveamento ocorra de maneira eficaz.

Tendo isto em vista, escolheu-se o *driver* IR2110 para acionar o IGBT. Este *driver* polariza corretamente o IGBT, fornecendo a voltagem adequada para o seu funcionamento. Também possui duas entradas (*HIN* e *LIN*) e saídas analógicas (*HO* e *LO*) em fase. Isso permite que seja usada a configuração *push-pull* que pode ser vista na figura 3.8 .

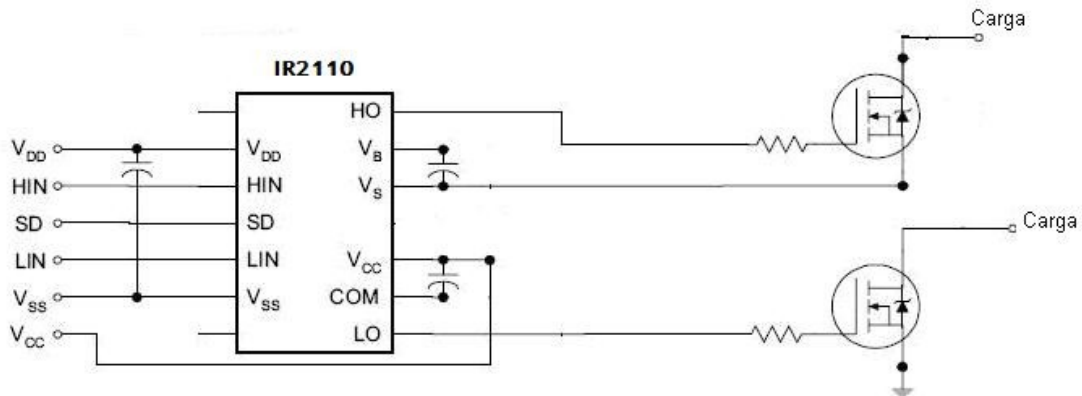


Figura 3.8: Configuração Push-Pull

Além disso, o *driver* possui um sistema de *shutdown* caso sua entrada SD (figura 3.8) seja acionada. Neste momento, as saídas HO e LO são interrompidas. O comportamento do *driver* do IGBT encontra-se na figura 3.9.

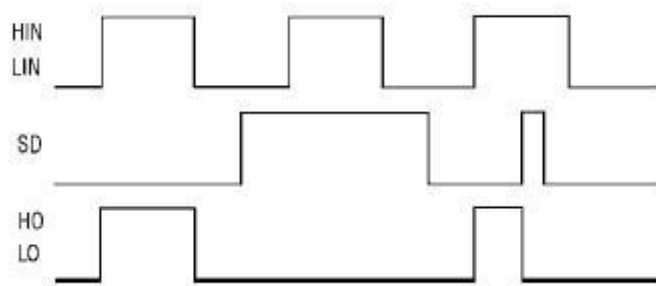


Figura 3.9: Comportamento do *driver* do IGBT

3.6 – Integração dos blocos do transmissor

Com a especificação da etapa de potência, passou a ser possível integrar o gerador de onda portadora e o sensor de sobrecorrente já desenvolvidos, com a etapa de injeção do circuito.

Como o *driver* do IGBT aceita alimentações entre 10V e 20V (DC), mantivemos a mesma fonte de alimentação de 17V (DC) utilizada na primeira versão do TOP. No entanto o PIC suporta somente 5V (DC) e por isso teremos que incluir um 7805 para regular a tensão. A figura 3.10 apresenta o esquema da fonte de alimentação utilizada, onde as tensões de alimentação são geradas a partir de um transformador com primário para 127V.

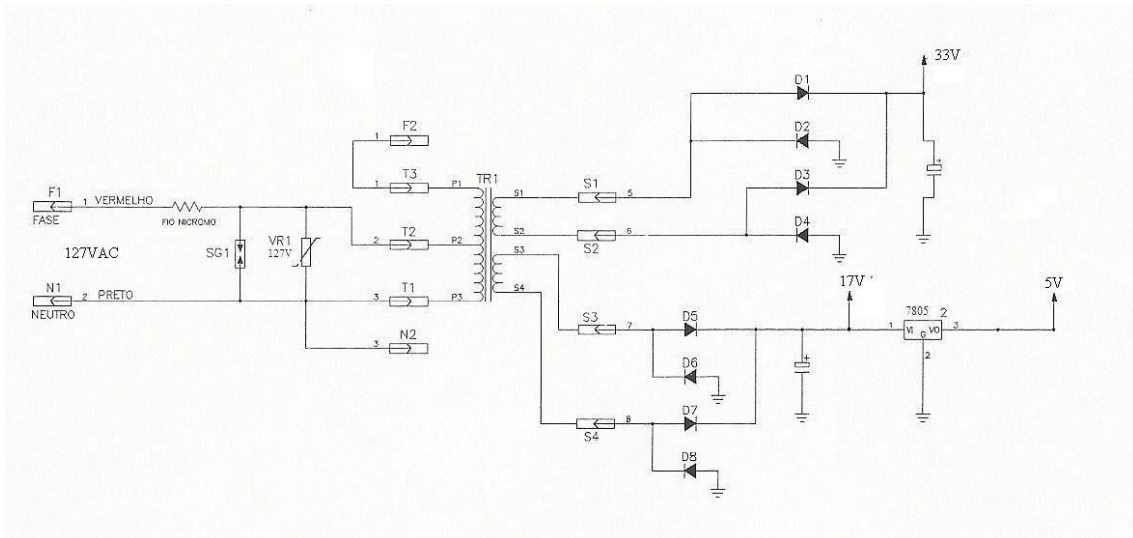


Figura 3.10: Esquema da fonte de alimentação

A figura 3.11 mostra o esquema atual do circuito.

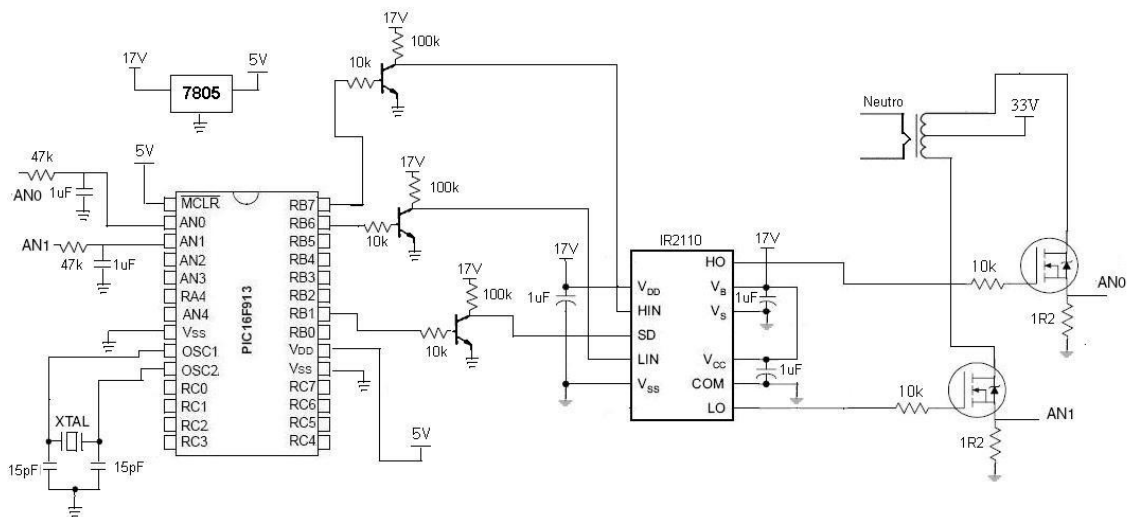


Figura 3.11: Esquema do circuito do transmissor

Com o bloco gerador de onda portadora em funcionamento, os dois sinais de 210Hz defasados entre si em 180° são entregues ao *driver* do IGBT através das entradas *HIN* e *LIN*. O *driver*, por sua vez, introduz os sinais nas bases dos IGBT que farão a injeção do sinal no neutro da rede através do toróide injetor. A relação de espiras permanece em 30:1 em cada enrolamento.

A tensão sobre o resistor sensor presente no emissor do IGBT é monitorada através dos dois canais analógicos do PIC (*AN0* e *AN1*). Quando a tensão ultrapassar 1,5V, são realizadas novas amostras de tensão. Caso se confirme a condição de curto circuito, o PIC interrompe a geração da onda e ativa o *shutdown* do *driver*. Desta forma

a injeção no neutro da rede é interrompida. Após alguns segundos, o PIC reinicia a geração do sinal em paralelo com o monitoramento do nível de tensão sobre o resistor sensor.

Também se projetou um circuito *snubber* pra dissipar a energia armazenada nos indutores. Existem algumas configurações para este tipo de circuito especificamente desenvolvidas para aplicações com IGBT. Neste trabalho, foi selecionada a configuração RC, semelhante a configuração utilizada para o transistor (2N6547) na primeira versão do TOP.

No entanto, a conexão para IGBT é realizada de maneira diferente. Como mostra a figura 3.11, o circuito RC deve ser conectado entre coletor e o emissor do IGBT. Os valores para capacitância e resistência para nosso circuito foram definidos utilizando os valores de teste encontrados em trabalho anterior [5]. O circuito foi ensaiado e comportou-se adequadamente.

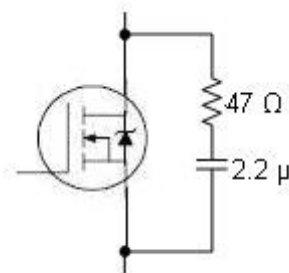


Figura 3.12: Configuração do circuito *snubber*

4. Resultados

4.1 – Confeção da placa

Após a etapa de testes para a validação do circuito, partiu-se para a construção da placa de circuito impresso do protótipo da nova versão do Transmissor de Onda Portadora (figura 4.1) para aumentar a confiabilidade do protótipo e verificar as dimensões do conjunto e dificuldades de transformar o protótipo em produto.

A figura 4.1 apresenta as duas faces da placa confeccionada. Ela apresenta dimensões de 14,9 cm x 13,8 cm totalizando uma área de 205,62 cm². Todos os blocos funcionais do transmissor que foram desenvolvidos neste trabalho estão incluídos na placa além dos retificadores de onda para as tensões de 33V e 17V (DC) utilizadas na alimentação do circuito.

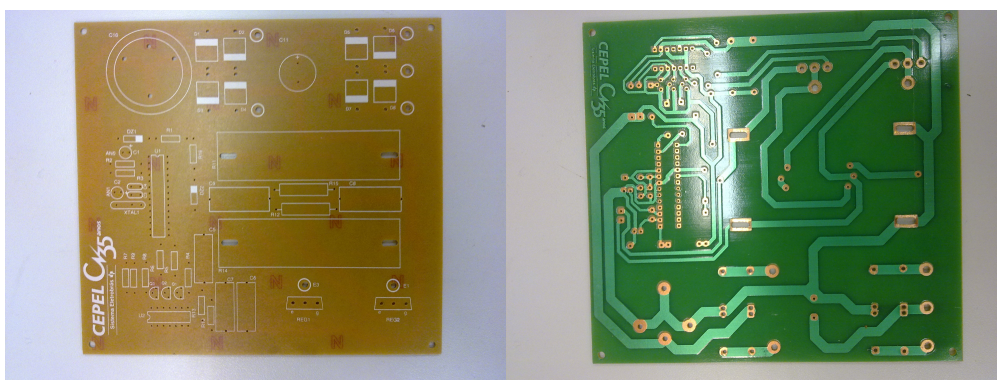


Figura 4.1: Placa de circuito impresso do protótipo

4.2 – Operação do circuito

Na seção 2.3 foi especificado um toróide injetor com relação de espiras de 30+30:1 para respeitar a norma técnica limitando a amplitude do sinal injetado no neutro em apenas 1% da tensão da rede (127V). No entanto, o toróide injetor utilizado em laboratório possui uma relação de espiras de 15+15:1. Por isso, iremos observar adiante nos resultados, que o sinal injetado apresenta uma tensão pico a pico próxima do dobro da amplitude estimada na seção 2.2.

4.2.1 – Snubber

Como vimos no capítulo 3, a onda portadora é gerada pelo microcontrolador e entregue ao *driver* do IGBT (entradas HIN e LIN). A figura 4.2 mostra este sinal com amplitude de 17V e período de aproximadamente 4,7 ms (210Hz).

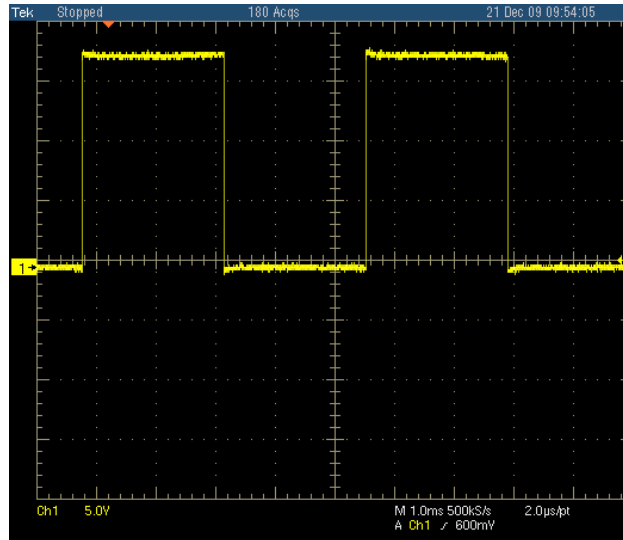


Figura 4.2: Sinal entregue ao *driver* do IGBT

A figura 4.3 apresenta o sinal na saída do *driver* e que será entregue ao IGBT (saídas HO e LO).

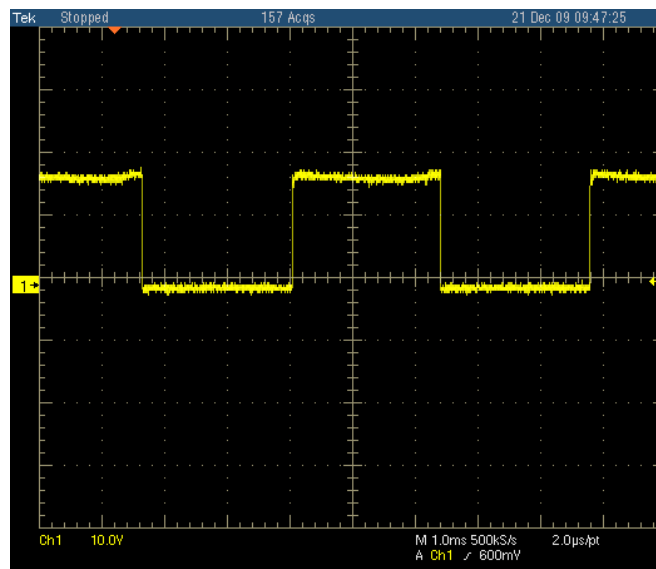
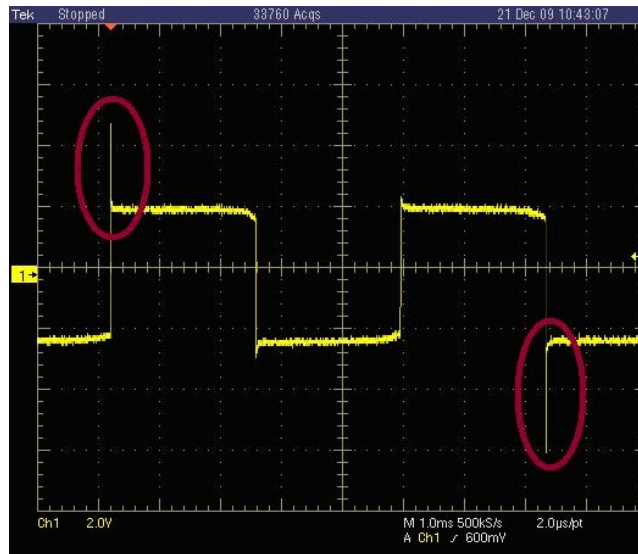
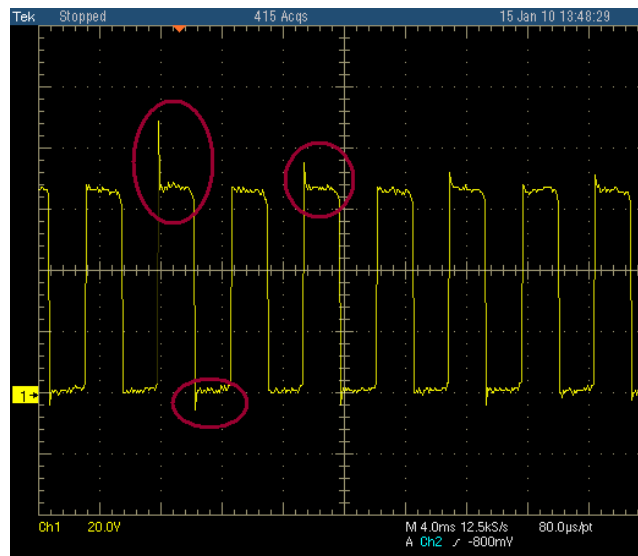


Figura 4.3: Sinal na saída do *driver*

Para efeito de comparação veremos a seguir as formas de onda que serão injetadas pelo IGBT com e sem a presença do circuito *snubber* na etapa de injeção. A figura 4.4 (a) e (b) apresenta o comportamento do sinal sem o circuito *snubber* acoplado ao IGBT e por isso é possível verificar a presença de picos de tensão destacados.



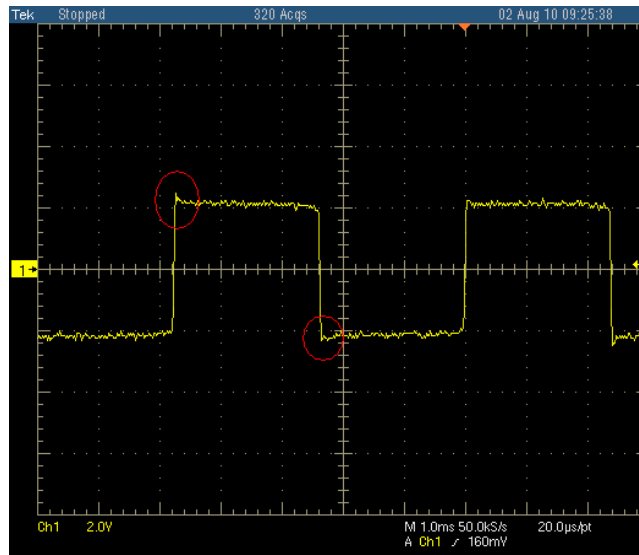
(a)



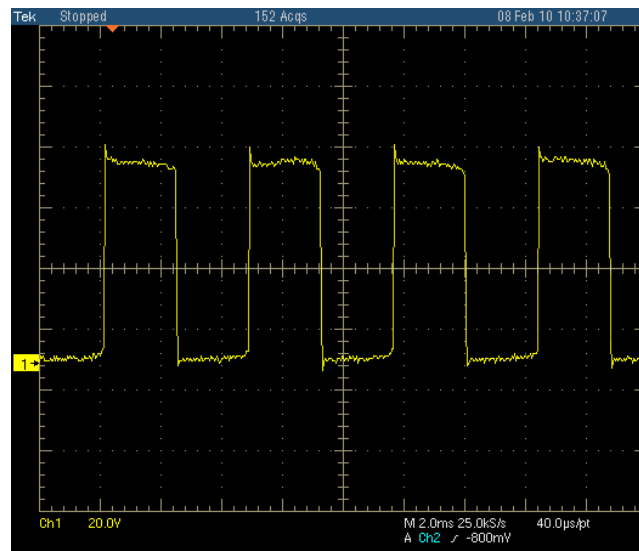
(b)

**Figura 4.4: (a) Sinal injetado pelo toróide (sem *snubber*)
(b) Sinal no coletor do IGBT (sem *snubber*)**

Já as figuras 4.5 (a) e (b) mostram os mesmos sinais dessa vez com a supressão dos picos pela atuação do circuito *snubber*. O sinal gerado com frequência de 210Hz possui nível de amplitude de 2,2V que corresponderia a 1,1V com transformador de 30+30:1 e, portanto, dentro da especificação. A atenuação dos picos de tensão aparece destacada na figura.



(a)



(b)

**Figura 4.5: (a) Sinal injetado pelo toróide (com *snubber*)
(b) Sinal no coletor do IGBT (com *snubber*)**

A análise dos gráficos permite afirmar que o circuito *snubber* projetado está atenuando satisfatoriamente os picos de tensão da onda portadora.

4.2.2 – Sensor de proteção

Para verificar o funcionamento do sensor de sobrecorrente simulamos uma situação de curto circuito. Nesta situação, a corrente que passa no resistor presente no emissor do IGBT aumenta, elevando a tensão sobre o mesmo. Com isso, o valor monitorado pelo conversor A/D do PIC ultrapassará a tensão limite de 1,5 V estipulada no capítulo 2, ativando o sensor.

As figuras 4.6 e 4.7 mostram o comportamento do sinal após o curto circuito. A interrupção do sinal é provocada pela ação do sensor de sobrecorrente.

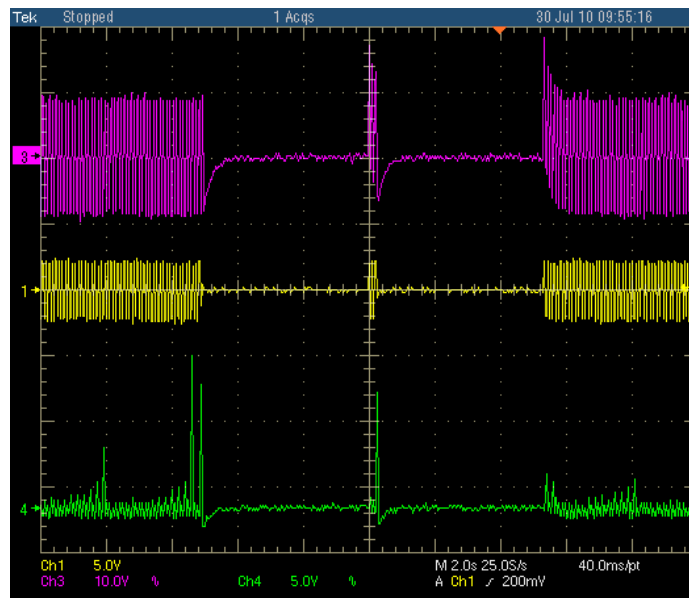


Figura 4.6: Sinal no emissor do IGBT (canal 4) ; Sinal injetado (canal 1) e Sinal no gate do IGBT (canal 3)

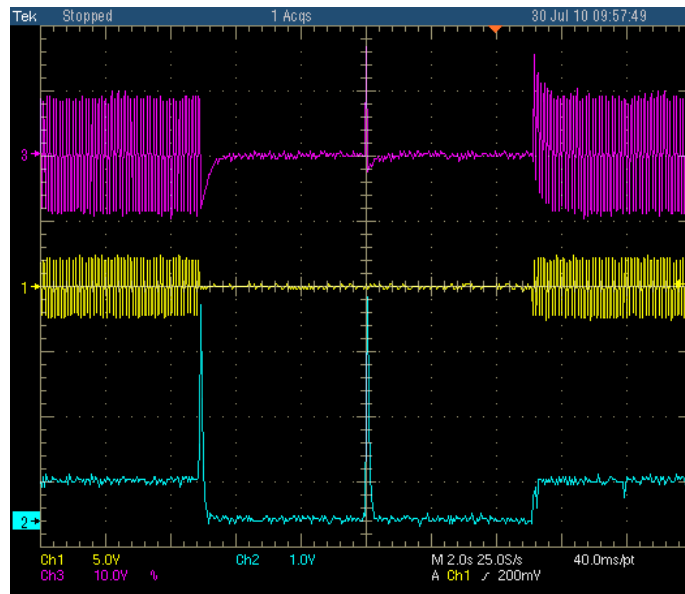
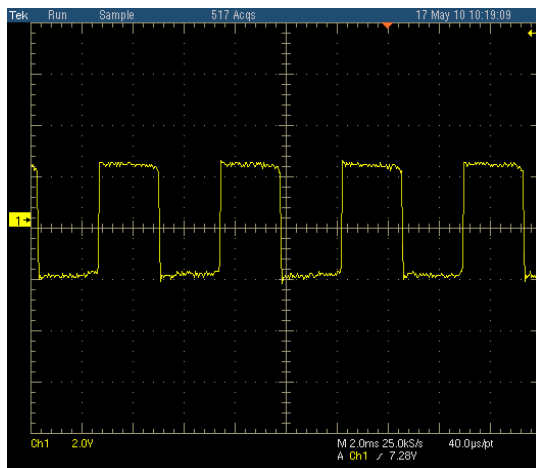


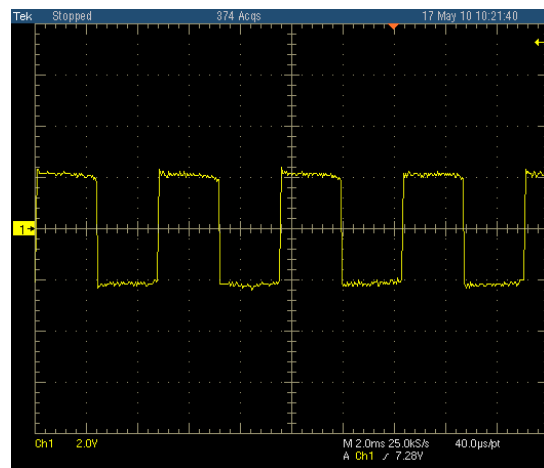
Figura 4.7: Sinal no emissor do IGBT após o filtro RC (canal 2) ; Sinal injetado (canal 1) e Sinal no gate do IGBT (canal 3).

4.2.3 – Cargas

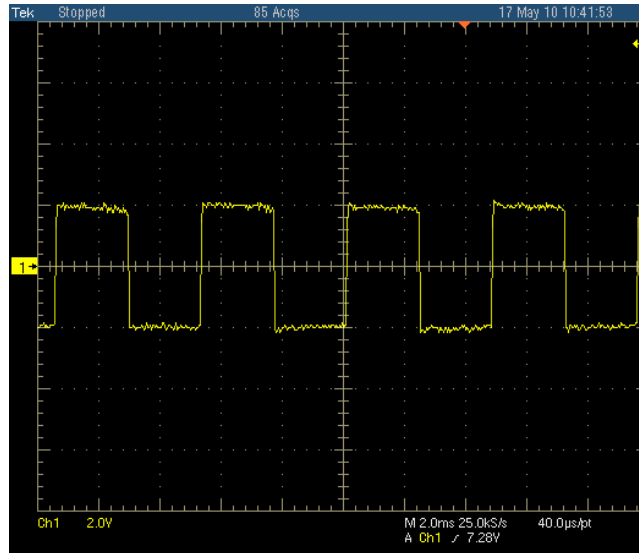
Também foi realizada uma simulação de cargas atuando sobre o sistema. A figura 4.8 mostra o comportamento do sinal injetado pelo toróide sob cargas de 10Ω , 2Ω e 0.15Ω .



(a)



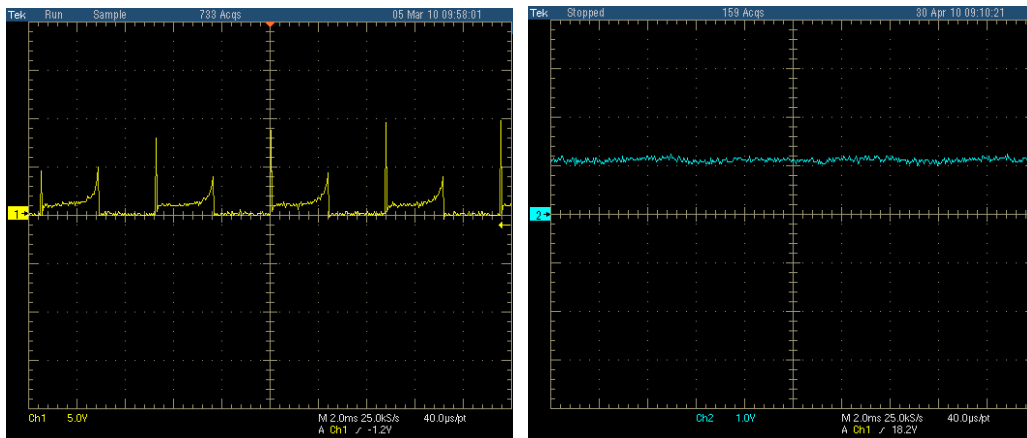
(b)



(c)

Figura 4.8: Sinal injetado pelo toróide sob cargas de (a) 10Ω ; (b) 2Ω ;(c) 0.15Ω

As figuras 4.9 (a) e (b) apresentam o sinal no emissor do IGBT e o sinal após o filtro RC quando uma carga de 0.15Ω está atuando sobre o sistema.



(a)

(b)

Figura 4.9: (a) Sinal no emissor do IGBT ; (b) Sinal após o filtro RC

É possível observar que, para $0,15\Omega$ a tensão média no emissor é aproximadamente 1V. Por isso foi admitida uma tensão um pouco mais elevada de aproximadamente 1,5 V como tensão limite para acionar o sensor de sobrecorrente.

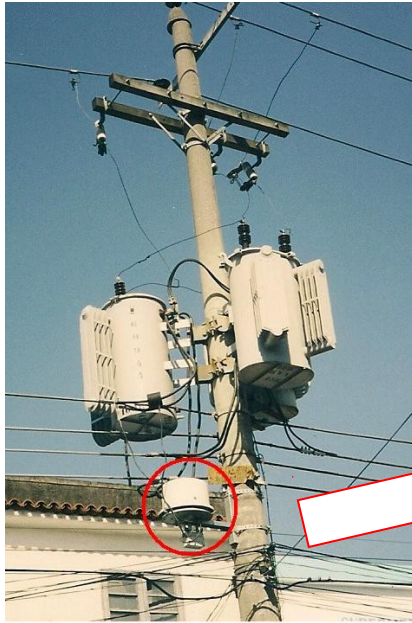
4.3 – Compactação do conjunto

A atualização do TOP tinha como um dos objetivos diminuir o espaço físico ocupado pelo transmissor dentro da rede de distribuição de energia. A redução do

volume do equipamento acarretará na diminuição do seu peso facilitando o manuseio para instalação e manutenção além da redução de custos do invólucro como um todo.

A figura 4.10 apresenta a primeira versão do TOP. A placa contendo o gerador de onda portadora, os sensores de proteção e a etapa de injeção ocupavam uma área de 244 cm².

(a)



(b)

Figura 4.10: Primeira versão do Transmissor de Onda Portadora
(a) Circuito interno (b) Em destaque na rede de distribuição de energia

Já a versão atualizada ocupa uma área de 205,62 cm² e o resultado final do protótipo pode ser visto nas figuras 4.11 e 4.12.

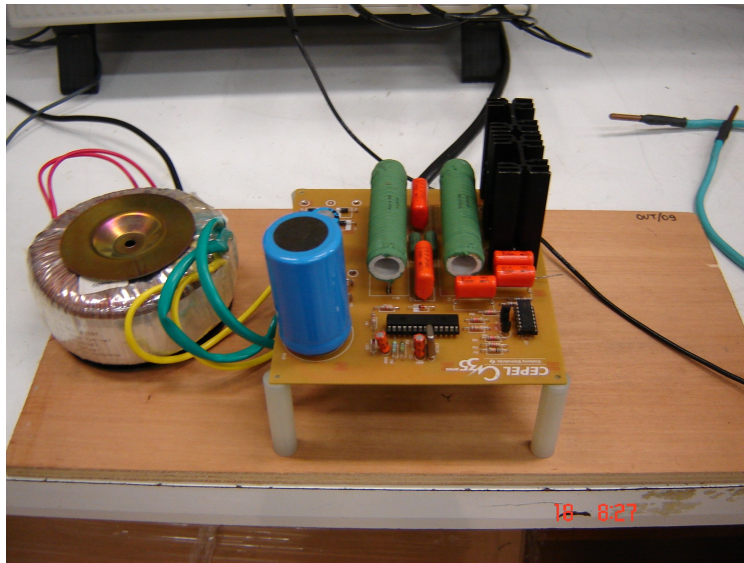


Figura 4.11: Nova versão do Transmissor de Onda Portadora

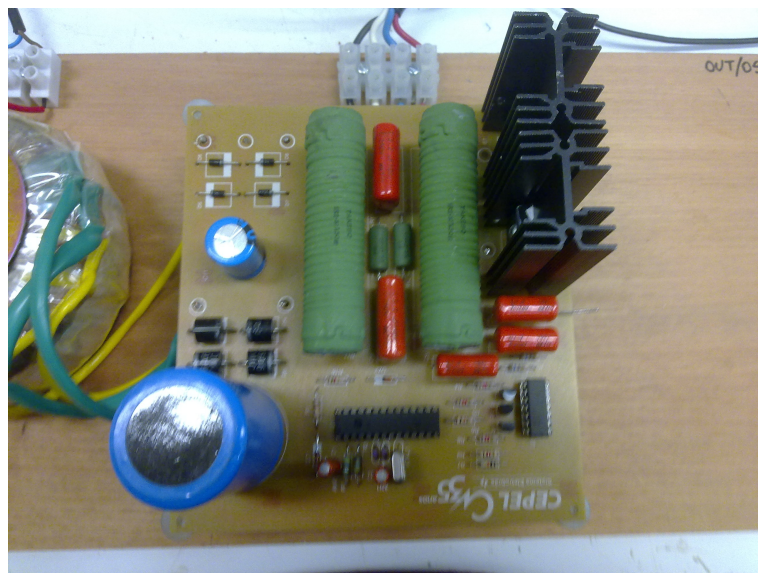


Figura 4.12: Zoom sobre a placa do TOP

4.4 – Redução de custos

Outra questão importante no processo de atualização do TOP era a redução de custo dos seus componentes. A tabela abaixo lista os componentes da versão anterior do TOP e seus respectivos preços de mercado atuais.

Componentes	Quantidade	Preço (R\$)
Resistores	25	13,26
Capacitores	22	8,55
CI's		
4060	1	1,29
4040	1	0,79
4082	2	0,86
4013	2	1,40
4016	4	2,80
4009	2	1,58
LM339	4	3,44
LM555	1	2,91
<i>Subtotal</i>	<i>17</i>	<i>15,07</i>
Osciladores		
4MHz	1	1,37
Transistores		
TIP120	2	3,48
2N6547	2	24,52
<i>Subtotal</i>	<i>4</i>	<i>28,00</i>
Total	69	66,25

Fonte: Farnell

Tabela 4.1: Orçamento do TOP antes da atualização

O orçamento dos componentes da nova versão do TOP está na tabela 4.2.

Componentes	Quantidade	Preço (R\$)
Regulador 7805	1	0,81
Microcontrolador		
PIC16F872	1	17,27
Resistores	13	0,71
Capacitores	9	4,60
Transistores		
BC549	3	0,48
IRG4PC30UD	2	30,26
<i>Subtotal</i>	5	31,55
Driver IGBT		
IR2110	1	12,90
Oscilador		
12MHz	1	1,23
Total	30	65,72

Fonte: Farnell

Tabela 4.2: Orçamento do TOP depois da atualização

Ao comparar os orçamentos acima observamos que a atualização do TOP apresentou uma redução percentual de aproximadamente 2% sobre o valor de custo da sua primeira versão.

Porém, analisando as tabelas 4.1 e 4.2 observa-se que os componentes mais caros são os transistores utilizados. O transistor Darlington (TIP 120) tem como função proporcionar um ganho de corrente para o transistor utilizado na injeção do sinal (2N6547) uma vez que este necessita de uma corrente de base mínima de 2A para entrar em funcionamento.

A substituição destes componentes pelo IGBT é mais cara, mas em compensação este dispositivo suporta tensões de até 600V e corrente máxima de 23A provendo ao circuito um limite de potência muito maior. Por isso, a atualização realizada neste trabalho irá permitir que futuramente mais custos sejam reduzidos, como por exemplo a revisão no transformador da fonte de alimentação e o toróide de injeção.

Isso é importante para o objetivo deste trabalho, uma vez que demonstra ser possível implementar tecnologias mais modernas e precisas substituindo circuitos baseado em lógica discreta sem ultrapassar o orçamento esperado.

Em suma, a implementação das funcionalidades do TOP em um único microcontrolador dispensando a utilização dos circuitos integrados. Isto permitiu a redução do tamanho do equipamento além de facilitar futuras modificações e até mesmo

atividades de manutenção uma vez que todo controle do transmissor passou a ser realizado via software. Isto confere maior confiabilidade ao sistema proposto.

4.5 – Consumo do TOP

Na primeira versão do TOP, as tensões de alimentação de 17V e 33V (DC) foram geradas a partir de um transformador com primário para 220V(RMS.) Durante o processo de atualização do TOP, utilizamos um transformador cuja tensão no primário é de 127 V(RMS) para gerar as mesmas tensões de alimentação.

Para calcular o consumo do TOP foram medidos os valores de tensão, corrente e potência no primário e secundário do transformador. A tabela 4.3 apresenta estes dados correspondentes às duas versões do TOP.

		Primeira versão	Segunda versão	
Primário	Tensão (RMS)	219,85 V	124,54	
	Corrente	499 mA	512 mA	
	Potência Ativa	73,06 W	39,3 W	
Secundário	Eletrônica digital	Tensão (RMS)	16,7 V	14,2 V
		Corrente	1,01 A	33,5 mA
		Potência Ativa	11,2 W	0,22 W
	Circuito de injeção	Tensão (RMS)	33 V	26,94 V
		Corrente	2,6 A	2,16 A
		Potência Ativa	51,2 W	35,7 W
Consumo total		62,4 W	35,92 W	

Tabela 4.3: Consumo do TOP após a atualização

A análise da tabela acima permite afirmar que o consumo total do TOP obteve uma redução de 42%. Isso se deve a atualização dos componentes do equipamento. A retirada dos CI's em função da implementação de suas funcionalidades em um único microcontrolador (eletrônica digital) reduziu o consumo em 98%. No que diz respeito ao circuito de injeção, em que trocamos o antigo transistor (2N6547) pelo IGBT, a

diminuição foi de 30,27%. A perda de potência no transformador também sofreu uma redução de 10,66W para 3,6W.

Estes dados evidenciam que a atualização do circuito foi eficaz no sentido de diminuir a potência consumida pelo TOP.

5. Novos desenvolvimentos

5.1 – Fonte de alimentação

Como este trabalho concentrou-se nas funções desempenhadas pelo TOP, não realizamos nenhuma modificação no que diz respeito a sua fonte de alimentação.

No protótipo desenvolvido alimentamos a etapa de injeção em 30V apesar de o IGBT suportar uma tensão de até 600V no seu coletor. Esta característica cria a possibilidade de usar a própria alimentação da rede. Isto eliminaria o uso do transformador que além de ser pesado, ocupa espaço dentro do transmissor. No entanto seria necessário recalcular a relação de espiras do toróide para atender a especificação da amplitude da onda quadrada no neutro.

5.2 – *Driver* do IGBT

Durante a fase de pesquisa sobre o funcionamento do IGBT, diversas fontes aconselhavam a presença do *driver* para garantir a polarização correta dos transistores durante o chaveamento. Para reduzir ainda mais os custos com o TOP, é possível cogitar a retirada do *driver* do IGBT do conjunto.

A função de *shutdown* do *driver*, utilizada para impedir a injeção do sinal durante um surto de corrente, já é realizada atualmente pelo microcontrolador que interrompe a geração da onda portadora. Por isso, polarizando corretamente os IGBT's, o *driver* se torna desnecessário dentro do circuito reduzindo razoavelmente o custo final do TOP.

5.3 – Regulamentação Técnica Metrológica

Vimos na seção 2.1 que seria necessário implementar um gerador de frequências programáveis devido às exigências impostas pelo Inmetro para que o SMC operasse corretamente.

Neste trabalho, mantivemos a configuração do STC gerando uma frequência de 210Hz uma vez que o novo protocolo de comunicação entre o ROP e o TOP ainda não foi desenvolvido. Futuramente esta frequência deverá ser modificada via software para que o terminal de consulta (TCCC e/ou TCCI) seja atualizado a cada 60 segundos.

Neste caso, o TOP precisará gerar uma frequência muito maior e não poderá atender longas distâncias devido a atenuação do sinal.

Como uma estimativa inicial da frequência a ser utilizada, podemos considerar que o TOP será capaz de atender 8 consumidores a uma distância entre 20 e 30 metros. Então teremos 7,5 segundos para enviar toda a informação de consumo para o ROP. Quanto ao de números de bits a serem transmitidos, vamos considerar que o novo protocolo não excederá a maior palavra enviada no protocolo de comunicação do STC: 36 bits. Com isso temos uma taxa de aproximadamente 5 bits por segundo. No STC, com a frequência de 210Hz era possível transmitir a uma taxa de 1 bit por segundo. Isso implica que deverá gerar uma frequência de aproximadamente 1kHz.

6. Conclusão

O trabalho desenvolvido atualizou o TOP utilizando técnicas mais modernas e confiáveis. Os blocos gerador de frequência e de proteção, por exemplo, foram implementados em um microcontrolador. Isto simplificou o processo de síntese das frequências desejadas e eliminou os componentes utilizados nas etapas de comparação e temporização do sensor de sobrecorrente. Ao contrário da primeira versão do TOP, qualquer alteração necessária nesses blocos poderá ser realizada via software sem alterar o circuito. Estas modificações apresentaram uma redução de 98% do consumo relativo à eletrônica digital (tabela 4.3).

O circuito de injeção da primeira versão do TOP utilizava transistores de potência que precisavam ser polarizados com correntes de base elevadas, o que aumentava consideravelmente a demanda de potência. Com a substituição desses transistores pelo IGBT, a corrente de base foi eliminada, permitindo a redução do consumo e do espaço físico ocupado pelo transmissor. Desta forma, foi possível perceber uma redução de 30,27% no consumo do circuito de injeção (tabela 4.3). Em termos de custo, a substituição dos transistores pelo IGBT foi um pouco mais cara. No entanto, devido a sua característica de suportar tensões mais elevadas, outros custos poderão ser revistos futuramente como por exemplo, reprojetoando a fonte de alimentação, conforme sugerido na seção 5.1.

Com todos os blocos integrados e funcionando corretamente, o consumo total do TOP reduziu 42%. A atualização desenvolvida também eliminou muitos componentes utilizados na primeira versão do TOP permitindo diminuir o espaço físico ocupado pelo transmissor. Os resultados obtidos nestes trabalhos foram satisfatórios.

Bibliografia

- [1] Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, Portaria Inmetro nº371 em 28 de Setembro de 2007
- [2] Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, Portaria Inmetro nº011 em 13 de Janeiro de 2009
- [3] IEC, “Electricity Metering (a.c) Tariff and Load Control – Part 11: Particular Requirements for Electronic Ripple Control Receivers”, N.62054-11, Maio de 2004
- [4] De Souza, Fabio Cavaliere, “Sistema de Telecomando para Chaveamento de Energia Elétrica”, Tese de Mestrado - COPPE/UFRJ, Maio 1991.
- [5] Zhang, Y., Sobhani, S., Chokhawala, R., Snubber Considerations for IGBT Applications, International Rectifier Applications Engineering 233 Kansas St., El Segundo, CA, 90245 USA.
- [6] De Oliveira, S.C.G., “Proposta de Arquitetura do Demodulador Digital para o Terminal de Consulta ao Consumo Individual do Sistema de Medição Centralizada”, Projeto de fim de curso de graduação – DEL/UFRJ, Setembro de 2008
- [7] Bandim, C.J., De Souza, F.C., Alvarenga, L.M., Pinto Jr, A.V., Luiz, F.C., Alves Jr, J.E.R., Gálvez-Durand, F., Loureiro, M.R.B., Dantas, A.R. - “Sistema de Medição Centralizada em Edifícios” - Congreso Internacional de Distribucion Electrica, Cidel - Argentina, 2002
- [8] Bandim, C.J., De Souza, F.C., Alvarenga, L.M., Pinto Jr, A.V., Luiz, F.C., Alves Jr, J.E.R., Shuet, M.R., Caixão, S.A. - “Centralized Metering: Technology to aid energy distribution utilities”- III Congreso Internacional de la Región Andina IEEE, ANDESCON 2006, Quito, Equador.