

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO
DIRETORIA DE GRADUAÇÃO E EDUCAÇÃO PROFISSIONAL
ENGENHARIA ELÉTRICA

MURILLO GARCIA GENTIL

**DESENVOLVIMENTO DE HARDWARE DEDICADO PARA
MONITORAMENTO ONLINE DE MÁQUINAS ELÉTRICAS VIA TCP/IP**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2016

MURILLO GARCIA GENTIL

**DESENVOLVIMENTO DE HARDWARE DEDICADO PARA
MONITORAMENTO ONLINE DE MÁQUINAS ELÉTRICAS VIA TCP/IP**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina TCC 2, do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Alessandro Goedel
Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Favoretto Castoldi

CORNÉLIO PROCÓPIO
2016



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Murillo Garcia Gentil

Desenvolvimento de hardware dedicado para monitoramento online de máquinas elétricas via TCP/IP

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 12:30hs do dia 07/11/2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Alessandro Goedel - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Marcelo Favoretto Castoldi - (Coorientador)

Prof(a). Dr(a). Danilo Hernane Spatti - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Fábio Renan Durand - (Membro)

Dedico essa obra a minha família, que sempre me apoiou.

AGRADECIMENTOS

A Deus por estar sempre ao meu lado.

A toda minha família, em especial meu pai Claudio José Gentil, minha querida mãe Rosa Garcia de Lima Gentil, minha mãe de coração Helena de Araújo Martins, meu irmão Nathanael, minhas irmãs Maria Claudia e Mariana, minha sobrinha Maria Eduarda pelo apoio e incentivo.

À minha namorada Gabriela Vieira Jeffery, pela constante presença, paciência, compreensão e estímulo, durante todo o período da graduação.

Ao meu orientador Prof. Dr. Alessandro Goedel pelos inúmeros conselhos sobre a condução deste trabalho, sobre os ensinamentos profissional e pessoal. Pela dedicação em todos os anos como orientador de iniciação científica.

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Marcelo Favoretto Castoldi por sua orientação neste trabalho, por seus inúmeros conselhos durante as disciplinas ministradas no curso.

Ao Prof. Dr. André Sanches Fonseca Sobrinho por seus conselhos, disponibilidade, amizade e auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

Aos Prof. Dr. Wagner Godoy e Prof. Dr. Rodrigo Henrique Cunha Palácios, por suas disponibilidades, por todos os ensinamentos profissionais e pessoais, éticos e morais, pela amizade e pelos momentos de descontração.

Aos professores Clayton Luiz Graciola, Tiago Drummond Lopes, Gustavo Henrique Bazan, Paulo Bronieira Júnior, Vinicius Dário Bacon, Leonardo Bruno Campanhol, Tiago Henrique dos Santos pela amizade, ensinamentos e disposição em sempre ajudar.

Ao Murilo Cinel, Técnico de Laboratório da UTFPR-CP pela amizade desde o curso técnico, pelo auxílio neste trabalho e pela confecção das placas utilizadas neste projeto.

Aos amigos e parceiros de laboratório Engenheiro Igor Elias e futuros Engenheiros Pedro Petri Dias da Silva, Dionizio Roman, Tonicler Conti Kutz, Bruno Henrique Tangerino, Fabiano, Gustavo Vendrame pela amizade, companheirismo e colaboração no desenvolvimento deste projeto.

A todos os amigos e professores que, direta ou indiretamente, colaboraram para realização deste trabalho.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná, por disponibilizar a estrutura necessária para a conclusão deste trabalho.

Ao suporte financeiro da Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Paraná (Processo Nº 06/56093-3), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (Processo Nº 474290/2008-5, 473576/2011-2, 552269/2011-5) e bolsas de Iniciação Científica CNPq.

“Porque me fez grandes coisas o Poderoso; E santo é seu nome. E a sua misericórdia é de geração em geração sobre os que o temem.” (Lucas 1:49,50)

“E ainda que tivesse o dom da profecia, e conhecesse todos os mistérios e toda a ciência, e ainda que tivesse toda fé de maneira tal que transportasse os montes, e não tivesse amor, nada seria.” (1Cor 13, 2)

RESUMO

GENTIL, Murillo Garcia. **Desenvolvimento de hardware dedicado para monitoramento online de máquinas elétricas via TCP/IP**. 2016. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

O elemento mais utilizado para conversão eletromecânica de energia no setor industrial é o Motor de Indução Trifásico (MIT), devido às suas características já consolidadas, tais como baixo custo de aquisição e manutenção, robustez e simplicidade. Assim, a partir do monitoramento destas máquinas é possível analisar seu comportamento, estimar parâmetros e identificar falhas, podendo consequentemente realizar uma para programada e aumentar a confiabilidade e a segurança do processo.

Para realizar o monitoramento, desenvolveu-se um sistema com oito canais, sendo estes utilizados para realizar medidas de tensões e correntes trifásicas, bem como outras duas variáveis do motor de indução trifásico. Os sinais de corrente são medidos utilizando transformadores de corrente, onde em cada um deles tem-se um condicionamento de sinal, com o intuito de ajustar o valor da amplitude destes sinais a serem inseridos no microcontrolador. Já os sinais de tensão são oriundos de um transformador de potencial. Um microcontrolador Microchip modelo PIC32MX695F512H é utilizado neste trabalho, cuja função é aquisitar os sinais provenientes dos sensores através de um conversor A/D e armazená-los em uma memória RAM externa (23LCV512H). Por fim, esses dados são enviados para um transceptor (Lan8720), o qual realiza o encapsulamento e endereçamentos dos dados e os envia por meio do protocolo TCP/IP a um microcomputador.

Palavras-chave: Motores de indução Trifásico; Microcontrolador; Protocolo TCP/IP.

ABSTRACT

The most used element for electromechanical energy conversion in the industrial sector is the Three Phase Induction Motor (TIM), due to its consolidated characteristics, such as low acquisition and maintenance costs, robustness and simplicity. Thus, the monitoring of these machines makes it possible to analyze their behavior, to estimate parameters, to identify faults, in order to schedule a programmed stop increasing the process reliability and safety.

In order to carry out the monitoring, a system with eight channels was developed, which are used to measure three-phase voltages and currents, as well as two other variables of the three-phase induction motor. The current signals are measured using current transformers, where each of them has a signal conditioning, in order to adjust the value of the amplitude of these signals that will be inserted in the microcontroller. The voltage signals are derived from a potential transformer. A Microchip microcontroller PIC32MX695F512H is used in this work, whose function is to acquire the signals coming from the sensors through an A / D converter and store them in an external RAM (23LCV512H) memory. Finally, this data is sent to a transceiver (Lan8720), that encapsulates, addresses and sends it via the TCP / IP protocol to a microcomputer.

Key-words: Three-phase induction motors; Microcontroller; TCP/IP protocol

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Características do transformador de Corrente.	34
--	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Percentuais de incidência dos tipos de falhas dos motores.....	17
Figura 2. Circuito equivalente de um TC.....	21
Figura 3. Transformador de potencial.....	22
Figura 4. Diagrama em blocos do LAN 8720.....	23
Figura 5. Diagrama de um microcontrolador.....	24
Figura 6. Microcontrolador PIC32MX695F512H.....	25
Figura 7. Etapas da conversão A/D.....	27
Figura 8. Modelo de referência OSI.....	30
Figura 9. Comparativo entre modelo OSI e TCP/IP.....	33
Figura 10. Transformador de corrente ZMCT 103C.....	35
Figura 11. Esquema elétrico do condicionamento de sinais de corrente.....	36
Figura 12. Placa para leitura da corrente.....	37
Figura 13. Fonte de alimentação $\pm 15\text{ V}$	38
Figura 14. Fonte de alimentação $\pm 15\text{ V}$ implementada.....	39
Figura 15. Diagrama de blocos do hardware.....	40
Figura 16. Adaptador SMD para DIP do microcontrolador.....	41
Figura 17. Esquema elétrico da etapa de comunicação via TCP/IP.....	42
Figura 18. Esquema elétrico da fonte de $3,3\text{ V}$	42
Figura 19. Fluxograma do algoritmo desenvolvido para a aquisição dos dados e comunicação TCP/IP.....	45
Figura 20. Esquema elétrico do hardware parte 1.....	46
Figura 21. Esquema elétrico do hardware parte 2.....	47
Figura 22. Layout do hardware.....	48
Figura 23. Layout 3D do hardware no proteus 8.....	48
Figura 24. Hardware implementado.....	49
Figura 25. Protótipo final montado.....	50
Figura 26. Sinal +15V da fonte simétrica de $\pm 15\text{ V}$	51
Figura 27. Sinal +15V da fonte simétrica de $\pm 15\text{ V}$	51
Figura 28. Sinal do sensor de corrente/ Sinal condicionado.....	52
Figura 29. Sinal Contínuo da fonte de $3,3\text{ V}$	53
Figura 30. Interface para comunicação TCP/IP.....	54
Figura 31. Interface comunicando com o Kit de desenvolvimento.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS

A/D	Analógico-Digital
Ampop	Amplificador Operacional
CIPECA	Centro Integrado de Pesquisa em controle e automação
DARPA	<i>Defense Advanced Research Projects Agency</i>
DIP	<i>Dual Inline Package</i>
LSI	Laboratório de Sistemas Inteligentes
MAC	<i>Media Access Control</i>
MIT	Motor de Indução Trifásico
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISO	<i>International Standards Organization</i>
LAN	<i>Local Área Networks</i>
TC	Transformador de Corrente
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TP	Transformador de Potencial
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
SRAM	<i>Static Random Access Memory</i>
SMD	<i>Surface Mounting Device</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 JUSTIFICATIVA	16
1.2 OBJETIVOS	18
1.2.1 Objetivo geral	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	19
1.3 DISPOSIÇÃO DO TRABALHO	19
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	20
2.1.1 Motores de indução	20
2.1.2 Motores de Indução trifásicos.....	20
2.2 TRANSFORMADOR DE CORRENTE (TC)	21
2.3 TRANSFORMADOR DE POTENCIAL (TP)	22
2.4 TRANSCEPTOR LAN 8720	23
2.5 MICROCONTROLADORES.....	23
2.5.1 PIC32MX695F512H	25
2.6 MEMÓRIA 23LCV512	25
2.7 SISTEMAS DE AQUISIÇÃO DE SINAIS.....	26
2.7.1 Conversor Analógico-Digital	26
3 TRANSMISSÃO DE DADOS	29
3.1 COMUNICAÇÃO DE REDE	29
3.2 PROTOCOLO TCP/IP	32
4 METODOLOGIA	35
4.1 SENSOR DE CORRENTE	35
4.2 FONTES DE ALIMENTAÇÃO ± 15 V	38
4.4 FLUXOGRAMA DO <i>FIRMWARE</i> UTILIZADO NO <i>HARDWARE</i>	43
5 RESULTADOS OBTIDOS	46
5.1 ESQUEMA ELÉTRICO E LAYOUT DO <i>HARDWARE</i>	46
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	56

1 INTRODUÇÃO

O elemento mais utilizado para conversão eletromecânica de energia no setor industrial é o Motor de Indução Trifásico (MIT), sendo que este modelo de máquina representa cerca de 90% dos motores aplicados no setor industrial (HINITSCH, 2002). A escolha por este tipo de máquina está relacionada a sua estrutura robusta, simplicidade construtiva, baixo custo de aquisição e manutenção (SUETAKE; SILVA; GOEDEL, 2011).

De acordo com o balanço Energético Nacional apresentado pela Eletrobrás-Procel (2014), 210,10 TWh (Tera Watt-hora) são destinados às indústrias, o que representa 34,4% da energia elétrica gerada no Brasil em 2014. Em relação a aplicação do MIT em ambientes industriais, pode-se compreender que a parcela de consumo energético desta máquina é superior a 24% da geração nacional de energia elétrica (EPE, 2014). O monitoramento remoto desses motores torna-se imprescindível para acompanhar as condições de operação bem como a eficiência destas máquinas.

Assim, o monitoramento da corrente de alimentação no MIT é de suma importância, pois através da análise do espectro da corrente é possível analisar o comportamento da máquina, estimar parâmetros e identificar falhas. Em Broniera (2014), Gongora (2013), Palácios et al. (2015), Godoy et al. (2015) utiliza-se as informações contidas nos sinais de correntes para classificar falhas de estator, rotor e rolamentos. Já em Graciola (2013) os sinais de correntes são utilizados para estimar a velocidade no eixo do MIT. Os sinais de tensão foram utilizados por Gongora (2013) em complemento aos sinais de corrente para identificação de falhas em rolamentos.

Os dados relativos as máquinas elétricas em um processo produtivo podem estar à disposição dos operadores no local de funcionamento ou em uma central de operações. Assim, pode-se disponibilizar estes dados via redes de dados.

O fluxo de informações pela Internet permite que qualquer pessoa conectada nesta rede possa ter acesso a qualquer conteúdo ou informação. A capacidade de transmitir e receber dados em qualquer lugar do mundo proporcionou o emprego de sistemas de monitoramento mediante o uso da Internet, possibilitando que sistemas distantes geograficamente possam se comunicar, sem que seja necessário agregar um alto investimento para realizar essa comunicação (RANIERI, 2007).

O monitoramento e a aquisição de dados são métodos similares, pois apresentam o mesmo princípio básico de digitalização dos sinais analógicos. No princípio os sistemas de aquisição de dados (do inglês *Data Acquisition* - DAQ) eram simplesmente conversores analógico/digital (A/D) desenvolvidos em placas e conectadas a um microcomputador. No entanto, estes sistemas evoluíram de simples placas de aquisição de dados para modernos sistemas independentes e controlados por microcontrolador ou microprocessador. Com a evolução do sistema de aquisição de dados, características como portabilidade e mobilidade são fundamentais nas mais diversas aplicações, incluindo dentro de outras áreas como: geologia, medicina, aeronáutica e agricultura (TATEOKI, 2007).

Assim, neste trabalho propõe-se desenvolvimento de um *hardware* para monitoramento *online* de máquinas elétricas, utilizando um sistema de aquisição de dados conectado a um sistema de comunicação *ETHERNET* via protocolo *Transmission Control Protocol/Internet Protocol*, comumente chamado de TCP/IP.

1.1 JUSTIFICATIVA

O motor de indução trifásico é o principal elemento de conversão eletromecânica de energia devido as suas características já consolidadas como baixo custo, robustez e simplicidade na operação e manutenção. No entanto, essas máquinas podem vir a apresentar diversos tipos de falhas, sendo as mais comuns: falhas de rolamento (41% dos casos), rotor (10% dos casos) e estator (37% dos casos), como pode ser observado na Figura 1. Este fato ocorre devido a estas máquinas estarem inseridas em ambientes hostis e sujeitas a variações de temperatura, vibração excessiva, poeira e umidade, bem como serem instaladas sem o correto dimensionamento.

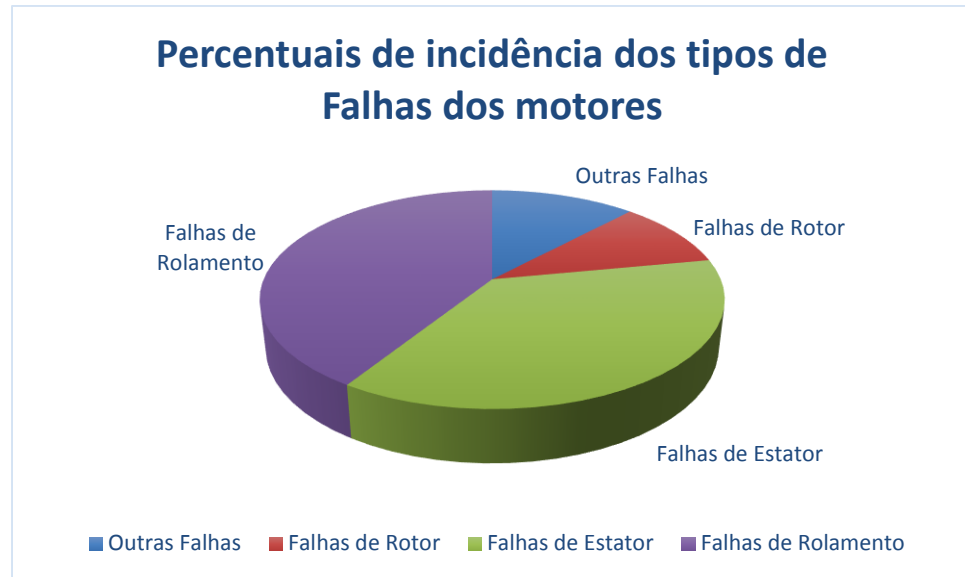


Figura 1. Percentuais de incidência dos tipos de falhas dos motores.
Fonte: Adaptado de (ZAREI, TAJEDDINI e KARIMI, 2014).

Diante deste contexto em que os motores de indução estão inseridos, o monitoramento destas máquinas se torna imprescindível para que não haja uma parada inesperada, que gera prejuízo financeiros ao setor industrial. Em Drummond et al., (2013) o monitoramento da temperatura determina em quais condições a máquina pode estar operando. No caso de condições anormais surge o sobreaquecimento que possui impacto direto na vida útil da máquina. Ou seja, quando há o monitoramento de temperatura da máquina é possível efetuar a intervenção e evitar a perda do motor.

Já em Graciola (2013), a partir do monitoramento e análise da velocidade da máquina pode-se identificar duas falhas de rotor, sendo estas falhas de barras quebradas e falhas de excentricidade no eixo. Ainda, a partir da velocidade pode se determinar a eficiência energética da máquina, bem como conhecer alguns parâmetros elétricos como a potência de saída, que pode ser obtida por meio do produto entre torque e velocidade (SAIDEL, RAMOS, ALVES, 2010).

Em motores de indução qualquer tipo de falha provoca um desequilíbrio que reflete em características tais como o torque, o fluxo do campo, e as correntes do estator, entre outros (GODOY, 2015). O trabalho de Broniera (2014) apresenta a identificação de falhas de enrolamento de estator. Para isto utilizaram-se as correntes de alimentação do MIT. Em Gongora (2013) a tensão de alimentação e a corrente da máquina é utilizada para detecção de falhas de rolamento. Desta forma, o

monitoramento da tensão e da corrente elétrica é importante para determinar em qual condição a máquina está operando.

Portanto, um sistema de monitoramento *online* no qual mede-se as correntes da máquina, processe esses dados e os envie através da rede TCP/IP é uma solução de relevância para detecção de falhas, estimativa de parâmetros e principalmente monitoramento das condições de operação da máquina. Ou seja, o desenvolvimento e implementação de um sistema microcontrolado para o monitoramento das condições de operação da máquina permitirá maior confiabilidade e segurança para o processo de tomada de decisão em relação a continuidade de processos industriais. Com isso, o mesmo permitirá realizar um estudo comparativo entre diversas metodologias apresentada na literatura para identificação de falhas, utilizando dados de uma máquina que está em operação no setor industrial com uma máquina que opera em laboratório.

Com o desenvolvimento deste *Hardware* será possível efetuar o pedido de patente no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), mediante o atendimento da Agência de Inovação da UTFPR (AGINT), pois de acordo com uma busca realizada no banco de dados do INPI não foi encontrado nenhum projeto análogo e tendo ciência do interesse de algumas empresas.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos são abordados de maneira geral e específica para melhor explanação.

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema/dispositivo para monitoramento de máquinas elétricas, utilizando um sistema microcontrolado, enviando os dados encapsulados em pacotes via protocolo TCP/IP.

1.2.2 Objetivos específicos

- Pesquisar métodos para realizar o monitoramento de máquinas elétricas;
- Projetar Esquema elétrico e Layout do *Hardware*;
- Implementar o hardware em placa de circuito impresso;
- Desenvolver algoritmo para comunicação TCP/IP;
- Testar o Hardware para monitoramento de máquinas em laboratório;
- Possibilitar o monitoramento de máquinas elétricas através dos sinais de corrente.

1.3 DISPOSIÇÃO DO TRABALHO

O capítulo inicial apresentou uma breve introdução sobre a importância do monitoramento de máquinas elétricas e a proposta a ser desenvolvida nesse trabalho.

No capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento desse trabalho.

No capítulo 3 são apresentados estudos sobre a transmissão de dados, comunicação de rede e protocolo TCP/IP necessários para realização desse trabalho.

No capítulo 4 é apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento do hardware e a explanação sobre o funcionamento do mesmo.

No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos com o desenvolvimento desse trabalho e o algoritmo utilizado para realizar a comunicação TCP/IP

No capítulo 6 são expostas as considerações finais relativas ao funcionamento do hardware, dificuldades encontradas no desenvolvimento e as propostas de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção será apresentada uma explanação teórica sobre os conceitos envolvidos no desenvolvimento do trabalho, sendo abordado as características dos componentes utilizados para o monitoramento de máquinas elétricas. O sistema é composto por sensores, condicionamentos de sinais, microcontrolador, conversão analógica/digital de dados.

2.1 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

2.1.1 Motores de indução

O motor de indução é o tipo mais utilizado nos mais diversos setores de atividade. Desta forma, o estudo de melhorias relacionadas a sua eficiência e prolongamento da vida útil traz grandes benefícios econômicos.

2.1.2 Motores de Indução trifásicos

O motor de indução é uma máquina assíncrona, onde a corrente alternada é fornecida diretamente ao estator, sendo que no rotor circula corrente por indução como em um transformador. O rotor normalmente utilizado em motores de indução é do tipo gaiola de esquilo. Neste tipo de rotor o enrolamento consiste em barras condutoras encaixadas em ranhuras no núcleo de ferro do rotor e curto-circuitadas em cada lado por anéis condutores (FITZGERALD, 2006).

O MIT tem sua alimentação feita por corrente alternada que é transmitida pelas três fases, que estão defasadas em 120° entre si, ao passo que o rotor recebe a corrente por indução. A interação entre os campos gerados por essas correntes que circulam nas bobinas do estator gera um campo eletromagnético girante em seu interior. Além de produzir esse campo, os fluxos originados pelas bobinas de estator induzem uma tensão nas bobinas do rotor, que conseqüentemente geram um campo eletromagnético contrário ao campo estator, assim, há o movimento rotacional do eixo.

2.2 TRANSFORMADOR DE CORRENTE (TC)

O transformador de corrente ideal pode ser caracterizado como um transformador no qual qualquer condição no primário é reproduzida no secundário com a mesma proporção e relação de fase. Os transformadores de corrente apresentam a impedância, vista pelo lado do enrolamento primário como desprezível quando comparadas com a do sistema ao qual está instalado, mesmo que seja considerada a carga que se liga ao seu secundário. Desta forma, a corrente que circula no primário dos transformadores de corrente é definida pelo circuito de potência (CHAVES, 2008).

Na Figura 2 é representado o circuito equivalente de um transformador de corrente real com todas as grandezas referidas ao secundário, onde:

I_1 – Valor eficaz da corrente primária;

$N = N_2/N_1$ – Relação de espiras secundárias para primárias;

$I'_1 = I_1/N$ – Corrente primária referida ao secundário;

Z_2 – Impedância do enrolamento secundário;

Z_1 – Impedância do enrolamento primário, referida ao secundário;

I_m – Corrente de magnetização ou excitação;

Z_m – Impedância de magnetização ou de excitação;

E_2 – Tensão de excitação secundária;

V_t – Tensão nos terminais do secundário (tensão na carga);

Z_c – Impedância da carga.

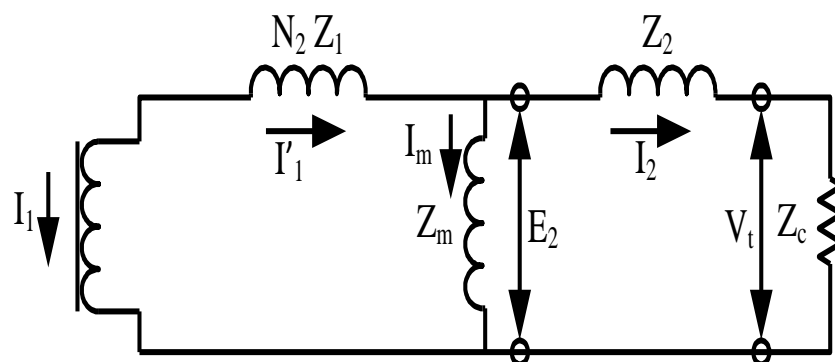


Figura 2. Circuito equivalente de um TC.

Fonte: Adaptado de (CHAVES,2008).

Do circuito equivalente, constata-se que parte da corrente primária é drenada pela impedância de excitação do núcleo: $I'_1 = I_m + I_2$. A força eletromotriz

secundária (E_2) é função da corrente de excitação (I_m), da impedância secundária (Z_2) e da carga (Z_c).

Segundo a norma NBR6856 (1992) os transformadores de corrente destinados ao serviço de medição devem ter uma boa exatidão no domínio da corrente nominal até sua corrente determinada pelo fator térmico. Eles são enquadrados nas classes de exatidão de 0,3%, 0,6% e 1,2%. Para classificar essa exatidão são levados em consideração os erros de relação e fase levantados em ensaios (CHAVES, 2008).

Os transformadores de corrente são frequentemente utilizados como sensores para medição de corrente elétrica e também para proteção, pois estes apresentam um baixo custo e uma resposta em frequência satisfatória (CHAVES, 2008).

2.3 TRANSFORMADOR DE POTENCIAL (TP)

Os Transformadores de Potencial (TP) são elementos sensores destinados a atuar em equipamentos de controle, medição e proteção. Estes consistem em dois ou mais enrolamentos interligados por um campo magnético mútuo, sendo o primário de alta tensão e o secundário de baixa tensão. No entanto, sua potência nominal é muito baixa, desta forma este fornece apenas uma amostra da tensão do sistema de potência aos instrumentos que o monitoram. Devido sua característica principal de amostrar o sinal, o TP deve apresentar uma boa de exatidão para que não haja a distorção dos valores de tensão (CHAPMAN, 2013).

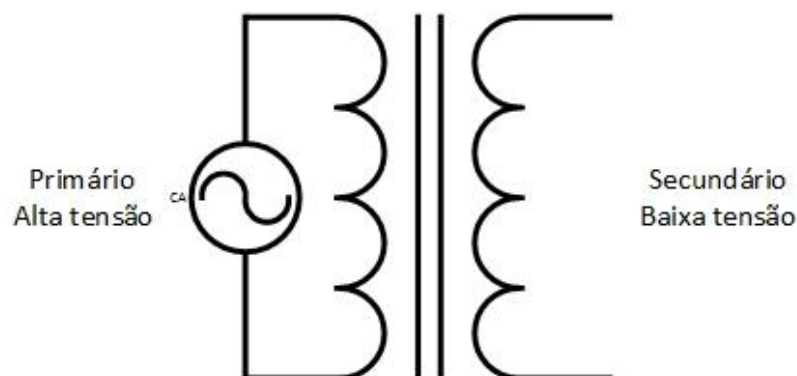


Figura 3. Transformador de potencial.
Fonte: Autoria própria.

2.4 TRANSCEPTOR LAN 8720

O LAN 8720 é um transceptor de camada física 10BASE-T / 100BASE-TX, de baixa potência, com variável de entrada e saída tensão compatível com os padrões IEEE 802.3-2005.

O transceptor suporta comunicação com um MAC *Ethernet* via RMI padrão, é um dispositivo *Full-duplex* que suporta uma velocidade de comunicação de 10 Mbps e 100 Mbps. A utilização deste componente determina automaticamente a melhor velocidade e o modo de funcionamento duplex. De acordo com o padrão IEEE, todos os pinos de conexão suportam uma tensão de 3,6 V. Este dispositivo deverá se conectar a um microcontrolador e a um conector RJ 45 para realizar a comunicação com a Internet. A Figura 4 apresenta o diagrama em blocos do funcionamento do LAN 8720, na maioria dos casos o bloco do transformador encontra-se integrado ao RJ 45 (MANUAL LAN8720).

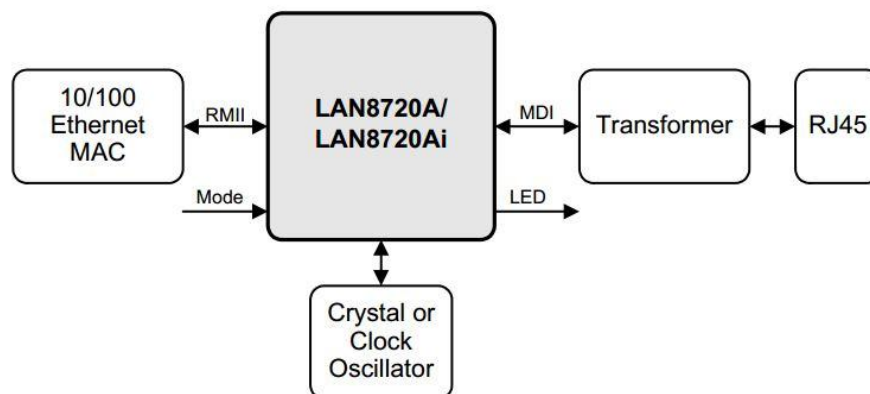


Figura 4. Diagrama em blocos do LAN 8720

Fonte: Manual do componente.

2.5 MICROCONTROLADORES

O microcontrolador é um dispositivo que contém um sistema computacional completo inserido em um único circuito integrado. Possui CPU (*Central Processing Unit*), memória de dados RAM (*Random Access Memory*) e de programa ROM (*Read Only Memory*) para manipulação de dados e armazenamento de instruções, sistema de *clock* para dar sequência às atividades da CPU, portas de entrada/saída (I/O), além de outros possíveis periféricos tais como, módulos de temporização, conversor analógico digital e até mesmo os mais avançados conversores USB (*Universal Serial Bus*) e *ETHERNET* (MIYADAIRA, 2011).

Os microcontroladores apresentam duas principais arquiteturas sendo elas Harvard e Von-Neumann. A primeira é composta por um barramento para acesso a memória de programa e um barramento para a memória de dados, onde está se faz eficaz devido ao aumento do fluxo de dados. A arquitetura Von-Neumann apresenta um único barramento para memórias de dados e programa. (MIYADAIRA, 2011). A Figura 5 apresenta o diagrama de um microcontrolador com arquitetura Harvard.

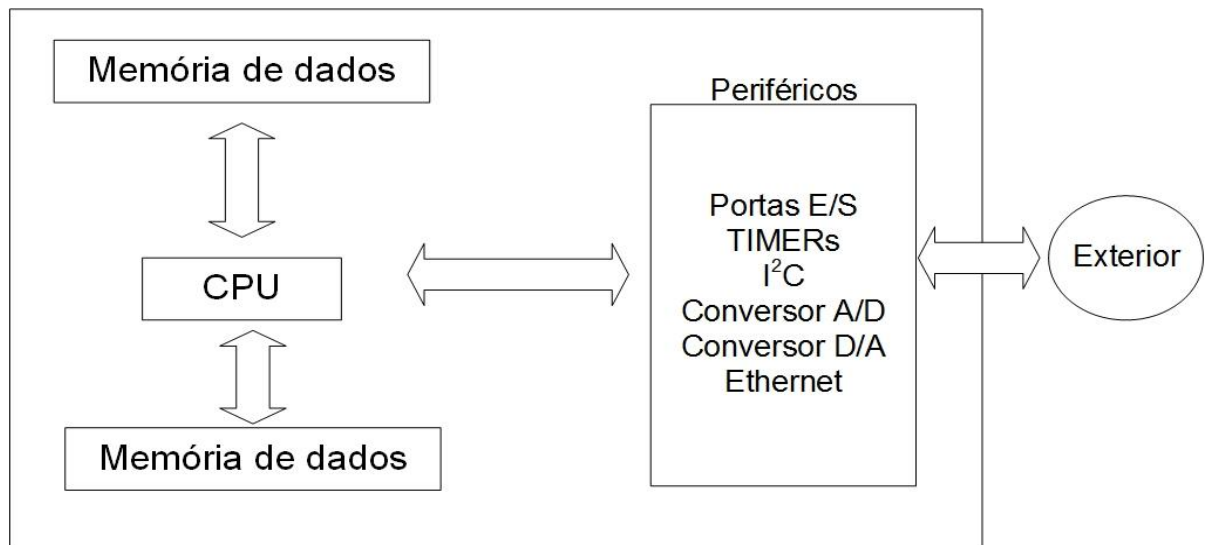


Figura 5. Diagrama de um microcontrolador
Fonte: adaptado de (MYADAIRA,2011).

O diagrama da Figura 5 apresenta o periférico ethernet, este não é usual na maioria dos microcontroladores, pois o mesmo é utilizado para aplicações específica envolvendo protocolo de redes de computador.

Uma característica importante dos microcontroladores refere-se a velocidade de processamento, sendo está relacionado com a frequência de *clock*. Quanto maior a frequência de operação do microcontrolador maior será a capacidade de processamento. Alguns métodos são utilizados para gerar a frequência de *clock*, tais como, a utilização do oscilador interno circuito RC e oscilador externo cristal de quartzo ou ressonador.

Os osciladores internos do tipo RC são utilizados em aplicações no qual não há necessidade de precisão do clock. Já os osciladores externos do tipo cristal de quartz são os mais utilizados devido a confiança de precisão (MIYADAIRA, 2011).

2.5.1 PIC32MX695F512H

O microcontrolador modelo PIC32MX695F512H utilizado neste projeto é fabricado pela empresa *Microchip Technology Incorporated* e possui uma unidade de processamento de 32 bits e pode operar com frequência de até 80 MHz. Outras características são 512 kB de memória Flash, 128 kB de memória RAM, 53 pinos de I/O, 16 conversores A/D de 10 bits e 3 canais para comunicação SPI. No entanto, para que o microcontrolador possa operar a sua tensão de alimentação deve estar na faixa de 2,3 V à 3,6V e a temperatura deve estar entre -40 °C à 105 °C.

Este microcontrolador detém de uma interface para controle de acesso *ethernet* de 10/100 Mbps, módulo de calendário e relógio em tempo real, timer, interfaces de comunicação serial síncronas e assíncronas. Este microcontrolador possui um encapsulamento *Surface Mounting Device* (SMD) de 64 pinos de acordo com a Figura 6.



Figura 6. Microcontrolador PIC32MX695F512H
Fonte: Microchip.

Para que se possa estabelecer uma comunicação física *ETHERNET* com este micro é necessário utilizar o periférico MAC juntamente com um transceiver Lan 8720 (PHY), um transformador de acoplamento e um conector RJ 45.

2.6 MEMÓRIA 23LCV512

A memória 23LCV512H pertence à família SRAM da Microchip, a tecnologia utilizada nestas memórias dispensa a atualização constante dos *bytes* e com isto os dados não são perdidos, ao menos que haja o desligamento da

alimentação. Outra característica relevante está em não possuir limite de gravação como acontece nas memórias EEPROM, e trabalhar com altas frequência de *clock*.

O protocolo de comunicação utilizado é o SPI (*Serial Peripheral Interface*), este necessita de uma alimentação entre 2,5 V a 5,5 V e uma corrente de 33 mA para operar corretamente. Devido ao fato desta memória ser volátil, ou seja, quando ocorre a falta de energia os dados armazenados são perdidos, no entanto este dispõe de um pino auxiliar para a conexão de uma bateria externa, assim evitando a perda dos dados armazenados.

2.7 SISTEMAS DE AQUISIÇÃO DE SINAIS

O sistema de aquisição de dados tem a função de receber os sinais analógicos vindo dos sensores e transformar em sinais digitais, este sistema de aquisição é formado por sensores, filtros, amplificadores e conversor A/D. A utilização destes componentes se faz necessário devido os sistemas digitais operarem com baixas tensões (BALBINOT e BRUSAMARELLO, 2011). Quando se trabalha com sinal digital há uma maior facilidade em realizar operações, manipulações e transformações matemáticas.

2.7.1 Conversor Analógico-Digital

Os sinais analógicos se apresentam-se como sendo a grande maioria entre os sinais encontrados em todo lugar. No entanto, os sinais processado por computadores, sistemas embarcados e entre outros sistemas que realizam algum tipo de processamento são sinais digitais, com isso surgiu a necessidade de implantação dos conversores A/D.

A conversão analógico-digital (A/D) é simplesmente a representação dos sinais analógicos no mundo digital. Desta forma é possível utilizar os dados extraídos do mundo real para cálculos ou operar seus valores. Em geral, o conversor A/D está presente internamente nos processadores, controladores de sinais digitais e alguns microcontroladores, no entanto existem circuitos integrados dedicados a este fim (OLIVEIRA e ANDRADE, 2006).

Quando se deseja realizar a conversão dos sinais analógicos para sinais digitais, primeiro é necessário convertê-los em forma digital, ou seja, convertê-los em uma sequência de números com precisão finita. A conversão A/D pode ser dividido em três etapas: amostragem, a quantização e a qualificação como ilustrado na Figura 7 (PROAKIS e MANOLAKIS, 1996).

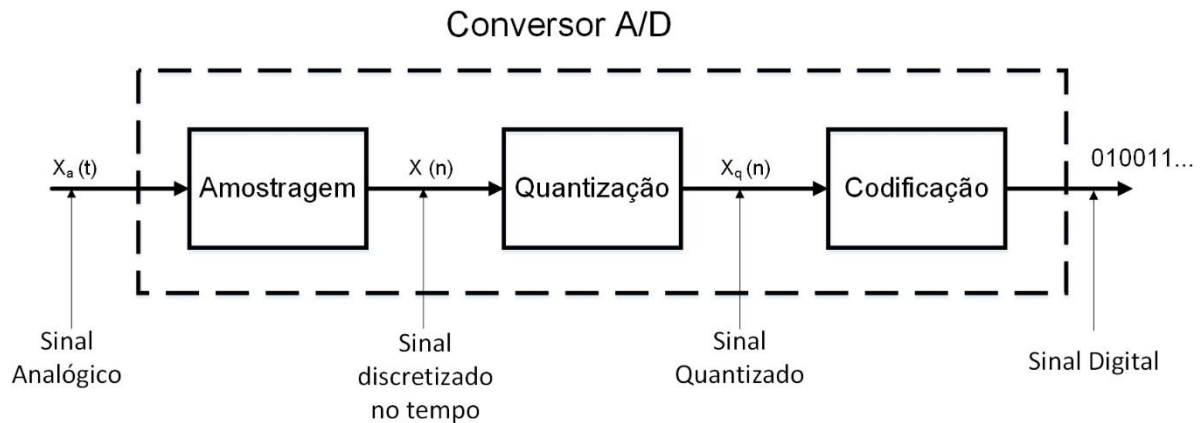


Figura 7. Etapas da conversão A/D
Fonte: adaptado de (PROAKIS e MANOLAKIS, 1996).

O processo de amostragem consiste na conversão de um sinal contínuo no domínio do tempo em um sinal discreto, que é obtido tomando-se amostras do sinal contínuo com uma frequência determinada. A quantização ocorre quando cada valor da amostra obtida do sinal contínuo no tempo recebe um valor finito quando comparado com um valor de referência. Já a codificação ocorre quando cada valor quantizado é representado por uma sequência binária (PROAKIS e MANOLAKIS, 1996).

Os conversores A/D assim como outros instrumentos de medição estão sujeitos a erros intrínsecos devido a suas construções, no entanto na conversão analógica para digital o erro mais comum é denominado erro de quantização. Este erro sucede quando a resolução do conversor A/D é muito alta para o valor que se deseja medir. Este erro pode ser amenizado utilizando-se um conversor A/D que contenha um número de bits adequado as características do sinal. Como se pode observar na Equação (1), a resolução do conversor é inversamente proporcional ao número de bits, por isso quanto maior for o número de bits, maior será a sensibilidade do conversor (OLIVEIRA e ANDRADE, 2006).

$$resolução = \frac{V_{REF}}{2^N - 1} \quad (1)$$

Onde V_{REF} é a tensão de referência do conversor A/D e N é o número de bits do mesmo.

Uma outra característica que deve-se levar em consideração e que pode vir a ocasionar erros na medição quando se utiliza a conversão analógica para digital é o tempo de conversão, t_c . Este é o tempo que o conversor demora para realizar a conversão do valor analógico para o valor digital. Para que este erro não influencie as medidas, deve-se consultar o manual do conversor para determinar o tempo mínimo de conversão, pois este varia com a construção dos conversores (TOCCI, WIDMER E MOSS, 2011).

Para que o sinal analógico seja bem representado, as amostras devem ser tomadas de maneira que seja possível a reconstrução de um sinal análogo ao original. Com isso, é importante conhecer algumas características prévias do sinal analisado. A condição que assegura que as amostras convertidas representam bem o sinal original, acontece quando a frequência de amostragem F_s , possui o valor de duas vezes ou mais o favor da frequência máxima, $F_{m\acute{a}x}$, contida no sinal, ou seja:

$$F_s > 2F_{m\acute{a}x} \quad (2)$$

Sendo assim, F_s , é conhecida como taxa de Nyquist (OLIVEIRA e ANDRADE, 2006).

3 TRANSMISSÃO DE DADOS

A partir da conversão analógica para digital do sinal, a próxima etapa consiste na transmissão desses dados para um computador. Para realizar esta etapa serão apresentados neste capítulo conceitos teóricos sobre rede de computadores e protocolo TCP/IP.

3.1 COMUNICAÇÃO DE REDE

A comunicação de rede tornou-se parte fundamental em vários sistemas nos dias atuais, essas redes apresentam uma abrangência mundial e reúnem dados sobre assuntos diversificados, como: condições atmosférica, bolsas de valores, sistemas bancários e muitos outros. No meio científico as comunicações de redes são essenciais, pois este permite a interação de pesquisadores, possibilitando que enviem programas e dados a supercomputadores remotos para processamento e troca de informações em tempo real. Ou seja, as redes apresentam extrema relevância e possuem altos investimentos para que sejam difundida e desenvolvidas ainda mais (COMER, 2006).

Para que haja a comunicação dos dispositivos conectados na rede é necessário que todos utilizem a mesma linguagem, sendo que neste caso as linguagens são chamadas de protocolos. O protocolo é um conjunto de regras cuja função está em controlar o formato, o significado dos pacotes e mensagens que são trocadas entre setores de uma camada (TORRES,2006).

Em geral, os protocolos são organizados como camada empilhadas, cujo objetivo de cada camada está em realizar determinada tarefa pré-estabelecida e que poderá ser solicitadas pelas camadas superiores e inferiores. Outro fator importante é que existe uma interface entre as camadas que define os serviços e operações que a camada inferior tem a oferecer à camada que está localizada acima dela (TANENBAUM e WETHERALL, 2011).

Quando as redes de computadores surgiram no início na década de 60, as soluções em grande parte das vezes eram proprietárias, ou seja, a tecnologia era suporta somente por equipamentos do mesmo fabricante, com isso cada fabricante era responsável por criar todos os componentes do sistema de comunicação. Devido a importância das redes, um alto investimento e conseqüentemente a grande

expansão se tornou um empecilho, pois em alguns casos não era possível compatibilidade entre os componentes devido seus diferentes protocolos. Com intuito de resolver este problema, a ISO (*International Standards Organization*) estabeleceu um modelo de referência sendo este chamado OSI (*Open System Interconnection*) para que os fabricantes pudessem adota-lo e conseqüentemente padronizar a comunicação (TORRES, 2001).

O modelo OSI é composto por sete camadas de protocolo, e estão agrupadas de acordo com a Figura 8.

Camada	Funcionalidade
7	Aplicação
6	Apresentação
5	Sessão
4	Transporte
3	Rede
2	Enlace de dados (interface de hardware)
1	Conexão física do hardware

Figura 8. Modelo de referência OSI
Fonte: Adaptado de Comer (2006).

A seguir será descrito qual a função de cada camada de acordo com Torres (2001) e Tanenbaum e Wetherall (2011):

- Camada 7 – Aplicação: nesta camada realiza-se a interface entre o protocolo de comunicação e o aplicativo que pediu ou receberá a informação através da rede. Ou seja, quando se deseja baixar o seu e-mail com seu aplicativo de e-mail, ele solicitará para camada de aplicação do protocolo de rede efetuando este pedido.
- Camada 6 – Apresentação: esta camada tem a função de converter o formato dos dados recebidos pela camada de aplicação em um formato comum a ser usado na transmissão e para entendimento das máquinas. Normalmente

esses dados são convertidos de mais alto nível para mais baixo nível. Esta etapa pode também realizar a compressão de dados e criptografia.

- Camada 5 – Sessão: a função desta camada é permitir que duas aplicações em computadores diferentes estabeleçam uma sessão de comunicação. Ou seja, esta camada realiza o controle de diálogo e gerência quando um computador pode transmitir ou receber os dados. Esta camada também está encarregada de manter o sincronismo de comunicação entre as máquinas e se por acaso a rede vir a falhar, a transmissão é retomada a partir do último pacote enviado de acordo com a última marcação recebida pelo computador receptor.
- Camada 4 – Transporte: esta camada recebe os dados transmitido pela camada de sessão e os divide em pacotes que serão transmitidos pela rede, ou seja, que será enviado para a camada de rede. Porém quando se trata do receptor, a camada de transporte tem a função de receber os pacotes da camada de Rede e remontar o dado original para enviá-lo à camada de Sessão.
- Camada 3- Rede: nesta camada que ocorre o endereçamento dos pacotes, para tal converte-se endereços lógicos em endereços físicos, de forma que os pacotes consigam chegar corretamente ao destino. Essa camada também determina a rota que os pacotes irão seguir para atingir o destino, baseada em fatores como condições de tráfego da rede e prioridades.
- Camada 2 – Enlace: a função desta camada consiste em juntar os pacotes de dados recebidos da camada de Rede e transformá-los em quadros que serão trafegados pela rede, adicionando informações como o endereço da placa de rede de origem, o endereço da placa de rede de destino, dados de controle e os dados em si.
- Camada 1- Física: a camada Física agrupa os quadros enviados pela camada de Enlace de dados e os transforma em sinais compatíveis com o meio onde os dados deverão ser transmitidos. Os sinais mais comuns utilizados nesta

camada são sinais elétricos que são usados para representar o nível lógico dos bits. Esta camada tem a função de definir se a transmissão será full-duplex, qual o tempo que estes sinais devem durar para validar um nível lógico e quantos pinos o conector de rede terá.

Neste modelo todas as camadas apresentam um fluxo de dados bidirecional, ou seja, todas as ações que estas realizarem como transmissoras, realizarão o contrário quando como receptoras (TORRES, 2001).

3.2 PROTOCOLO TCP/IP

Com o aumento da importância e o potencial da tecnologia de interligação de redes, o governo norte-americano vem financiando diversas pesquisas em redes de comunicação, fato que possibilitou a conexão das redes em todo o mundo. A *Advanced Research Projects Agency* (ARPA) foi quem financiou a pesquisa, que resultou na criação de um conjunto de padrões de redes que especificam os detalhes do sistema que faz com que os computadores se comuniquem. Diante deste contexto que surgiu o protocolo TCP/IP, sendo este o nome dado ao resultado da pesquisa (COMER, 2006).

O protocolo TCP/IP foi desenvolvido para realizar a conexão de várias redes em diversas localidades, no entanto quando foi elaborada um dos requisitos era de que as conexões entre as máquinas de origem e destinos se mantivessem mesmo se houvesse algum dano no hardware ou nas linhas de transmissão. As suas funcionalidades eram realizar desde a transferência de arquivos até a transmissão de dados de voz em tempo real, apresentando assim um sistema flexível (TANEBAUM e WETHERALL, 2011).

O modelo de protocolo TCP/IP apresenta muitas similaridades com o modelo OSI, ambos se baseiam no conceito de uma pilha de protocolos independentes. A Figura 9 apresenta um comparativo entre modelo TCP/IP composto por 4 camadas o modelo OSI.

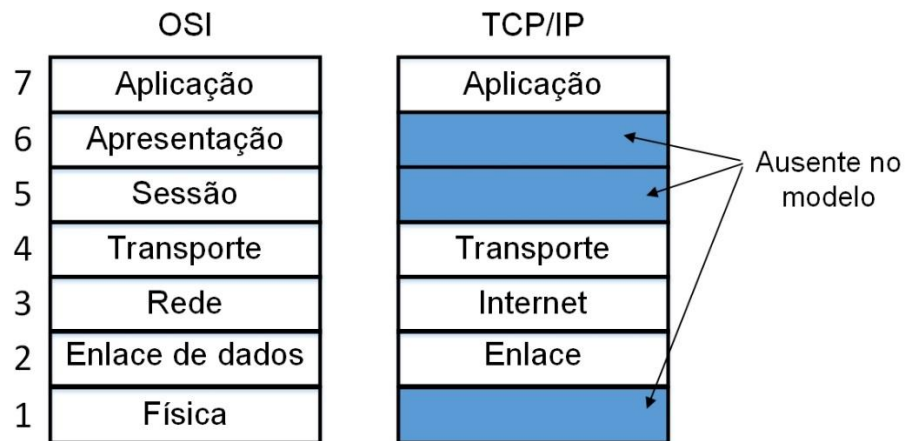


Figura 9. Comparativo entre modelo OSI e TCP/IP
 Fonte: Adaptado de Tanenbaum e Wetherall (2011).

A seguir será apresentado a função de cada camada do modelo TCP/IP de acordo com Tanenbaum e Wetherall (2011):

- Camada 7- Aplicação: esta camada contém os protocolos de nível mais elevado. Nesta etapa utiliza-se um protocolo para cada tipo de aplicação, como por exemplo quando se deseja transferir arquivos o protocolo utilizado é o *File Transfer Protocol (FTP)*.
- Camada 4 - Transporte: o objetivo desta camada está em permitir que os *hosts* de origem e destino mantenham uma conversação. Nesta camada definiu-se o protocolo de controle de transmissão (TCP) como sendo o protocolo que permite a entrega de um fluxo de *bytes* sem erro e uma conexão confiável.
- Camada 3 - Internet: esta se encarrega de integrar toda a arquitetura, mantendo-a unida. No entanto, sua função consiste em possibilitar que os dispositivos enviem pacotes em qualquer rede e assegurar que eles trafeguem livremente até o destino.
- Camada 2 - Enlace: Por ser a camada mais inferior no modelo, esta descreve como as linhas seriais e *ETHERNET* devem cumprir os requisitos desta camada de interconexão com serviços não orientados a conexões. Desta forma, esta não é uma camada propriamente dita, mas uma interface entre hosts e os enlaces de transmissão.

O modelo apresentado utiliza frequentemente os protocolos TCP e IP, por isso recebeu o nome de TCP/IP, no entanto dependendo da aplicação outros protocolos podem ser utilizados nesta mesma estrutura.

4 METODOLOGIA

Nesta seção são apresentados os materiais, metodologia e sistemas utilizados e desenvolvidos na elaboração deste trabalho.

4.1 SENSOR DE CORRENTE

Os sensores de corrente utilizados para medir a corrente em máquinas elétricas necessitam atender alguns requisitos, como: boa resposta em frequência, linearidade de ganhos e uma resolução satisfatória. Caso os sensores não possuam esses requisitos, o sinal de corrente aquisitionado perderá algumas de suas características.

Logo, neste trabalho utilizou-se o transformador de corrente (TC) do tipo janela modelo ZMCT103C, o qual é apresentado na Figura 10. Optou-se por este TC pois sua corrente máxima é de 20 A no primário, sendo assim possível medir as correntes dos motores de indução de 1cv e 2 cv. O secundário do TC resulta em uma corrente de 20 mA e uma resposta em tensão conforme a Equação 3.

$$V_t = R * I_2 / 1000 \quad (3)$$

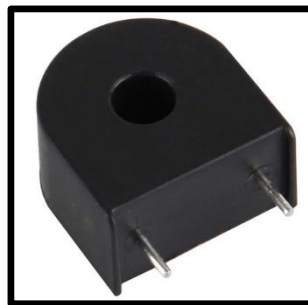


Figura 10. Transformador de corrente ZMCT 103C
Fonte: Autoria própria.

Onde:

V_t é a tensão proporcional a corrente que circula pelo transformador de corrente.

I_2 é a corrente que passa pelo TC.

R é a resistência utilizada para converter o sinal de corrente em um sinal de tensão.

O Quadro 1 apresenta algumas especificações do transformador de corrente ZMCT 103C.

Modelo	ZMCT103C (classe A)
Corrente Primário	20A
Corrente Secundário	20mA
Relação de Espira	1000 : 1
Tensão de Isolação	4500V
Aplicação	Medição de Corrente e Potencia
Encapsulamento	Epóxi
Temperatura de Operação	-40~+70° C

Quadro 1 – Características do transformador de corrente

A corrente no primário do TC é condicionada para adequar o nível de tensão utilizado pelo microcontrolador. Para realizar esse condicionamento dos sinais utiliza-se a placa desenvolvida no Laboratório de Sistemas Inteligentes (LSI). A Figura 11 apresenta o esquema elétrico do condicionamento de sinais utilizando Amplificadores operacionais TL084, resistores e diodos.

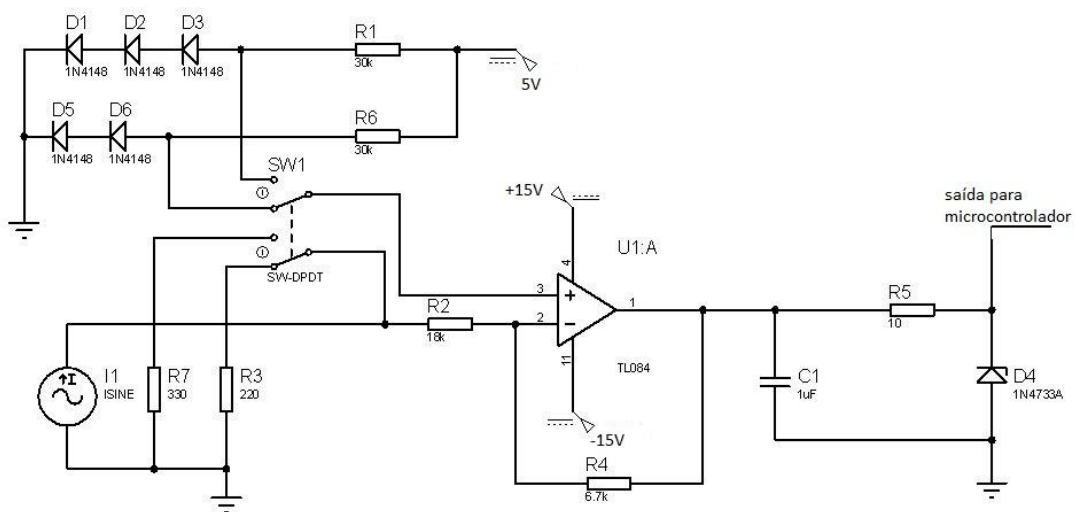


Figura 11. Esquema elétrico do condicionamento de sinais de corrente
Fonte: Autoria própria.

A seguir a Figura 12 apresenta a placa utilizada para realizar a medição da corrente e o condicionamento de sinais.

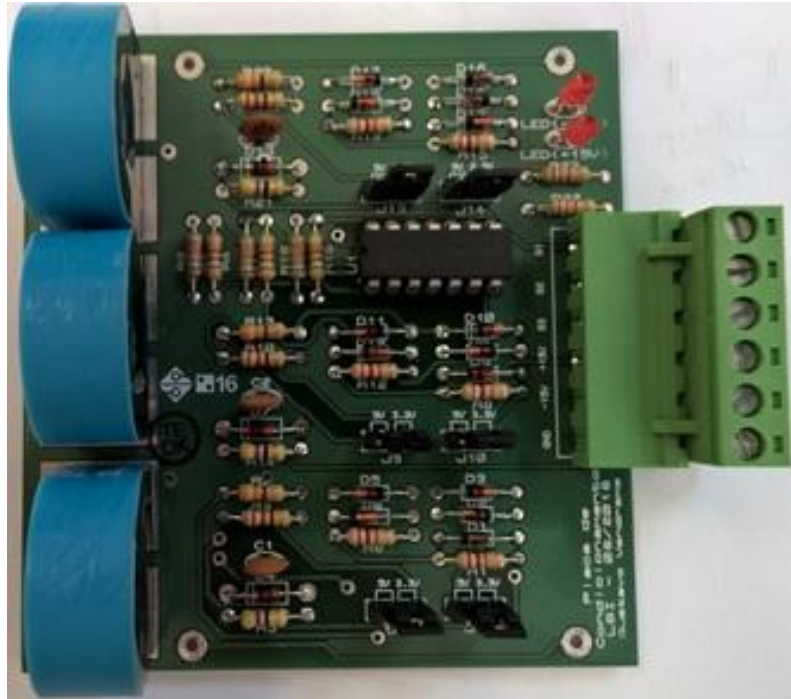


Figura 12. Placa para leitura da corrente
Fonte: Autoria própria.

A seguir tem-se algumas características do condicionamento de sinais:

- Entrada trifásica;
- Corrente de entrada alternada com pico máximo de 20 A;
- Dois níveis de tensão de saída:
 - 0 V a 5 V;
 - 0 V a 3,3 V;
- Alimentação +15 V e -15 V;

Como apresentado anteriormente, esta placa dispõem de dois níveis tensão de saída, podendo estes serem comutados mudando os jumper na placa, esta característica proporciona a utilização desta placa tanto para um dispositivo que operem com tensão de 0 à 5 V quanto para dispositivos que operem com tensão de 0 à 3,3 V. Esta placa garante que os sinais sejam todos positivos, evitando assim a queima da porta analógica/digital do microcontrolador.

4.2 FONTES DE ALIMENTAÇÃO ± 15 V

A placa de condicionamento é alimentada por uma fonte simétrica de ± 15 V. A Figura 13 é mostrado o Layout da fonte, onde pode-se observar a entrada da tensão 15 V alternada vinda do secundário do transformador nos terminais AC1 e AC2 e a saída do sinal contínuo de +15 V e -15 V.

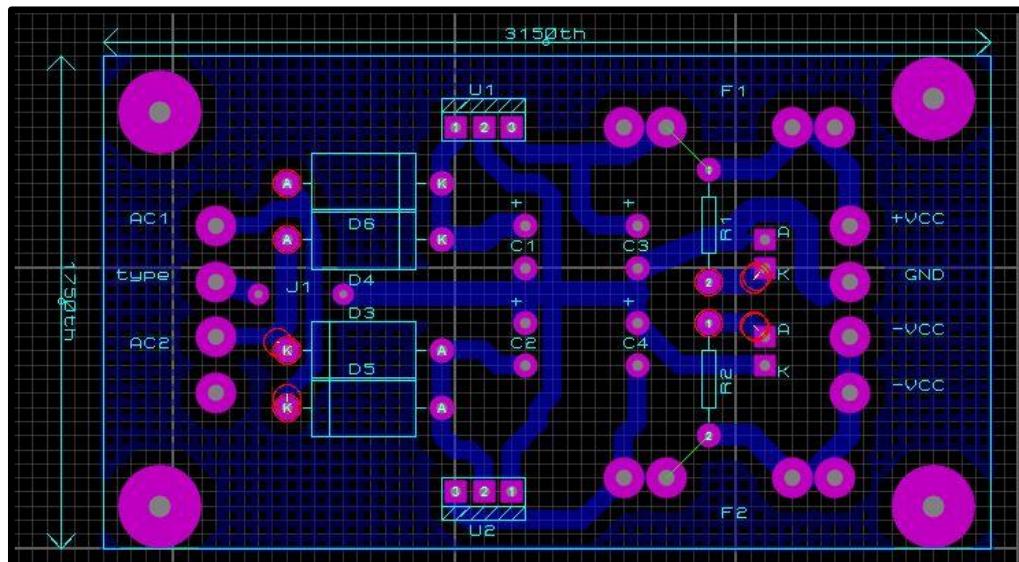


Figura 13. Fonte de alimentação ± 15 V
Fonte: Autoria própria.

Os componentes utilizados para implementar a placa são:

- Um transformador 15 + 15 V / 1A;
- Quatro diodos 1N4007;
- Dois capacitores eletrolítico de 1000 μ F;
- Um capacitor eletrolítico de 470 μ F;
- Um capacitor de tântalo de 100 μ F;
- Um Regulador de tensão LM7815;
- Um Regulador de tensão LM7915;
- Dois resistores de 10 K Ω ;
- Dois LED.

A Figura 14 apresenta a placa com os componentes soldados e funcionando corretamente.

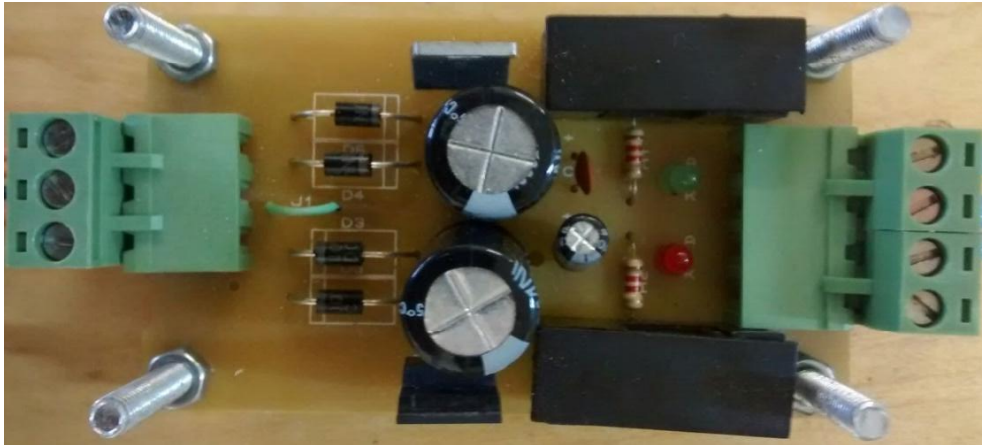


Figura 14. Fonte de alimentação ± 15 V implementada.
Fonte: Autoria própria.

4.3 DESENVOLVIMENTO DO MODULO DE PROCESSAMENTO

Este *Hardware* tem como finalidade efetuar a leitura das três correntes da alimentação da máquina, converter esses sinais analógicos em sinais digitais por meio de um conversor A/D, em seguida armazenar esses dados afim de enviar via TCP/IP para um computador. Para tal, a solução encontrada para desempenhar todas essas funções foi a utilização de um microcontrolador. No entanto, há uma gama de microcontroladores disponíveis no mercado, por conta disso houve a necessidade de realizar uma pesquisa levando em consideração característica, como: fabricantes, resolução, velocidade de processamento, modelo, disponibilidade de compra e aplicabilidade. Após ponderação das características em questão, optou-se em utilizar um microcontrolador do fabricante Microchip.

Atualmente a Microchip disponibiliza duas soluções para atender as necessidades deste projeto, a primeira consiste em se utilizar um microcontrolador da família PIC18 junto com um módulo *Ethernet* externo ENC 28J60. A segunda opção compreende na utilização de um microcontrolador da família PIC32 que dispõe de um módulo ethernet interno, resultando em uma maior velocidade de comunicação, hardware reduzido e um menor custo de implementação quando comparado com a primeira opção. Portanto, conclui-se que a melhor opção é a utilização do microcontrolador da família PIC32, portanto o PIC32MX695F512H é o micro utilizado neste projeto.

Com a definição do elemento de processamento, a Figura 15 apresenta o diagrama de blocos do *Hardware*, onde pode-se observar a conexão dos módulos de condicionamento de sinais, processamento e transmissão.

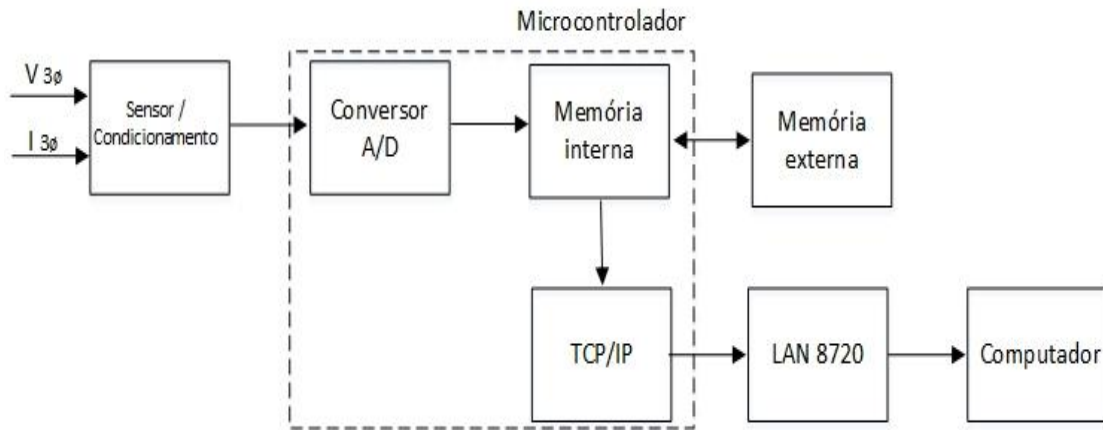


Figura 15. Diagrama de blocos do hardware
Fonte: Autoria própria.

Para explicar o desenvolvimento do *Hardware* bem como o seu funcionamento, dividiu-se em quatro etapas leitura, condicionamento de sinais, processamento e transmissão. Estas etapas são apresentadas a seguir:

- **Leitura:** a primeira parte do circuito é a leitura das três correntes de linha. Nesta etapa são utilizados três transformadores de corrente como apresentado anteriormente.
- **Condicionamento de sinais:** após a leitura dos sinais de corrente, estes são condicionados para fornecer o valor da tensão proporcional ao nível de tensão adequado para o microcontrolador. O *Hardware* responsável pela realização desta etapa está acoplado junto aos sensores.
- **Processamento:** A partir dos sinais condicionados, esses dados são lidos pelo microcontrolador PIC 32MX695F512H por meio do conversor analógico/digital (AD) e armazenados em sua memória interna. No entanto, devido à baixa capacidade de armazenamento da memória interna do microcontrolador se faz necessário a utilização de uma memória externa. Com isso, optou-se por uma memória RAM 23LCV512 da Microchip devido ao fato de ser um sistema de aquisição de dados, ou seja, a todo momento novos dados deverão ser gravados e esta não possui um limite de gravação. No entanto, sua limitação está relacionada com a perda de dados caso ocorra a ausência de energia elétrica.

O microcontrolador utilizado neste projeto possui um encapsulamento *Surface Mounting Device* (SMD), ou seja, este componente só pode ser conectado na superfície da placa, no entanto este encapsulamento dificulta soldagem, diante deste fato utilizou-se um adaptador que tem a função de converter o encapsulamento SMD para *Dual Inline Package* (DIP), o encapsulamento DIP conecta o componente na parte superior da placa e solda-o na parte inferior, com isso há maior facilidade para a soldagem, manutenção e substituição do componente. A Figura 16 mostra o PIC32MX69F512H soldado no adaptador.



Figura 16. Adaptador SMD para DIP do microcontrolador
Fonte: Autoria própria.

- **Transmissão:** Com os dados armazenados na memória externa, o microcontrolador tem a função de endereçar esses dados de acordo com o protocolo de comunicação TCP/IP e transmitir utilizando periférico *ethernet* para o *transceiver* LAN 8720. Este último tem a função de converter as informações vindo do microcontrolador para as camadas de internet, realizar a conexão física com o RJ 45 e assim enviar essas informações para um computador. Nesta aplicação o RJ 45 possui internamente transformador para acoplamento. A Figura 17 apresenta o esquema elétrico do *Hardware* responsável pela etapa de comunicação TCP/IP, pode-se observar como foi realizada a conexão do LAN8720 com o microcontrolador e com o RJ 45.

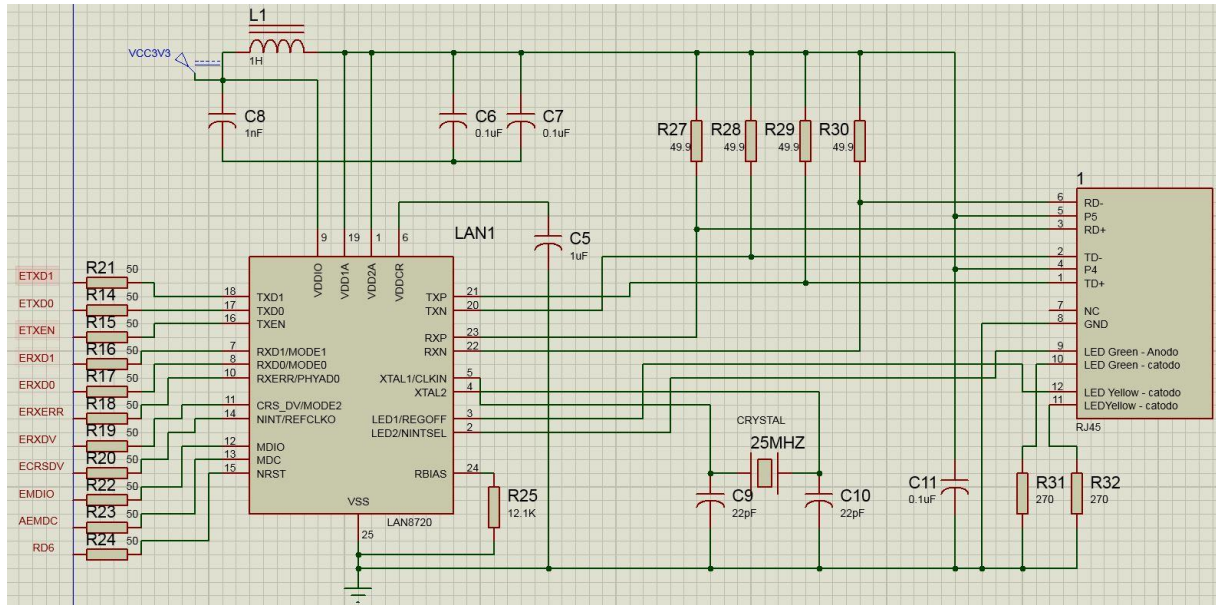


Figura 17. Esquema elétrico da etapa de comunicação via TCP/IP
Fonte: Autoria própria.

Por fim, devido ao fato do microcontrolador e o transceptor LAN 8720 operar em uma faixa de tensão de 2,6 V até 3,6 V, desenvolveu-se uma fonte de 3,3 V utilizando um transformador de 3,3 V, sendo que este fornece uma tensão de 4,66 V de pico. Para realizar a retificação do sinal utilizou-se um retificador de onda completa composto por dois diodos 1N4007, um capacitor de filtro de 1000 uF/35 V e um diodo zener de 3,3 V para fixar um valor de tensão na saída. Dessa forma obteve-se uma tensão contínua de 3,3 V. A Figura 18 exibe o esquema elétrico da fonte de 3,3 V.

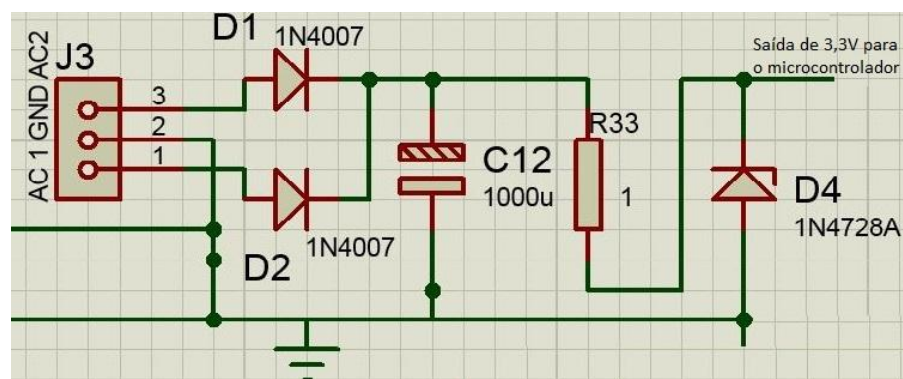


Figura 18. Esquema elétrico da fonte de 3,3 V
Fonte: Autoria própria.

Desta forma foi possível desenvolver o *Hardware* cuja a função é realizar a leituras das variáveis da máquina de indução e enviá-la via protocolo TCP/IP.

A seguir tem-se a lista de componentes utilizados para a implementação do *Hardware*:

Um transformador 3 V + 3 V / 300 mA;

- Dois diodos 1N4007;
- Um capacitor eletrolítico de 1000 uF;
- Um conector Ethernet RJ 45;
- Um Transceptor LAN 8720
- Um microcontrolador PIC32MX695F512H;
- Uma memória 23LCV512;
- Um cristal caneca 20MHz;
- Um cristal caneca 25MHz;
- Dois LED 1,5mm;
- Quatro capacitores de 22 pF;
- Dez Resistores de 100 Ω ;
- Cinco Resistores de 49.9 Ω ;
- Dez resistores de 50 Ω ;
- Um diodo zener de 3,3 V;
- Dez capacitores de 100 nF;
- Dez Resistores de 220 Ω ;
- Um botão *push-botton*;
- Três capacitores de 1 nF.

De acordo com a lista de componentes utilizado no projeto, avalia-se este projeto com um custo total de aproximadamente R\$ 250,00.

4.4 FLUXOGRAMA DO *FIRMWARE* UTILIZADO NO HARDWARE

Nesta subseção será apresentada o fluxograma do *firmware* inserido no microcontrolador. Pode-se observar na Figura 19 que inicialmente este software deve executar as rotinas das configurações iniciais como as variáveis globais, definição dos pinos de entrada e saída. Em seguida o microcontrolador configura os módulos *ETHERNET* e timer podendo assim iniciar a comunicação do protocolo TCP/IP. Para que fosse possível realizar tal comunicação utilizou-se a pilha TCP/IP que é

disponibilizada gratuitamente pela Microchip, esta pilha permite a interface lógica do *transceiver* LAN 8720 e com uma infinidade de protocolos.

Quando se utiliza esta pilha é necessário configurar os endereços utilizando uma interface para controle de acesso Ethernet (MAC), IP e a porta de comunicação. O endereço MAC, é um endereço físico único de um equipamento associado à interface de comunicação, neste caso o endereço MAC é o mesmo do controlador *Ethernet* disponível no microcontrolador. Para esta aplicação o *Hardware* foi configurado como servidor, portanto para que haja a comunicação entre o computador e o *Hardware* é necessário que algum computador conecte-se e solicite que o *Hardware* envie os dados. Somente desta forma ocorrerá a comunicação TCP/IP entre as partes. Com isto o IP e a porta de comunicação do *Hardware* devem ser fixo para que qualquer computador possa vir a se conectar com o mesmo.

Após realizar as configurações necessárias para inicializar a comunicação TCP/IP, o algoritmo entra em uma rotina para aguardar a conexão de algum dispositivo. Quando há conexão de um dispositivo para com o *Hardware* este se prepara para receber uma solicitação de envio de dados. Quando chega a solicitação, o microcontrolador inicia o módulos dos conversores A/D, realiza a aquisição dos dados e envia para o computador conectado. Com o recebimento dos dados pelo cliente a conexão é encerrada e o algoritmo inicia uma nova busca por conexão.



Figura 19. Fluxograma do algoritmo desenvolvido para a aquisição dos dados e comunicação TCP/IP. Fonte: Autoria própria.

Para realizar desenvolvimento do *firmware* utilizou-se a linguagem C, sendo esta uma linguagem estruturada, eficiente, rápida e possui várias bibliotecas de funções prontas. O ambiente computacional utilizado para o desenvolvimento do *firmware* foi MPLAB IDE, sendo este um software disponibilizado gratuitamente pela Microchip para programação de microcontroladores.

5 RESULTADOS OBTIDOS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos com a elaboração e funcionamento do hardware para monitoramento de máquinas elétricas via TCP/IP desenvolvido.

5.1 ESQUEMA ELÉTRICO E LAYOUT DO HARDWARE

Os resultados inicialmente apresentado neste trabalho advêm de ambientes computacionais. Devido a extensão do esquema elétrico houve a necessidade de dividi-lo em duas figuras, sendo que a Figura 20 apresenta a primeira parte do esquema elétrico com a presença da fonte de 3,3 V na parte superior da figura, o conector de 8 pinos do conversor A/D, a memória 23LCV512H, os pinos de gravação do pinos (ICSP) e os 9 pinos de entrada/saída do microcontrolador.

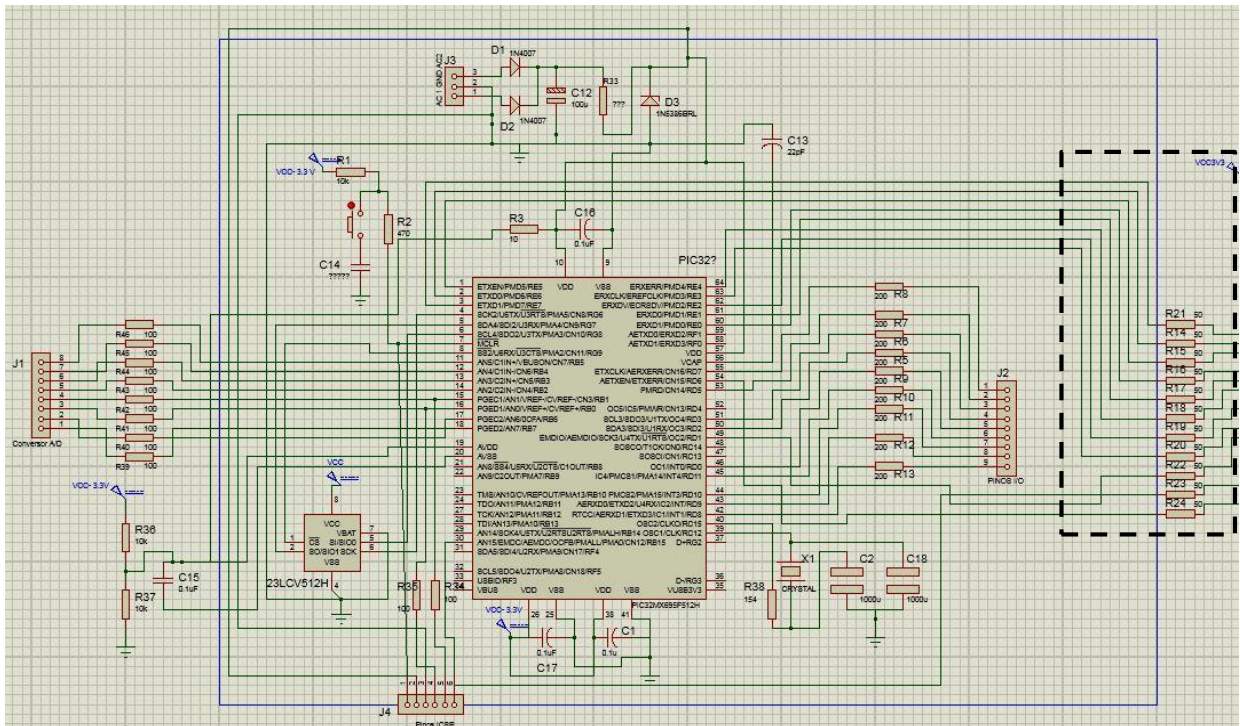


Figura 20. Esquema elétrico do hardware parte 1.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 21 apresenta a segunda parte do esquema elétrico, onde pode-se verificar a parte do circuito que realiza a comunicação TC/IP através do LAN 8720 e o

RJ45. As Figuras 20 e 21 possuem um retângulo que indica o mesmo ponto do circuito para ambas Figuras, facilitando assim a análise do esquema elétrico.

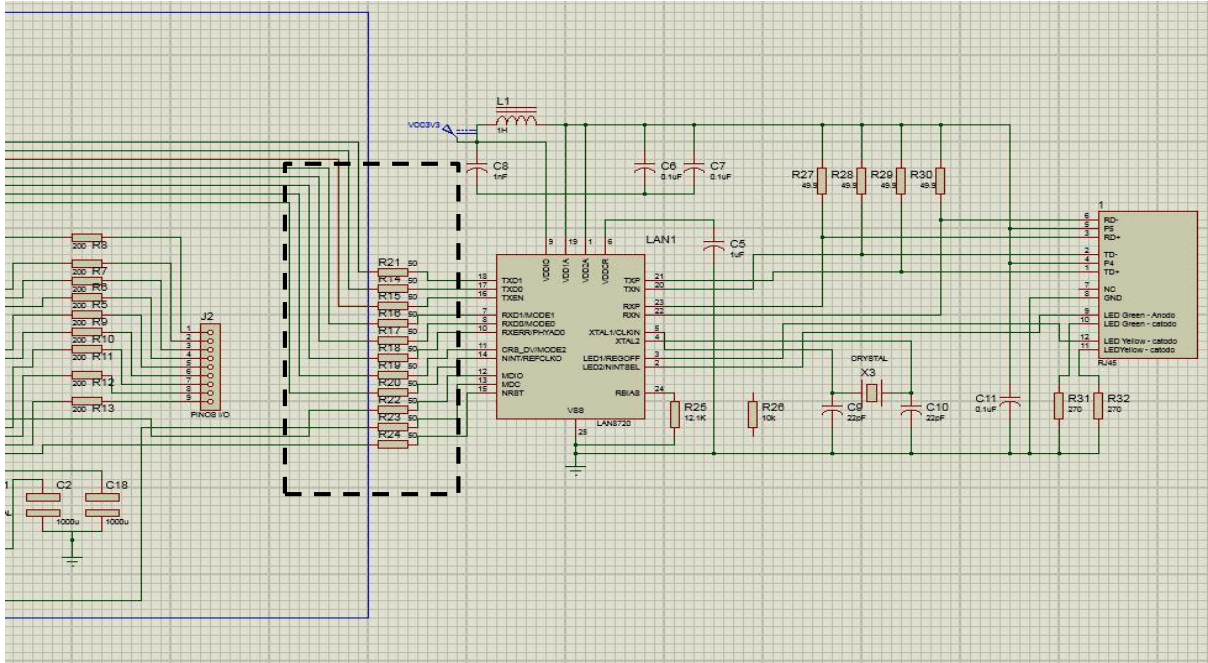


Figura 21. Esquema elétrico do hardware parte 2.
Fonte: Autoria própria.

Em seguida desenvolveu-se o *layout* da placa. Nesta etapa realizou-se a disposição dos componentes, optando em utilizar os cristais o mais próximo possível dos componentes que os utilizam, optou-se também em alocar os conectores dos conversores A/D, dos pinos I/O e RJ45 nas extremidades da placa afim de facilitar a conexão com outras placas como mostrado na Figura 22.

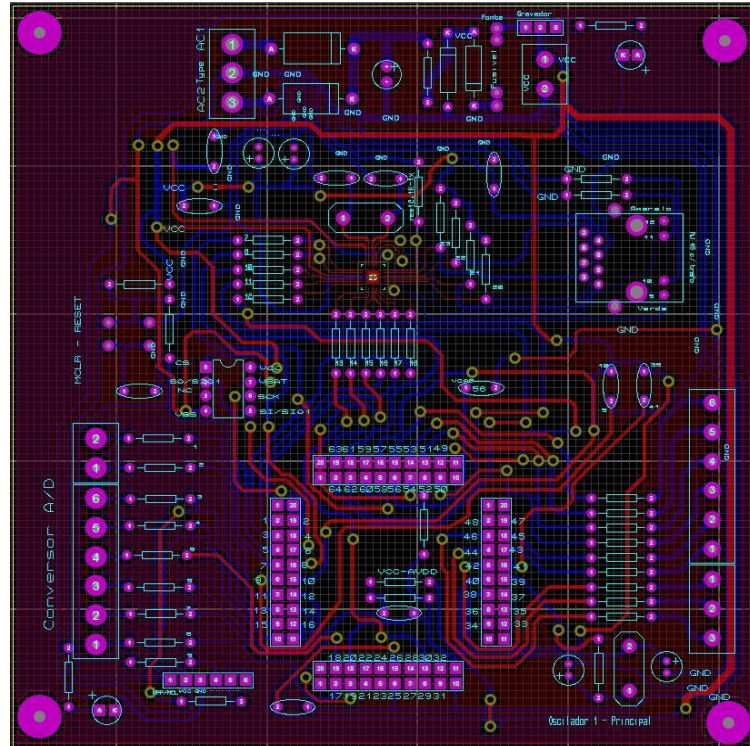


Figura 22. Layout do hardware
Fonte: Autoria própria.

Um recurso disponível durante o desenvolvimento do *layout* é a visualização em 3D da placa, este possibilita a visualização da placa com os componentes utilizados. A Figura 20 apresenta o layout da placa em 3D.

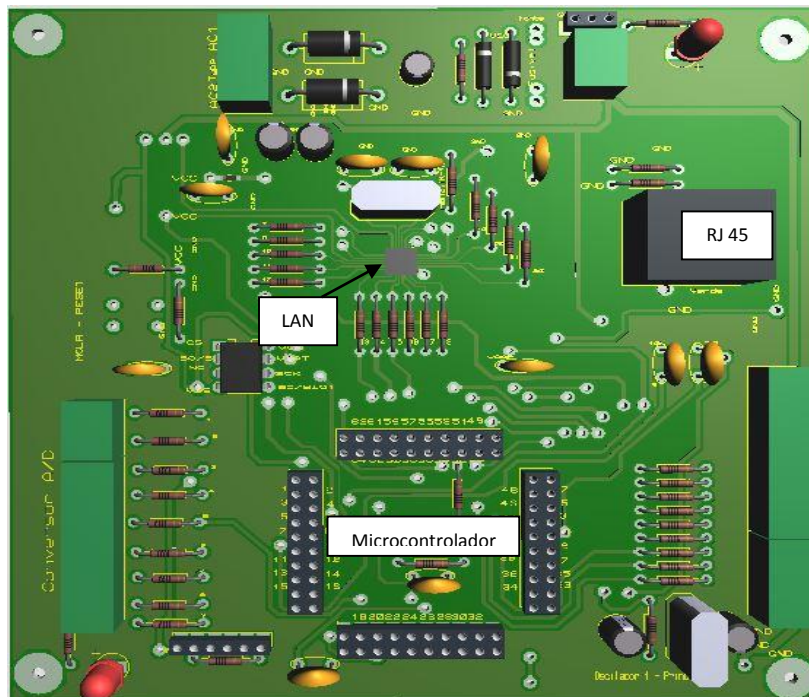


Figura 23. Layout 3D do hardware no proteus 8
Fonte: Autoria própria.

Após a apresentação dos resultados computacionais, a Figura 24 apresenta o resultado da implementação da placa e descrição dos componentes. Para realizar a confecção desta utilizou-se uma máquina para prototipagem de circuito impresso disponível no Laboratório de Prototipagem da UTFPR.

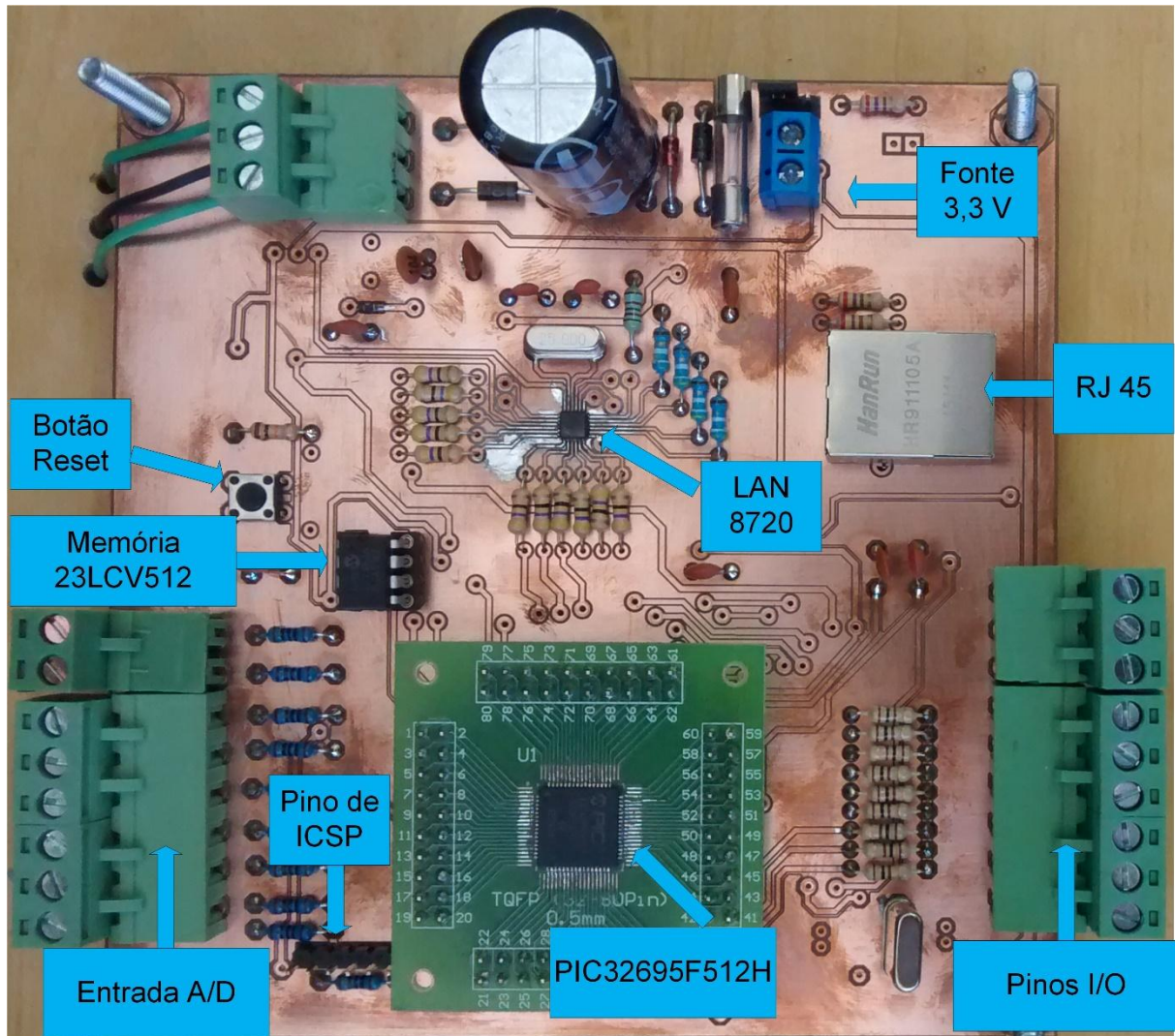


Figura 24. Hardware implementado
Fonte: Autoria própria.

Nota-se que na Figura 24 tem-se os pinos ICSP disponíveis, onde estes pinos têm a função de realizar a gravação do microcontrolador quando o mesmo se encontra conectado com o restante do circuito. O botão de *reset* tem a função de reiniciar o microcontrolador quando ocorrer alguma falha de comunicação ou na execução de uma instrução.

A partir da implementação de cada circuito do projeto, conectou-se todos as placas apresentadas anteriormente em conjunto, e desta forma, concluiu-se a montagem. A Figura 25 apresenta o protótipo com as indicações de cada módulo.

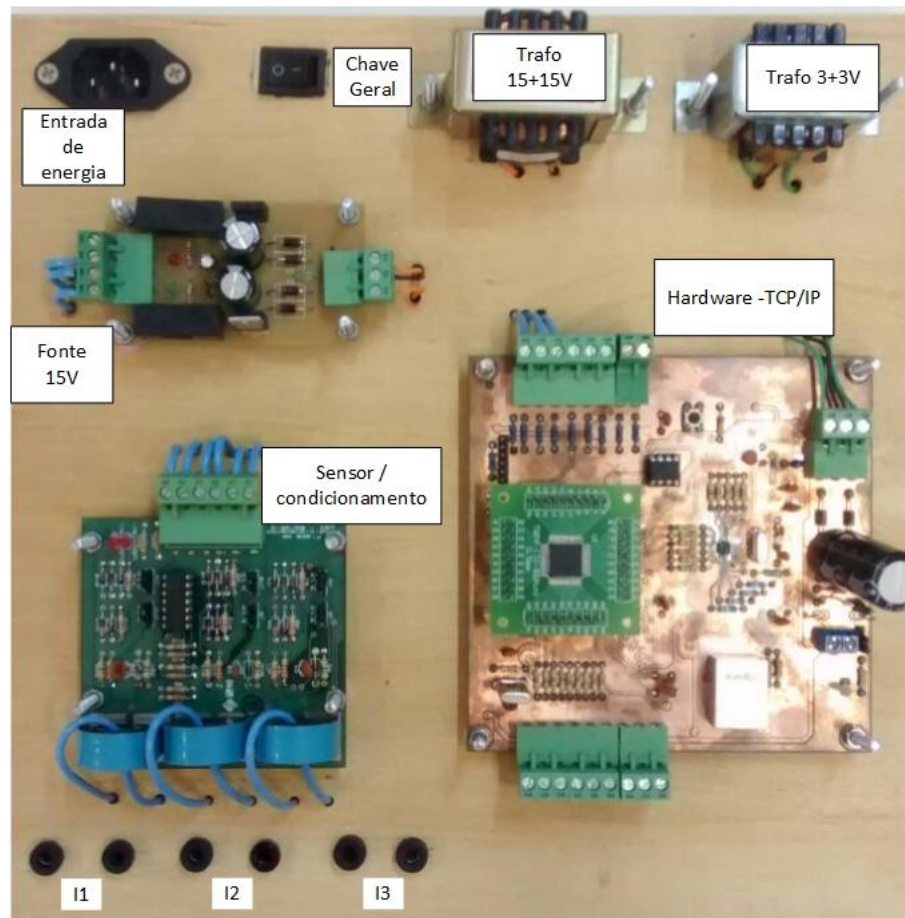


Figura 25. Protótipo final montado.
Fonte: Autoria própria.

5.2 FORMAS DE ONDA DOS SINAIS DO PROTÓTIPO

Com a montagem do protótipo iniciou-se os testes de cada placa utilizada afim de verificar o funcionamento do sistema. Para aquisitar as formas de ondas apresentadas a seguir utilizou-se o osciloscópio do fabricante Tektronix cujo modelo é o TPS 2014.

Inicialmente foi testada a fonte simétrica de $\pm 15V$, a Figura 26 apresenta o sinal de +15V contínuo e sem ruído, sendo este apto para alimentar a placa de condicionamento de sinais.

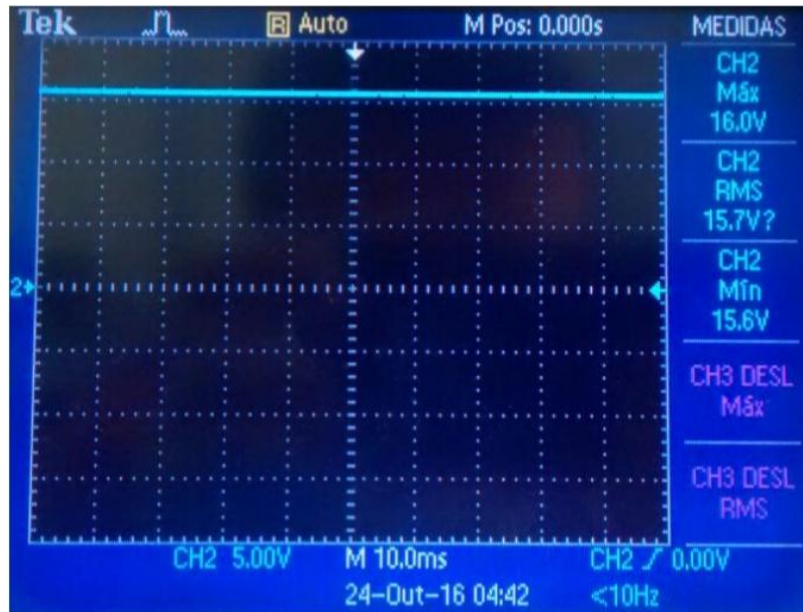


Figura 26. Sinal +15V da fonte simétrica de ± 15 V
 Fonte: Autoria própria.

Continuando o teste da fonte simétrica de ± 15 V a Figura 27 apresenta o sinal -15V da fonte, pode-se observar um sinal contínuo e sem ruído, por se tratar de um sinal negativo este fica vulnerável ao ruído, por isso utilizou-se um capacitor eletrolítico para filtrar o sinal.



Figura 27. Sinal -15V da fonte simétrica de ± 15 V
 Fonte: Autoria própria.

Após apresentar a alimentação do condicionamento de sinais, a Figura 28 apresenta o sinal de corrente adquirido pelo TC e o condicionamento de sinais realizado. Na Figura 28 o sinal inferior (em rosa) representa o sinal de corrente da

máquina, sendo este um sinal alternado com um pico de 4,60 A. Nesta mesma figura pode-se observar o sinal superior (em azul), sendo um sinal de tensão positivo resultado do condicionamento do sinal de corrente. Houve a necessidade converter o sinal de corrente em sinal de tensão pois o microcontrolador só trabalha com sinal de tensão de 0 à 3,3V em suas portas.

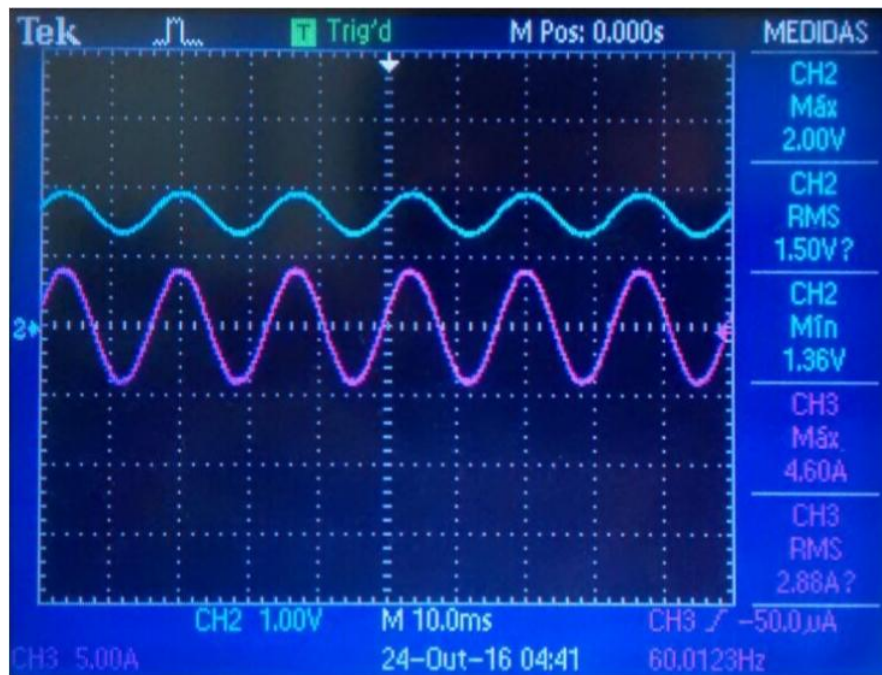


Figura 28. Sinal do sensor de corrente/ Sinal condicionado
Fonte: Autoria própria.

Utilizando a Figura 28 definiu-se a relação de conversão utilizada no microcontrolador, pois o pico de 4,6 A do sinal corrente relaciona-se com o pico de 2 V do sinal de tensão. Sendo assim possível realizar a conversão do sinal de tensão para corrente na saída do *Hardware*.

Como apresentado anteriormente, o *Hardware* desenvolvido neste trabalho necessita de uma tensão de 3,3 V para operar. A Figura 29 apresenta o sinal de 3,3 V contínuo utilizado para alimentar o *Hardware*.

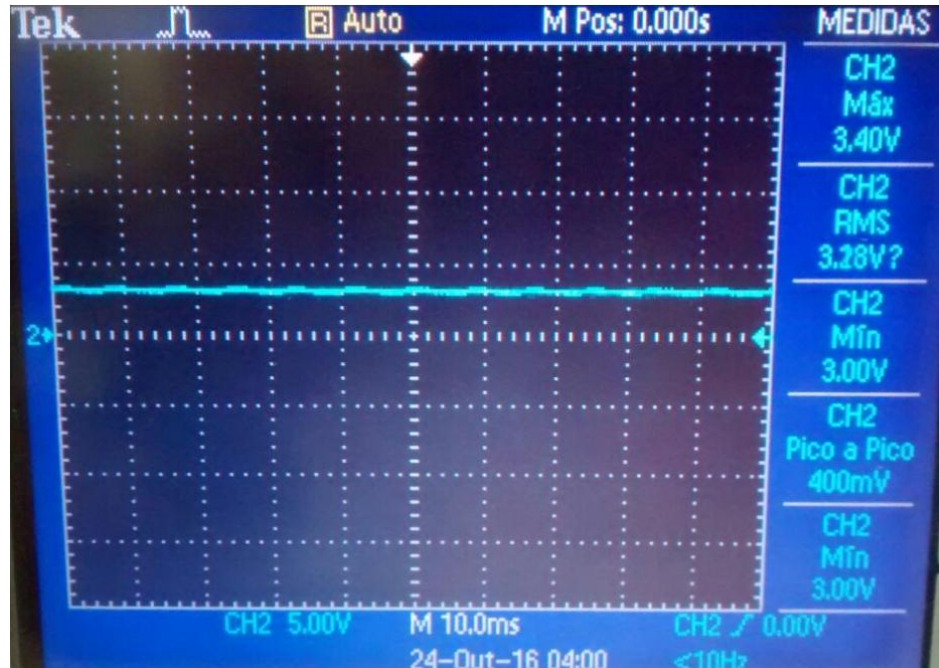


Figura 29. Sinal Contínuo da fonte de 3,3 V
Fonte: Autoria própria.

5.3 FIRMWARE PARA COMUNICAÇÃO TCP/IP

Com a conclusão da etapa de montagem do projeto, iniciou-se o desenvolvimento do *firmware* cujas funções são habilitar, operar e gerenciar as tarefas do microcontrolador. Inicialmente para auxiliar no desenvolvimento do *firmware* utilizou-se um kit de desenvolvimento modelo CEREBOT MX7 CK cujo o fabricante é a Digilent, este dispõe de um microcontrolador da família PIC32 e de um *transceiver* LAN8720, além de vários recursos como interface de rede CAN, conexão USB 2.0, comunicação SPI, I2C e TCP. Logo, este Kit de desenvolvimento pode ser utilizado para diversas aplicações.

Com a implementação do algoritmo iniciou-se os testes de comunicação TCP/IP no kit de desenvolvimento, para realizar a interface da comunicação entre o computador com o kit utilizou-se um software Hercules disponibilizado gratuitamente pela HW GROUP, sendo este capaz de realizar comunicações UDP/IP, TCP/IP Cliente ou TCP/IP servidor.

A Figura 30 apresenta a interface de comunicação TCP/IP por meio do software Hercules. Pode-se observar neste software a presença de alguns campos, como a área de trabalho que é responsável por mostrar todas as informações referentes à comunicação entre o computador e o dispositivo configurado como

servidor. Também são apresentadas as opções para configuração do endereço do servidor, que têm por objetivo configurar os endereços responsáveis pela conexão do hardware.

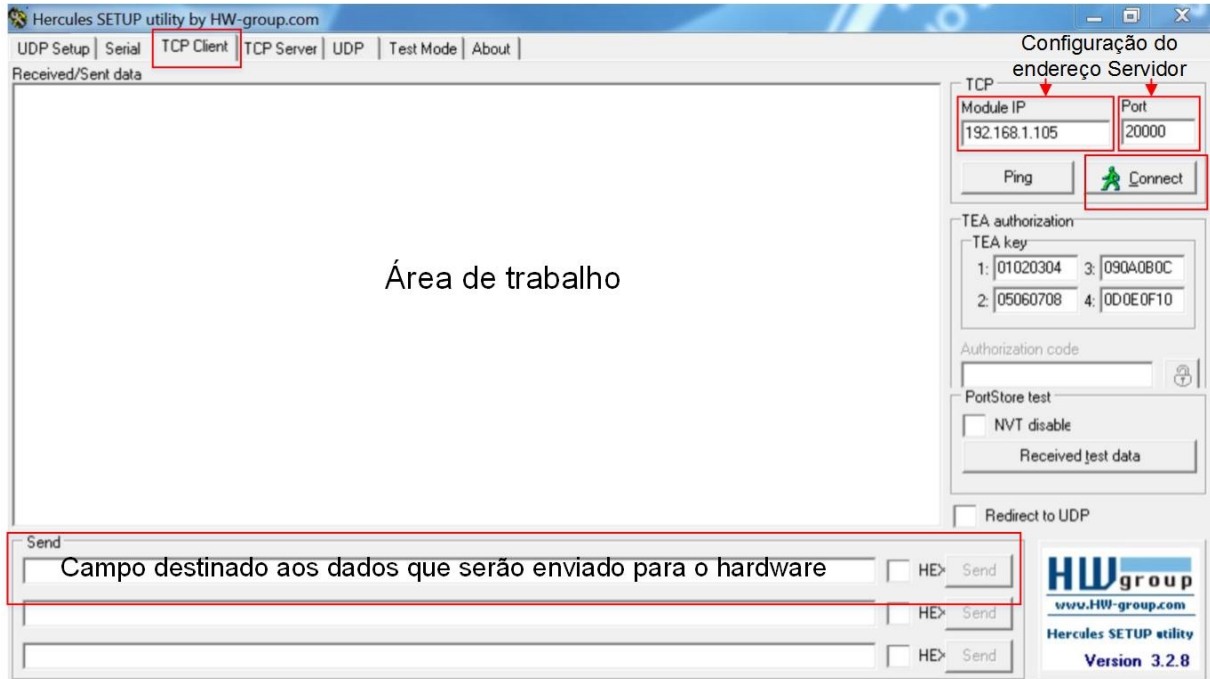


Figura 30. Interface para comunicação TCP/IP.
Fonte: Autoria própria.

Como este software se encontra instalado no computador, utilizou-se opção *TCP Client* como pode ser observado na Figura 30, pois tanto o kit de desenvolvimento utilizado quanto o hardware desenvolvido neste trabalho deverão ser configurados como servidor. Quando se utiliza esta opção para iniciar a conexão, deve-se enviar uma solicitação de conexão através do botão *connect*, para que assim dispositivo configurado como servidor possa se conectar com o computador. No entanto, para solicitar a conexão é necessário inserir o IP e a porta na qual o Kit de desenvolvimento está configurado.

Já na Figura 31 pode-se observar a realização da comunicação TCP/IP entre o computador e o kit de desenvolvimento. Pode ser visto nesta figura que os dados na cor rosa são os que foram enviados pelo computador para o dispositivo ao passo que os dados de corrente na cor preta foram os que o dispositivo retornou para o computador.

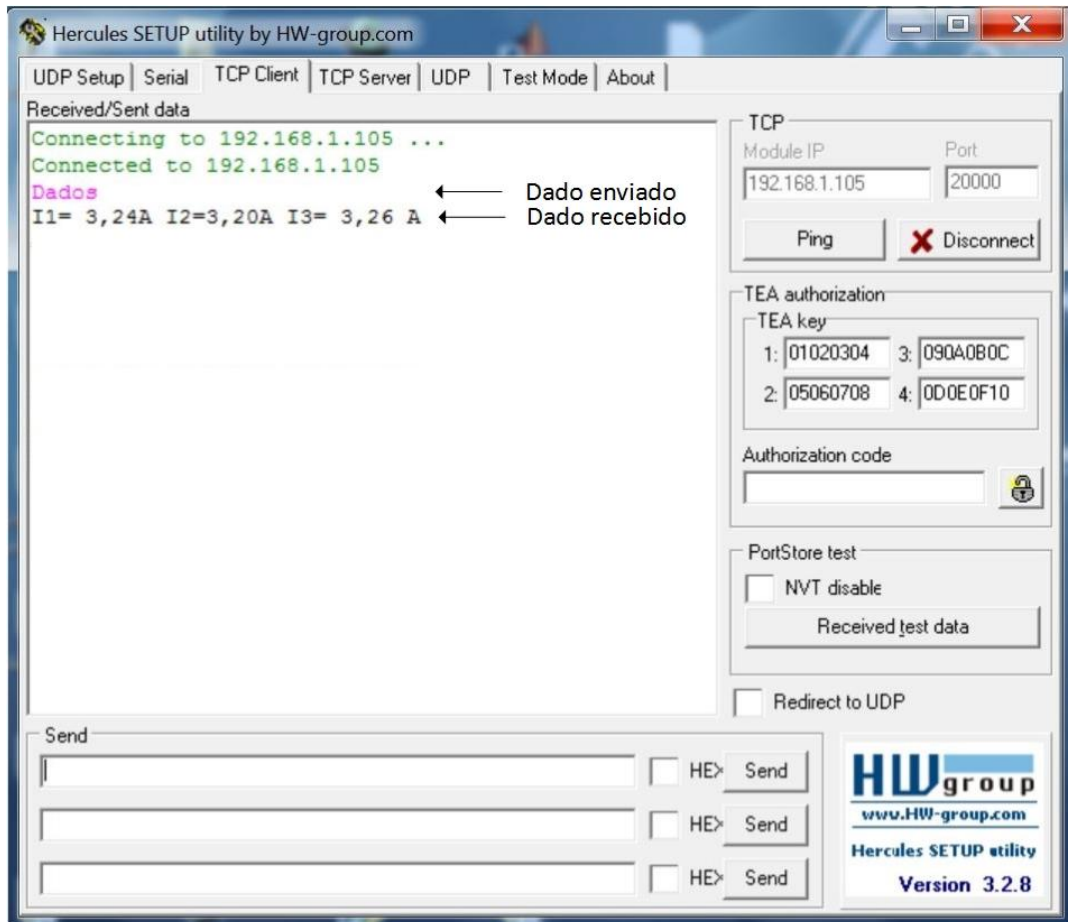


Figura 31. Interface comunicando com o Kit de desenvolvimento.
Fonte: Autoria própria.

Conforme apresentado na seção 4.4 do presente trabalho, para que o servidor possa enviar algum dado ao computador é necessário que antes este lhe envie uma solicitação. Neste caso configurou-se a palavra “Dados” como sendo a solicitação a ser recebido pelo servidor, para que este possa inicializar o envio da informação contida na memória de armazenamento ao computador. Neste caso a Figura 31 apresenta alguns dados de corrente aleatórios, utilizados somente para comprovar que houve a comunicação entre ambas as partes.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foi proposto o desenvolvimento de um hardware capaz tanto de realizar a leitura das correntes do MIT por meio de transformadores de correntes quanto enviá-las via protocolo TCP/IP para um computador, permitindo assim o acesso remoto à essas informações.

Para o seu desenvolvimento, inicialmente realizou-se uma pesquisa sobre quais eram as opções de componentes que fossem capazes de atender o objetivo proposto. Após a definição deste, iniciou-se o desenvolvimento do esquema elétrico e *layout* das placas. Em seguida implementou-se o hardware e desenvolveu-se o algoritmo necessário para que o microcontrolador inicia-se seu funcionamento.

No entanto, quando se inseriu o *firmware* no microcontrolador e iniciou-se os teste constatou-se algumas falhas de comunicação no hardware. Assim, considerando que o algoritmo havia sido testado anteriormente, pode-se concluir que a falha está relacionada com o hardware.

Realizando uma análise geral do hardware concluiu-se alguns fatores que contribuíram para que o mesmo não operasse corretamente.

- Soldagem dos componentes SMD: Neste trabalho utilizou-se dois componentes smd, sendo estes vitais para que o funcionamento do dispositivo e que foram soldados manualmente. Considerando que esses componentes são sensíveis a alta temperatura, no momento da soldagem esses podem ter sido danificados.

- Confecção da placa: Para realizar a confecção da placa utilizou-se a Prototipadora LPKF S63. Com esta máquina é possível realizar diversos tipos de layout com qualidade e confiabilidade, no entanto esta não dispõe de um acabamento como as utilizadas nas placas industrializadas, fato que pode interferir no funcionamento do circuito. Por exemplo, um placa quando não envernizada qualquer objeto por menor que seja pode vir a curto-circuitar alguma trilha. Neste caso pode-se observar que o hardware possui trilhas muito finas e próximas umas das outras o que torna mais vulnerável a um curto-circuito.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade nessa linha de pesquisa são sugeridos os seguintes trabalhos:

- Realizar a confecção da placa e a soldagem em empresas especializadas no setor, afim de corrigir os erros apresentados anteriormente.
- Instalar este hardware no setor industrial afim de avaliar sua robustez em um ambiente que possui vários fatores que podem interferir em seu funcionamento.
- Desenvolver a comunicação *Wireless* para este dispositivo, com intuito de evitar a conexão com o cabo de rede.
- Habilitar as comunicações USB e Bluetooth do microcontrolador com o intuito de aumentar as possibilidades de conexões para monitoramento da máquina.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6856**: transformador de corrente: especificação. Rio de Janeiro, 1992.
- BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- BRONIERA, P. J. **Diagnóstico de curto-circuito no enrolamento de estator em máquinas de indução trifásicas utilizando redes neurais artificiais**. 112 f. Dissertação – Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2014.
- COMER, D. E. **Interligação de redes com TCP/IP**. 5. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, v.1, 2006.
- CHAVES, F, C. **“Transformador de Corrente Eletrônico Utilizando Bobina de Rogowski e Interface óptica com POF para Aplicações em Sistema de Potência”**. 2008. 95 f. Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- DRUMMOND, T. L.; GOEDEL, A.; MIZUYAMA, D.; COSTA, W. F. **Método de Avaliação da Temperatura Discreto e Distribuído na Carcaça do Motor de Indução Trifásico Utilizando Sensores de Baixo Custo**. Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2013.
- ELETROBRÁS-PROCEL. **Balanco Energético Nacional**. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br>: acessado em 21/07/2015, 2014.
- EPE, Balanço energético nacional 2014 – ano base 2013 – relatório final. **Empresa de Pesquisa Energética – Ministério de Minas e Energia**, 2014.
- GOEDEL, Alessandro. **Estimador Neural de Velocidade Para Motores de Indução Trifásicos**. 2007. 159 f. Tese - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- GRACIOLA, C. L.. **Estimador neural de velocidade embarcado em hardware de baixo custo**. 2013. 52 f. Trabalho de conclusão de curso – Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2013.
- GODOY, W. F., SILVA, I. N., GOEDEL, A., PALÁCIOS, R. H. C., **Evaluation of stator winding faults severity in inverter-fed induction motors**, Applied Soft Computing, Volume 32, July 2015, Pages 420-431, ISSN 1568-4946.
- GONGORA, W. S. **Uma abordagem neural no diagnóstico de falhas em rolagamentos de motores de indução trifásicos**. 2013. 95 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2013.

HINITSCH, R. **Energy Efficient Electric Motors**. 2002. 6 f. University of Technology, Berlin, Germany. 2002.

MICROCHIP **23LCV512H**, 2011 -Disponível em: <
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/25157A.pdf>>. Acesso em: 20
 Jun.2016.

MICROCHIP **LAN8720**, 2011 -Disponível em: <
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/8720a.pdf>>. Acesso em: 20
 Jun.2016.

MICROCHIP **PIC32MX694F512**, 2009 -Disponível em:
 <<http://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC32MX695F512H>>. Acesso em: 20
 Jun.2016.

MIYADAIRA, A.N. **Microcontroladores PIC 18**. São Paulo, SP. Editora Érica Ltda, 2011.

OLIVEIRA, S. A.; ANDRADE, S. F. **Sistemas Embarcados: Hardware e Firmware**. 1ª.ed. Érica LTDA, 2006.

PALÁCIOS, R. H. C., SILVA, I. N., GOEDTEL, A., GODOY, W. F., **A comprehensive evaluation of intelligent classifiers for fault identification in three-phase induction motors**, Electric Power Systems Research, Volume 127, October 2015, Pages 249-258, ISSN 0378-7796.

RANIERI, F. **Sistema Supervisório de Parâmetros de Máquinas Elétricas via TCP/IP e Painel Eletrônico Mensagens**- Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo,2007.

SUETAKE, M.; SILVA, I. N. da, GOEDTEL, A. (2011). **Embedded DSP-Based Compact Fuzzy System and Its Application for Induction-Motor V/f Speed Control**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v.58, n.3, p.750-760.

SAIDEL, M. A.; RAMOS, M. C. E. S.; ALVES, S. S. **Assessment and optimization of induction electric motors aiming energy efficiency in industrial applications**. (ICEM), XIX International Conference on Electrical Machines, p. 1–6, 2010.

TANENBAUM, A. S.; WETHERALL, D. **Redes de computadores**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

TATEOKI, G. T. **Monitoramento de Dados via Internet baseado em Telefonia Celular**- Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em engenharia elétrica. 2007.

TORRES, G. **Redes de Computadores Curso Completo**. Edição Especial. ed. Rio de Janeiro: Axcel Books, 2001.