

ALISON LINS DE LIMA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO
DE SINAIS UTILIZANDO A PLATAFORMA *TIVAWARE*[®] PARA APLICAÇÕES EM
*SMART GRID***

Dissertação de Mestrado apresentado ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica - PPGEE, da Universidade Federal da
Paraíba - UFPB, como requisito parcial para a
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Salvadori
Co-Orientador: Prof. Dr. Lucas V. Hartmann

JOÃO PESSOA

2015

ALISON LINS DE LIMA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO
DE SINAIS UTILIZANDO A PLATAFORMA *TIVAWARE*® PARA APLICAÇÕES EM
*SMART GRID***

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Salvadori
Co-Orientador: Prof. Dr. Lucas V. Hartmann

**JOÃO PESSOA,
JULHO 2015**

FICHA CATALOGRÁFICA

LIMA, Alison L.

Desenvolvimento de um sistema para aquisição e processamento de sinais utilizando a plataforma *TivaWare*TM para aplicações em *Smart Grid* – João Pessoa, 2015.

Nº de páginas: 119.

Área de concentração: Sistemas de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Salvadori.

Co-Orientador: Prof. Dr. Lucas V. Hartmann

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba – UFPB
Centro de Energias Alternativas e Renováveis – CEAR
Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica –
PPGEE.

1. Aquisição de Dados; 2. Condicionamento de Sinais; 3. *Smart Grids*;
4. *TivaWare*TM; 5. LA25-NP

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGE

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Exame de Dissertação

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA AQUISIÇÃO, PROCESSAMENTO
E COMUNICAÇÃO DE SINAIS UTILIZANDO A PLATAFORMA *TIVAWARE*® PARA
APLICAÇÕES EM *SMART GRID***

Elaborado por

ALISON LINS DE LIMA

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

COMISSÃO EXAMINADORA

ORIENTADOR: PROF. DR. FABIANO SALVADORI

CO-ORIENTADOR: PROF. DR. LUCAS V. HARTMANN

PROF. DR. ALEXANDRE CÉZAR DE CASTRO – EXAMINADOR INTERNO

PROF. DR. ABEL CAVALCANTE LIMA FILHO – EXAMINADOR EXTERNO

PROFA. DRA. CAMILA SEIBEL GEHRKE – EXAMINADORA EXTERNA

João Pessoa/PB, 24 de Julho de 2015.

A minha esposa Patrícia e filhos, Lucas e Daniel, por todo amor e compreensão
nesse tempo difícil, que deixamos de estar juntos...
Aos meus pais e irmãos, Renato e Marinalva, Aline e Anderson por todo amor...
A Deus, todos os créditos...

Dedico

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Fabiano Salvadori, pela grande compreensão e dedicação na orientação desse trabalho. Ainda pelos momentos de aprendizado.

Ao Prof. Dr. Lucas Vinicius Hartmann, pela ajuda no desenvolvimento da plataforma, com sugestões significativas.

À Profa. Dra. Camila Gehrke, pelas orientações no curso de algumas práticas e na colaboração das correções do trabalho.

A todos os colaboradores de pós-graduação e amigos pessoais, Sérgio, Zariif, Celso, Marcos e Renato, pela contribuição significativa no desenvolvimento do trabalho.

Aos meus amigos de trabalho, pela compreensão, nos momentos em que não pude estar presente.

E a todos que de maneira direta ou indireta, contribuíram para o desenvolvimento do trabalho.

Agradeço ao CNPq, processo 404961/2013-4, pelo financiamento do projeto.

“Sucesso é uma questão de não desistir, e fracasso é uma questão de desistir cedo demais.”

Walter Burke.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	IX
RESUMO.....	XII
ABSTRACT.....	XIII
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES	15
1.2 OBJETIVO.....	19
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	19
2 REVISÃO DA LITERATURA	22
2.1 INTRODUÇÃO.	22
2.2 CONDICIONAMENTO DE SINAIS.	22
FIGURA 2.1- ESTRUTURA DO CIRCUITO CONDICIONADOR DE TENSÃO.....	23
FIGURA 2.2- ESTRUTURA DO CIRCUITO CONDICIONADOR DE CORRENTE. ..	23
2.3 REVISÃO DE LITERATURA ESPECÍFICA.	24
2.3.1 SISTEMA DE MEDIDAS EM TEMPO REAL	24
FIGURA 2.3 - SISTEMA PROPOSTO.....	24
FIGURA 2.4 - CIRCUITO CONDICIONADOR DE SINAL.	24
FIGURA 2.5 - SENSOR DE CORRENTE ACS754-050.	25
FIGURA 2.6 - CONVERSOR AD - ADS7816.	25
FIGURA 2.7 - PLATAFORMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS E OS RESULTADO.....	26
2.3.2 PLATAFORMA DE DETECÇÃO E DIAGNÓSTICO DE FALHAS – (DDF) ...	27
FIGURA 2.8 - SISTEMA PROPOSTO PARA DDF.....	27
FIGURA 2.9 - DIAGRAMA DE BLOCOS DA PLACA DO MÓDULO SENSOR.	28
FIGURA 2.10- MÓDULO SENSOR ANALÓGICO.....	29
FIGURA 2.11 - PLATAFORMA SHASE.	29
2.3.3 MEDIDOR DE ENERGIA ELETRÔNICO	30
FIGURA 2.12 - MICROCONTROLADOR PIC16F916.....	30
FIGURA 2.13 - SENSOR ACS712.	30
FIGURA 2.14 - ESQUEMA DE LIGAÇÃO	30
FIGURA 2.15 - CIRCUITO ELETRÔNICO DO MEDIDOR DE ENERGIA.	31
FIGURA 2.16 - RESULTADOS.	31
2.3.4 ATENUADOR RESISTIVO.....	33
FIGURA 2.17 - CIRCUITO DE MEDIÇÃO DA TENSÃO.	33

FIGURA 2.18 - SINAL DE ENTRADA DA REDE.	34
FIGURA 2.19 - SINAL DE SAÍDA DO CIRCUITO.	34
2.3.5 DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA SEM FIOS E MICROCONTROLADO DE MEDIÇÃO.	35
FIGURA 2.20 - REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO.	35
FIGURA 2.21 - CIRCUITO PROPOSTO MÓDULO CENTRAL.	36
FIGURA 2.22 - PLACA DO MÓDULO CENTRAL.	37
2.3.6 DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE INTERFACE DE COMUNICAÇÃO ZIGBEE.	38
FIGURA 2.23 - CIRCUITO CONDICIONADOR DE TENSÃO.	38
FIGURA 2.24 - CIRCUITO CONDICIONADOR DE CORRENTE.	39
FIGURA 2.25 - MICROCONTROLADOR MSP430G2553.	39
FIGURA 2.26 - INTERFACE DE APRESENTAÇÃO DOS DADOS.	40
FIGURA 2.27 - SISTEMA DE MEDIÇÃO PROPOSTO.	40
2.3.7 PROPOSTA DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.	41
FIGURA 2.28 - SISTEMA DESENVOLVIDO.	42
FIGURA 2.29 - SISTEMA PROPOSTO.	43
2.4 CONCLUSÃO.	43
3 DIGITALIZAÇÃO DO SINAL E PROJETO DO FILTRO PASSA-BAIXAS.	45
3.1 INTRODUÇÃO.	45
3.2 DIGITALIZAÇÃO DE SINAIS ANALÓGICOS.	45
FIGURA 3.1 - PROCESSOS DA DIGITALIZAÇÃO DOS SINAIS.	45
3.2.1 AMOSTRAGEM.	46
FIGURA 3.2 - AMOSTRAGEM PERIÓDICA DE UM SINAL ANALÓGICO.	47
FIGURA 3.3 - SINAL ANALÓGICO ORIGINAL.	48
FIGURA 3.4 - SINAIS RECUPERADOS, A PARTIR DO SINAL ORIGINAL.	48
3.2.2 QUANTIZAÇÃO.	49
FIGURA 3.5 - AMOSTRAGEM E QUANTIZAÇÃO DE UM SINAL SENOIDAL.	50
3.2.3 CODIFICAÇÃO.	50
3.3 PROJETO DO FILTRO.	51
3.3.1 RESPOSTA DE UM FILTRO PASSA-BAIXAS IDEAL (FPBI).	51
FIGURA 3.6 - RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO FPBI.	51
FIGURA 3.7 - FILTRO PASSA BAIXAS DE SEGUNDA ORDEM ATIVO.	52
FIGURA 3.8 - FILTRO PASSA BAIXAS DE SEGUNDA ORDEM ATIVO.	53

FIGURA 3.9 - EFEITO DO FATOR DE QUALIDADE EM UM FILTRO DE SEGUNDA ORDEM.	54
FIGURA 3.10 - APROXIMAÇÃO DE BESSEL.	55
FIGURA 3.11 - APROXIMAÇÃO BUTTERWORTH.	55
FIGURA 3.12 - APROXIMAÇÃO DE CHEBYSHEV.	56
3.3.2 DETERMINANDO OS RESISTORES E CAPACITORES DO FILTRO	56
FIGURA 3.13 - RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO FILTRO PASSA-BAIXAS DE 2º ORDEM.	58
4 PRINCIPAIS COMPONENTES DO SISTEMA.....	60
4.1 CIRCUITO INTEGRADO - LM324N	60
FIGURA 4.1 - AMPLIFICADOR OPERACIONAL, LM324N.....	60
FIGURA 4.2 - AMPLIFICADOR INVERSOR.....	60
FIGURA 4.3 - AMPLIFICADOR BUFFER.....	61
4.2 TRANSFORMADOR DE POTENCIAL	61
FIGURA 4.4 - TRANSFORMADOR DE POTENCIAL.....	61
4.3 SENSOR DE CORRENTE LA-25NP	62
FIGURA 4.5 - SENSOR LA25-NP.....	62
FIGURA 4.6 - CONFIGURAÇÃO DO SENSOR, COM BASE NA CORRENTE DE ENTRADA.	62
FIGURA 4.7 - CONFIGURAÇÃO DE LIGAÇÃO DO SENSOR LA25-NP.....	63
FIGURA 4.8 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO LEM LA-25NP.....	63
5 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	66
5.1 INTRODUÇÃO	66
5.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS (SAD).....	66
5.2.1 UNIDADE DE CONDICIONAMENTO DE SINAL (UCS)	68
5.2.1.1 CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DE TENSÃO (CCT).....	69
5.2.1.2 CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DE CORRENTE (CCC)	71
FIGURA 5.11 - RESISTOR DE MEDIÇÃO.....	72
FIGURA 5.12 - AMPLIFICADOR INVERSOR.	73
FIGURA 5.13 - FILTRO ATIVO PASSA-BAIXAS DE 20 ORDEM.	73
FIGURA 5.14 - CIRCUITO CONDICIONADOR DE CORRENTE - CCC.....	73
5.2.2 PLATAFORMA TIVA™ C SERIES TM4C123G	74
FIGURA 5.15 - PLATAFORMA EK-TM4C123GXL.....	74
FIGURA 5.16 - MICROCONTROLADOR TM4C123GH6PM.....	74

FIGURA 5.17 - DIAGRAMA DE BLOCOS MICROCONTROLADOR TM4C123GH6PM.	76
FIGURA 5.18 - MÓDULOS ADC COM CANAIS DE ENTRADA COMPARTILHADO.	77
5.2.3 UNIDADE DE MONITORAMENTO.	78
FIGURA 5.19 - ENVIO DOS DADOS A UNIDADE DE MONITORAMENTO.....	78
FIGURA 5.20 - JANELA DE CONFIGURAÇÃO DO PUTTY.....	79
FIGURA 5.21 - JANELA DE EXIBIÇÃO DOS DADOS ENVIADOS A PORTA SERIAL.....	79
FIGURA 5.22 - SOFTWARE CCS, AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO.....	80
FIGURA 5.23 - SOFTWARE CCS, PROGRAMA EM EXECUÇÃO.....	81
FIGURA 5.24 - SOFTWARE CCS, CARREGANDO O ARQUIVO QUE CONTÉM A ROTINA PARA EXPORTA OS DADOS.	82
FIGURA 5.25 - SOFTWARE CCS, EXECUTANDO A ROTINA SAVEMYVARIABLE().....	82
FIGURA 5.26 - ARQUIVOS TEXTOS EXPORTADOS.....	83
FIGURA 5.27 - CURVA DA VARIÁVEL TENSÃO E CORRENTE PLOTADA PELO MATLAB.	83
5.3 PLATAFORMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	84
FIGURA 5.28 - UNIDADE DE CONDICIONAMENTO DE SINAL.....	84
FIGURA 5.29 - PLATAFORMA TIVAWARE.....	84
FIGURA 5.30 - ENTRADA E SAÍDA DE SINAIS DA PLATAFORMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.	84
5.4 PLATAFORMA DE TESTE / ENSAIO.	85
FIGURA 5.31 - SISTEMA COMPLETO.	85
FIGURA 5.32 - CARGA ACIONADA A DE TESTE DO SISTEMA.	85
FIGURA 5.33 - PLACA DO MOTOR.	85
FIGURA 5.34 - CARGA ACIONADA.	85
5.5 SOFTWARE	86
FIGURA 5.35 - AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO CODE COMPOSER STUDIO, TEXAS INSTRUMENTES.	86
FIGURA 5.36 - FLUXOGRAMA DA ROTINA PRINCIPAL.	87
FIGURA 5.37- FLUXOGRAMA DO TRATAMENTO DA INTERRUPÇÃO DO AD. ...	87
FIGURA 5.38 - ALGORITMO PARA O CÁLCULO DA TENSÃO E CORRENTE EFICAZ.....	89
FIGURA 5.39 - ALGORITMO PARA O CÁLCULO DA POTÊNCIA MÉDIA OU ATIVA.	90

FIGURA 5.40 - ALGORITMO PARA O CÁLCULO DA POTÊNCIA APARENTE.	90
FIGURA 5.41 - ALGORITMO PARA O CÁLCULO DO FATOR DE POTÊNCIA.	91
6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	93
6.1 INTRODUÇÃO	93
6.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA VALIDAÇÃO DA PLATAFORMA	93
6.3 RESULTADOS	95
6.3.1 VERIFICAÇÃO DO SINAL DE TENSÃO NA CARGA	95
6.3.2 SINAIS DE TENSÃO E CORRENTE NA ENTRADA DOS CONVERSORES AD.....	96
6.3.2.1 SINAL DE TENSÃO	96
6.3.2.2 SINAL DE CORRENTE.....	98
6.3.3 MONITORAMENTO DAS GRANDEZAS ELÉTRICAS DO SISTEMA.....	100
6.3.3.1 RESULTADOS - COMUNICAÇÃO PADRÃO.....	100
6.3.3.2 RESULTADOS - EXPORTADOS PELO OPERADOR	102
6.4 IMAGENS DO SISTEMA.....	109
6.5 CONCLUSÃO.....	110
7 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA PRÓXIMOS TRABALHOS.....	112
8 REFERÊNCIAS.....	115

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 2.1- ESTRUTURA DO CIRCUITO CONDICIONADOR DE TENSÃO.....	23
FIGURA 2.2- ESTRUTURA DO CIRCUITO CONDICIONADOR DE CORRENTE.....	23
FIGURA 2.3 - SISTEMA PROPOSTO.....	24
FIGURA 2.4 - CIRCUITO CONDICIONADOR DE SINAL.....	24
FIGURA 2.5 - SENSOR DE CORRENTE ACS754-050.....	25
FIGURA 2.6 - CONVERSOR AD - ADS7816.....	25
FIGURA 2.7 - PLATAFORMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS E OS RESULTADO.....	26
FIGURA 2.8 - SISTEMA PROPOSTO PARA DDF.....	27
FIGURA 2.9 - DIAGRAMA DE BLOCOS DA PLACA DO MÓDULO SENSOR.....	28
FIGURA 2.10- MÓDULO SENSOR ANALÓGICO.....	29
FIGURA 2.11 - PLATAFORMA SHASE.....	29
FIGURA 2.12 - MICROCONTROLADOR PIC16F916.....	30
FIGURA 2.13 - SENSOR ACS712.....	30
FIGURA 2.14 - ESQUEMA DE LIGAÇÃO.....	30
FIGURA 2.15 - CIRCUITO ELETRÔNICO DO MEDIDOR DE ENERGIA.....	31
FIGURA 2.16 - RESULTADOS.....	31
FIGURA 2.17 - CIRCUITO DE MEDIÇÃO DA TENSÃO.....	33
FIGURA 2.18 - SINAL DE ENTRADA DA REDE.....	34
FIGURA 2.19 - SINAL DE SAÍDA DO CIRCUITO.....	34
FIGURA 2.20 - REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO.....	35
FIGURA 2.21 - CIRCUITO PROPOSTO MÓDULO CENTRAL.....	36
FIGURA 2.22 - PLACA DO MÓDULO CENTRAL.....	37
FIGURA 2.23 - CIRCUITO CONDICIONADOR DE TENSÃO.....	38
FIGURA 2.24 - CIRCUITO CONDICIONADOR DE CORRENTE.....	39
FIGURA 2.25 - MICROCONTROLADOR MSP430G2553.....	39
FIGURA 2.26 - INTERFACE DE APRESENTAÇÃO DOS DADOS.....	40
FIGURA 2.27 - SISTEMA DE MEDIÇÃO PROPOSTO.....	40
FIGURA 2.28 - SISTEMA DESENVOLVIDO.....	42
FIGURA 2.29 - SISTEMA PROPOSTO.....	43
FIGURA 3.1 - PROCESSOS DA DIGITALIZAÇÃO DOS SINAIS.....	45
FIGURA 3.2 - AMOSTRAGEM PERIÓDICA DE UM SINAL ANALÓGICO.....	47
FIGURA 3.3 - SINAL ANALÓGICO ORIGINAL.....	48
FIGURA 3.4 - SINAIS RECUPERADOS, A PARTIR DO SINAL ORIGINAL.....	48
FIGURA 3.5 - AMOSTRAGEM E QUANTIZAÇÃO DE UM SINAL SENOIDAL.....	50
FIGURA 3.6 - RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO FPBI.....	51
FIGURA 3.7 - FILTRO PASSA BAIXAS DE SEGUNDA ORDEM ATIVO.....	52
FIGURA 3.8 - FILTRO PASSA BAIXAS DE SEGUNDA ORDEM ATIVO.....	53
FIGURA 3.9 - EFEITO DO FATOR DE QUALIDADE EM UM FILTRO DE SEGUNDA ORDEM.....	54
FIGURA 3.10 - APROXIMAÇÃO DE BESSEL.....	55
FIGURA 3.11 - APROXIMAÇÃO BUTTERWORTH.....	55
FIGURA 3.12 - APROXIMAÇÃO DE CHEBYSHEV.....	56
FIGURA 3.13 - RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO FILTRO PASSA-BAIXAS DE 2º ORDEM.....	58
FIGURA 4.1 - AMPLIFICADOR OPERACIONAL, LM324N.....	60
FIGURA 4.2 - AMPLIFICADOR INVEROR.....	60

FIGURA 4.3 - AMPLIFICADOR BUFFER.....	61
FIGURA 4.4 - TRANSFORMADOR DE POTENCIAL.....	61
FIGURA 4.5 - SENSOR LA25-NP.....	62
FIGURA 4.6 - CONFIGURAÇÃO DO SENSOR, COM BASE NA CORENTE DE ENTRADA.....	62
FIGURA 4.7 - CONFIGURAÇÃO DE LIGAÇÃO DO SENSOR LA25-NP.....	63
FIGURA 4.8 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO LEM LA-25NP.....	63
FIGURA 5.1 - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	66
FIGURA 5.2 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	67
FIGURA 5.3 - SINAL DE TENSÃO COMPATÍVEL COM ADC DO DSP.....	68
FIGURA 5.4 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO CIRCUITO CONDICIONADOR DE TENSÃO - CCT....	69
FIGURA 5.5 - BLOCO ABAIXADOR DE TENSÃO E BLOCO DE TENSÃO DE OFFSET.....	70
FIGURA 5.6 - BLOCO DO BUFFER.....	70
FIGURA 5.7 - FILTRO ATIVO PASSA-BAIXAS DE 2º ORDEM.....	71
FIGURA 5.8 – UNIDADE DE CONDICIONAMENTO DO SINAL DE TENSÃO - UCST	71
FIGURA 5.9 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO CIRCUITO CONDICIONADOR DE CORRENTE (CCC).....	71
FIGURA 5.10 - ILUSTRAÇÃO DO SENSOR DE CORRENTE LA-25NP.....	72
FIGURA 5.11 - RESISTOR DE MEDIÇÃO.....	72
FIGURA 5.12 - AMPLIFICADOR INVERSOR.....	73
FIGURA 5.13 - FILTRO ATIVO PASSA-BAIXAS DE 20 ORDEM.....	73
FIGURA 5.14 - CIRCUITO CONDICIONADOR DE CORRENTE - CCC.....	73
FIGURA 5.15 - PLATAFORMA EK-TM4C123GXL.....	74
FIGURA 5.16 - MICROCONTROLADOR TM4C123GH6PM.....	74
FIGURA 5.17 - DIAGRAMA DE BLOCOS MICROCONTROLADOR TM4C123GH6PM.....	76
FIGURA 5.18 - MÓDULOS ADC COM CANAIS DE ENTRADA COMPARTILHADO.....	77
FIGURA 5.19 - ENVIO DOS DADOS A UNIDADE DE MONITORAMENTO.....	78
FIGURA 5.20 - JANELA DE CONFIGURAÇÃO DO PUTTY.....	79
FIGURA 5.21 - JANELA DE EXIBIÇÃO DOS DADOS ENVIADOS A PORTA SERIAL.....	79
FIGURA 5.22 - SOFTWARE CCS, AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO.....	80
FIGURA 5.23 - SOFTWARE CCS, PROGRAMA EM EXECUÇÃO.....	81
FIGURA 5.24 - SOFTWARE CCS, CARREGANDO O ARQUIVO QUE CONTÉM A ROTINA PARA EXPORTA OS DADOS.....	82
FIGURA 5.25 - SOFTWARE CCS, EXECUTANDO A ROTINA <i>SAVEMYVARIABLE()</i>	82
FIGURA 5.26 - ARQUIVOS TEXTOS EXPORTADOS.....	83
FIGURA 5.27 - CURVA DA VARIÁVEL TENSÃO E CORRENTE PLOTADA PELO MATLAB.....	83
FIGURA 5.28 - UNIDADE DE CONDICIONAMENTO DE SINAL.....	84
FIGURA 5.29 - PLATAFORMA TIVAWARE.....	84
FIGURA 5.30 - ENTRADA E SAÍDA DE SINAIS DA PLATAFORMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	84
FIGURA 5.31 - SISTEMA COMPLETO.....	85
FIGURA 5.32 - CARGA ACIONADA A DE TESTE DO SISTEMA.....	85
FIGURA 5.33 - PLACA DO MOTOR.....	85
FIGURA 5.34 - CARGA ACIONADA.....	85
FIGURA 5.35 - AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO CODE COMPOSER STUDIO, TEXAS INSTRUMENTES.....	86
FIGURA 5.36 - FLUXOGRAMA DA ROTINA PRINCIPAL.....	87
FIGURA 5.37- FLUXOGRAMA DO TRATAMENTO DA INTERRUPÇÃO DO AD.....	87
FIGURA 5.38 - ALGORITMO PARA O CÁLCULO DA TENSÃO E CORRENTE EFICAZ.....	89

FIGURA 5.39 - ALGORITMO PARA O CÁLCULO DA POTÊNCIA MÉDIA OU ATIVA.	90
FIGURA 5.40 - ALGORITMO PARA O CÁLCULO DA POTÊNCIA APARENTE.....	90
FIGURA 5.41 - ALGORITMO PARA O CÁLCULO DO FATOR DE POTÊNCIA.	91
FIGURA 6.1 - ALICATE AMPERÍMETRO DIGITAL PROFISSIONAL ET-3200 MINIPA.....	93
FIGURA 6.2 - MULTÍMETRO DIGITAL HM-2030 - HIKARI.....	93
FIGURA 6.3 - OSCILOSCÓPIO DSO-X-2012A – AGILENT.....	94
FIGURA 6.4 - FLUKE 434/435 SERIES I.	94
FIGURA 6.5 - SINAL DE TENSÃO NA CARGA E NA SAÍDA DO CCT.	95
FIGURA 6.6 - SINAL DE TENSÃO CONDICIONADO E ADEQUADO A ENTRADA DO CONVERSOR AD.	96
FIGURA 6.7 - MEDIÇÃO DO SINAL DE TENSÃO NA ENTRADA DO CONVERSOR AD.....	97
FIGURA 6.8 - SINAL DE TENSÃO RECUPERADO APÓS O PROCESSAMENTO DOS DADOS.	97
FIGURA 6.9 - SINAL DE CORRENTE CONDICIONADO E ADEQUADO A ENTRADA DO CONVERSOR AD.	98
FIGURA 6.10 - SINAL DE CORRENTE RECUPERADO NA ENTRADA DO CONVERSOR AD.	98
FIGURA 6.11 - CURVA DA TENSÃO E CORRENTE RECUPERADO NA ENTRADA DO CONVERSOR AD.	99
FIGURA 6.12 - VALORES DAS GRANDEZAS ELÉTRICAS NA ENTRADA DO CONVERSOR AD.	99
FIGURA 6.13 - SOFTWARE PUTTY MONITORAMENTO DA CARGA RESISTIVA.	100
FIGURA 6.14 - MEDIÇÃO DOS VALORES DE TENSÃO E CORRENTE DA CARGA RESISTIVA.....	100
FIGURA 6.15 - MEDIÇÃO DOS VALORES DE TENSÃO E CORRENTE DO MOTOR ELÉTRICO.....	101
FIGURA 6.16 - MEDIÇÃO DOS VALORES DE TENSÃO E CORRENTE DO MOTOR ELÉTRICO.....	101
FIGURA 6.17 - CURVA DA TENSÃO NA CARGA RESISTIVA - SINAL RECUPERADO.	102
FIGURA 6.18 - CURVA DA CORRENTE NA CARGA - SINAL RECUPERADO.	102
FIGURA 6.19 - CURVA DA TENSÃO E CORRENTE NA CARGA RESISTIVA.....	103
FIGURA 6.20 - VALORES DAS GRANDEZAS ELÉTRICAS.	103
FIGURA 6.21 - TENSÃO X CORRENTE DO MOTOR A 3KHZ.	104
FIGURA 6.22 - SINAL DE TENSÃO E CORRENTE DE REFERENCIA.	104
FIGURA 6.23 - TENSÃO X CORRENTE DO MOTOR A 10KHZ.	105
FIGURA 6.24 - RESULTADOS DA MEDIÇÃO A 10KHZ COMPARADOS COM OS DO FLUKE 434/435.	105
FIGURA 6.25 - COMPARAÇÃO DOS VALORES DE TENSÃO.....	107
FIGURA 6.26 - COMPARAÇÃO DA CORRENTE.....	108
FIGURA 6.27 - IMAGEM DO SISTEMA.	109
FIGURA 6.28 - IMAGEM DO SISTEMA 2.	109
 TABELA 5.1 - FUNÇÕES DE ENVIO DE DADOS PELA SERIAL.	 91
TABELA 6.2 - VALORES DE TENSÃO.....	106
TABELA 6.3 - VALORES DE CORRENTE.	106

RESUMO

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE SINAIS UTILIZANDO A PLATAFORMA *TIVAWARE*[®] PARA APLICAÇÕES EM *SMART GRID*

Em meio a um cenário que contrasta o aumento da demanda por energia elétrica, e a diminuição da capacidade de geração a partir das fontes convencionais, o que vem gerando sérios problemas para o setor energético, o conceito de *smart grids* populariza-se e apresenta-se como uma alternativa para, entre outras possibilidades, minimizar os efeitos da falta de energia elétrica, na concepção de geração distribuída a partir de fontes alternativas. Com vistas em alternativas com esse fim, será desenvolvido um sistema de aquisição de dados, de baixo custo e alto desempenho, para aplicações em *smart grids*, que viabilize o monitoramento da energia elétrica em tempo real, onde o usuário possa gerir o seu próprio controle evitando o desperdício e, conseqüentemente, economizando. O sistema será desenvolvido com base nas normas da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), órgão responsável por determinar os parâmetros mínimos que um equipamento de medição deve possuir.

O sistema de aquisição de dados apresentou resultados com alto grau de concordância ao ser comparados com o instrumento de referência, o fluke 434/435. Foi apresentada uma curva resposta da tensão e corrente, mostrando o comportamento do sistema em comparação a de outros instrumentos de medições. Ainda, é objetivo do trabalho que a Unidade de Condicionamento dos Sinais, possa ser adaptada para múltiplas plataformas microprocessadas, através de simples ajustes, sem a necessidade de reconfiguração de *hardware*. Esse fato foi comprovado ao ser utilizada com a *BeagleBone Black*, apresentando resultados satisfatórios.

Descritores: Condicionamento de Sinais, Medição de Energia, Smart Grid, *TivaWare*.

ABSTRACT

DEVELOPMENT A SYSTEM FOR ACQUISITION AND SIGNAL PROCESSING USING THE PLATFORM TIVAWARE® FOR APPLICATIONS SMART GRID

Amid a scenario, that contrasts the increasing demand for electricity, and decreased ability to generation from conventional sources, which is creating serious problems for the energy sector, the concept of smart grids popularizes up and presented as an alternative to, among other possibilities, minimize the effects of power outages in the design of distributed generation from alternative sources. In order for alternatives to that end, it will develop a data acquisition system, low cost and high performance for applications in smart grids, which facilitates monitoring of electricity in real time, where the user can manage their own control avoiding waste and consequently saving. The system will be developed based on the standards of ANEEL (Brazilian Electricity Regulatory Agency), body responsible for determining the minimum parameters a measuring equipment must possess.

The data acquisition system showed results with a high degree of agreement when compared with the reference instrument, the fluke 434/435. A response curve of voltage and current, showing the system behavior compared to other instruments of measurement was introduced.

Still, it is objective of the work that the signs Conditioning Unit can be adapted for multiple microprocessor platforms, using simple settings, without the need for hardware reconfiguration. This fact has been proven to be used with Black BeagleBone with satisfactory results.

Key words: Signal Conditioning, Energy Measurement, Smart Grids, TivaWare.

1 INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

A qualidade e a confiabilidade no fornecimento de energia elétrica são, atualmente, temas de destaque no meio acadêmico, no setor industrial e nas concessionárias de energia elétrica. Existe um grande esforço por parte de grupos de PD&I no mundo todo no desenvolvimento e experimentação de métodos e dispositivos para melhorar a qualidade e a confiabilidade dos sistemas de energia elétrica [1].

Usuários de energia elétrica, industriais, residenciais e comerciais, estão se conscientizando das vantagens dos sistemas de monitoramento e controle eletrônico capazes de gerar benefícios tangíveis e de significativo retorno do investimento [2].

Smart Grids é um conceito moderno de rede de energia elétrica que objetiva com sua infraestrutura melhorar a eficiência, confiabilidade e segurança, através do controle automatizado e tecnologias modernas de comunicação. Em *Smart Grids*, informações confiáveis e em tempo real tornam-se o fator chave para o controle e gerenciamento do fluxo de potência, permitindo novas estratégias de gestão da rede e uma integração eficaz entre a Geração Distribuída (GD) e o Gerenciamento pelo Lado da Demanda (GLD) [2], [3], [4], [5], [6].

A busca crescente do desenvolvimento de módulos sensores inteligentes torna possível a concepção de uma infraestrutura de redes de energia elétrica que objetiva melhorar a eficiência, confiabilidade e segurança. Esse conceito é cada vez mais presente e conhecido por *Smart Grids* - SGs (Redes Elétricas Inteligentes - REI) [3].

A implantação de *Smart Grids* envolve a transformação positiva das redes elétricas tradicionais para um sistema com uma nova tecnologia, adicionando sensores inteligentes, sistemas de informação back-end, medidores inteligentes e redes de comunicações. Toda esta informação estará e deverá ser obtida na rede. Portanto, para a implantação de *Smart Grid* existe a necessidade de instrumentalização do sistema elétrico [2], [3].

A inserção de novas tecnologias e de elementos digitais no setor elétrico, em especial no segmento de distribuição, proporciona ganhos ao setor elétrico

abrangendo tanto distribuidoras quanto consumidores. Com a implantação de *Smart Grids* abre-se uma oportunidade para combater alguns dos principais problemas verificados no setor elétrico brasileiro: perdas não técnicas, baixa confiabilidade (interrupções no fornecimento) e outros tipos de ineficiências [7].

Ainda, segundo a Agência Internacional de Energia (International Energy Agency – IEA), “uma *Smart Grid* é uma rede de eletricidade que usa tecnologia digital para monitorar e gerenciar o transporte de eletricidade a partir de todas as fontes de geração, encontrando uma variedade de demandas e usuários. Essas redes estarão aptas a coordenar as necessidades e capacidades de todos os geradores, operadores, usuários finais e *stake holders* do mercado de eletricidade, de forma a otimizar a utilização e operação dos ativos no processo, minimizando os custos e impactos ambientais enquanto mantêm a confiabilidade, resiliência e a estabilidade do sistema [9].”

Portanto, percebe-se que o conceito de *Smart Grid* não é único, exclusivo, mas sim um conjunto de definições que convergem para o uso de elementos digitais e de comunicações nas redes. Esses elementos possibilitam o envio de uma gama de dados que carregam informações para os centros de controle e operação. Nesses, os dados são tratados e interpretados, de modo que se possa proceder à tomada de decisão necessária, apesar de os sensores inteligentes dessas redes possuírem a capacidade de tratar tais dados localmente, de acordo com a função a que se proponha [4]. Também permitem estabelecer novas estratégias para gerenciamento dessas redes [2], [10].

Vale porém ressaltar que não se deve confundir medição inteligente (*smart metering*) com *Smart Grid*. As *Smart Grids* surgiram a partir das medições inteligentes, necessidade esta para monitorar o comportamento da carga de grandes consumidores. A partir dos avanços para essas medições, como a instalação de equipamentos de comunicação, foi-se desenvolvendo uma nova tecnologia, uma nova conceituação para se aplicar ao setor elétrico. Percebe-se, assim, que *Smart Grids* são muito mais abrangentes que *smart meterings*. Os avanços nas redes inteligentes foram tantos que a medição inteligente hoje é uma pequena parcela de uma rede inteligente [11].

Outro conceito relacionado às *Smart Grid* são os sistemas embarcados, encontrados em várias atividades de nossa vida diária, desde a energia elétrica

enquanto insumo, passando por eletrodomésticos, mecanismos de compensação não-linear, sistemas de automação complexos e sistemas de controle adaptativo [12], [13].

Sistemas eletrônicos de monitoramento são capazes de proporcionar benefícios tangíveis e significativo retorno financeiro sobre o investimento. Os benefícios obtidos nestes casos podem ser geralmente classificados em termos de economia de energia, uso otimizado dos equipamentos e aumento da confiabilidade do sistema. Além disso, os usuários destes sistemas acrescentam a necessidade de um elevado grau de segurança e adequação dos sistemas de suprimento de energia, juntamente com um funcionamento eficaz e econômico em termos operacionais e de manutenção [14].

Cada vez mais no deparamos em nosso dia-a-dia com equipamentos eletroeletrônicos que trazem, embutidos, sistemas eletrônicos, os chamados sistemas embarcados. Sistemas embarcados podem ser encontrados em toda parte na vida diária, a partir de produtos elétricos e eletrodomésticos, automóveis, para mecanismo de compensação não-linear, sistemas complexos de automação e sistemas de controle adaptativo [12], [13].

De acordo com [15], [16] sistemas embarcados podem ser configurados para desempenhar uma ou qualquer combinação das tarefas listadas a seguir:

- Monitoramento do sistema;
- Proteção do sistema;
- Desempenho de atividades de controle central;
- Gerenciamento dos custos de energia;
- Manutenção do nível de tensão;
- Controle do fator de potência;
- Controle dos níveis de geração de energia;
- Controle do carregamento do sistema.

A integração dos sistemas é outra característica inerente às *Smart Grid*. Cada vez mais os equipamentos constituintes da rede elétrica deverão “conversar” entre si. A utilização de sistemas integrados possibilita evitar graves prejuízos econômicos resultantes de falhas inesperadas, e melhorar a confiabilidade do

sistema permitindo, além disso, a implantação de políticas de manutenção preventiva [17].

Várias são as soluções/alternativas em termos de hardware e software para aplicação em sistemas integrados para os cenários mais variados e sistemas integrados compostos por um número de dispositivos conectados a um computador através de uma Rede de Área Local (*Local Area Network* - LAN), geralmente consistindo de uma ligação através de cabos (par trançado) [3], [15], [16], [18].

Porém, estas alternativas são baseadas em soluções proprietárias para sistemas dedicados baseados em comunicação com fio usando cabos e vários tipos de sensores. A instalação e manutenção desses sistemas é geralmente muito mais cara do que o custo dos próprios sensores. Além do que, estes sistemas são de difícil ampliação, devido, principalmente, à própria comunicação com fio e à falta de flexibilidade do software proprietário [19].

Há no meio científico/industrial um crescente interesse na aplicação de tecnologias para proteger os sistemas de controle e supervisão. Atualmente, Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (do inglês *Intelligent Electronic Devices* (IED)) e processadores de sinais robustos aplicados a comunicação de dados que possibilitam a utilização (processamento) de uma grande quantidade de dados. Além disso, esforços de integração vêm sendo envidados pela maioria dos fornecedores focados exclusivamente em fornecer dados de acesso; controle da supervisão e aquisição de dados [20], [21], [22].

Frente ao cenário apresentado, da integração e convergência de diferentes sistemas formando uma infraestrutura de redes inteligentes, esse trabalho traz como proposta o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de dados, tensão e corrente, que dentro das redes inteligentes apresenta-se como uma parcela fundamental.

É neste ponto, que se mostra oportuno o desenvolvimento de dispositivos dedicados a medição das grandezas do sistema elétrico. Nesse sentido, será desenvolvido um sistema de aquisição de dados, capaz de monitorar os sinais de tensão e corrente elétrica de uma carga.

1.2OBJETIVO

Estudar os sistemas de aquisição de dados existentes, analisando suas principais características e aplicações, observando contextos onde os mesmos foram empregados ou poderão ser aplicados, dentro do conceito de *Smart Grids*.

Avaliar tecnologias de processadores e microcontroladores, que possuam características de processamento digitais de sinais (do inglês *Digital Signal Processor* – DSP) e escolher uma tecnologia que atenda aos requisitos do projeto.

Desenvolver um sistema de aquisição de dados capaz de monitorar os sinais de tensão e corrente elétrica, atendendo as normas determinadas pela ANEEL.

A partir desse objetivo geral, os seguintes objetivos específicos serão trabalhados:

1. Desenvolver uma plataforma de aquisição de dados, com configuração monofásica ampliável para sistemas polifásicos, para medir a tensão e a corrente elétrica;
2. Projetar e implementar os circuitos condicionadores de tensão e corrente compatibilizando os níveis dos sinais medidos com os níveis do conversor analógico digital (AD);
3. Desenvolver o *software*, de gerenciamento da aquisição dos dados em conformidade com as normas da ANEEL;
4. Validar da plataforma, a partir da verificação dos resultados em comparação a instrumentos de referência.

1.3ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O trabalho está dividido em oito capítulos, cada um apresentando suas subseções para melhor detalhar pontos específicos, de modo a propiciar uma compreensão facilitada acerca do assunto.

- 1.Introdução;
- 2.Revisão Bibliográfica;
- 3.Digitalização do Sinal e Projeto do Filtro Passa-Baixas;
- 4.Principais Componentes do Sistema;

5.Sistema de Aquisição de Dados;

6.Resultados Experimentais;

7.Conclusões;

8.Referências.

O segundo capítulo trata da revisão de literatura, onde serão apresentados trabalhos relacionados com o processo de medição de tensão e corrente, analisado a metodologia utilizada. Ainda, serão comparados vantagens e desvantagens das topologias revisadas em relação ao trabalho desenvolvido.

O terceiro capítulo versa sobre a digitalização dos sinais, onde será apresentado o fenômeno de *Aliasing* e seus possíveis efeitos. Ainda, será introduzido o conceito de filtros eletrônicos, e mostrado o projeto do filtro passa-baixas utilizado nesse trabalho.

No capítulo quatro, serão apresentados os principais componentes do sistema de aquisição de dados e suas principais características.

O quinto capítulo é o principal, descreve todas as etapas do sistema de aquisição, explicando o funcionamento dos circuitos condicionadores de sinais. Ainda nesse capítulo será apresentado o *software* desenvolvido para o gerenciamento do sistema.

O sexto capítulo trata dos resultados experimentais, obtidos a partir da plataforma de aquisição de dados, explicando a metodologia utilizada, e finalizado com a comparação dos resultados obtidos pelos instrumentos de referência.

O sétimo capítulo apresenta as conclusões do trabalho e o oitavo as referências bibliográficas utilizadas no desenvolvimento do trabalho.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 INTRODUÇÃO.

O objetivo desse capítulo é introduzir uma discussão acerca dos circuitos condicionadores de sinais, fazendo um levantamento na literatura disponível, sobre trabalhos relacionados com o tema.

Serão apresentados trabalhos desenvolvidos, que tratem da aquisição dos sinais de tensão e corrente elétrica da rede, cujas principais características serão apontadas. No final, será feita uma discussão acerca das vantagens e desvantagens de cada trabalho e confrontadas com o sistema desenvolvido.

2.2 CONDICIONAMENTO DE SINAIS.

O processo de condicionamento de sinais é parte fundamental em sistemas de aquisição de dados, possuindo a função de compatibilizar níveis de amplitudes, permitindo o acoplamento entre os sinais da rede elétrica e as entradas analógicas dos processadores.

A instrumentação de sinais analógicos, não corresponde a uma tarefa simples, pois normalmente os sinais possuem amplitudes que inviabilizam sua digitalização direta. Nesse contexto, entram em cena os circuitos condicionadores de sinais, que baseado em amplificadores operacionais apresentam uma versatilidade em aplicações, dentre elas a realização de operações matemáticas com os sinais.

Os estágios dos circuitos condicionadores de sinais são determinados pela aplicação desejada. Com vistas em atender as necessidades impostas pela medição de tensão e corrente da rede elétrica, aplicação foco desse trabalho, foram determinadas as etapas necessárias para a realização da aplicação, com base em seus ganhos.

A Figura 2.1, mostra as etapas do circuito condicionador de tensão e a Figura 2.2, o circuito condicionador de corrente, em função de seus ganhos.

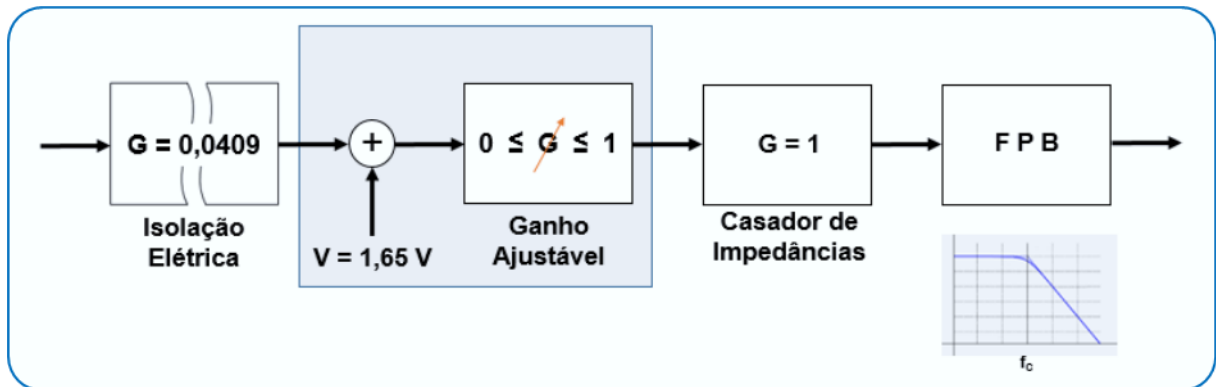


FIGURA 2.1- ESTRUTURA DO CIRCUITO CONDICIONADOR DE TENSÃO.

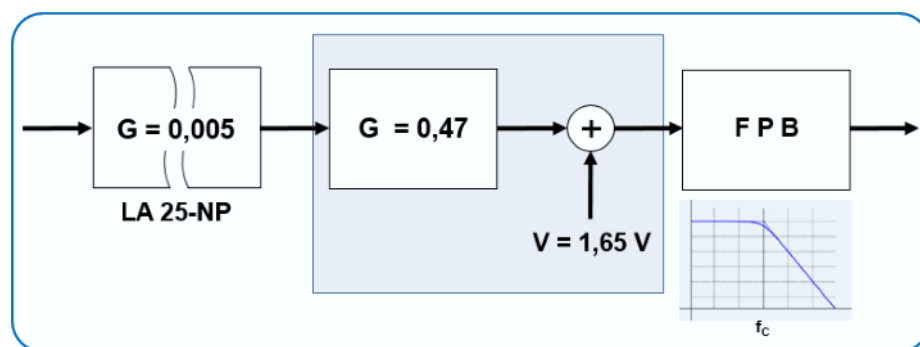


FIGURA 2.2- ESTRUTURA DO CIRCUITO CONDICIONADOR DE CORRENTE.

Nas duas estruturas, figuras 2.1 e 2.2, são mostradas as etapas dos circuitos condicionadores de tensão e corrente, através de seus respectivos ganhos, adequando o sinal a níveis em que os componentes seguintes possam trabalhar sem problemas.

Em análise das estruturas do circuito, pode-se verificar algumas características presentes no sistema desenvolvido.

- ✓ Isolação elétrica entre a rede e o circuito de medição;
- ✓ A presença de operadores matemáticos, como somadores, atenuadores e seguidor de tensão, implementados pelos amplificadores operacionais.
- ✓ A presença de um filtro passa baixas, com a função de limitar a largura de banda do sinal, proporcionando um sinal adequado para digitalização.

Todas as características do sistema, será apresentado de forma detalhada nos capítulos seguintes.

2.3 REVISÃO DE LITERATURA ESPECÍFICA.

2.3.1 SISTEMA DE MEDIDAS EM TEMPO REAL

Em 2007, [24] propôs o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados, para sinais de tensão e corrente elétrica. O sistema foi ilustrado na Figura 2.3.

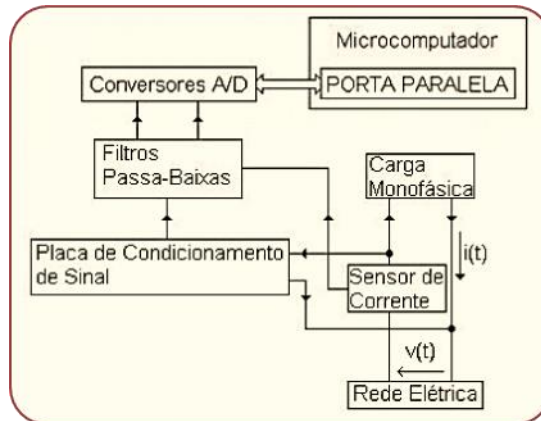


FIGURA 2.3 - SISTEMA PROPOSTO.

O sistema é formado por um circuito eletrônico conectado à porta paralela do computador e um *software* desenvolvido em C/C++ que gerencia e controla todo o processamento, incluindo as rotinas para calcular as grandezas elétricas.

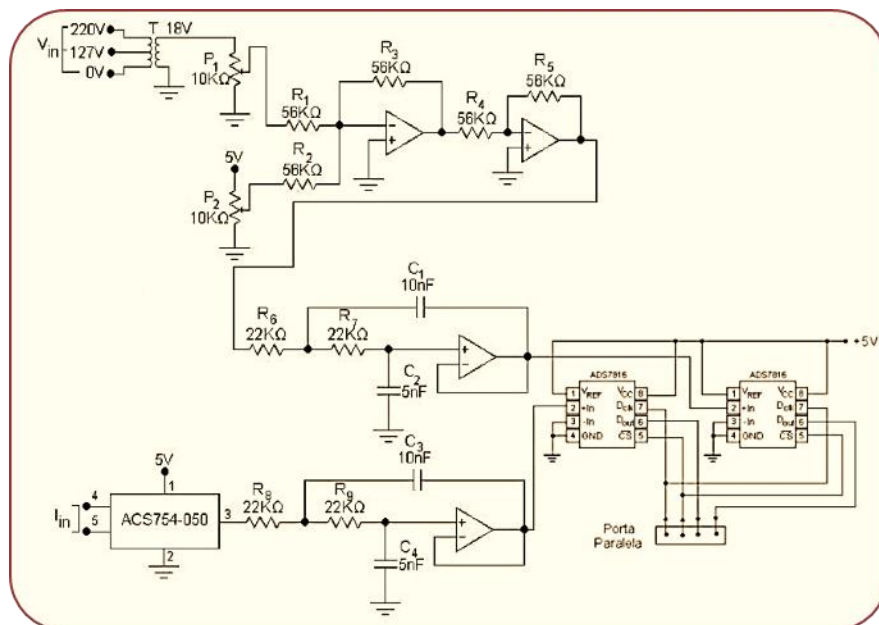


FIGURA 2.4 - CIRCUITO CONDICIONADOR DE SINAL.

Para a medição de tensão foi utilizado um transformador de potencial, para reduzir a amplitude do sinal de entrada, permitindo aos estágios secundários receberem um nível de tensão adequado. Os próximos estágios correspondem a um amplificador somador inversor, cuja função é introduzir a tensão de *offset* no circuito, seguido de um amplificador inversor com ganho unitário, utilizado para recuperar a fase do sinal de entrada, finalizando com filtro passa-baixas de segunda ordem.

Para a medição da corrente elétrica foi utilizado o sensor de efeito *hall* da *Allegro*, ACS754-050, que fornece uma tensão de saída proporcional a corrente de entrada. A tensão de saída possui amplitude compatível com os níveis de tensão suportado pelo conversor AD, o que dispensa a utilização de estágios condicionadores de tensão, sendo acoplado diretamente ao filtro passa-baixas.

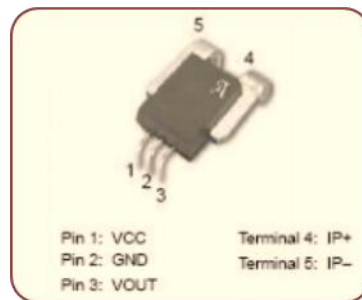


FIGURA 2.5 - SENSOR DE CORRENTE ACS754-050.

Após a realização do condicionamento dos sinais de tensão e corrente é realizado o processo de digitalização. Para essa etapa foi utilizado o conversor ADS7816, que possui uma taxa de amostragem de 200kHz, e uma resolução de 12bits.

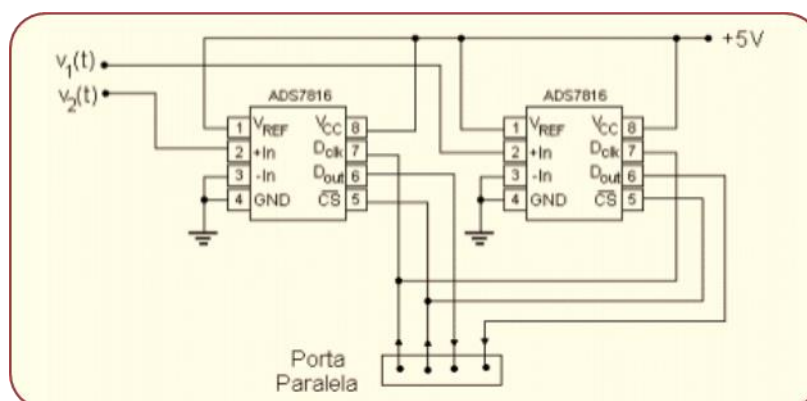


FIGURA 2.6 - CONVERSOR AD - ADS7816.

Na etapa do *software* foram utilizados filtros digitais para a realização das rotinas matemáticas responsáveis pela determinação da tensão eficaz, corrente eficaz e potência média. Os filtros digitais utilizados foram passa-baixas tipo IIR, por apresentar uma rápida convergência [24].

Plataforma de aquisição de dados e resultados obtidos.

Na Figura 2.7, pode-se ver a plataforma montada em placa de circuito impresso e os resultados obtidos, sendo exibidos em tela.

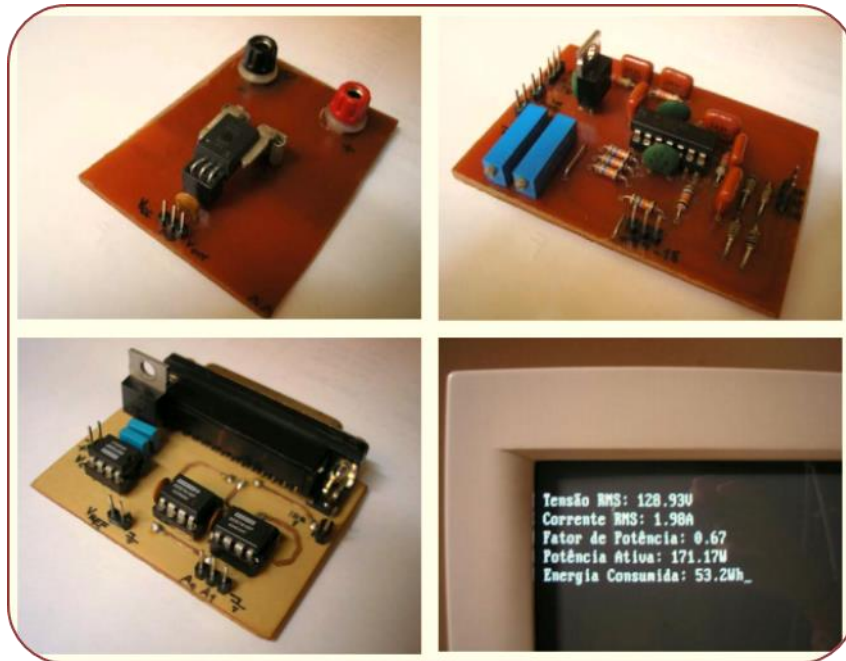


FIGURA 2.7 - PLATAFORMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS E OS RESULTADO.

Fonte: [24].

Vantagens do Sistema

- ✓ Simples implementação;
- ✓ Baixo custo;
- ✓ Apresenta isolamento Galvânica;
- ✓ Utiliza um conversor AD de 12bits, com frequência de 200kHz;
- ✓ Utilização de um computador para processamento do sinal.

Desvantagem do Sistema

- ✓ Não utiliza um processador na plataforma;

2.3.2 PLATAFORMA DE DETECÇÃO E DIAGNÓSTICO DE FALHAS – (DDF)

Em 2008, [25] propôs o desenvolvimento de uma plataforma de detecção e diagnóstico de falhas (DDF), denominada Sistema Híbrido de Aquisição de Sistemas Elétricos (SHASE). A plataforma foi analisada operando em paralelo com um sistema de geração isolado baseado em um gerador de indução, analisando resultados com a inserção de falhas nesse sistema.

O sistema proposto foi ilustrado na Figura 2.8.

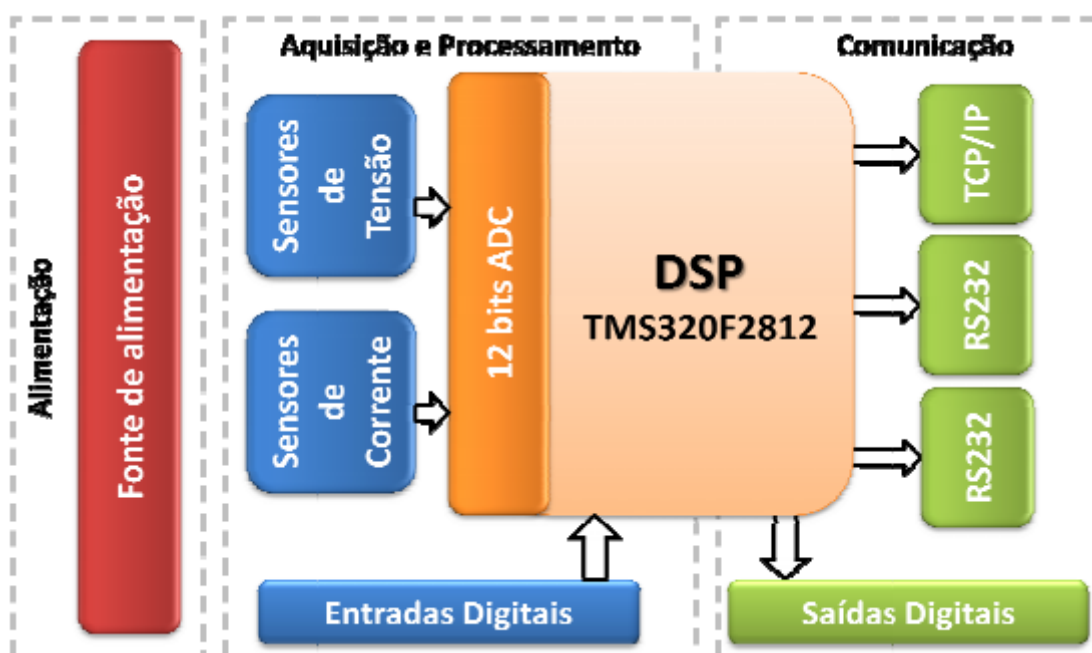


FIGURA 2.8 - SISTEMA PROPOSTO PARA DDF.

Fonte: [25].

O sistema é formado por um *hardware* baseado no DSP TMS320F2812 e um *software* que está dividido em duas partes, uma gravado no próprio DSP e a outra é executado no computador. O SHASE é uma plataforma que tem a capacidade de monitorar o sistema elétrico, através de suas seis entradas analógicas. A plataforma ainda possui quatro entradas digitais, e se necessário pode atuar no sistema através de quatro saídas digitais [25].

A comunicação da plataforma com o computador é realizada pela porta serial RS-232, havendo a possibilidade da comunicação através do protocolo TCP/IP.

O SHASE foi utilizado no estudo de caso que apresentava valores nominais de tensão e corrente para cada fase de 110 V e 5 A. Porém, para garantir que a plataforma permitisse o monitoramento do sistema em situações adversas foram consideradas sobretensões de 20% e correntes de curto-circuito com 2000% da nominal, sendo assim a plataforma era capaz de monitorar tensões até 130 V e correntes 100 A [25].

O módulo analógico é composto por transformadores de tensão com razão de transformação com relação de transformação de 1:11 e transdutores de corrente HAIS100-TP da LEM® [28], de modo a reduzir os níveis de tensão e correntes fornecidos pelos secundários dos transformadores de medição. O módulo, então, é acoplado aos circuitos de condicionamento de sinal do SHASE. Ver Figura 2.9 [25].



FIGURA 2.9 - DIAGRAMA DE BLOCOS DA PLACA DO MÓDULO SENSOR.

Fonte: [25]

Para adequar o sinal a entrada do conversor AD do DSP, foram utilizados amplificadores operacionais na configuração inversora e somador inversor, para introduzir a tensão de *offset* ao sinal analógico que será amostrado.

O SHASE apresenta nove condicionadores de sinais, sendo três para tensão e os outros seis para corrente. Como o SHASE foi projetado para medir a corrente nominal e a corrente de curto-circuito, então três condicionadores são responsáveis pela medição da corrente em seus valores nominais, enquanto os outros três são dedicados a medição da corrente de curto-circuito.

Para uma maior flexibilidade na realização das medições, o módulo sensor analógico foi construído externo a placa do SHASE. A Figura 2.10, mostra o módulo sensor, enquanto a Figura 2.11, mostra a plataforma SHASE.

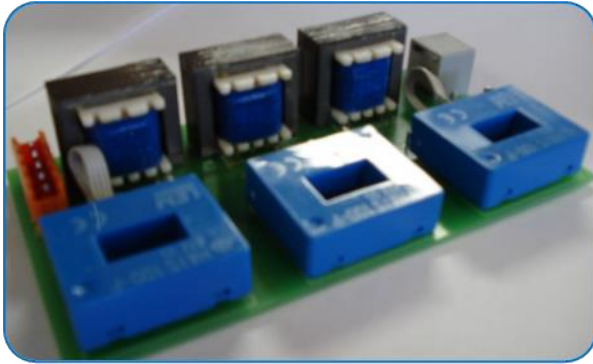


FIGURA 2.10- MÓDULO SENSOR ANALÓGICO.

Fonte: [25].

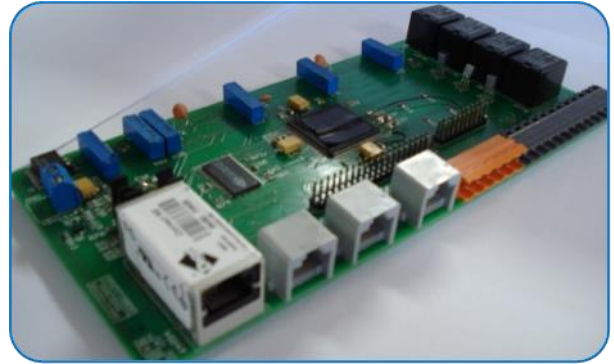


FIGURA 2.11 - PLATAFORMA SHASE.

Fonte: [25].

Vantagens do Sistema

- ✓ Apresenta isolação Galvânica;
- ✓ Utiliza um DSP de alta capacidade com 32 bits e ponto fixo;
- ✓ Opera a 150MHz;
- ✓ Utiliza conversor AD de 12bits;
- ✓ Flexibilidade na medição, uma vez que o módulo sensor é externo da placa de processamento;
- ✓ Pode intervir no sistema.

Desvantagem do Sistema

- ✓ Implementação robusta;
- ✓ Custo Elevado.

2.3.3 MEDIDOR DE ENERGIA ELETRÔNICO

Em 2009, foi proposto por [27], um projeto de medição de energia microcontrolado, que aquisitava sinais de corrente e tensão de uma instalação elétrica, calculando a potência (ativa e reativa) e o fator de potência. Quando necessário atuava, acionando bancos de capacitores para corrigir o fator de potência do sistema.

O medidor possui um display de LCD, para visualizar os valores localmente, além de gerar relatórios do consumo, que pode ser transferido para um computador através de uma comunicação serial (RS-232) [27].

O microcontrolador escolhido foi o PIC16F916, mostrado na Figura 2.12, por apresentar cinco canais analógicos, controlador de LCD e oscilador interno. Para a comunicação serial foi utilizado um conversor TTL/RS-232 para compatibilizar os níveis de tensão.

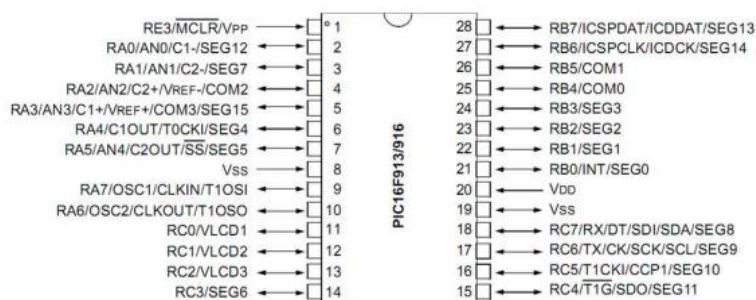


FIGURA 2.12 - MICROCONTROLADOR PIC16F916.

Fonte: [27].

A limitação do projeto é que a maior potência ativa medida é de 4400 W. Esse limite pode ser estendido redimensionando o condicionamento dos sinais de entrada. No projeto são medidos potência de 40 W até 4400 W.

Para a medição de tensão e corrente foi utilizado o sensor de efeito *hall*, ACS712.



FIGURA 2.13 - SENSOR ACS712.

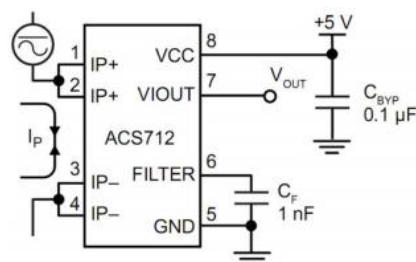


FIGURA 2.14 - ESQUEMA DE LIGAÇÃO

O circuito proposto para o medidor de energia é mostrado na Figura 2.15.

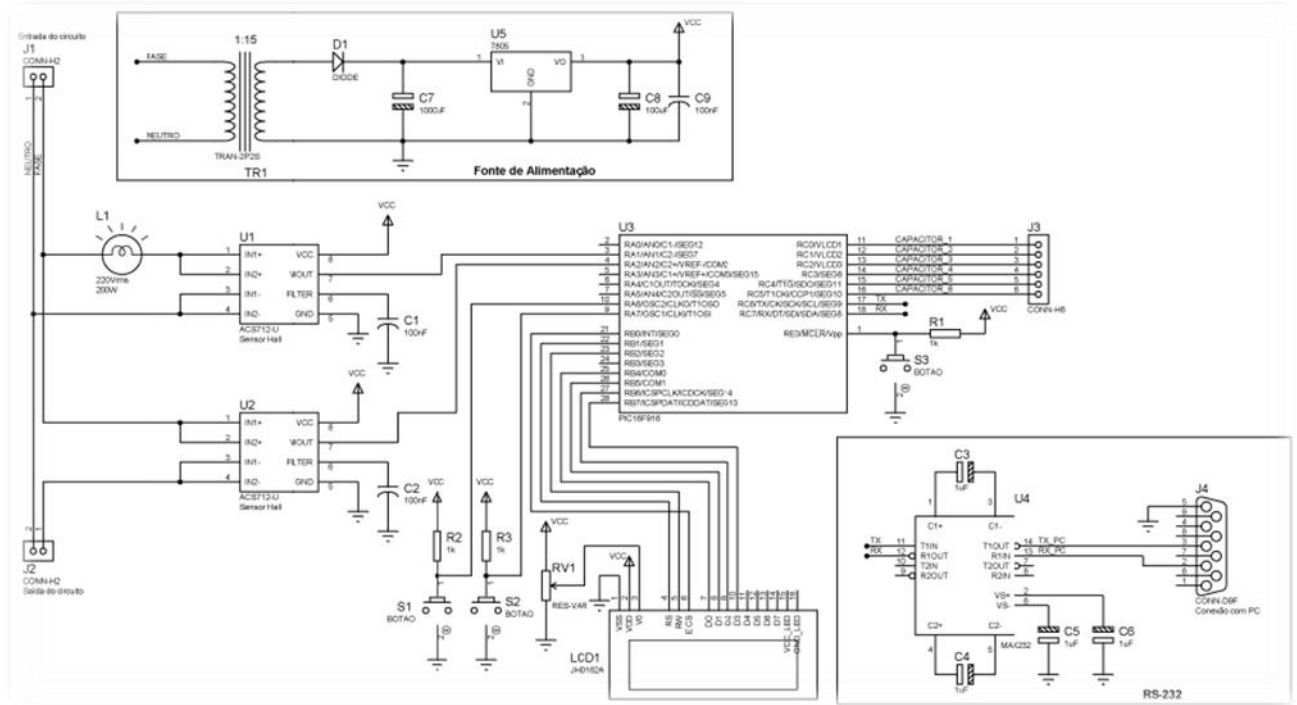


FIGURA 2.15 - CIRCUITO ELETRÔNICO DO MEDIDOR DE ENERGIA.

Fonte: [27]

A Figura 2.16, ilustra os resultados obtidos.

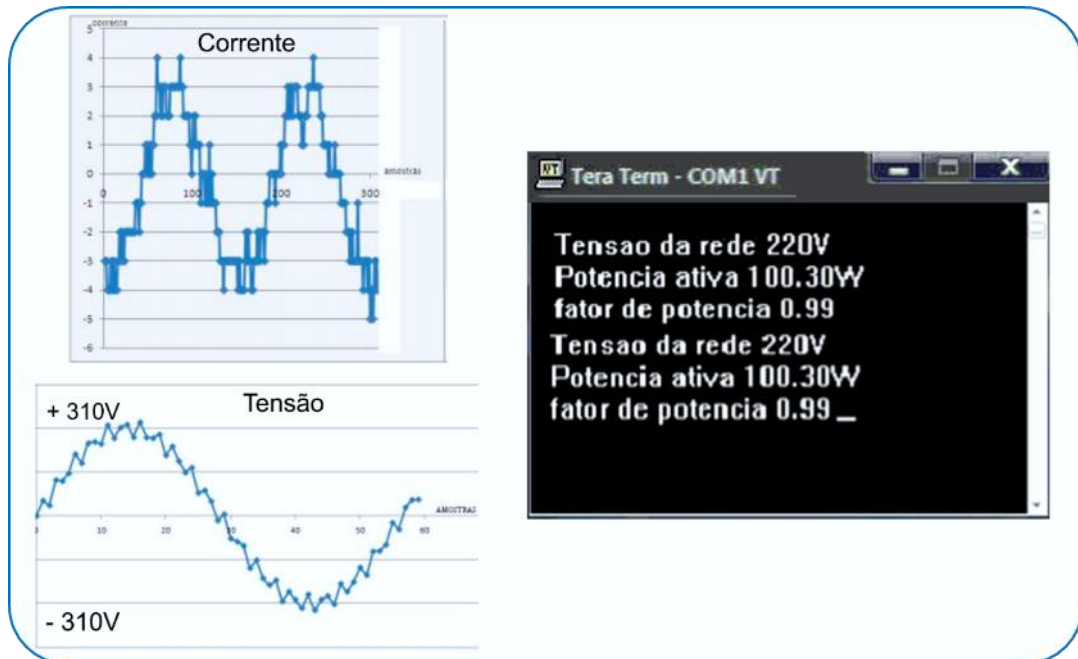


FIGURA 2.16 - RESULTADOS.

Fonte: [27]

Esse trabalho apresenta uma proposta, que possibilita a correção do fator de potência, em momentos oportunos.

No entanto, a grande desvantagem consiste no uso do microcontrolador, que apresenta um baixo processamento, tornando-o inviável em aplicações que demandam alto processamento, além de não atender as normas de distribuição por apresentar um conversor AD com resolução de 10 bits.

A ANEEL, determina que um sistema de medição deve possuir um conversor AD de pelo menos 12 bits, com isso o sistema apresentado não se enquadra no disposto em norma.

Vantagens do Sistema

- ✓ Apresenta isolamento Galvânica;
- ✓ Baixo custo;
- ✓ Simples Implementação;
- ✓ Pode intervir no sistema, com vistas na correção do fator de potência.

Desvantagem do Sistema

- ✓ Utiliza um microcontrolador de 8 bits, com frequência de operação de máxima de 20MHz;
- ✓ Processador não possui características DSP.
- ✓ Apresenta um conversor AD de 10 bits.

2.3.4 ATENUADOR RESISTIVO

Em 2010, [28] publicou um artigo na Conferência Internacional de Educação em Engenharia e Tecnologia, que propôs um circuito eletrônico utilizado para medição de tensão alternada, de 127 V eficaz.

Apesar de não ter sido implementado, o trabalho foi levando em conta na revisão da literatura, por apresentar um modelo de medição com proposta diferente das demais apresentadas. O circuito proposto é mostrado na Figura 2.17.

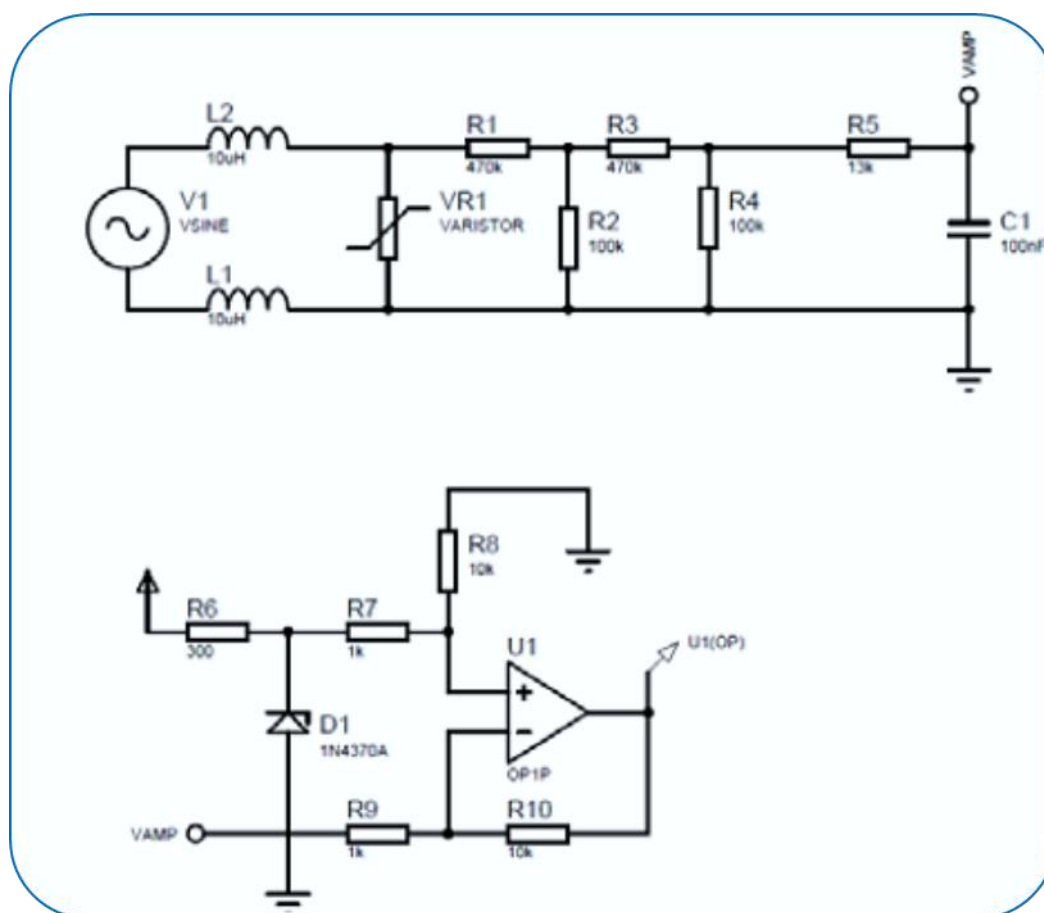


FIGURA 2.17 - CIRCUITO DE MEDIÇÃO DA TENSÃO.

Fonte: [28].

O circuito condicionador de sinal, está dividido em duas partes. Na primeira foram utilizados indutores na entrada seguido de um VDR, proporcionando uma filtragem inicial, eliminando picos de tensão oriundos da rede elétrica, na sequência existem duas malhas resistivas em cascata, que resultam na atenuação do sinal,

finalizando essa primeira parte com um filtro passa-baixas de primeira ordem, com frequência de corte em 120 Hz.

Na segunda etapa é composta basicamente por um amplificador operacional, configurando como um somador inversor, que tem a função de somar a tensão de *offset* ao sinal analógico a ser medido.

A Figura 2.18 e Figura 2.19, mostra, respectivamente, o sinal da rede elétrica e o sinal condicionado na saída do circuito condicionador, durante a simulação.

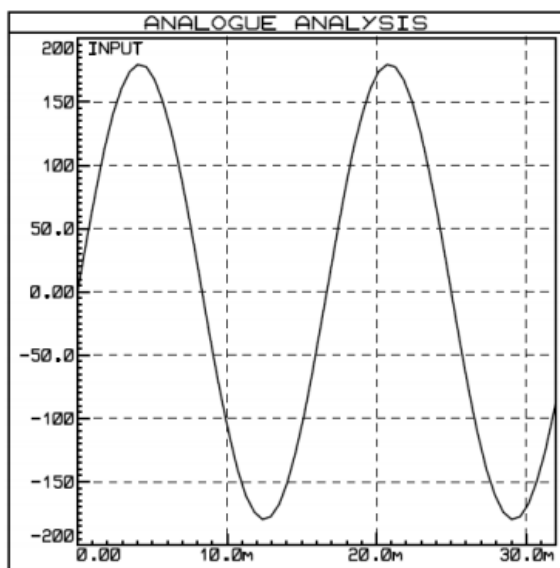


FIGURA 2.18 - SINAL DE ENTRADA DA REDE.

Fonte: [28].

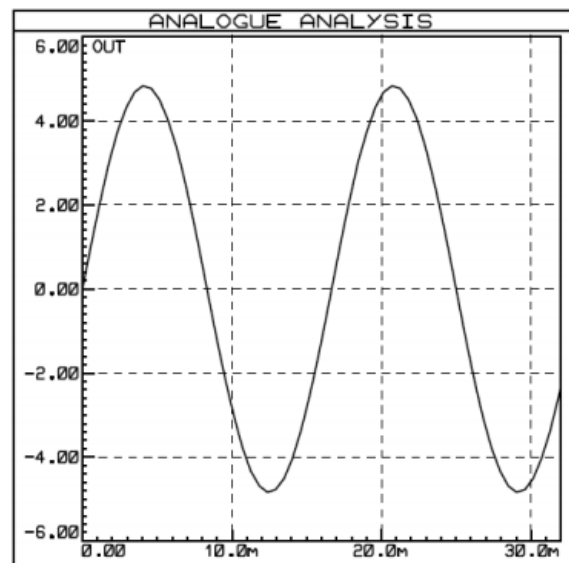


FIGURA 2.19 - SINAL DE SAÍDA DO CIRCUITO.

Fonte: [28].

O objetivo desse trabalho foi apresentar uma topologia diferente para o condicionamento da tensão elétrica.

Como principal desvantagem do sistema, tem-se a falta de isolamento elétrica entre a rede e o circuito de medição, o que pode ocasionar sérios riscos, para o usuário e os componentes do circuito de medição.

2.3.5 DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA SEM FIOS E MICROCONTROLADO DE MEDIÇÃO.

No trabalho [29], foi desenvolvido um sistema de medição inteligente de energia elétrica para cargas residenciais.

O sistema proposto foi dividido em dois módulos, o sensor e o central, onde o sensor adquire as grandezas de tensão e corrente e os envia para o módulo central via protocolo MiWi™ P2P. O módulo central recebe os dados e os envia através da interface USB para o microcomputador, onde um programa desenvolvido em C# trata os dados e os mostra ao usuário [29].

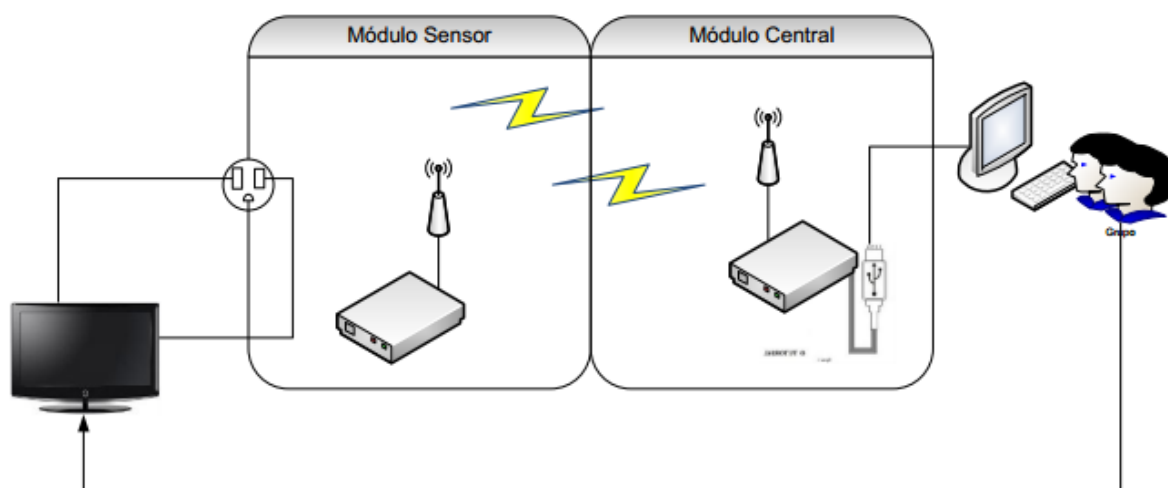


FIGURA 2.20 - REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO.

Fonte: [29].

Os dados de consumo são disponibilizados dinamicamente, através de um programa em C#, que recebe os dados do módulo central, trata e disponibiliza ao usuário [29].

Para o condicionamento dos sinais foi utilizado o sensor de efeito *hall*, da ACS712. O sensor foi apresentado na Figura 2.13 e Figura 2.14.

Os dados obtidos pelo modulo sensor são enviados a módulo central através de uma comunicação sem fio. O programa de monitoramento é executado continuamente no computador, e fica requisitando em intervalos de tempos regulares informações ao módulo central, caso exista os mesmos são tratados e por fim exibidos em tela ao comando do usuário [29].

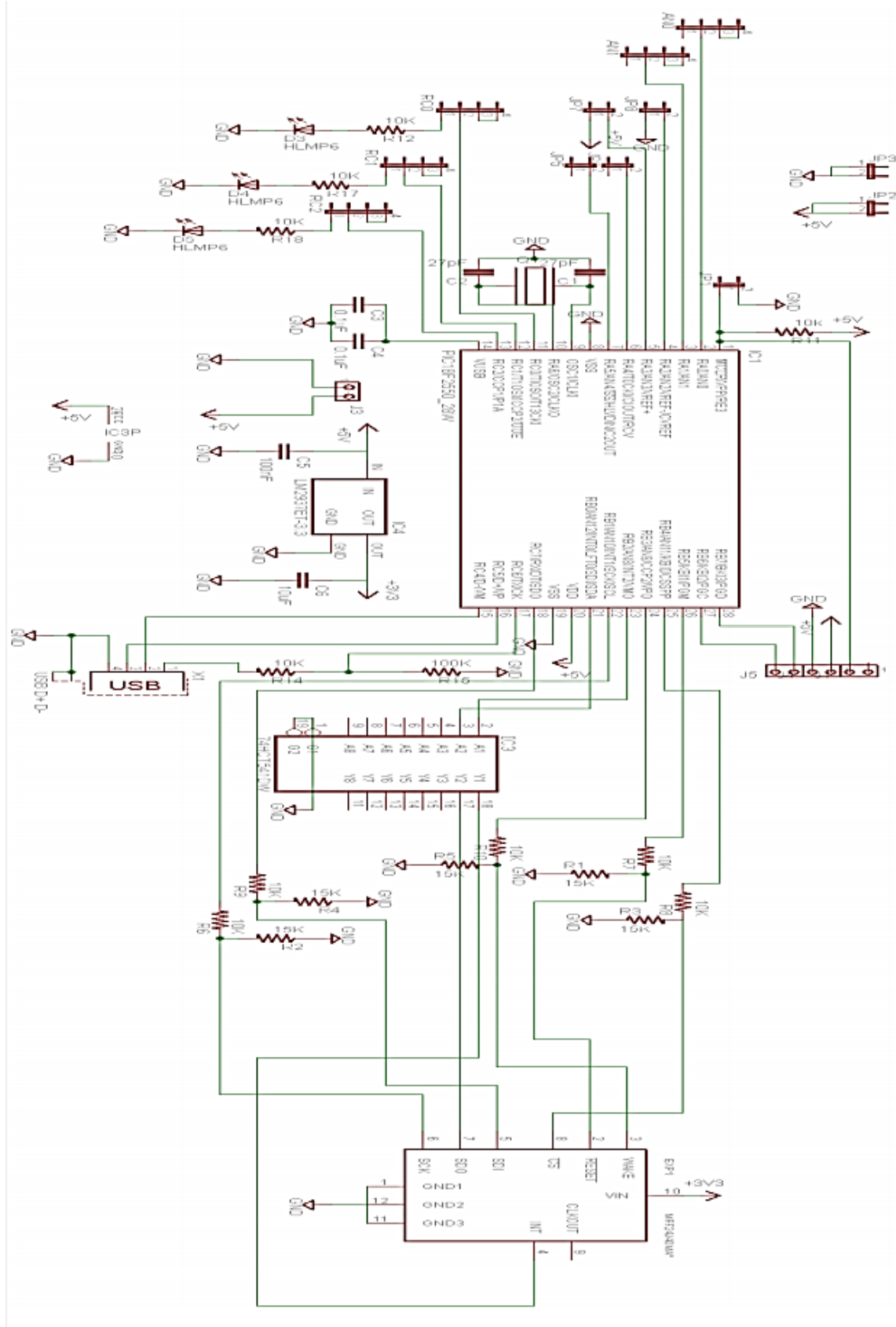


FIGURA 2.21 - CIRCUITO PROPOSTO MÓDULO CENTRAL.

Fonte: [29]

A Figura 2.22, mostra a placa do módulo central.



FIGURA 2.22 - PLACA DO MÓDULO CENTRAL.

Fonte: [29]

O microcontrolador 18f2550, possui baixo processamento e inviabiliza sua utilização nas aplicações desejadas para o trabalho proposto. Esse fato foi vivenciado por componentes do grupo de pesquisa, obrigando-os a migrarem para processadores que utilizem tecnologias DSPs. Ainda com base no microcontrolador o mesmo apresenta um conversor AD de 10bits, e como citado anteriormente não atende as normas da ANEEL.

Vantagens do Sistema

- ✓ Apresenta comunicação sem fio, entre o nó central e nó sensor.
- ✓ Realiza medição distribuída e descentralizada.

Desvantagem do Sistema

- ✓ Utiliza um microcontrolador de 8 bits;
- ✓ Frequência de operação máxima de 48MHz;
- ✓ Processador não possui características DSP.
- ✓ Apresenta um conversor AD de 10 bits.

2.3.6 DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE INTERFACE DE COMUNICAÇÃO ZIGBEE.

No trabalho desenvolvido por [30], foi proposto uma solução para a medição da energia elétrica em instalações prediais e residências comuns, aplicando sensores e módulos de transmissão de dados a fim de monitorar a qualidade da energia.

O projeto consiste em um sistema de Medição distribuída utilizando vários sensores conectados entre si através de uma tecnologia de redes sem fio, que transferem os dados para uma central de aquisição Mestre (UAM), podendo ser um computador com um supervisor, ou um servidor *Web* ligado a Internet, que difunde a informação para qualquer lugar do mundo [30].

Condicionamento dos sinais de tensão e corrente.

O circuito do condicionador de tensão é formado por um transformador de potencial seguido do circuito mostrado na Figura 2.23 e finalizado com um filtro passa-baixas.

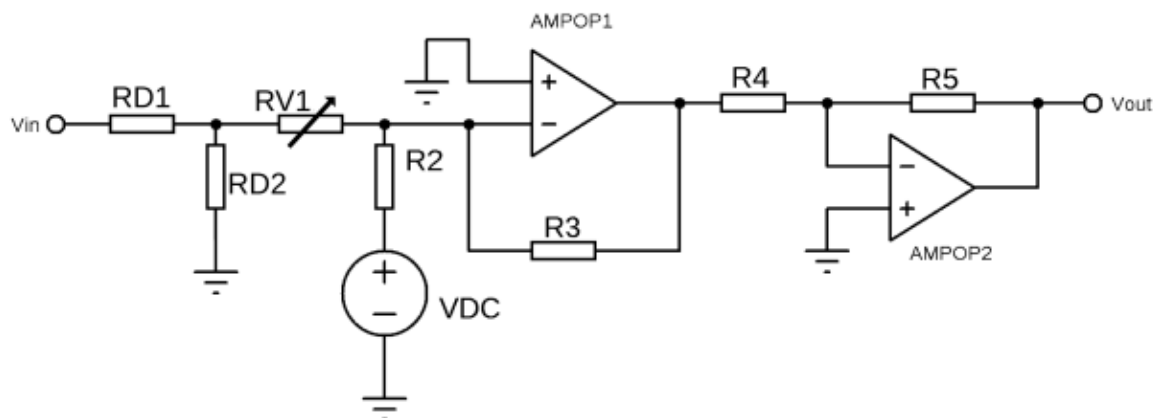


FIGURA 2.23 - CIRCUITO CONDICIONADOR DE TENSÃO.

Fonte: [30].

O divisor resistivo formado por RD1, RD2, tem o objetivo de atenuar o sinal e RV1, ajustar de modo que o sinal seja compatível com os níveis praticados pelos amplificadores operacionais, na sequência do AMPOP1 é responsável por somar o sinal de *offset* ao sinal a ser digitalizado. Por fim, o AMPOP2 é utilizado para recupera a fase do sinal.

O circuito do condicionador de corrente utiliza parte da estrutura do condicionador de tensão, sendo apenas adaptado a malha resistiva.

A corrente do circuito passa por um transformador de corrente, onde tem sua amplitude atenuada e ao passar pela resistência *shunt* (RV1) é produzida uma queda de tensão, que será lida pelo AMPOP1. Essa tensão é proporcional a corrente de entrada. A Figura 2.24, mostra o circuito condicionador de corrente. Por fim, o sinal passa por um filtro passa-baixas.

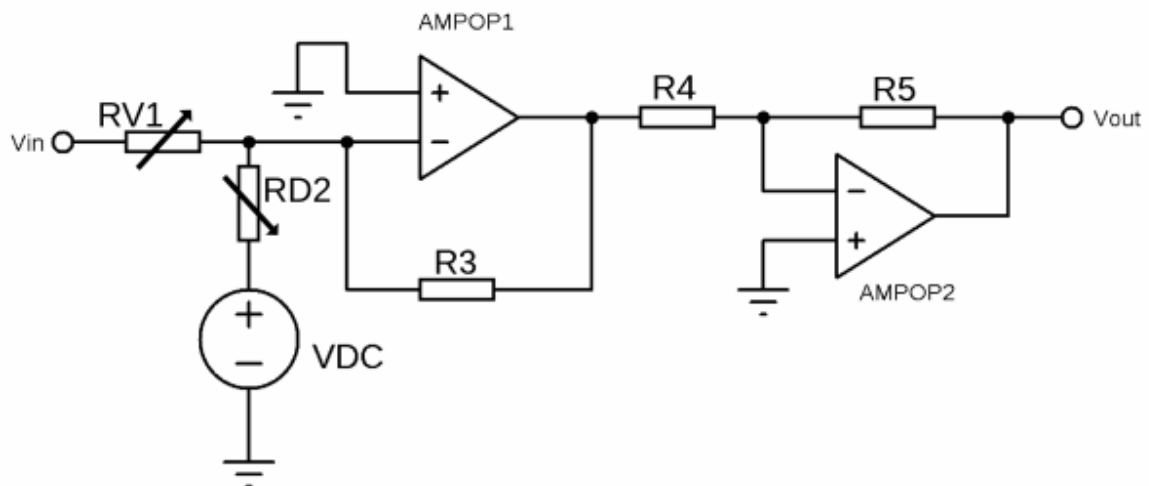


FIGURA 2.24 - CIRCUITO CONDICIONADOR DE CORRENTE.

Fonte: [30].

Após os sinais filtrados serão digitalizados pelo microcontrolador MSP430G2553.



FIGURA 2.25 - MICROCONTROLADOR MSP430G2553.

Fonte: [30].

O funcionamento do sistema é gerenciado pela Unidade de Aquisição Mestre (UAM) que requisita informações a Unidade de Aquisição Remota (UAR), que por sua vez responde enviando os dados de tensão e corrente aquisitados.

De posse dos resultados a UAM envia os dados ao computador, que através de uma interface WEB desenvolvida com recursos de HTML5, JavaScript e Python, tornam a informação portátil e acessível [30].

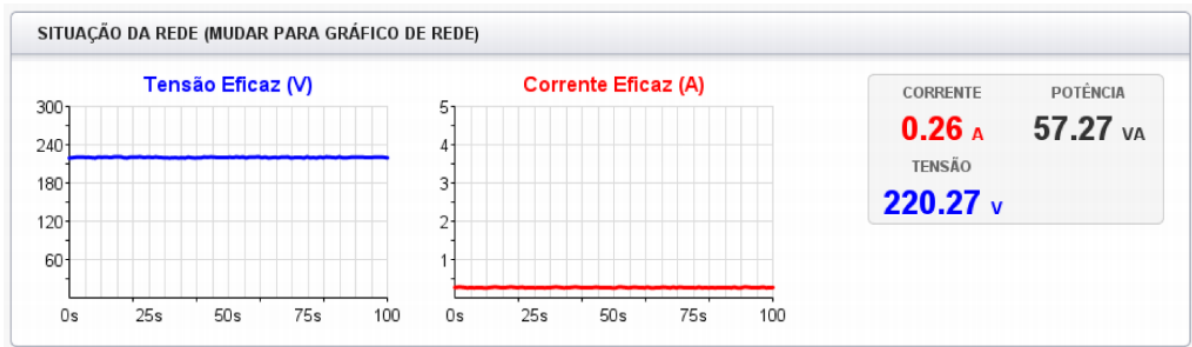


FIGURA 2.26 - INTERFACE DE APRESENTAÇÃO DOS DADOS.

Fonte: [30].

A Figura 2.27, mostra o sistema de medição proposto montado em *protoboard*.

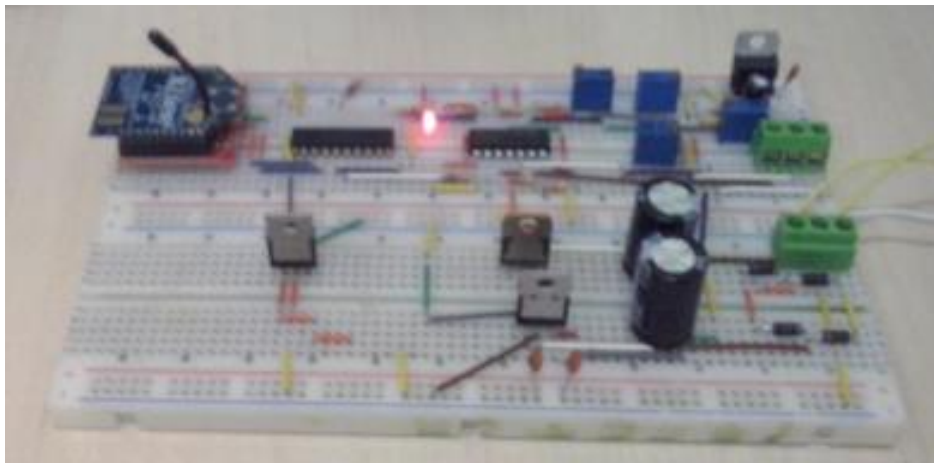


FIGURA 2.27 - SISTEMA DE MEDIÇÃO PROPOSTO.

Fonte: [30].

Vantagens do Sistema

- ✓ Apresenta isolamento Galvânica;
- ✓ Realizar medição distribuída e descentralizada.

Desvantagem do Sistema

- ✓ Microcontrolador que opera a 16MHz;
- ✓ Utiliza conversor AD de 10bits, o que inviabiliza sua utilização por não se atender a norma da ANEEL.

2.3.7 PROPOSTA DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.

O sistema de medição que será proposto nesse trabalho, apresenta característica e funcionalidades que atende as normas da ANEEL, no que se refere a *hardware* e a *software*.

A ANEEL, em sua Resolução Normativa, nº 641/2014 - 6ª revisão, com vigência a partir de 01/01/2015, norteia os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – (PRODIST), em seu Módulo 8, que trata da Qualidade da Energia Elétrica [31], determinando as características que os instrumentos de medição devem apresentar:

- 2.6.1.1 As leituras devem ser obtidas por meio de equipamentos que operem segundo o princípio da amostragem digital.
- 2.6.1.2 Os equipamentos de medição devem atender os seguintes requisitos mínimos:
 - a.Taxa amostral: 16 amostras/ciclo;
 - b.Conversor AD (analógico/digital) de sinal de tensão: 12 bits;**
 - c.Precisão: até 1% da leitura.

Ainda, com base no módulo 8, deve ser atendido o subitem:

- 4.5.2 O espectro harmônico a ser considerado para fins do cálculo da distorção total deve compreender uma faixa de frequências que considere desde a componente fundamental até, no mínimo, a 25ª ordem harmônica ($h_{min} = 25$).

Para a escolha do microcontrolador, foram observados os seguintes pontos:

- ✓ Possuir recursos que atendessem a norma;
- ✓ Conhecimento prévio sobre o microcontrolador;
- ✓ Possuir baixo custo;
- ✓ Integrado a uma plataforma de desenvolvimento.

Na escolha do microcontrolador, primeiro foi analisado recursos existentes em diversos dispositivos, sempre observando a relação custo benefício. De modo a facilitar o desenvolvimento do trabalho, foi dada preferência escolher um dispositivo já conhecido. Nesse sentido foi escolhido a plataforma Tiva™ C Series TM4C123G *LaunchPad Evaluation Kit* EK-TM4C123GXL, que consiste em uma atualização da plataforma de desenvolvimento, já conhecida, Stellaris® LM4F120 *LaunchPad Evaluation Kit* EK-LM4F120XL.

O uso da plataforma é vantajoso, por trazer o microcontrolador devidamente condicionado e integrado a um gravador nativo, o que facilita e otimiza o desenvolvimento das aplicações.

O microcontrolador é o TM4C123GH6PM, de 32 bits com ponto flutuante, podendo operar a uma frequência de 80MHz. Possui conversor AD de 12 bits, além de ter seu processador otimizado para a realização de operações matemáticas e processamentos de sinais.

Ainda, com base no *hardware* os circuitos condicionadores de sinais, foram construídos para compatibilizar os sinais da rede elétrica, aos das entradas analógicas da plataforma. Os filtros eletrônicos projetados permitem que o sistema monitore até a vigésima quinta harmônica, como disposto em norma.

O *software* desenvolvido atende as especificações da norma, no que tange a frequência de amostragem mínima e a janela de 12 ciclos, para o cálculo dos valores eficazes da tensão e corrente elétrica.

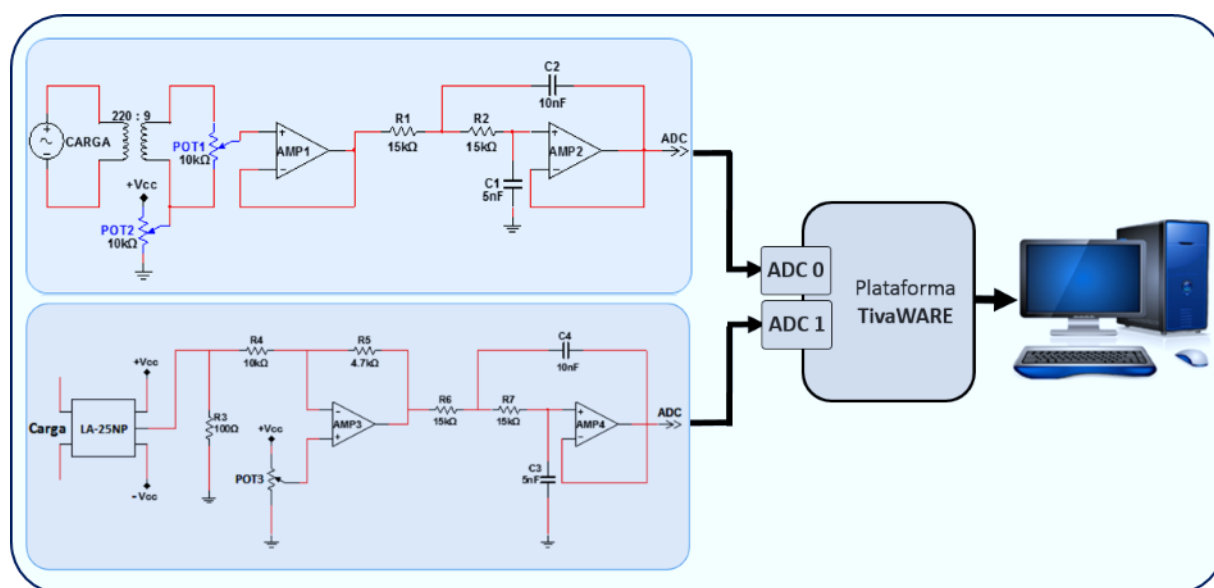


FIGURA 2.28 - SISTEMA DESENVOLVIDO.



FIGURA 2.29 - SISTEMA PROPOSTO.

A maior contribuição desse trabalho ao estado da arte, consiste no desenvolvimento de uma ferramenta de aquisição de dados, que atende, integralmente, aos requisitos da ANEEL. Nesse aspecto o trabalho se sobrepõe aos revisados anteriormente.

No entanto, como maior desvantagem, limita-se ao monitoramento de um tensão e corrente monofásica, além de não possuir uma comunicação sem fio entre o módulo sensor e o módulo de processamento.

Vantagens do Sistema

- ✓ Apresenta isolação Galvânica;
- ✓ Baixo custo;
- ✓ Flexibilidade nos ajustes dos ganhos e da tensão de offset;
- ✓ Utiliza um DSP de 32 bits com ponto flutuante e opera a 80MHz;
- ✓ Utiliza conversor AD de 12bits;

Desvantagem do Sistema

- ✓ Não realiza intervenções no sistema;
- ✓ Apenas monitora sistema monofásico.

2.4 CONCLUSÃO.

Neste capítulo foi realizado a revisão de literatura sobre medição das grandezas elétricas. Ainda, foi apresentado a prosposta do trabalho, apontando suas principais vantagens, em relação as trabalhos existentes, que consiste em atender as normas técnicas da ANEEL.

3 DIGITALIZAÇÃO DO SINAL E PROJETO DO FILTRO PASSA-BAIXAS.

3DIGITALIZAÇÃO DO SINAL E PROJETO DO FILTRO PASSA-BAIXAS

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado um estudo sobre o processo de digitalização de sinais analógicos, com base na literatura existente. Será discutido o Teorema da Amostragem de *Nyquist*, critério básico para o processo da amostragem. Observado o teorema, garante-se que o sinal amostrado será uma representação do sinal original, no momento em que for recuperado.

Após as definições iniciais relacionadas ao processo de digitalização de sinais analógicos, são revisados os conceitos sobre filtros eletrônicos e apresentado o projeto do filtro passa-baixas (FPB) de segunda ordem utilizado na plataforma de aquisição de dados, proposta nesse trabalho.

3.2DIGITALIZAÇÃO DE SINAIS ANALÓGICOS

Muitos sinais de interesse prático, como sinais biológicos, sísmicos, de radar, sonar e de comunicação como áudio e vídeo, são analógicos. Para processar sinais analógicos por meios digitais, é necessário primeiro convertê-los em formato digital num processo chamado de conversão analógico digital (AD) [32].

O conversor AD é o dispositivo responsável por transformar um sinal de entrada, contínuo no tempo, em uma sequência de números, os quais representarão amostras desse sinal [33] [34].

Na digitalização de um sinal, representada pela Figura 3.1, três processos estão envolvidos: amostragem, quantização e codificação [32] [34].

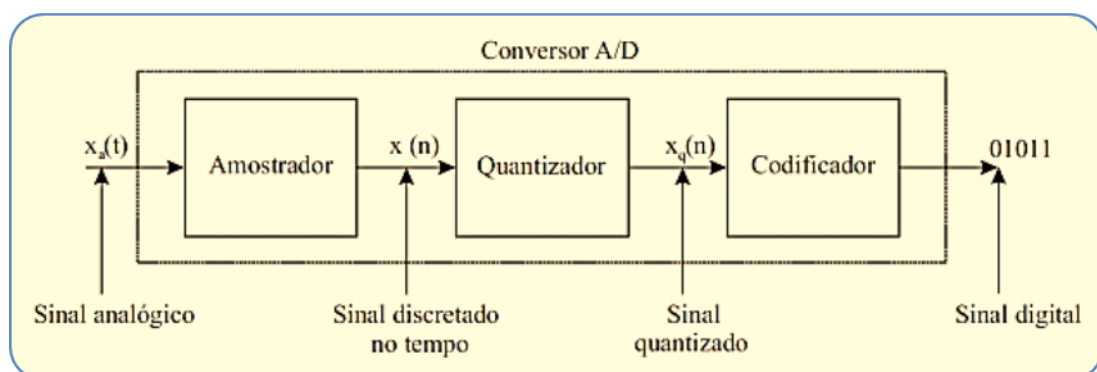


FIGURA 3.1 - PROCESSOS DA DIGITALIZAÇÃO DOS SINAIS.

Fonte: [32].

3.2.1 AMOSTRAGEM

No processo de amostragem, um sinal analógico é convertido em uma sequência correspondente de amostras que, em geral, são espaçadas uniformemente no tempo [35]. A amostragem uniforme, mostrada na Figura 3.2, é a mais usada na prática, sendo descrita pela relação [32]:

$$x(n) = x(nT_a) \quad \text{Eq. 3.1}$$

Onde:

$x(n)$ - é o sinal no tempo-discreto;

$x(t)$ - é sinal analógico;

n - é um número inteiro;

T_a - é o intervalo de amostragem.

A taxa de amostragem (F_a) é definida como sendo o inverso do intervalo de amostragem, dado por [32]:

$$F_a = 1/T_a \quad \text{Eq. 3.2}$$

Para que o sinal original possa ser reconstruído após sua amostragem, é necessário que a frequência com que as amostras são obtidas seja maior ou, na pior das hipóteses, igual a duas vezes a maior frequência do sinal [38].

Essa limitação é enunciada pelo teorema da amostragem de *Nyquist-Shannon*: “Se uma função $f(t)$ não contém frequências maiores que Ω ciclos por segundo, ela é completamente determinada, dando suas coordenadas em uma série de pontos espaçados de $1/(2\Omega)$ segundos” [37].

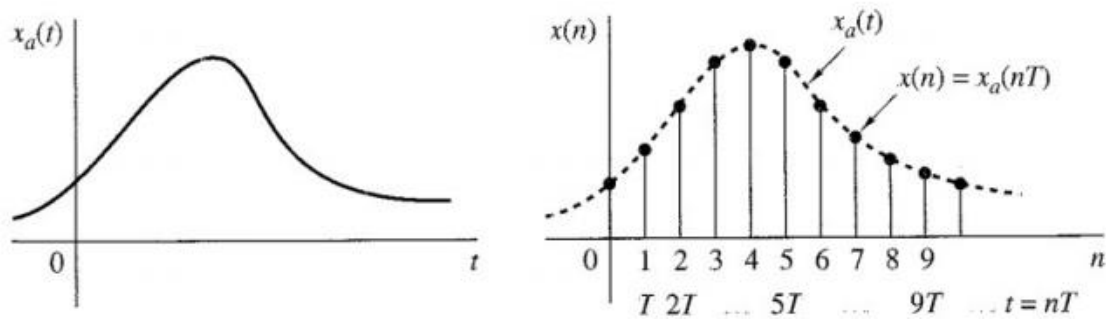


FIGURA 3.2 - AMOSTRAGEM PERIÓDICA DE UM SINAL ANALÓGICO.

Fonte: [32].

O intervalo de *Nyquist* de $1/(2\Omega)$ segundos, ou seu recíproco, 2Ω amostras por segundo para um sinal de largura de faixa de Ω Hertz, chamado de taxa de *Nyquist*, é a menor taxa de amostragem permitida. Na prática, porém, a relação é muito maior que 2Ω [36].

Em [34] é apresentada uma situação onde o teorema da amostragem não é observado permitindo que duas funções senoidais possam ser produzidas pelo sistema de digitalização de uma mesma maneira, gerando um erro de identificação (*aliasing error*). Ilustrada na Figura 3.4.

Para garantir que o sinal não contenha frequências superiores à de *Nyquist*, o mesmo deve passar por um filtro passa-baixa com corte nessa frequência, antes de ser amostrado [36].

Exemplificado o teorema *Nyquist*, considere o sinal analógico $X(t)$ da Figura 3.3, que possui frequência ($f = 7/8$ Hz) e período ($T = 8/7$ s).

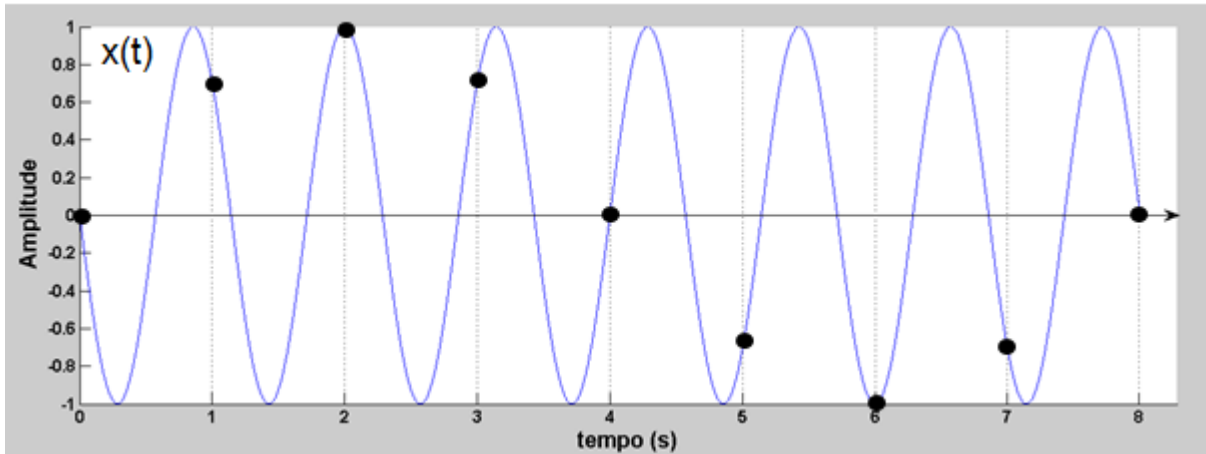


FIGURA 3.3 - SINAL ANALÓGICO ORIGINAL.

O sinal foi passado pelo processo de amostragem, em duas situações distintas, uma atendendo o teorema da amostragem de *Nyquist* a outra não.

O resultado dos processos de amostragem é mostrado na Figura 3.4, onde o sinal em azul representa o sinal original, enquanto o sinal em vermelho possui frequência menor que a do sinal original.

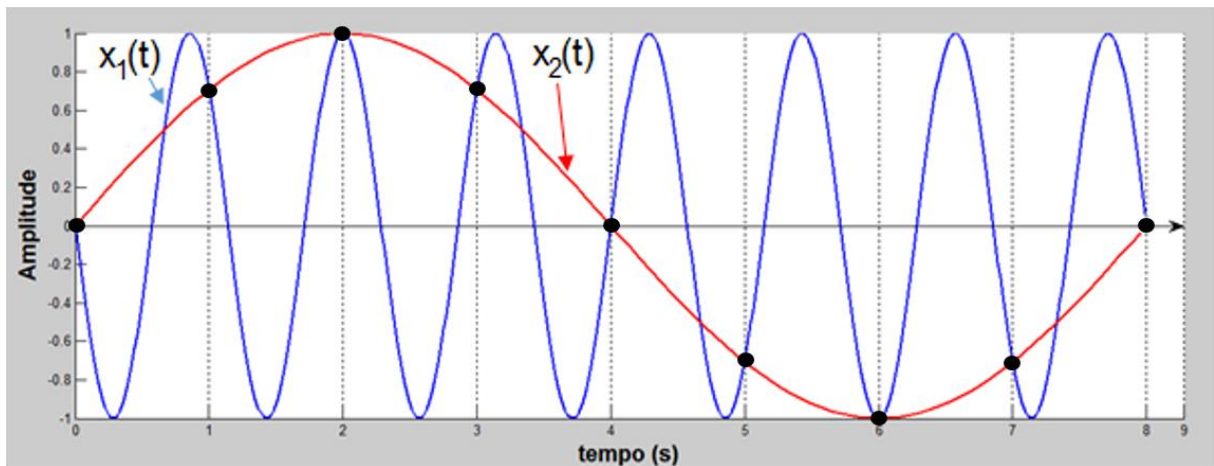


FIGURA 3.4 - SINAIS RECUPERADOS, A PARTIR DO SINAL ORIGINAL.

Com base no critério de *Nyquist*, a menor frequência com que o sinal da Figura 3.3, deve ser amostrada é determinada por:

$$f_a \geq 2x F_{max} \quad \text{Eq. 3.3}$$

$$f_a \geq 2x(7/8) \quad \text{Eq. 3.4}$$

$$f_a \geq 14/8 \text{ Hz ou } f_a \geq 1,75 \text{ Hz} \quad \text{Eq. 3.5}$$

O sinal $X_1(t)$ foi amostrado a uma frequência maior do que a frequência de *Nyquist* (f_a), permitindo ao sinal recuperado ser uma representação do sinal original.

No entanto, o sinal $X_2(t)$ foi amostrado a uma frequência ($f = 1\text{Hz}$), resultando em um período de amostragem ($T = 1\text{s}$), não atendendo ao teorema de *Nyquist*, que determinou a menor frequência de amostragem, como sendo ($f_a = 1,75\text{Hz}$), e consequentemente o menor intervalo que o sinal poderia ter sido amostrado, como sendo ($T_a = 0,57\text{s}$), em virtude desse fato resultou no erro de *Aliasing*.

Em outras palavras, o efeito *Aliasing*, consiste em um erro no processo de amostragem, que resulta em um desvio de frequência entre o sinal original e o sinal recuperado, não permitindo que o sinal recuperado possa representar o sinal original. Isso ocorre quando a frequência de amostragem, utilizada, é menor do que a frequência de *Nyquist*.

3.2.2 QUANTIZAÇÃO

As amplitudes dos dados resultantes do processo de amostragem, que pertencem a um intervalo contínuo de valores, podem ser quantificadas a partir de um conjunto finito de valores possíveis, denominados níveis de quantização, conforme ilustrado Figura 3.5 [32].

A quantidade de níveis a ser utilizada depende do número de bits usados para a codificação e o intervalo entre os níveis pode ser uniforme ou variar conforme a amplitude de interesse. O número de níveis é sempre obtido se fazendo 2^n , onde n é o número de *bits* utilizado. Assim, por exemplo, se $n = 8$ bits é possível representar 256 valores diferentes [32].

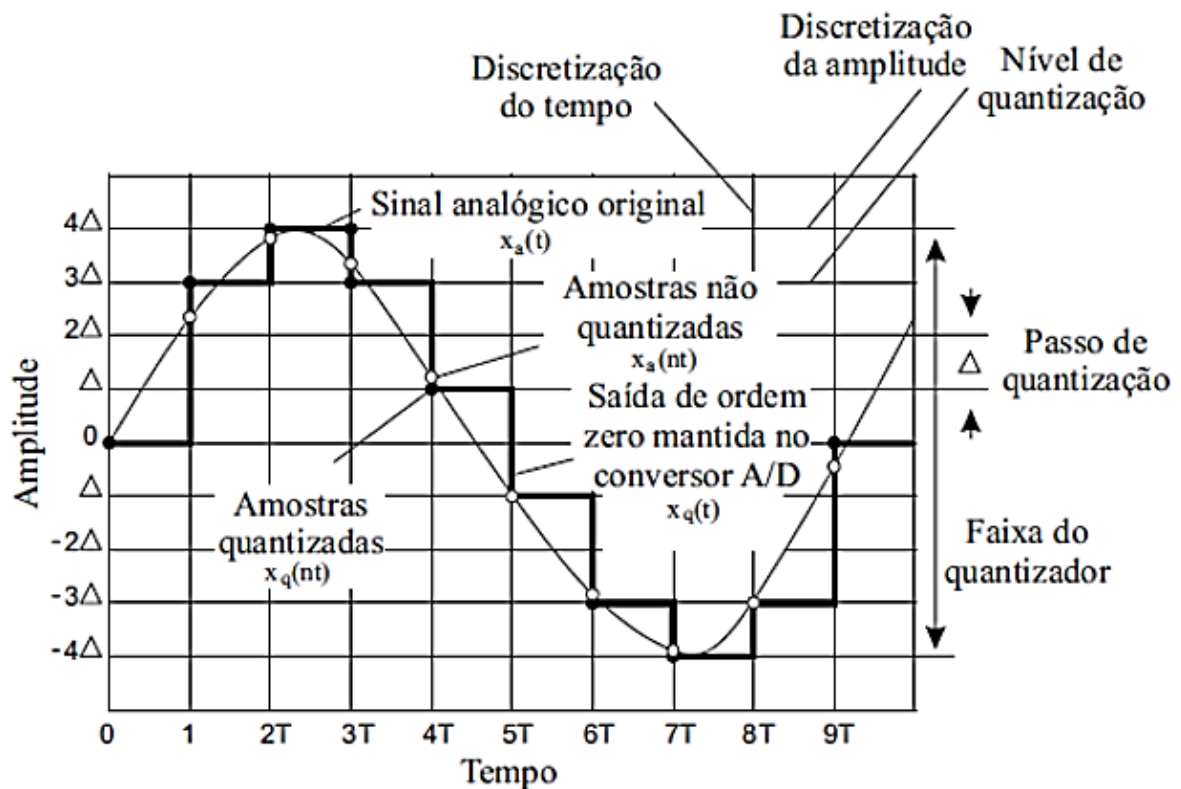


FIGURA 3.5 - AMOSTRAGEM E QUANTIZAÇÃO DE UM SINAL SENOIDAL.

Fonte [32].

O processo de discretização introduz erros na decodificação do sinal, pois cada amostra será recuperada não pelo seu valor original, mas pelo valor associado ao número do intervalo de quantização [32].

3.2.3 CODIFICAÇÃO

Nesta etapa os valores quantizados são codificados em sequências de *bits* [31]. O processo de conversão AD assume um valor binário para cada nível de quantização portanto, se existem L níveis são necessários pelo menos L diferentes números binários. Com tamanho de palavra de n bits é possível criar 2^n diferentes números binários, então $2^n \geq L$, ou de forma equivalente, $n \geq \log_2 L$. Por isso o número de bits requerido em um codificador é o menor número inteiro maior ou igual a $\log_2 L$ [32].

Geralmente quanto maior a frequência de amostragem e o número de *bits* usados para codificação, maior é o custo dos conversores AD [32].

3.3 PROJETO DO FILTRO

Os filtros eletrônicos são circuitos fundamentais e amplamente utilizados na aquisição e processamento de sinais. As áreas de telecomunicações, controle, instrumentação dentre outras, necessitam desses circuitos de forma indispensável, para o funcionamento dos seus diversos sistemas.

Um filtro eletrônico, basicamente, tem como função implementar a razão entre a tensão de saída pela tensão de entrada, em função da frequência. A resposta em frequência de um filtro é caracterizada por duas curvas, sendo uma o módulo e a outra a fase do sinal.

A função de transferência, $H(s)$, determina os componentes da curva resposta do filtro, que são: banda de passagem, banda de rejeição, frequência de corte e o fator de qualidade. Logo, para conhecer a resposta em frequência de um sistema, basta analisar o comportamento da sua função de transferência, quando a frequência varia de 0 até o infinito.

Diversas topologias de filtros são conhecidas na literatura, sendo que cada uma delas apresenta características próprias das quais podem ou não atender as necessidades de um projeto.

3.3.1 RESPOSTA DE UM FILTRO PASSA-BAIXAS IDEAL (FPBI)

A resposta em frequência do FPBI é caracterizada pela passagem de todo o sinal que apresente componentes de frequência inferior a frequência de corte, f_c , e atenuação total do sinal que apresente frequência maior que a frequência de corte. A Figura 3.6, ilustra a o comportamento do FPBI.

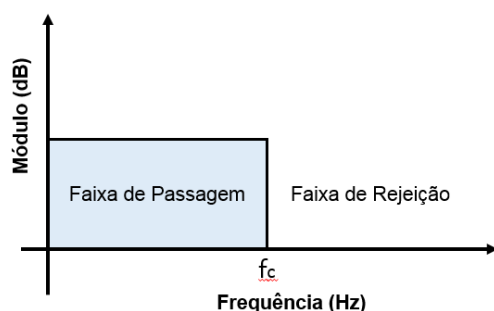


FIGURA 3.6 - RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO FPBI.

- Faixa de Passagem ou Banda Passante
(módulo = 1, para o sinal de $0 < f \leq f_c$)
 - Faixa de Rejeição ou Banda de Rejeição
(módulo = 0, para o sinal de $f_c < f < +\infty$)
- f = Frequência do Sinal
 f_c = Frequência de Corte

Para os filtros ideais, observa-se a mudança instantânea da banda passante para a banda de rejeição, embora esses filtros possam ser implementados digitalmente, eles não podem ser realizados na prática com componentes eletrônicos. A variação abrupta na frequência gera um efeito *ringing* (falsas bordas) no espaço.

Como visto anteriormente, é necessário limitar a largura de banda do sinal, para o adequá-lo ao processo da amostragem. Diante da necessidade foi escolhido um filtro passa-baixas ativo de segunda ordem, para eliminar a presença de frequências indesejáveis no sinal.

Para a escolha do filtro foi levado em consideração:

1. Facilidade de implementação;
2. Resposta em frequência compatível com a necessidade;
3. A disponibilidade do amplificador operacional, no mesmo circuito integrado em que serão implementados os circuitos condicionadores de sinais.

Para a aplicação foi escolhido a topologia *Sallen Key*, bastante utilizado pela simplicidade na implementação de filtros: passa-baixas, passa-altas e passa-faixa. Consiste em uma topologia onde a função de transferência é obtida sem grandes dificuldades e permite controlar o ganho na faixa de passagem, podendo ser um ganho unitário ou de ordem superior.

O circuito da Figura 3.7, mostra a topologia *Sallen Key*, para o filtro passa-baixas de segunda ordem.

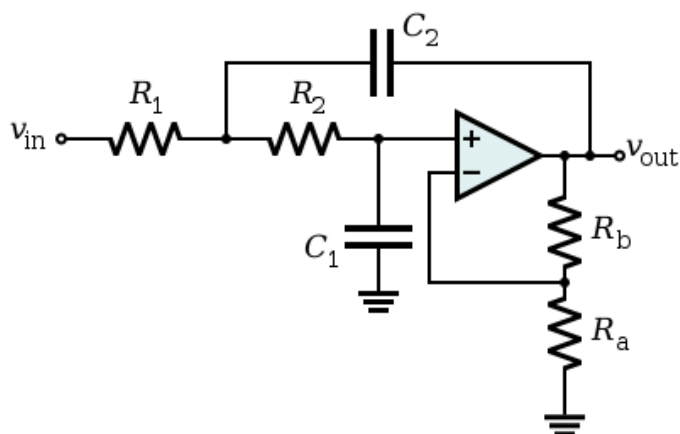


FIGURA 3.7 - FILTRO PASSA BAIXAS DE SEGUNDA ORDEM ATIVO.

Fonte:[39].

A malha formada pelos resistores R_a e R_b é responsável em fornecer o ganho de tensão ao filtro na banda passante. Nesse trabalho o filtro projetado possui ganho de tensão unitário, que permite a simplificação do circuito, resultando na Figura 3.8.

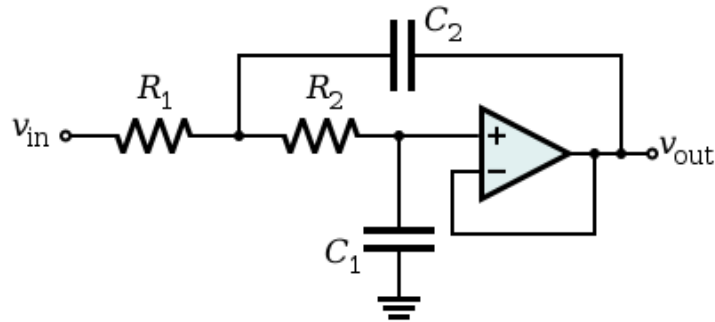


FIGURA 3.8 - FILTRO PASSA BAIXAS DE SEGUNDA ORDEM ATIVO.

Fonte:[39].

A função de transferência do filtro no domínio da frequência é dada por:

$$H(s) = \frac{(2\pi f_c)^2}{s^2 + 2\pi \frac{f_c}{Q} s + (2\pi f_c)^2} \quad \text{Eq. 3.6}$$

Onde:

f_c Frequência de corte;

Q Fator de qualidade.

A frequência de corte e o fator de qualidade, são dados respectivamente por:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad \text{Eq. 3.7}$$

e

$$Q = \frac{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}{C_1(R_1 + R_2)} \quad \text{Eq. 3.8}$$

Substituindo as equações 16 e 17 em 18, a função de transferência resulta em:

$$H(s) = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2 s^2 + C_1 (R_1 + R_2) s + 1} \quad \text{Eq. 3.9}$$

O fator de qualidade, Q , determina o formato da resposta do filtro [40].

- Para $Q = 0,5$, o filtro tem uma aproximação de *Bessel*;
- Para $Q = 0,707$, o filtro possui uma aproximação de *Butterworth*;
- Para $Q > 0,707$, o filtro possui uma aproximação de *Chebyshev*.

A Figura 3.9, mostra o efeito do fator de qualidade num filtro de segunda ordem.

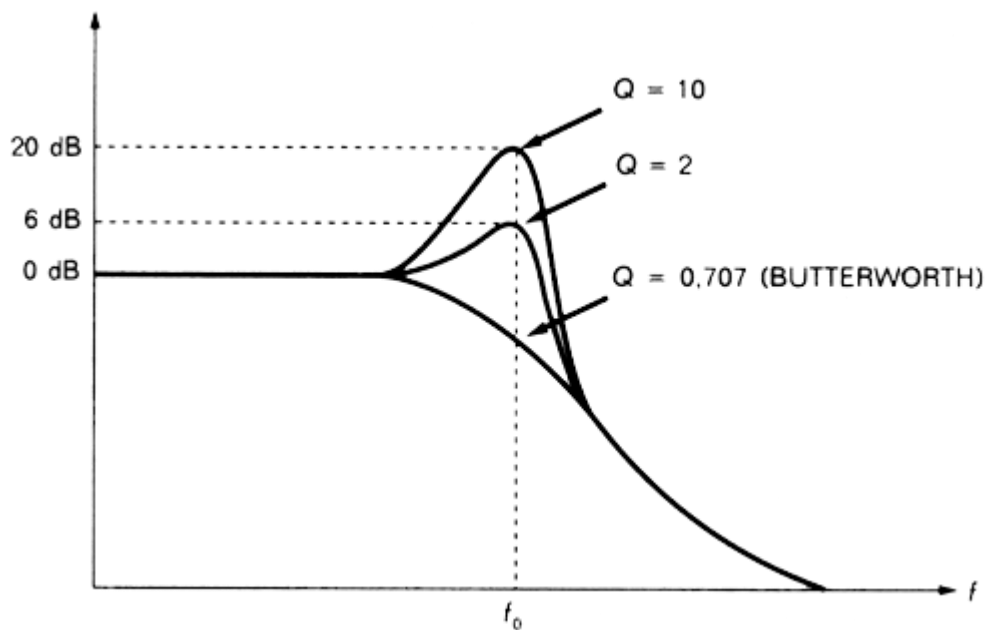


FIGURA 3.9 - EFEITO DO FATOR DE QUALIDADE EM UM FILTRO DE SEGUNDA ORDEM.

Fonte: [41].

O circuito escolhido Figura 3.8, pode apresentar três das aproximações básicas: *Bessel*, *Butterworth* e *Chebyshev* [43]. Vistas na: Figura 3.10, Figura 3.11 e Figura 3.12, respectivamente.

RESPOSTAS TÍPICAS DAS APROXIMAÇÕES

Aproximação de *Bessel* (Fonte: [41])

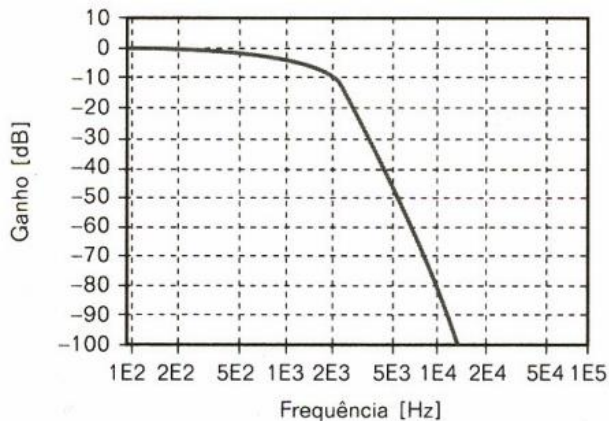


FIGURA 3.10 - APROXIMAÇÃO DE BESSEL.

Aproximação *Butterworth* (Fonte: [41])

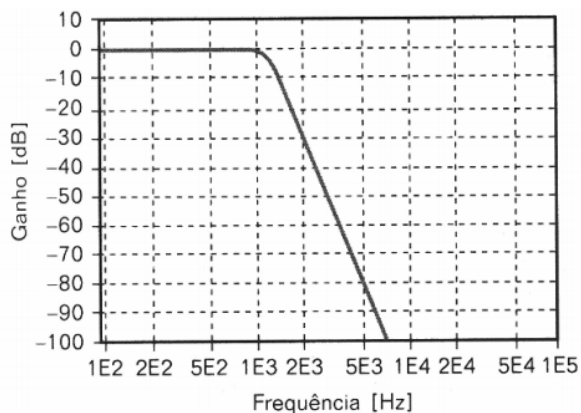


FIGURA 3.11 - APROXIMAÇÃO BUTTERWORTH.

Aproximação de *Chebyshev* (Fonte: [41]).

Características

Atenuação zero na banda passante;

Declividade na banda de transição muito menor do que a aproximação *Butterworth*;

É utilizada para produzir um deslocamento linear da frequência, comprometendo a inclinação.

Características

Atenuação zero na banda passante;

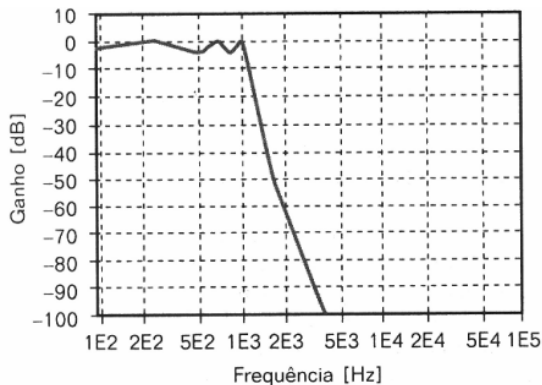
Declividade:

- 20dB/década 1º ordem;
- 40dB/década 2º ordem;

Características

Ondulação na banda passante, com mesmo valor pico a pico;

Declividade na zona de transição mais



acentuado que na aproximação *Butterworth*;

FIGURA 3.12 - APROXIMAÇÃO DE CHEBYSHEV.

Para determinar os componentes do filtro, foram levados em consideração as características e os conceitos mencionados anteriormente e a Resolução Normativa da ANEEL, nº 641/2014 [31].

Com base na resolução, foi determinada a frequência de corte do filtro de 1,5 kHz, que corresponde a 25ª harmônica do sistema.

3.3.2 DETERMINANDO OS RESISTORES E CAPACITORES DO FILTRO

A escolha dos valores dos componentes, foi iniciada determinando os capacitores, visto que em comparação aos resistores são mais difíceis de ser encontrados no mercado. Após escolher os capacitores foi definido que os valores dos resistores seriam iguais ($R_1 = R_2$).

A escolha de $C_1 = 5\mu\text{F}$ e $C_2 = 10\mu\text{F}$, e não, simplesmente, $C_1 = C_2 = 10\mu\text{F}$, decorre do fato, que caso os valores dos capacitores fossem iguais, a aproximação do filtro seria de Bessel. Através de várias simulações realizadas, foi observado uma grande atenuação na banda de passagem, e quando o filtro atingia a frequência de corte, o sinal já havia atenuado -6dB, e não -3dB como esperado. Com $C_2 = 2 \times C_1$, e os Resistores $R_1 = R_2$, chegará a um $Q = 0,707$, como desejado.

De posse dos valores dos componentes fica fácil determinar a aproximação em que o filtro estaria inserido.

Partindo da equação 3.8, fixando os valores dos resistores iguais, observa-se que a resposta só depende dos valores dos resistores. Definindo $R_1 = R_2 = R$, temos que:

$$Q = \frac{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}{C_1(R_1 + R_2)} = \frac{\sqrt{R R C_1 C_2}}{C_1(R + R)} = \frac{R\sqrt{C_1 C_2}}{2RC_1} =$$

Eq. 3.10

$$= \frac{R\sqrt{C_1 C_2}}{2RC_1} = \frac{\sqrt{C_1 C_2}}{2C_1} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_1 C_2}{C_1^2}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}$$

Dessa forma, com o fator de qualidade expresso apenas em função dos capacitores, fica fácil determinar seus respectivos valores, além do que escolher qual das aproximações pretende-se utilizar. No entanto, esse modelo é válido apenas quando $R_1=R_2$.

Os componentes do filtro foram escolhidos, a partir da definição da frequência de corte, $f_c = 1,5\text{kHz}$ e o fator de qualidade, $Q = 0,7$. Logo temos que:

- Resistores: $R_1 = R_2 = 15\text{k}\Omega$;
- Capacitores: $C_1 = 5\mu\text{F}$ e $C_2 = 10\mu\text{F}$.

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{15e3 * 15e3 * 5e-9 * 10e-9}} = 1.5 \text{ kHz} \quad \text{Eq. 3.11}$$

$$Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_2}{C_1}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{10e-9}{5e-9}} = \frac{1}{2} \sqrt{2} = 0,707 \quad \text{Eq. 3.12}$$

A função de transferência é dada por:

$$H(s) = \frac{1}{(2,42e-8)s^2 + (22e-5)s + 1} \quad \text{Eq. 3.13}$$

A Figura 3.13 mostra a resposta em frequência da função de transferência $H(s)$.

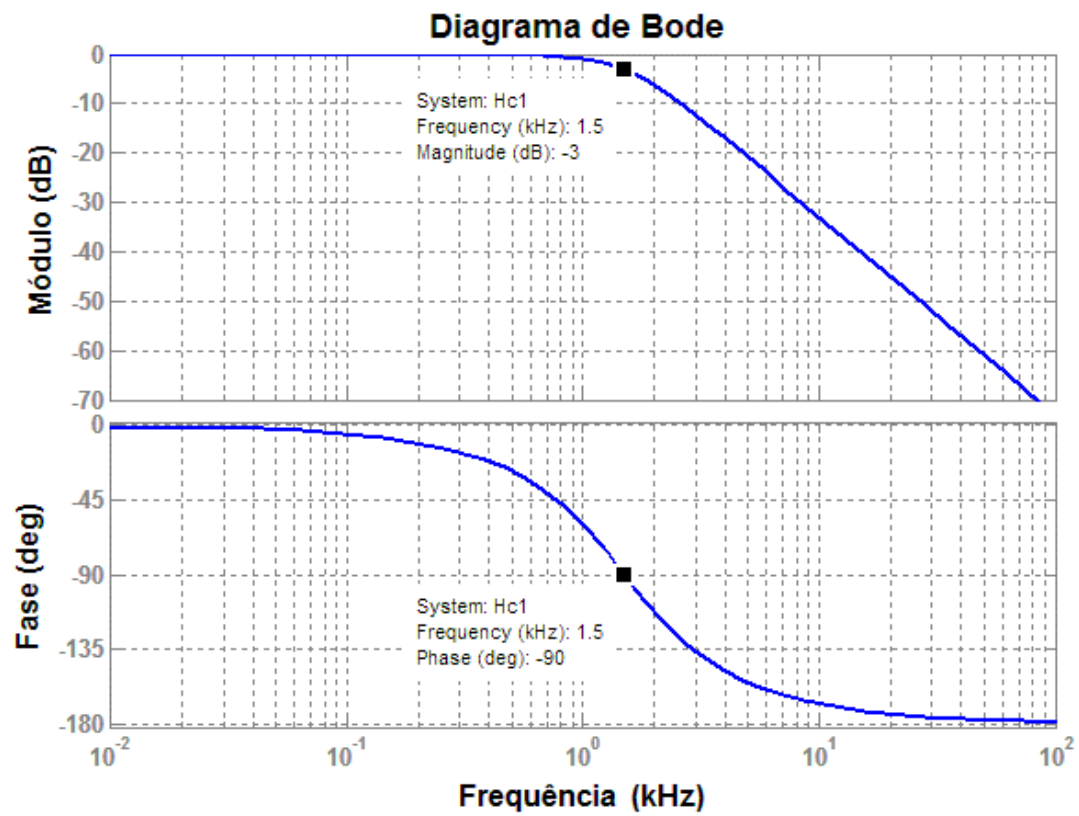


FIGURA 3.13 - RESPOSTA EM FREQU3NCIA DO FILTRO PASSA-BAIXAS DE 2^o ORDEM.

4 PRINCIPAIS COMPONENTES DO SISTEMA

4PRINCIPAIS COMPONENTES DO SISTEMA

4.1CIRCUITO INTEGRADO - LM324N

Os amplificadores operacionais (AMP OP) são componentes amplamente utilizados na eletrônica, devido a sua versatilidade e, principalmente, por possibilitarem implementar operações matemáticas com os sinais. Foi utilizado no projeto o circuito integrado LM324N, que possui quatro AMP OP no mesmo *chip*.



FIGURA 4.1 - AMPLIFICADOR OPERACIONAL, LM324N.

Um AMP OP é um componente que apresenta características próximas a de um componente ideal, dentre elas:

- Impedância de Entrada Infinita;
- Impedância de Saída Zero;
- Ganho de Tensão Infinito.

A partir dessas características os amplificadores operacionais podem assumir várias configurações. Para exemplificar serão elencadas duas configurações.

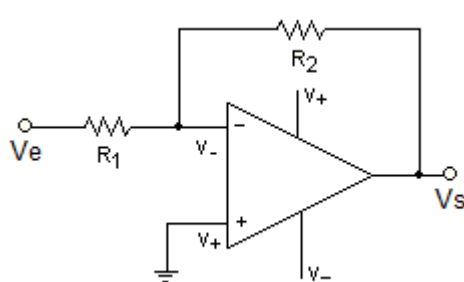


FIGURA 4.2 - AMPLIFICADOR INVERSOR.

Fonte: [43].

A função dessa configuração é aplicar um ganho negativo ao sinal de entrada, dado pela razão de $-(R2/R1)$.

A função de transferência dessa configuração é dada por:

$$Vs = -\frac{R2}{R1} \times Ve$$

Eq. 4.1

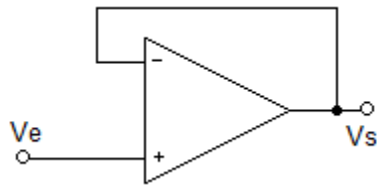


FIGURA 4.3 - AMPLIFICADOR BUFFER.

Fonte: [43].

Esta configuração, também chamada de Casador de Impedâncias, acopla com a máxima eficiência o estágio de entrada com o de saída.

A função de transferência dessa configuração é dada por:

$$V_s = V_e \quad \text{Eq. 4.2}$$

4.2 TRANSFORMADOR DE POTENCIAL

É um transformador cujo enrolamento primário é ligado em derivação com um circuito elétrico e cujo enrolamento secundário se destina a alimentar bobinas de potencial de instrumentos elétricos de medição, controle ou proteção. Na prática é considerado um redutor de tensão, pois a tensão no seu circuito secundário é normalmente menor que a tensão no seu enrolamento primário [44].

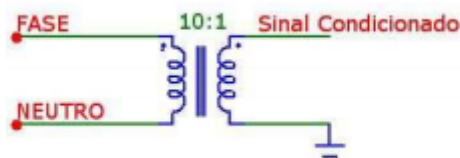


FIGURA 4.4 - TRANSFORMADOR DE POTENCIAL.

Fonte: [44].

4.3 SENSOR DE CORRENTE LA-25NP

Para a medição de corrente utilizou-se o sensor de efeito *hall*, da LEM LA25-NP, que apresenta características desejáveis, sendo a primeira a isolação galvânica entre o circuito de potência e o de medição.

O sensor atende aos requisitos da norma internacional IEC-61010-1, que define as características para instrumentos de medição em baixa tensão, 1000V_{AC} e 1500V_{DC} [46].

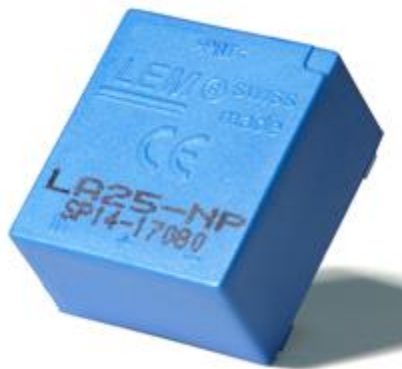


FIGURA 4.5 - SENSOR LA25-NP.

Fonte: [47].

O sensor é configurado de acordo com a corrente nominal da aplicação. A configuração é vista na Figura 4.7.

Number of primary turns	Primary current		Nominal output current I_{SN} [mA]	Turns ratio K_N	Primary resistance R_p [m Ω]	Primary insertion inductance L_p [μ H]	Recommended connections
	nominal I_{PN} [A]	maximum I_p [A]					
1	25	36	25	1 / 1000	0.3	0.023	
2	12	18	24	2 / 1000	1.1	0.09	
3	8	12	24	3 / 1000	2.5	0.21	
4	6	9	24	4 / 1000	4.4	0.37	
5	5	7	25	5 / 1000	6.3	0.58	

FIGURA 4.6 - CONFIGURAÇÃO DO SENSOR, COM BASE NA CORENTE DE ENTRADA.

Fonte: [46].

A corrente nominal do sistema é de 5 A, logo o sensor foi configurado para essa situação, mostrada na Figura 4.7.

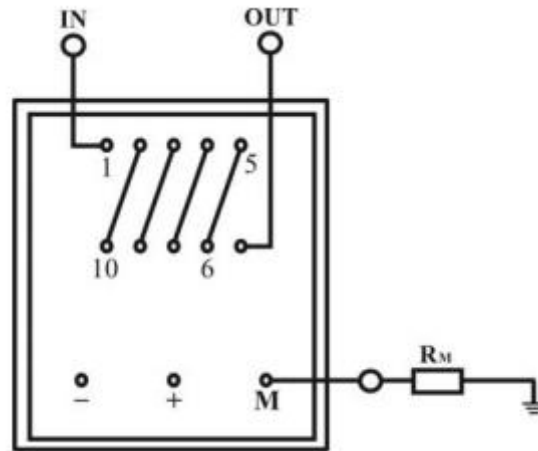


FIGURA 4.7 - CONFIGURAÇÃO DE LIGAÇÃO DO SENSOR LA25-NP.

Fonte:[45].

A Figura 4.8 – Diagrama esquemático LEM LA-25NP., apresenta o diagrama esquemático do sensor de corrente.

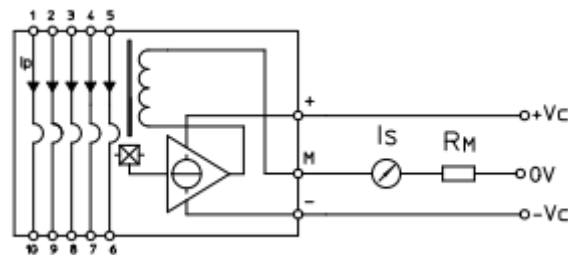


FIGURA 4.8 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO LEM LA-25NP.

Fonte: [46].

A corrente elétrica de entrada, I_P , gera um campo magnético em torno do condutor, no qual é aplicado sobre uma estrutura de silício, onde previamente está sendo percorrida por uma pequena corrente elétrica. Em virtude do Efeito *Hall*, os elétrons da estrutura de silício sofrem um desvio, e parte desses elétrons, se alojam na extremidade da estrutura, de silício, resultando em uma pequena diferença de potencial. Essa diferença de potencial é amplificada internamente e fornecida na saída na forma de uma corrente elétrica, proporcional a corrente de entrada.

5 DESENVOLVIMENTOS DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

5 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

5.1 INTRODUÇÃO

Nesse capítulo será apresentado o sistema de aquisição de dados, proposto para medição de tensão e corrente. Será mostrado, ainda, as funções de cada etapa do sistema, bem como as suas principais características de funcionamento. Além disso, será apresentada a plataforma utilizada para processamento das informações e a estrutura geral do *software* responsável pelo processamento realizado com os sinais, tendo início na aquisição do sinal e final com o envio das grandezas elétricas, tensão, corrente, entre outras para a unidade de monitoramento.

5.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS (SAD)

O sistema de aquisição de dados compreende todas as etapas envolvidas no processo de aquisição, condicionamento, processamento e monitoramento dos sinais de tensão e corrente elétrica de uma carga monofásica.

Na Figura 5.1 é ilustrado o sistema proposto, representando em blocos os principais componentes do sistema de aquisição.

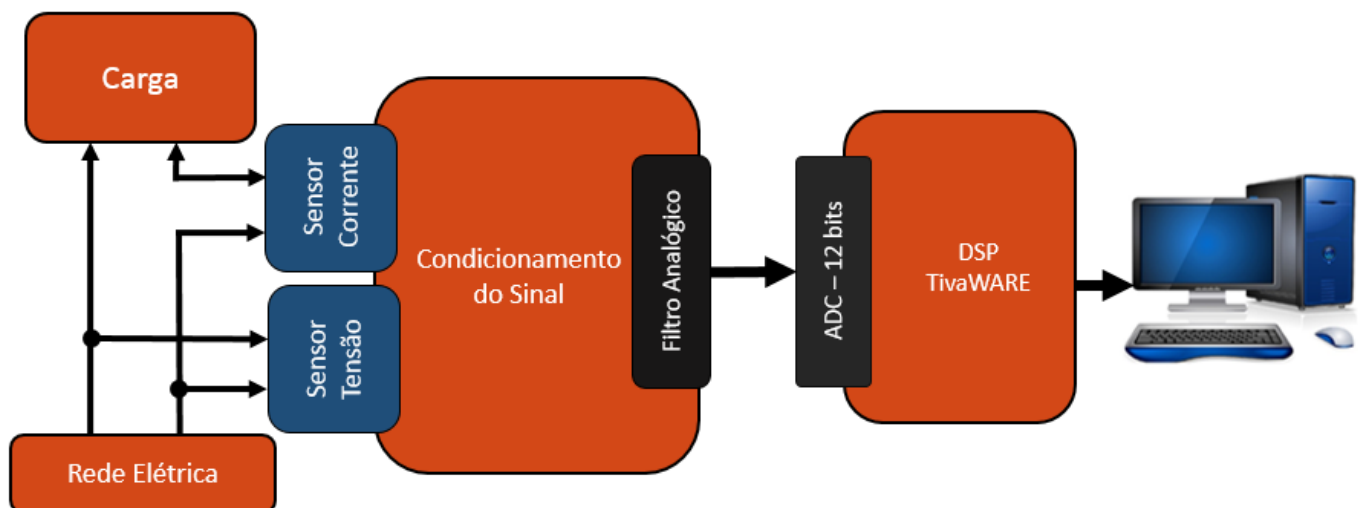


FIGURA 5.1 - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

A metodologia utilizada para a apresentação dos processos, consiste primeiro em simplificar as etapas em blocos, segundo fazer uma breve descrição de

cada um deles e posteriormente descrever de forma detalhada o funcionamento de cada bloco.

O diagrama de blocos de maneira simplificada é apresentado na Figura 5.2.

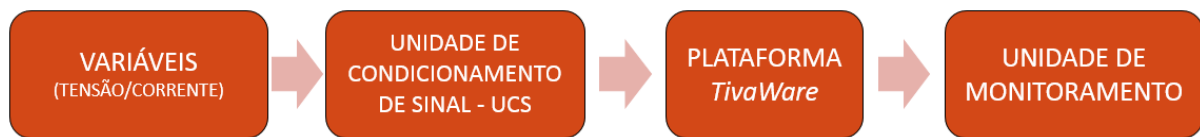


FIGURA 5.2 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.

Etapa 1 - Variáveis do sistema elétrico.

Nesta etapa são definidas as variáveis a serem adquiridas, no presente caso tensão e corrente elétrica e que serão medidas pelo sistema de aquisição de dados. Destaca-se nessa etapa o fato das variáveis apresentarem características que inviabilizam a medição direta por meio dos conversores ADs, que operam com nível de tensão limitados entre 0 e 3,3V.

Etapa 2 - Unidade de Condicionamento de Sinal - UCS

A UCS envolve todo o processo relacionado com a adequação do sinal a níveis compatíveis com os níveis necessários para a conversão AD. Tem início com a redução da amplitude do sinal de entrada para valores de tensão que possam ser utilizados pelos componentes dos estágios seguintes, sendo finalizado com a aplicação do filtro passa baixas, resultando em um sinal propício a digitalização.

Etapa 3 - Plataforma *TivaWare*TM

É a etapa do processo em que ocorre a digitalização e o processamento do sinal. Além disso, nessa etapa ocorre a transmissão dos dados para a etapa de monitoramento. Os dados são transmitidos ao computador através da comunicação serial, via porta USB, de duas formas. A primeira envia os valores já calculados e processados, que podem ser vistos em um terminal serial, que leia os dados recebidos pela porta serial, enquanto na outra salva os valores instantâneos da tensão e corrente em arquivos textos, direto no computador.

Etapa 4 - Unidade de Monitoramento

Nesta etapa os dados processados são enviados para um computador, onde o usuário pode visualizar as variáveis do sistema. O monitoramento pode ser

realizado com ou sem a intervenção do usuário, sendo determinado pelas características em que se deseja monitorar. Para verificar apenas os valores eficazes das grandezas elétricas, basta a utilização de um *software* que leia a porta serial do computador, dispensando a intervenção do usuário, no entanto caso se deseje verificar a forma de onda dos sinais, dentre outros parâmetros faz-se necessário a intervenção do usuário.

5.2.1 UNIDADE DE CONDICIONAMENTO DE SINAL (UCS)

A UCS, consiste na etapa do processo responsável por adquirir os sinais de tensão e corrente de uma carga monofásica conectada à rede elétrica, e adequá-los aos níveis da entrada do conversor AD. A UCS é composta por dois circuitos, sendo um responsável pelo tratamento do sinal de tensão e o segundo pelo tratamento do sinal de corrente.

A tensão na entrada do conversor AD, deve estar limitada entre 0 e 3,3V, ver Figura 5.3, logo é necessário adequar o sinal da rede elétrica a esse nível.

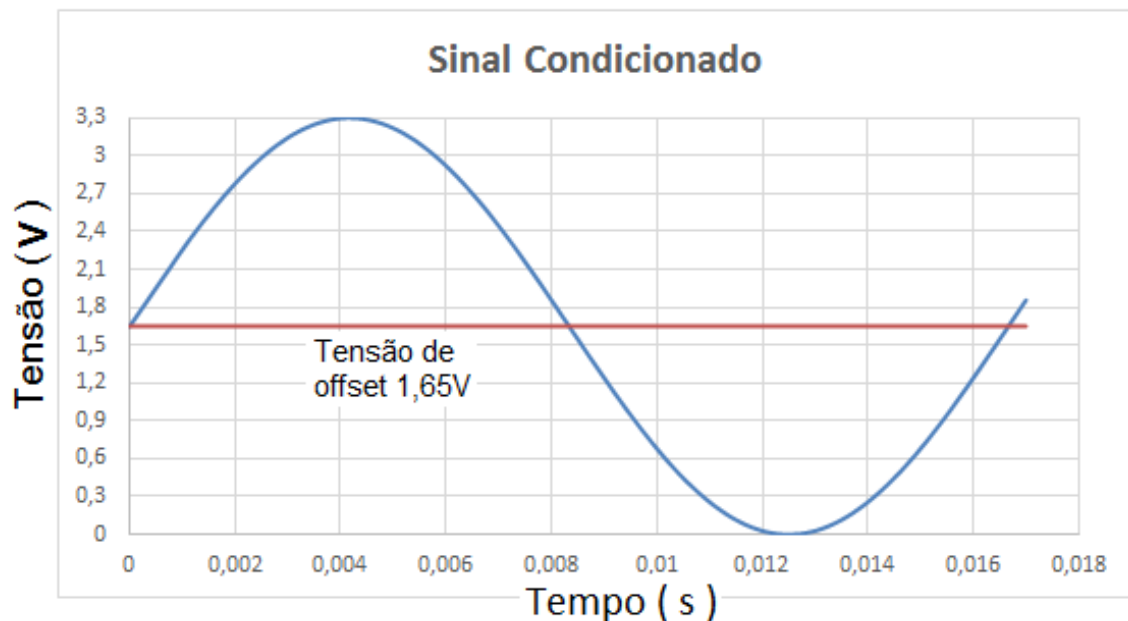


FIGURA 5.3 - SINAL DE TENSÃO COMPATÍVEL COM ADC DO DSP.

5.2.1.1 CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DE TENSÃO (CCT)

O CCT na forma de diagrama de blocos é ilustrado na Figura 5.4.

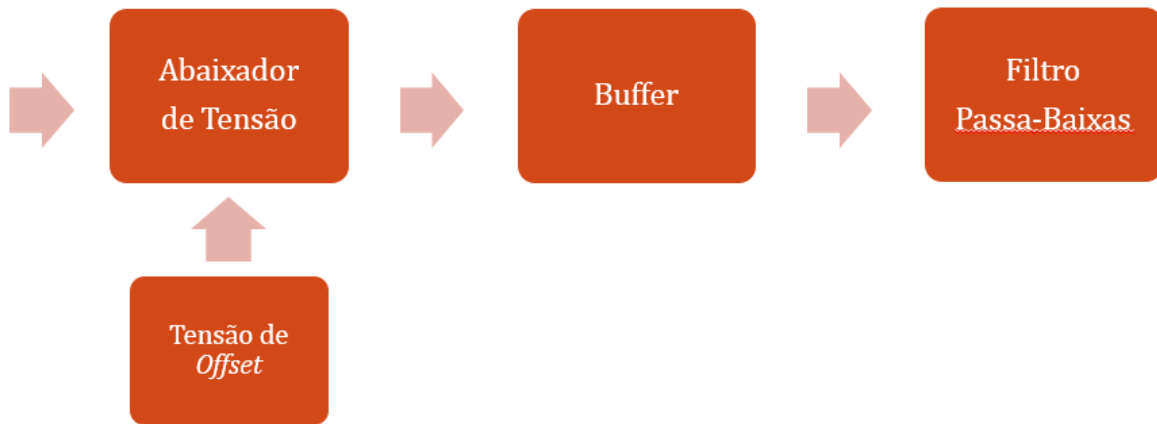


FIGURA 5.4 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO CIRCUITO CONDICIONADOR DE TENSÃO - CCT

O bloco abaixador de tensão é composto por um transformador e um potenciômetro. O transformador reduz previamente a tensão de entrada a uma razão de 24:1, ou seja, 220 V para 9 V, além de proporcionar ao circuito uma isolação elétrica entre o enrolamento primário e o secundário, garantindo uma maior proteção ao sistema.

O potenciômetro, POT1, em paralelo com o secundário do transformador, permite um ajuste fino da tensão que será entregue ao circuito do amplificador *buffer*.

Associado ao bloco abaixador de tensão, encontra-se o bloco denominado de tensão de *offset*, que é responsável por deslocar o sinal no eixo da amplitude, dessa forma o sinal adquirido assume apenas valores positivos de tensão. Em outras palavras, o sinal de tensão, passa a ter um novo eixo de referência, que consiste na tensão de *offset*, que é de 1,65 V, podendo ser vista na Figura 5.3. Esse bloco é formado apenas pelo potenciômetro, POT2.

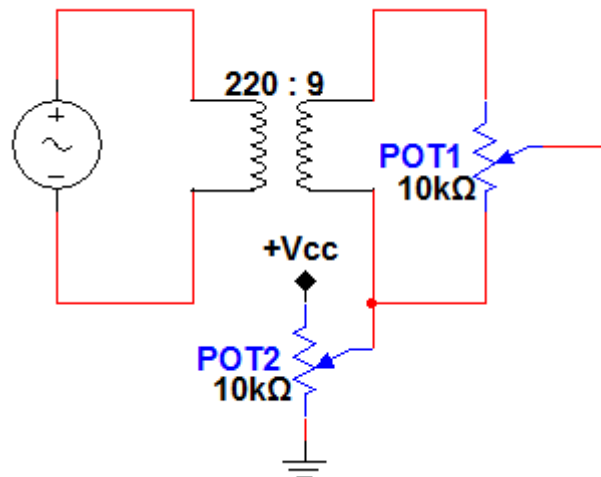


FIGURA 5.5 - BLOCO ABAIXADOR DE TENSÃO E BLOCO DE TENSÃO DE OFFSET.

A utilização do *buffer* objetiva acoplar com a máxima eficiência o estágio abaixador de tensão ao circuito do filtro passa-baixas. Um amplificador configurado como um *buffer*, proporciona um casamento entre as impedâncias de entrada e saída, função obtida em termos das características ideais de um amplificador operacional, impedância de entrada infinita e impedância de saída zero, evitando perdas do sinal no acoplamento.

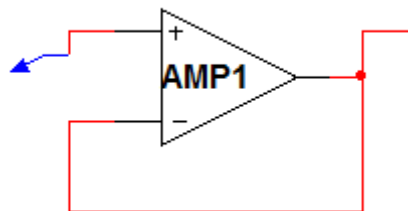


FIGURA 5.6 - BLOCO DO BUFFER

O estágio seguinte consiste no filtro passa-baixas, cuja função é limitar a largura de banda do sinal, removendo frequência indesejadas, o que possibilita aos conversores ADs um sinal adequado para a digitalização. A frequência de amostragem escolhida foi de 3 kHz. Esse item foi discutido no capítulo 3.

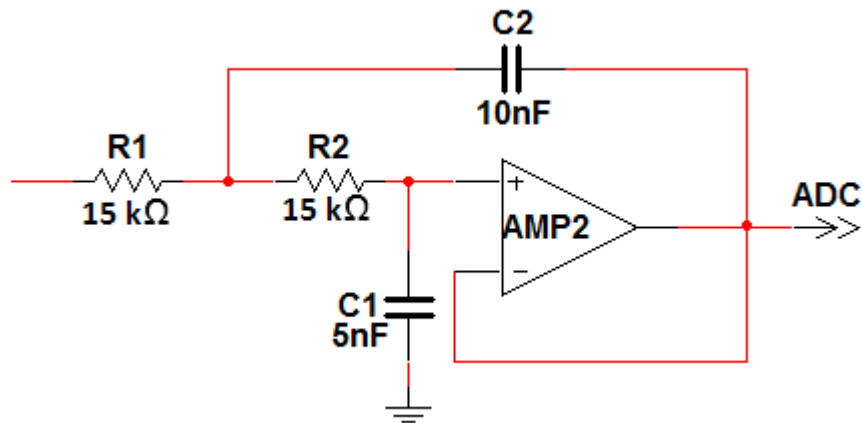


FIGURA 5.7 - FILTRO ATIVO PASSA-BAIXAS DE 2º ORDEM.

O circuito completo implementado para o CCT, está apresentado na Figura 5.8.

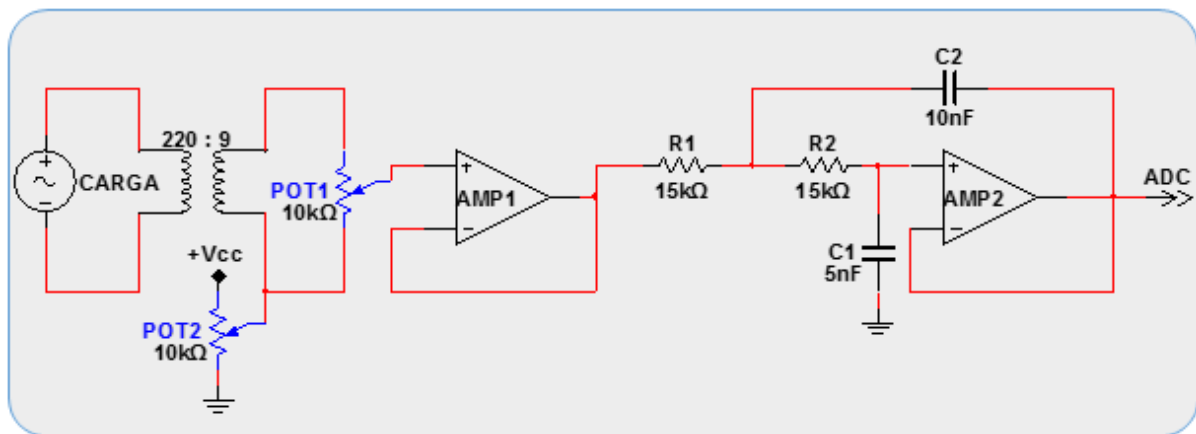


FIGURA 5.8 – UNIDADE DE CONDICIONAMENTO DO SINAL DE TENSÃO - UCST

5.2.1.2 CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DE CORRENTE (CCC)

O CCC na forma de diagrama de blocos é apresentado na Figura 5.9.

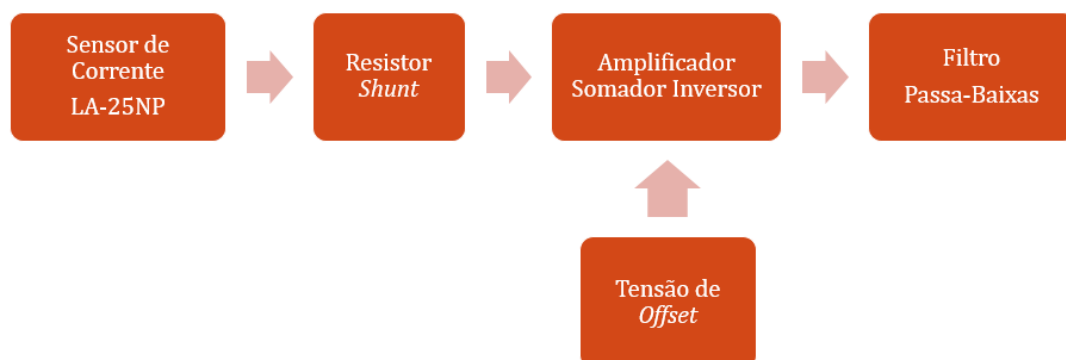


FIGURA 5.9 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO CIRCUITO CONDICIONADOR DE CORRENTE (CCC)

O primeiro bloco corresponde ao sensor de corrente LA-25NP, que fornece uma corrente de saída proporcional a corrente de entrada a uma razão de 5:1000, em sua amplitude. O sensor foi configurado para uma corrente nominal de 5 A, o que produz na saída uma corrente de 25 mA.

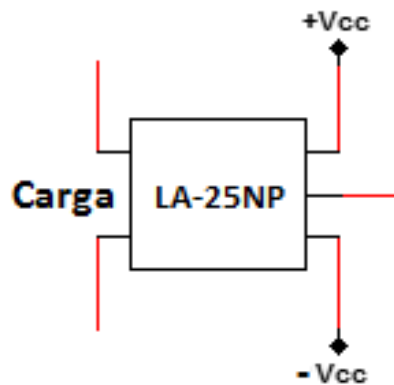


FIGURA 5.10 - ILUSTRAÇÃO DO SENSOR DE CORRENTE LA-25NP

O estágio seguinte consiste em um resistor de medição, que tem função de converter o sinal de corrente em uma tensão proporcional. O valor do resistor é fornecido pelo fabricante do sensor [48], e este pode assumir valores entre 100Ω e 320Ω. O valor do resistor de medição escolhido para o projeto foi de 100Ω.

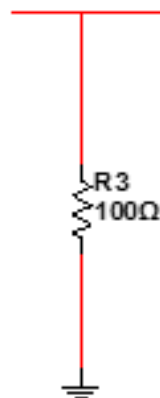


FIGURA 5.11 - RESISTOR DE MEDIÇÃO.

Na sequência tem um amplificador inversor, que é responsável por duas funções no circuito:

A primeira é a translação do sinal de tensão no eixo vertical, fazendo com que todo sinal passe a assumir valores positivos, essa função é provocada pela tensão de *offset*.

A segunda é atenuar o sinal de tensão por meio da malha R4 e R5, a um fator de 0,47, ajustando a tensão de saída para dentro da faixa de 0 a 3,3 V. O bloco pode ser visto na Figura 5.12.

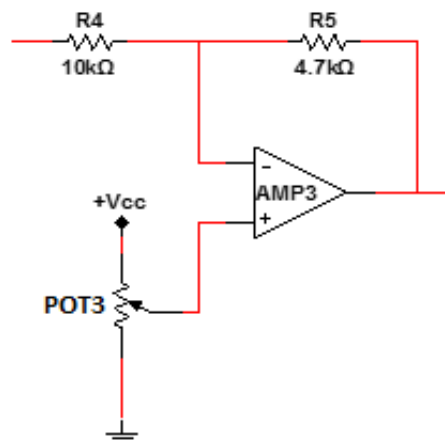


FIGURA 5.12 - AMPLIFICADOR INVERSOR.

O estágio seguinte consiste no filtro passa-baixas conforme figura 5.13.

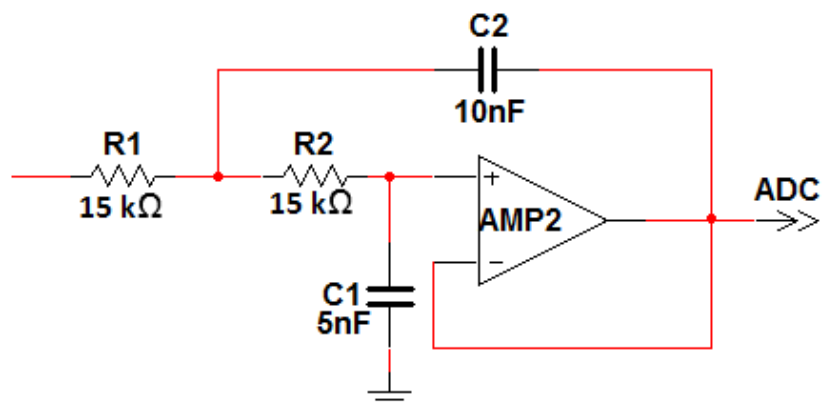


FIGURA 5.13 - FILTRO ATIVO PASSA-BAIXAS DE 20 ORDEM.

O circuito completo implementado para o CCC é apresentado na Figura 5.14.

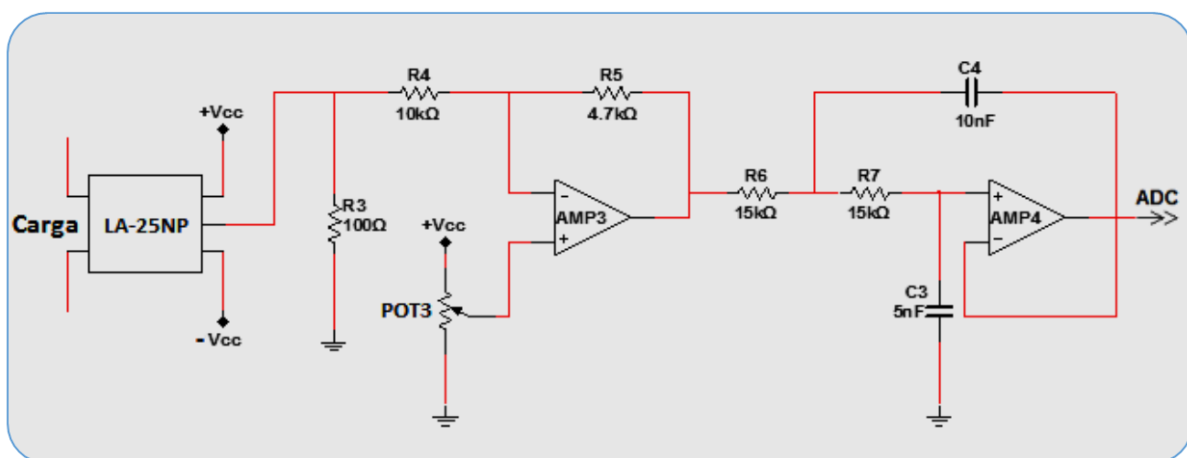


FIGURA 5.14 - CIRCUITO CONDICIONADOR DE CORRENTE - CCC.

5.2.2 PLATAFORMA TIVA™ C SERIES TM4C123G

A etapa de processamento do sinal utiliza a plataforma EK-TM4C123GXL, que é baseada no microcontrolador TM4C123GH6PM *Cortex™* M4F.

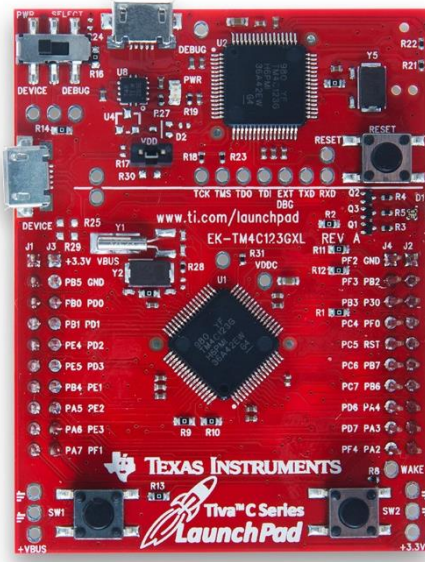


FIGURA 5.15 - PLATAFORMA EK-TM4C123GXL.



FIGURA 5.16 - MICROCONTROLADOR TM4C123GH6PM.

Características Principais

Microcontrolador

- ✓80MHz 32-bits ARM® Cortex™ M4F com Ponto Flutuante;
- ✓Arquitetura Harvard, 256KB Flash / 32KB SRAM / 2KB EEPROM *on-chip*;
- ✓2 x 12 Canais de ADC 12-bits a 1MSPS;
- ✓12 Timers, sendo 6x32bits e 6x64bits
- ✓16 Saídas *Pulse Width Modulation* (PWM)s;
- ✓18 Canais Seriais, 8xUARTs, 4xSSI/SPI, 6xI²C.

A família TM4C apresenta alto desempenho e baixo consumo de potência, isso é resultado da tecnologia empregada em sua construção 65 nm. No modo ativo o MCU consome 375 uA/MHz e no modo *standby* apresenta um consumo de 1,6 uA.

EK-TM4C123GXL

- ✓Alimentação: 4,75 V a 5,25 V;
- ✓Consumo Nominal (Em modo de Operação): 0,099 W
- ✓Dimensões: 5,0 cm x 6,5 cm;
- ✓40 pinos;

Diagrama de Blocos Microcontrolador TM4C123GH6PM

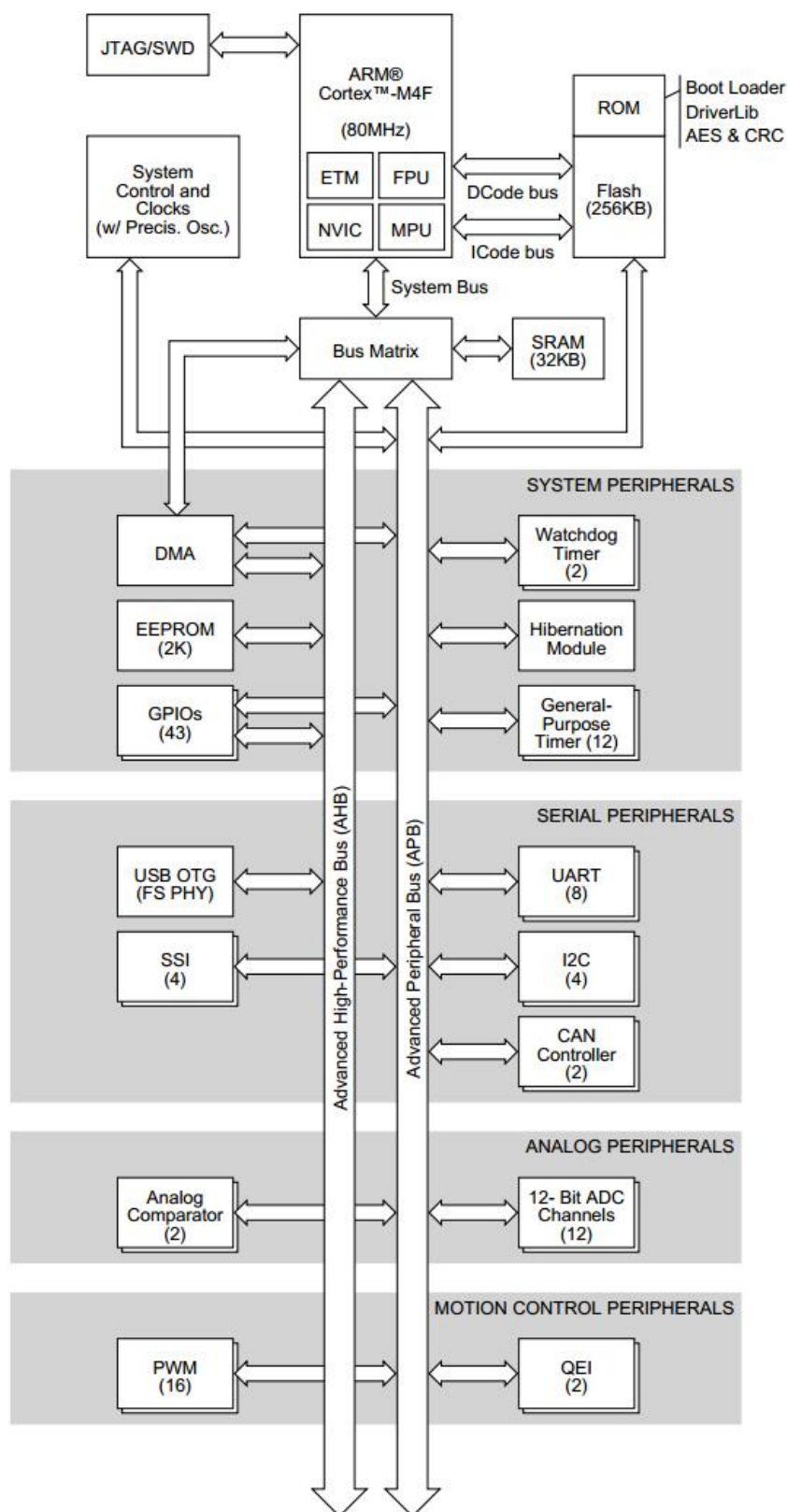


FIGURA 5.17 - DIAGRAMA DE BLOCOS MICROCONTROLADOR TM4C123GH6PM.

Fonte: [48].

Conversor Analógico Digital

O conversor AD é o periférico responsável em converter o sinal analógico em um sinal digital. A resolução é de 12-bits e possui uma taxa de conversão máxima de um milhão de amostras por segundo (1 MSPS). O MCU TM4C123GH6PM é composto por dois módulos conversores em paralelo, ADC0 e ADC1, no entanto os 12 canais de entradas são multiplexados.

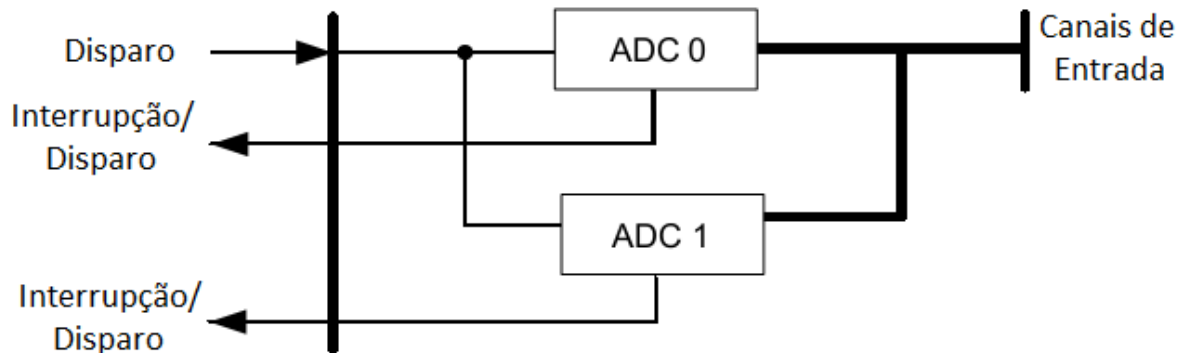


FIGURA 5.18 - MÓDULOS ADC COM CANAIS DE ENTRADA COMPARTILHADO.

Fonte: [48].

Cada módulo AD opera de forma independente e pode, portanto, executar diferentes sequências de amostragens, podendo utilizar qualquer um dos canais de entrada, a qualquer momento, e gerar diferentes interrupções e disparos.

O disparo do início da conversão AD, pode ser controlado pelos seguintes eventos:

- ✓ Controle por software;
- ✓ Timers;
- ✓ Comparadores analógicos;
- ✓ PWM;
- ✓ GPIO.

O nível de tensão máxima suportado pelo AD é de 3,3 V, portanto deve-se evitar níveis de tensão maiores o que pode causar a avaria do dispositivo. Com uma tensão de máxima de 3,3 V e um conversor com resolução de 12-bits, resulta em uma sensibilidade de:

$$V = \frac{V_{ref}}{2^{12}} = \frac{3,3}{4096} = 0,80566 \text{ mV} \quad \text{Eq. 5.1}$$

5.2.3 UNIDADE DE MONITORAMENTO.

A unidade de monitoramento é formada por um computador, onde o usuário tem acesso aos dados adquiridos possibilitando realizar a análise das grandezas elétricas do sistema.

Na Figura 5.19 é ilustrado o envio dos dados para a unidade de monitoramento.

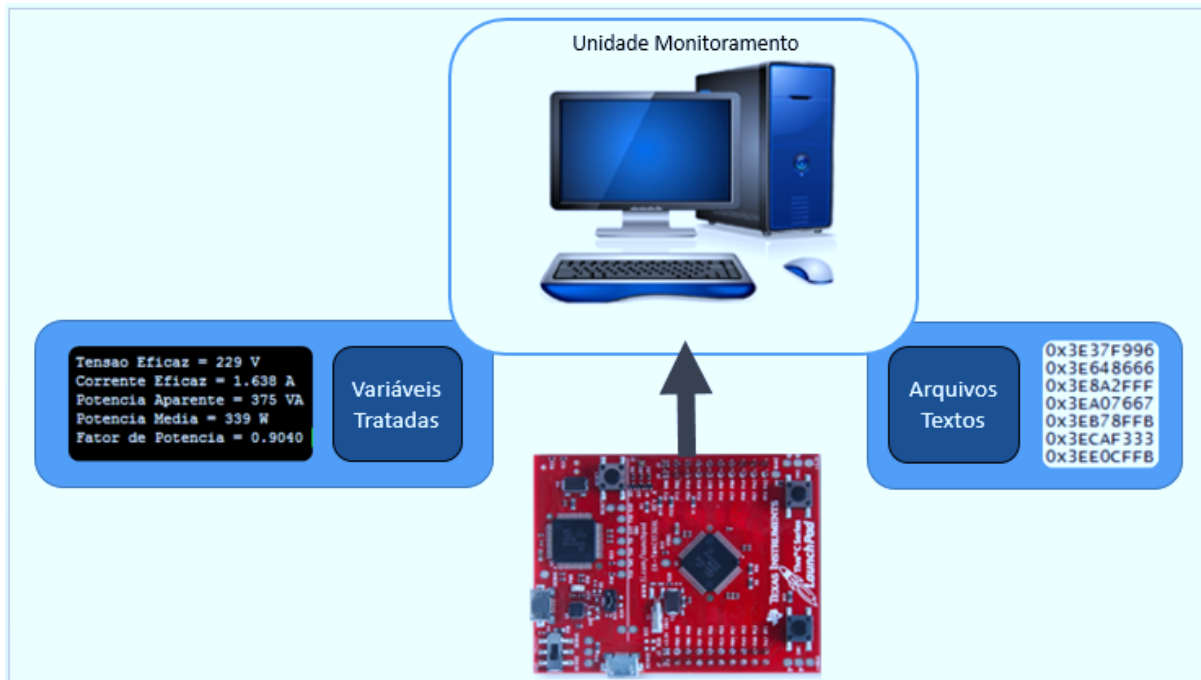


FIGURA 5.19 - ENVIO DOS DADOS A UNIDADE DE MONITORAMENTO.

O envio de dados da plataforma *TivaWare*, para a unidade de monitoramento é realizada por comunicação serial através da porta USB.

Existem duas formas de enviar os dados ao computador:

- A primeira é modo padrão, os dados são enviados continuamente, e monitorados por um *software*, que leia a porta serial do computador.
- A segunda, faz-se necessário a intervenção de um operador do sistema, para que o mesmo exporte os dados, em arquivos textos, durante a execução do programa por meio do *Code Composer Studio* (CCS).

A forma de envio está relacionada com as características, que desejam ser verificadas. Na primeira forma, são enviados os valores eficazes das grandezas elétricas do sistema, já tratado, enquanto na segunda forma, são exportados os valores de tensão e corrente instantâneos, desse modo é necessário o tratamento desses dados, antes da análise.

Nesse trabalho foi utilizado o *software putty* [49], para o monitoramento da porta serial do computador. O *putty* pode ser visto nas Figuras 5.20 e Figura 5.21.

Para configuração do software basta informar a porta serial em que a plataforma *TivaWare* foi montada, **COM4**, a taxa de comunicação, **115200 bps**, e o tipo de conexão, **SERIAL**.

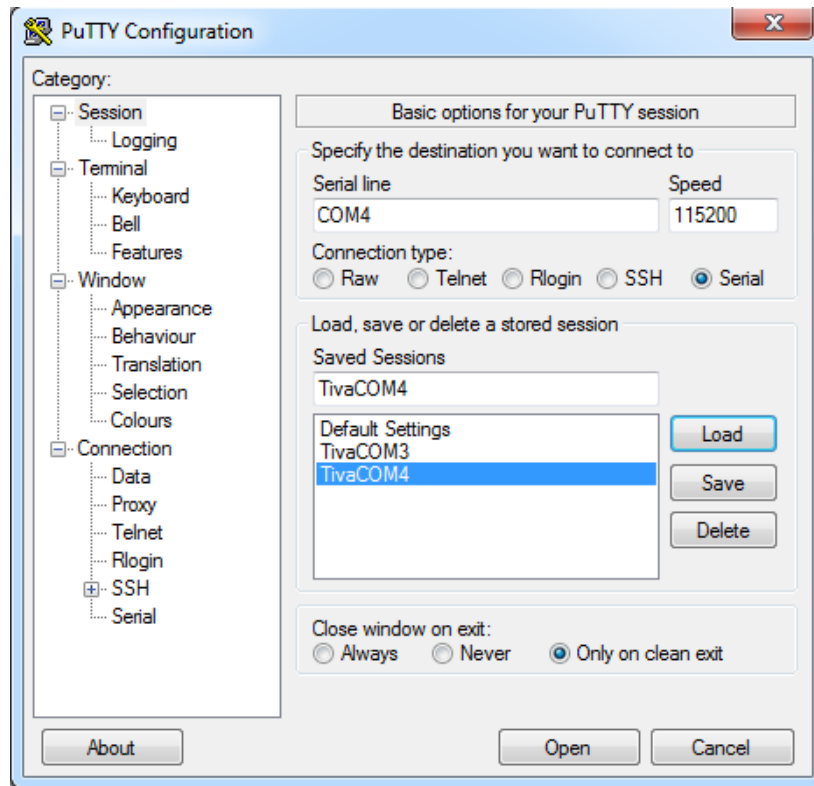


FIGURA 5.20 - JANELA DE CONFIGURAÇÃO DO PUTTY.

Fonte: [48].

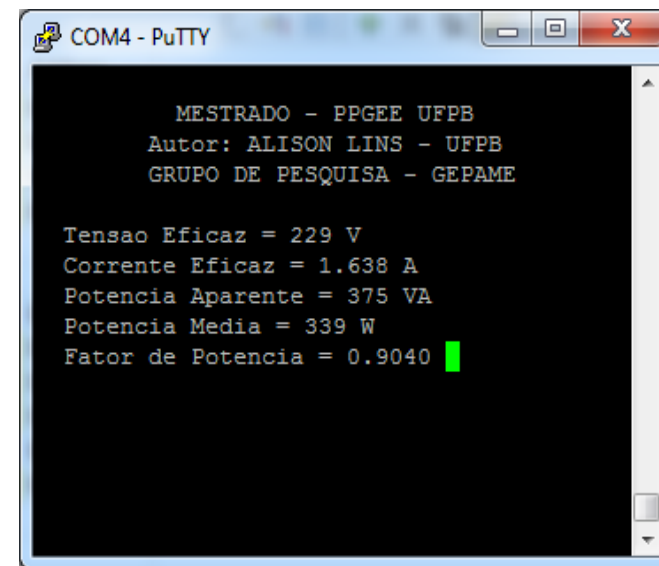


FIGURA 5.21 - JANELA DE EXIBIÇÃO DOS DADOS ENVIADOS A PORTA SERIAL.

Fonte: [48].

Para o segundo método o operador é responsável por exportar as variáveis do sistema em arquivos textos. Após os arquivos gerados, os dados deverão ser manipulados por uma ferramenta computacional, e por fim apresentar as características das variáveis do sistema.

Neste trabalho a ferramenta utilizada para a manipulação dos dados foi o MATLAB.

A manipulação dos arquivos textos é necessária, visto que os dados gerados não condizem aos valores de tensão e corrente legíveis e facilmente interpretados, pois os mesmos são exportados em hexadecimais e correspondem aos valores instantâneos das variáveis.

Para exportar os dados, o usuário deve utilizar o *software* CCS e executar o projeto. Durante a execução é chamada a rotina de gravação dos dados.

As Figura 5.22, Figura 5.23, Figura 5.24 e Figura 5.25, mostram os passos para exportar os dados.

1ª Passo – Abrir o ambiente de desenvolvimento, em seguida o projeto.

A Figura 5.22, mostra o ambiente de desenvolvimento CCS, com o projeto “Base_ADC_Serial” aberto.

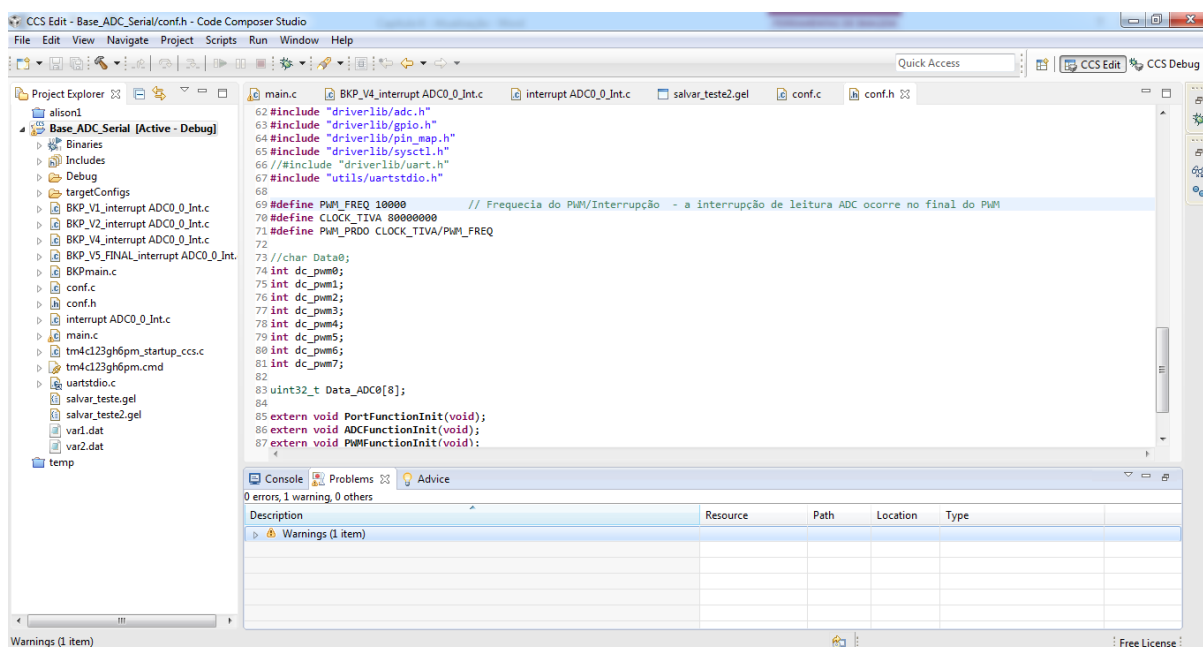


FIGURA 5.22 - SOFTWARE CCS, AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO.

2ª Passo – Compilar o projeto corrente.

A Figura 5.23, mostra o ambiente de desenvolvimento CCS, com o projeto sendo executado em modo *Debug*.

Para executar, ir em “RUN”, em seguida “Debug”. Ou, simplesmente, apertar “F11”. Após compilação do programa, apertar no botão *play*.

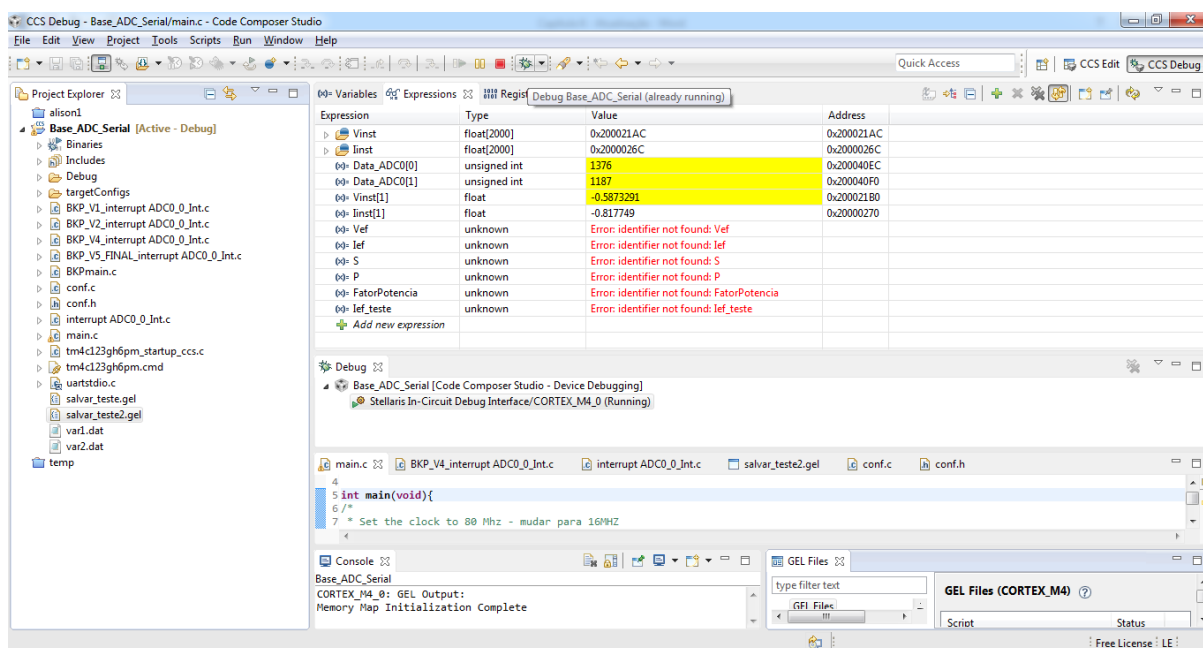


FIGURA 5.23 - SOFTWARE CCS, PROGRAMA EM EXECUÇÃO.

3ª Passo – Carregar a função para exportar os dados.

Na Figura 5.24, é apresentado como carregar os arquivos que contêm a função responsável por exportar os dados. Ir na opção “Tools”, em seguida “GEL Files” e selecionar o arquivo, que contém a função *SaveMyVariable()*. Para este trabalho o nome do arquivo é “salvar_teste”.

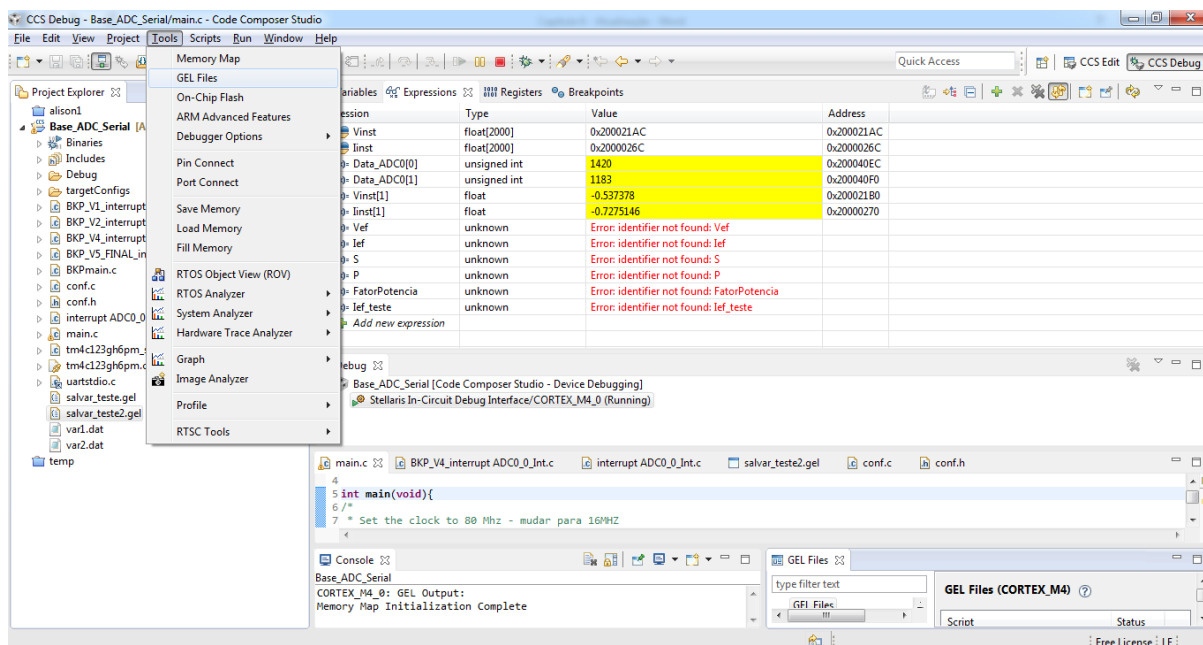


FIGURA 5.24 - SOFTWARE CCS, CARREGANDO O ARQUIVO QUE CONTÉM A ROTINA PARA EXPORTA OS DADOS.

4ª Passo – Executar a função para exporta os dados.

A Figura 5.25, mostra como executar a função *SaveMyVariable()*. Ao chamar a função *SaveMyVariable()*, serão gerados dois arquivos textos, Var1.dat e Var2.dat, contendo os dados das variáveis tensão e corrente, respectivamente.

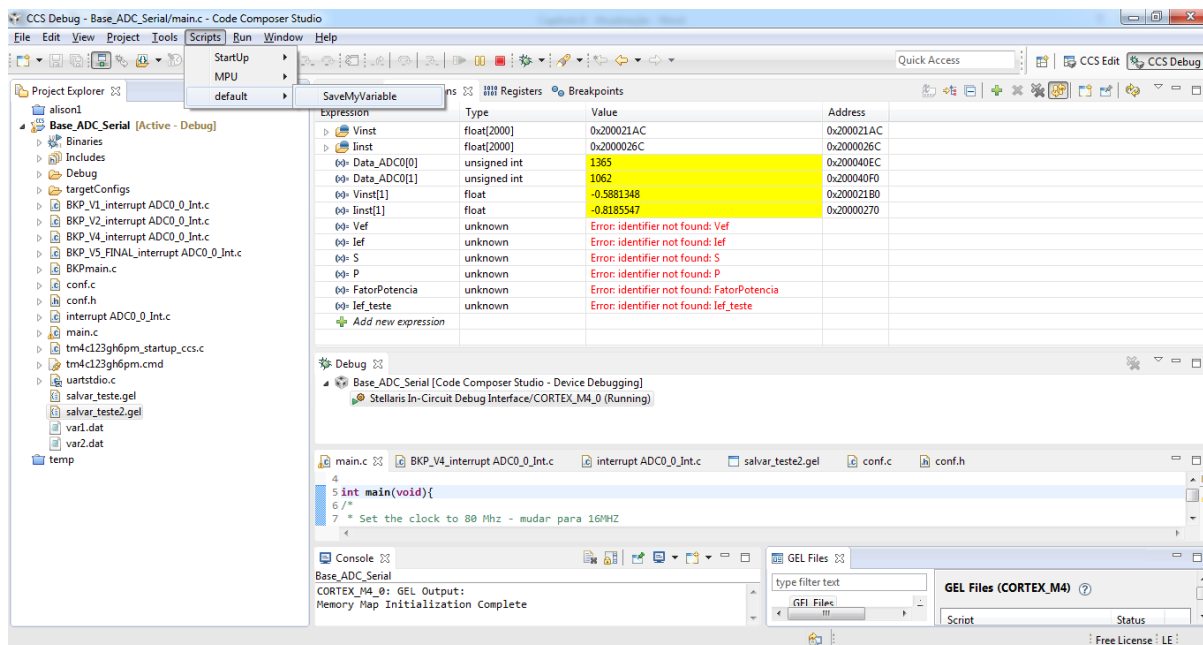


FIGURA 5.25 - SOFTWARE CCS, EXECUTANDO A ROTINA *SAVEMYVARIABLE()*.

A Figura 5.26, mostra um exemplo dos arquivos textos gerados, onde as variáveis do sistema são gravadas em formato hexadecimal. Nesse caso, os dados armazenados correspondem aos valores instantâneos da tensão e corrente.

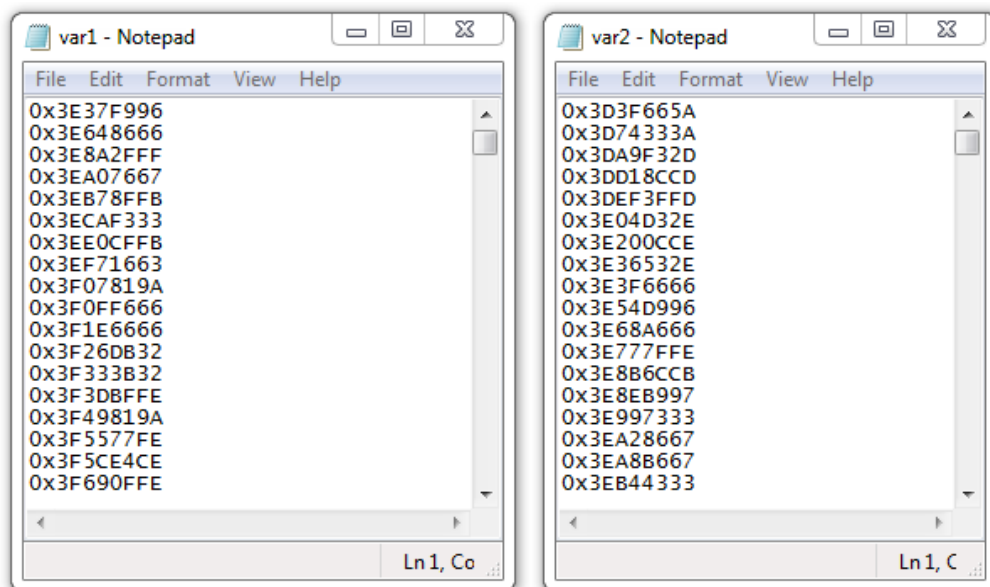


FIGURA 5.26 - ARQUIVOS TEXTOS EXPORTADOS.

Após a manipulação matemática dos dados são plotadas as curvas das variáveis, e os valores das grandezas.

Na Figura 5.27, são mostradas as curvas das variáveis de tensão e corrente.

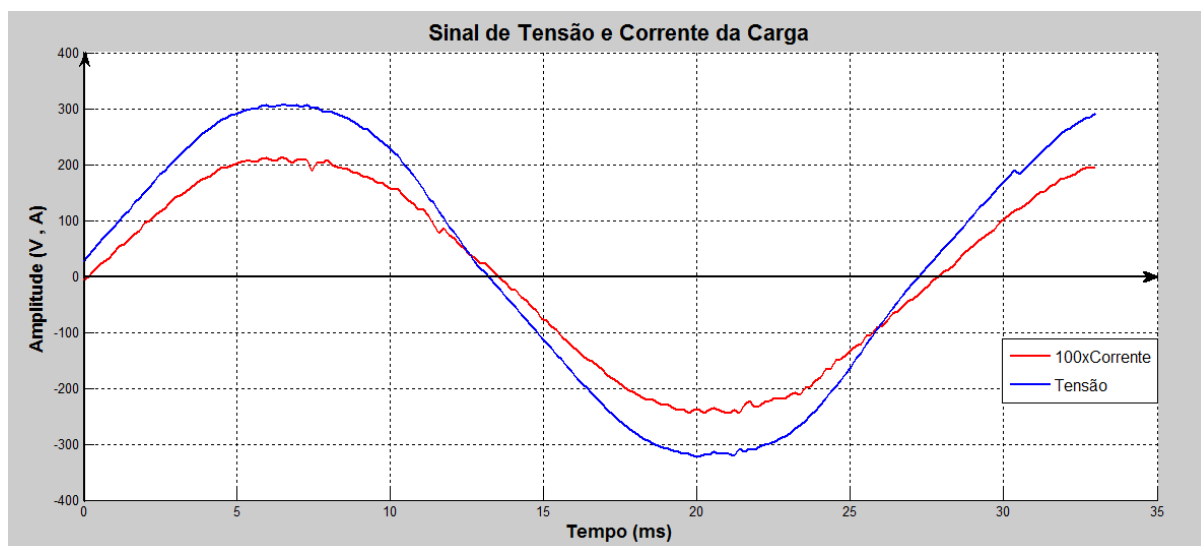


FIGURA 5.27 - CURVA DA VARIÁVEL TENSÃO E CORRENTE PLOTADA PELO MATLAB.

5.3 PLATAFORMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

A plataforma de aquisição de dados é formada pela junção da UCS, Figura 5.28, com a plataforma *TivaWare*, Figura 5.29.

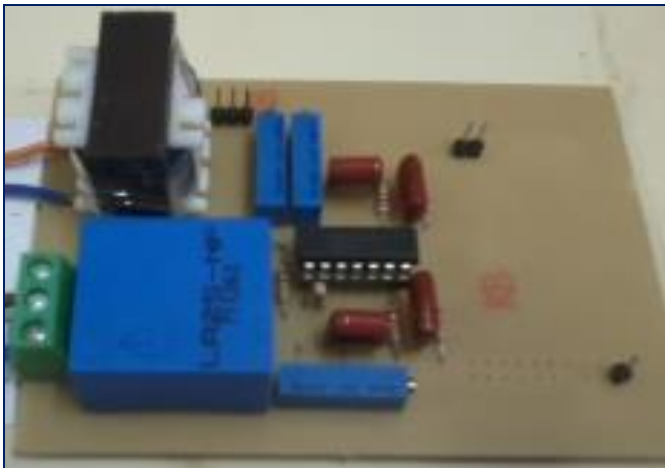


FIGURA 5.28 - UNIDADE DE CONDICIONAMENTO DE SINAL.

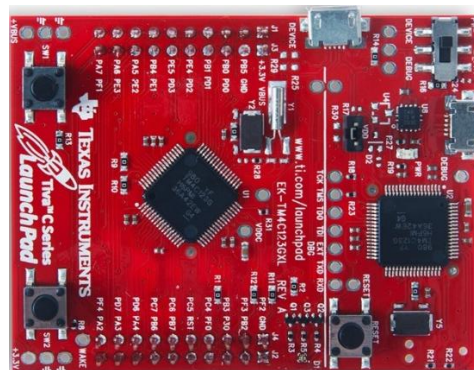


FIGURA 5.29 - PLATAFORMA TIVAWARE.

A Figura 5.30, descreve as entradas e saída de sinais na plataforma de aquisição de dados, que são dadas por:

- Tensão de Alimentação: ± 15 V e GND;
- Sinais de Entrada (Nominais): Tensão 220 V e Corrente 5 A;
- Saída de Dados: Sinal Digital.

Descrição das entradas e saída de sinal.

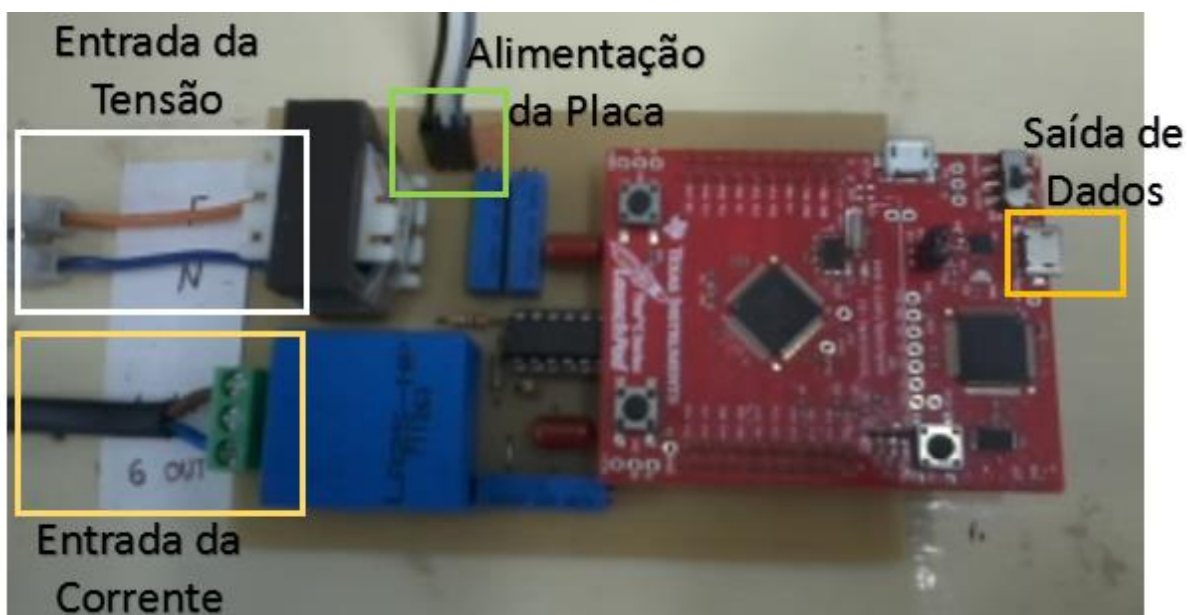


FIGURA 5.30 - ENTRADA E SAÍDA DE SINAIS DA PLATAFORMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.

5.4 PLATAFORMA DE TESTE / ENSAIO.

A Figura 5.31, ilustra o sistema de aquisição de dados completo.

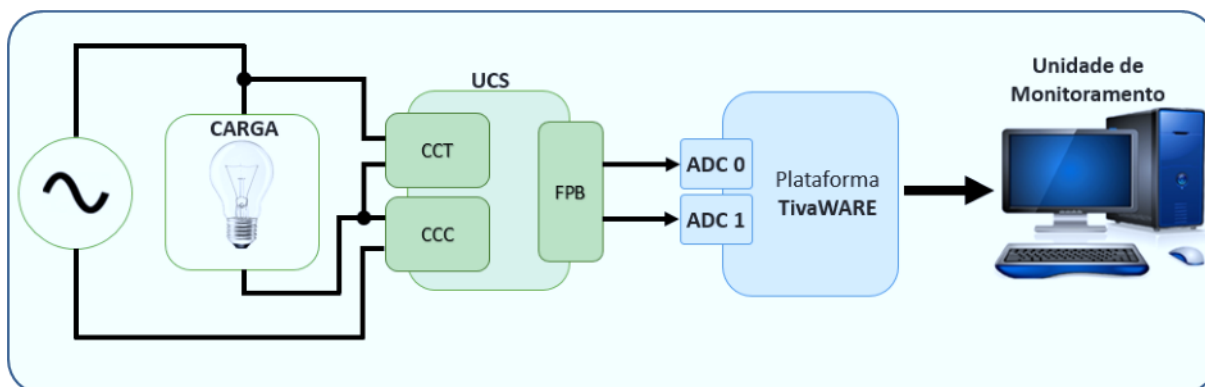


FIGURA 5.31 - SISTEMA COMPLETO.

Foram utilizadas no monitoramento dois tipos de cargas, uma resistiva, formada por quatro lâmpadas incandescentes, com potência total de 240 W e uma carga indutiva, composta por um motor de 0,7 kW.



FIGURA 5.32 - CARGA ACIONADA A DE TESTE DO SISTEMA.



FIGURA 5.33 - PLACA DO MOTOR.



FIGURA 5.34 - CARGA ACIONADA.

Para verificação e comparação dos valores dos sinais de tensão e corrente, durante a execução dos testes um osciloscópio monitora os dados na entrada dos conversores AD, enquanto a tensão da carga é monitorada por um multímetro e a corrente por um alicate amperímetro.

5.5 SOFTWARE

O *software* foi desenvolvido no ambiente *Code Composer Studio* (CCS), da *Texas Instruments*.



FIGURA 5.35 - AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO CODE COMPOSER STUDIO, TEXAS INSTRUMENTES.

O programa foi desenvolvido para atender as necessidades do projeto, que visa a aquisição de amostras dos sinais de tensão e corrente de uma carga monofásica conectada à rede elétrica.

Após a aquisição dos dados é necessário realizar processamentos matemáticos no sinal, que resultam nas grandezas elétricas.

Ao término do processamento os resultados obtidos são enviados ao computador. No entanto, para a realização desses procedimentos, faz-se necessários a configuração de vários periféricos do dispositivo.

Ao iniciar o desenvolvimento do *software*, objetivou-se modularizar ao máximo o projeto do *software*, no sentido de facilitar o desenvolvimento, sua leitura e compreensão, bem como para futuras correções ou atualizações. Com isso, a configuração de cada novo periférico ou dispositivo necessário ao projeto, seria realizado, por uma função ou um arquivo específico, quando necessário.

Uma segunda proposta para o desenvolvimento desse trabalho, incluído o *software*, é que esse trabalho pudesse ser utilizado como ferramenta base, no início de futuros trabalhos, principalmente dentro do grupo de pesquisa GEPAME. Nesse sentido, foram utilizadas práticas simples, mas que fazem toda a diferença no momento de leitura dos códigos, tais como: variáveis com nomes sugestivos, de trechos de códigos e principalmente comentários que tornam legíveis a interpretação das linhas de códigos.

Para uma visão geral do *software* foi elaborado um fluxograma que mostra de forma estruturada as principais etapas do projeto.

Rotina Principal

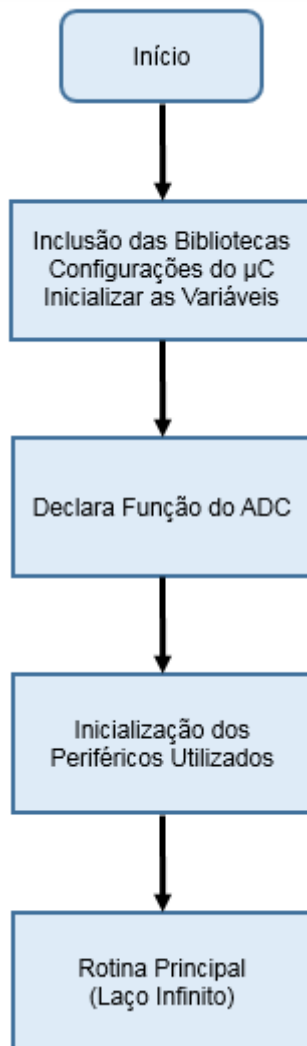


FIGURA 5.36 - FLUXOGRAMA DA ROTINA PRINCIPAL.

Tratamento da Interrupção do Conversor AD.

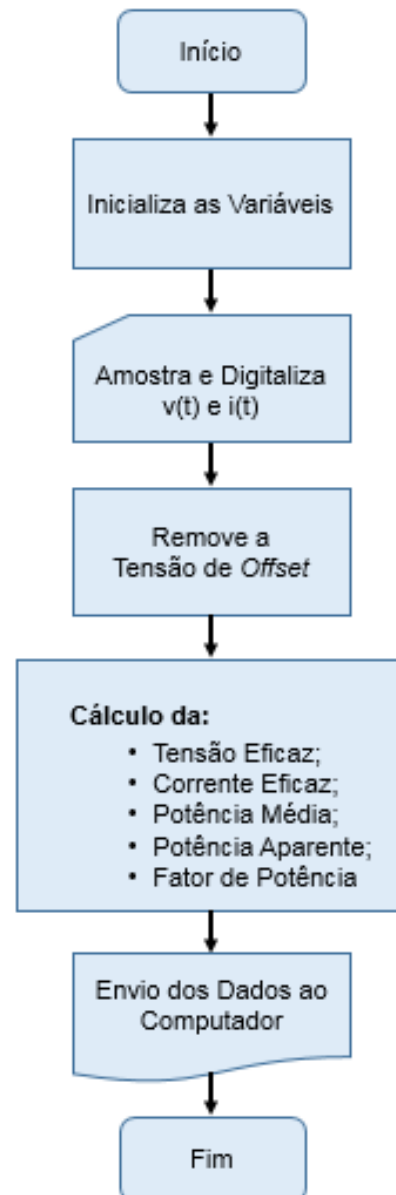


FIGURA 5.37- FLUXOGRAMA DO TRATAMENTO DA INTERRUPÇÃO DO AD.

O funcionamento do *software*, tem como parte fundamental o tratamento da interrupção da conversão AD, os demais dispositivos do sistema foram configurados para dar suporte a mesma.

A estruturação lógica do programa, consiste inicialmente na configuração dos dispositivos gerais do microcontrolador, onde será feita a inclusão das bibliotecas necessárias para configuração dos dispositivos utilizados, seguido da declaração das variáveis globais do sistema e finalizada com a determinação da frequência de *clock* do microcontrolador, do PWM e da frequência de amostragem do sistema.

Após as configurações iniciais será necessário habilitar os pinos, portas, de entrada e saída que serão utilizadas e definir qual a função que os pinos irão assumir, uma vez que as funções são multiplexadas por pinos. Com isso um pino pode desempenhar diferentes funções.

Após a etapa de configurações gerais do microcontrolador, foi configurada a interrupção de leitura do conversor AD. O início da conversão AD pode ser disparado por diversas formas, nesse trabalho o disparo ocorre em função do período do PWM. O período do PWM foi configurado para 3 kHz, ou seja, a cada 33ms acontece um novo período de PWM e conseqüentemente dispara a interrupção de conversão AD. O conversor AD, captura um par de amostras a cada disparo da conversão, onde uma das amostras corresponde ao sinal da tensão e a outra ao sinal da corrente, dessa forma não há erro de defasagem entre os sinais devido a aquisição em instantes diferentes.

Após a amostragem do sinal, inicia-se o processamento dos dados para calcular os valores das grandezas elétricas do sistema. O processamento dos dados consiste em implementar numericamente as equações conhecidas para cálculos de valores eficazes de sinais periódicos e para cálculo das grandezas secundárias, tais como: potência e fator de potência.

Cálculo da Tensão e Corrente Eficaz (RMS)

Para o cálculo dos valores eficazes de tensão e corrente, foram implementadas rotinas numéricas, que fizesse o processamento da equação 5.2. O cálculo do valor eficaz (X_{RMS}) de uma forma de onda $X(t)$ de período T , é dado por:

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T X(t)^2 .dt} \quad \text{Eq. 5.2}$$

Adequando a equação 5.2, para o tempo discreto [k], e considerando N o número de amostras realizadas dentro de um período do sinal, temos a equação 27.

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k]^2} \quad \text{Eq. 5.3}$$

O algoritmo desenvolvido, para realizar o processamento matemático da equação 5.3, está descrito na Figura 5.38.

```
função interrupçãoADC{
    Valor_Tensao_inst = [ Data_ADC0[0] * (3.3/4096) ] - 1.65;
    SE(i<600){
        somaTensao = somaTensao + (Valor_Tensao_inst * Valor_Tensao_inst);
        i = i + 1;
    }
    SENAOC(){
        Valor_Tensao_eficaz = raizquadrada [ (1/300) * somaTensao ];
        i = 0;
    }
}
```

FIGURA 5.38 - ALGORITMO PARA O CÁLCULO DA TENSÃO E CORRENTE EFICAZ.

O algoritmo citado na Figura 5.38, dispensa a utilização de uma estrutura de repetição, *for()*, *while()*, pois a função é executada a cada 0,33ms, ininterruptamente. O valor 600 está relacionado com o janelamento de 12 ciclos, previsto em norma, em função da frequência de amostragem 3kHz, para o cálculo dos valores eficazes de tensão e corrente.

Cálculo da Potência Média, Potência Aparente e do Fator de Potência.

A equação 5.4, determina o cálculo da potência instantânea.

$$P(t) = V(t).I(t) \quad \text{Eq. 5.4}$$

Para determinar a potência média do sistema, basta fazer a integral da potência instantânea, no intervalo de um período.

A equação 5.5, determina o cálculo da potência média.

$$P_{MED} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t).I(t).dt \quad \text{Eq. 5.5}$$

De modo análogo ao realizado para o cálculo dos sinais eficazes, a equação 5.5, deve ser adequada para o tempo discreto $[k]$, sendo N considerando o número de amostras realizadas dentro de um período do sinal, resultando na equação 5.6.

$$P_{MED} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} V[k].I[k] \quad \text{Eq. 5.6}$$

O algoritmo desenvolvido, para realizar o processamento matemático da equação 5.6, está descrito na Figura 5.39.

```

função interrupçãoADC{
    Valor_Tensao_inst = [ Data_ADC0[0] * (3.3/4096) ] - 1.65;
    Valor_Corrente_inst = [ Data_ADC0[1] * (3.3/4096) ] - 1.65;
    SE(i<600){
        somaPotencia = somaPotencia + (Valor_Tensao_inst * Valor_Corrente_inst);
        i = i + 1;
    }
    SENA0(){
        PotenciaMedia = (somaPotencia/300);
        i = 0;
    }
}

```

FIGURA 5.39 - ALGORITMO PARA O CÁLCULO DA POTÊNCIA MÉDIA OU ATIVA.

Para o cálculo da potência aparente, basta efetuar o produto da tensão eficaz pela corrente eficaz, já calculados.

$$S = V.I \quad \text{Eq. 5.7}$$

O algoritmo desenvolvido, como rotina capaz de realizar o processamento matemático da equação 5.7, está descrito na Figura 5.40.

```

função interrupçãoADC{
    Valor_Tensao_inst = [ Data_ADC0[0] * (3.3/4096) ] - 1.65;
    Valor_Corrente_inst = [ Data_ADC0[1] * (3.3/4096) ] - 1.65;
    SE(i<600){
        somaTensao = somaTensao + (Valor_Tensao_inst * Valor_Tensao_inst);
        somaCorrente = somaCorrente + (Valor_Corrente_inst * Valor_Corrente_inst);
        somaPotencia = somaPotencia + (Valor_Tensao_inst * Valor_Corrente_inst);
        i = i + 1;
    }
    SENA0(){
        Valor_Tensao_eficaz = raiz_quadrada(somaTensao/300);
        Valor_Corrente_eficaz = raiz_quadrada(somaCorrente/300);
        Potencia_Media = (somaPotencia/300);
        Potencia_Aparente = ( Valor_Tensao_eficaz * Valor_Corrente_eficaz);
        i = 0;
    }
}

```

FIGURA 5.40 - ALGORITMO PARA O CÁLCULO DA POTÊNCIA APARENTE.

Por fim, o cálculo do fator de potência consiste na razão da potência média pela potência aparente, sendo mostrado na equação 5.8.

$$Fp = \frac{P}{S} \quad \text{Eq. 5.8}$$

O algoritmo desenvolvido, para realizar o processamento matemático da equação 5.8, está descrito na Figura 5.41.

```
função interrupçãoADC{
  Valor_Tensao_inst = [ Data_ADC0[0] * (3.3/4096) ] - 1.65;
  Valor_Corrente_inst = [ Data_ADC0[1] * (3.3/4096) ] - 1.65;
  SE(i<600){
    somaTensao = somaTensao + (Valor_Tensao_inst * Valor_Tensao_inst);
    somaCorrente = somaCorrente + (Valor_Corrente_inst * Valor_Corrente_inst);
    somaPotencia = somaPotencia + (Valor_Tensao_inst * Valor_Corrente_inst);
    i = i + 1;
  }
  SENA0(){
    Valor_Tensao_eficaz = raiz_quadrada(somaTensao/300);
    Valor_Corrente_eficaz = raiz_quadrada(somaCorrente/300);
    Potencia_Media = (somaPotencia/300);
    Potencia_Aparente = ( Valor_Tensao_eficaz * Valor_Corrente_eficaz);
    Fator_Potencia = ( Potencia_Media / Potencia_Aparente);
    i = 0;
  }
}
```

FIGURA 5.41 - ALGORITMO PARA O CÁLCULO DO FATOR DE POTÊNCIA.

Ainda dentro da interrupção de leitura do AD, ao término dos cálculos das grandezas elétricas os dados são enviados ao computador através da comunicação serial, pela porta USB, por meio das funções:

TABELA 5.1 - FUNÇÕES DE ENVIO DE DADOS PELA SERIAL.

Funções	Descrição
<i>UARTCharPut()</i> ;	Envia um <i>char</i> pela serial;
<i>UARTprintf(" ");</i>	Envia uma <i>String</i> .

6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

6.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo trataremos dos resultados obtidos com a plataforma de aquisição de dados. Os resultados serão comparados aos valores obtidos por instrumentos de medição, como multímetro, osciloscópio e o analisador de energia.

Os sinais que serão apresentados correspondem aos da entrada da plataforma, da entrada do conversor AD, da saída da plataforma, e os sinais recuperados após serem manipulados no computador.

6.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA VALIDAÇÃO DA PLATAFORMA

6.2.1 Alicate Amperímetro Digital Profissional Et-3200 – Minipa.



Figura 6.1 - ALICATE AMPERÍMETRO DIGITAL PROFISSIONAL ET-3200 MINIPA.

Características

Padronização:

CAT. II do padrão IEC 1010.

Taxa de Amostragem:

3 Amostras/s.

Corrente AC

- Faixa: 20^a
- Precisão: $\pm 3\%$
- Resolução: 10mA

6.2.2 Multímetro Digital HM-2030 – HIKARI.



Figura 6.2 - MULTÍMETRO DIGITAL HM-2030 - HIKARI

Características

Padronização:

Categoria: CAT IV 600V

Taxa de Amostragem:

3 Amostras/s.

Tensão Ac

- Faixas 750V;
- Precisão: $\pm 1.2\%$;
- Resolução: 1V;
- Impedância de Entrada: 10M Ω .

6.2.3 Osciloscópio DSO-X-2012A - Agilent InfiniiVision 2000 série-X.



FIGURA 6.3 - OSCILOSCÓPIO DSO-X-2012A – AGILENT.

6.2.4 Analisador de Qualidades de Energia Trifásica - Fluke 434/435



FIGURA 6.4 - FLUKE 434/435 SERIES I.

O analisador de qualidade de energia foi utilizado como instrumento de referência, para validação dos valores obtidos pelo sistema proposto.

6.3RESULTADOS

6.3.1VERIFICAÇÃO DO SINAL DE TENSÃO NA CARGA

O ponto de partida na verificação dos resultados foi observar o sinal de tensão medido na carga e o sinal apresentado na saída do circuito condidicionador de tensão, com a finalidade de verificar possíveis distorções, principalmente no tocante ao atraso de fase. Essa verificação inicial, se deve pela natureza indutiva do transformador, que poderá se comportar como um filtro, e também pelos circuitos amplificadores, nos quais poderão se apresentar como possíveis fontes de erros.

A Figura 6.5, mostra a tensão medida na carga e na saída do CCT, onde se verifica um desvio de fase de 2,2 graus, o que proporciona uma boa representação do sinal original.

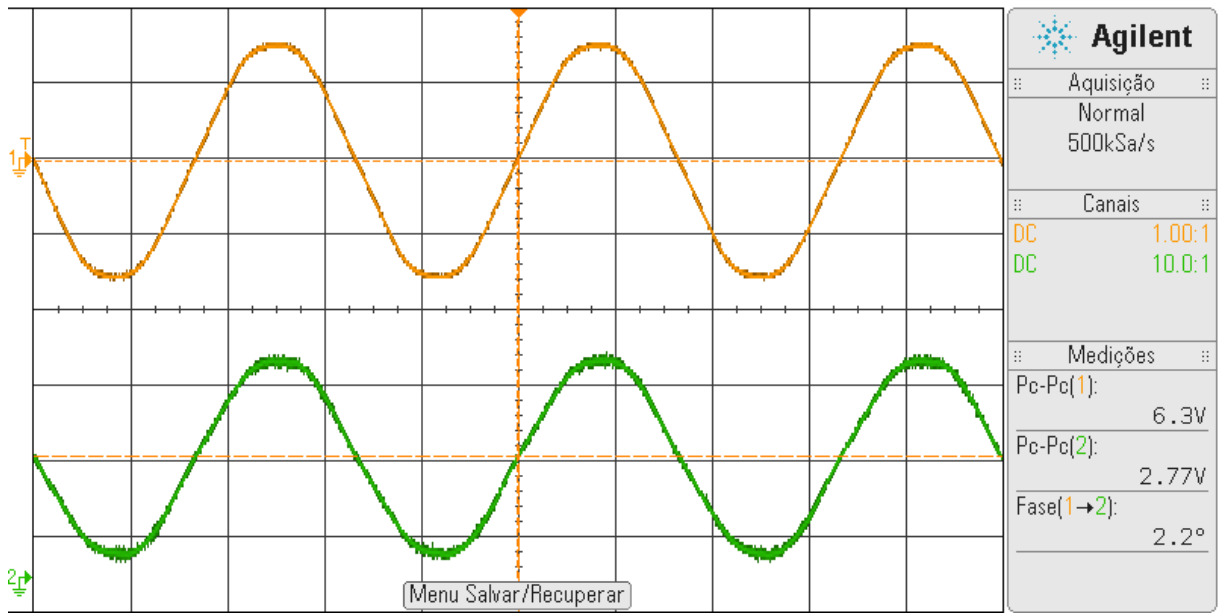


FIGURA 6.5 - SINAL DE TENSÃO NA CARGA E NA SAÍDA DO CCT.

6.3.2 SINAIS DE TENSÃO E CORRENTE NA ENTRADA DOS CONVERSORES AD.

6.3.2.1 SINAL DE TENSÃO

Como citado anteriormente, os sinais a serem amostrados precisam estar adequados aos níveis de tensão dos conversores ADs. Portanto, durante a realização das medições os sinais de tensão e corrente foram continuamente monitorados no osciloscópio.

Observa-se na Figura 6.6 as características do sinal de tensão condicionado e adequado à entrada do conversor AD.

- ✓ Amplitude de Pico a Pico de 2,7V, com amplitude máxima de 3,03V e amplitude mínima de 0,29V, ou seja, dentro da faixa de 0 a 3,3V;
- ✓ Tensão de offset de 1,6539V, o que torna o sinal completamente positivo.

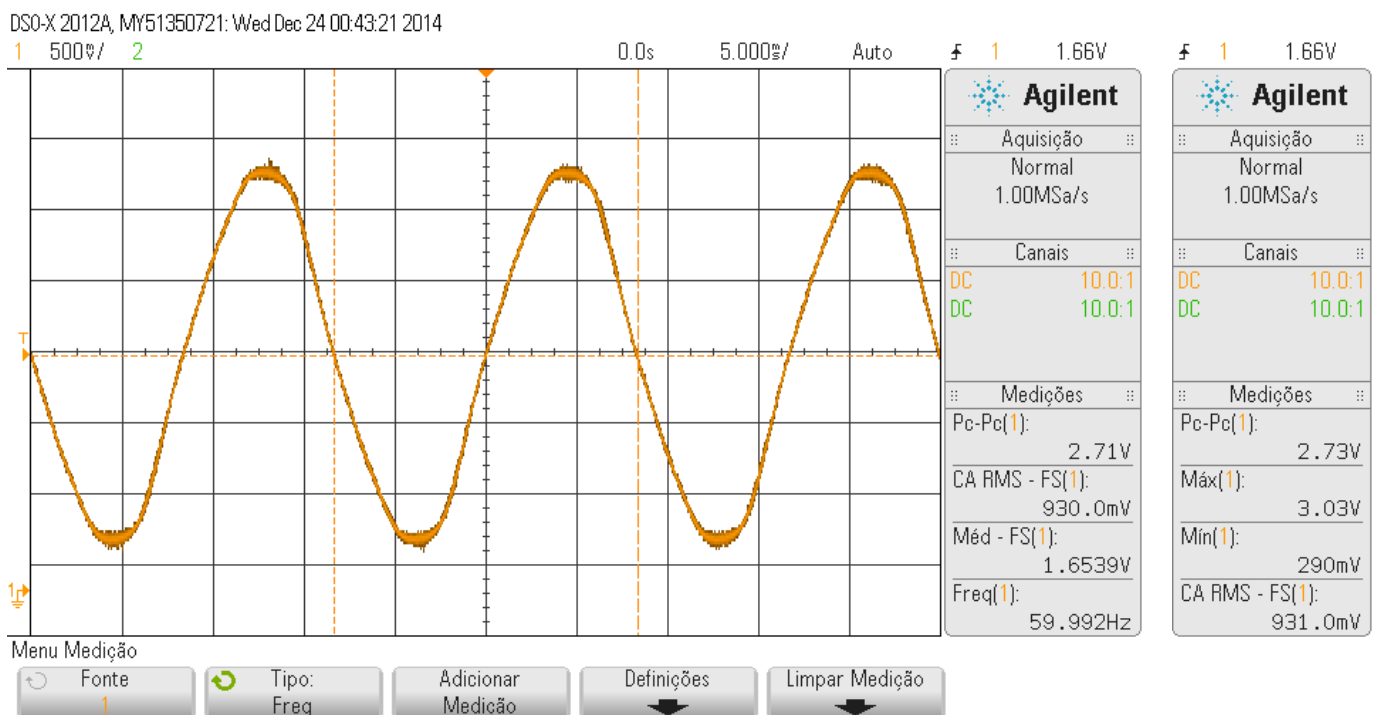


FIGURA 6.6 - SINAL DE TENSÃO CONDICIONADO E ADEQUADO A ENTRADA DO CONVERSOR AD.

Além da visualização do sinal no osciloscópio, verificou-se o valor eficaz da tensão com o auxílio do multímetro. A medição é mostrada na Figura 6.7.

Na sequência o sinal foi digitalizado e exportado para o computador, que através do processamento dos dados, realizado no matlab, o sinal foi recuperado e exibido em tela. O sinal recuperado é exibido na Figura 6.8.

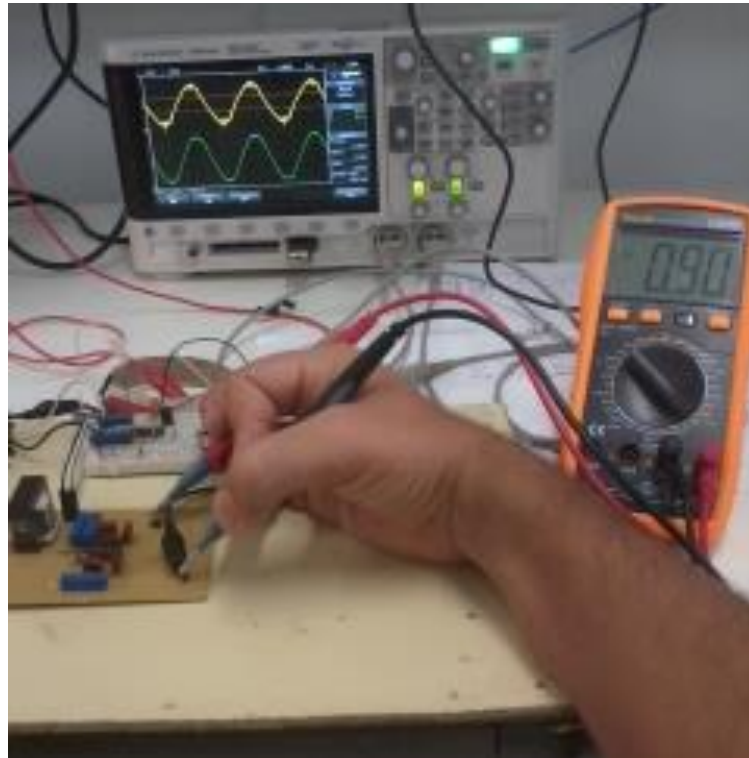


FIGURA 6.7 - MEDIÇÃO DO SINAL DE TENSÃO NA ENTRADA DO CONVERSOR AD.

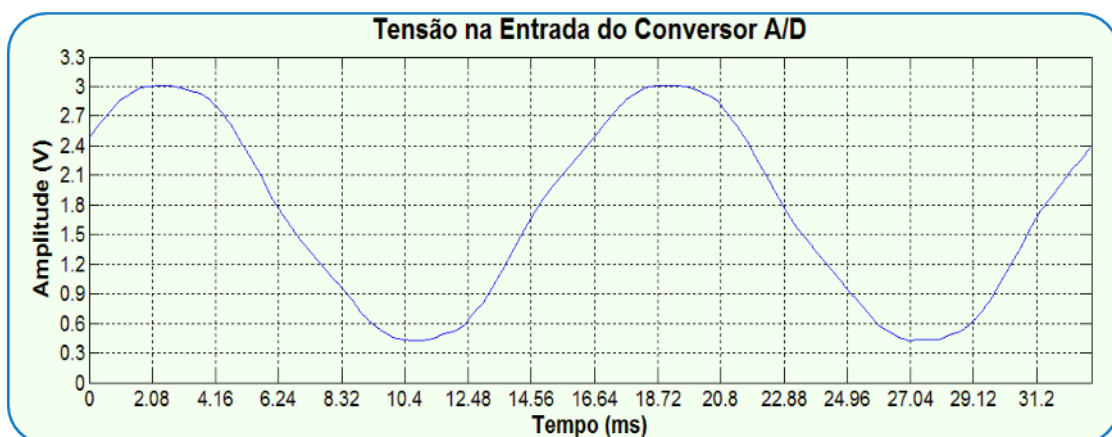


FIGURA 6.8 - SINAL DE TENSÃO RECUPERADO APÓS O PROCESSAMENTO DOS DADOS.

6.3.2.2 SINAL DE CORRENTE

O sinal de corrente ao ser condicionado e adequado à entrada do conversor AD é convertido em um sinal de tensão. O momento da realização dessa conversão é ao passar (o sinal) pela resistência de medição (R_M). Apesar dessa conversão o sinal deve ser interpretado como um sinal de corrente.

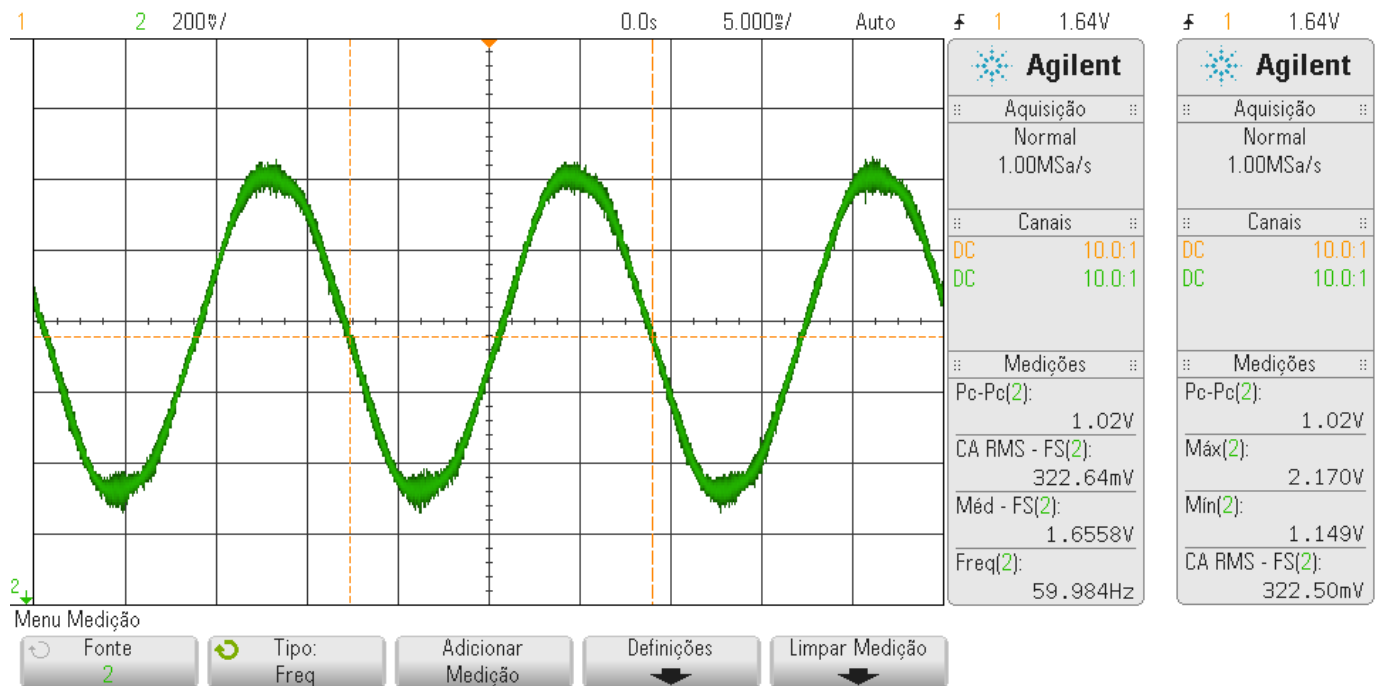


FIGURA 6.9 - SINAL DE CORRENTE CONDICIONADO E ADEQUADO A ENTRADA DO CONVERSOR AD.

A Figura 6.10, ilustra o sinal de corrente recuperado, logo após o processamento dos dados exportados para o computador.

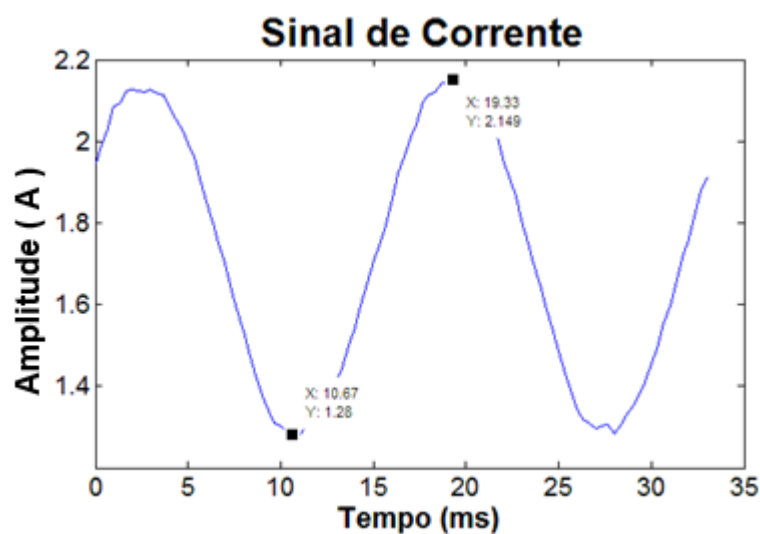


FIGURA 6.10 - SINAL DE CORRENTE RECUPERADO NA ENTRADA DO CONVERSOR AD.

Na Figura 6.11 pode-se observar a curva do sinal de tensão e corrente na entrada do conversor AD.

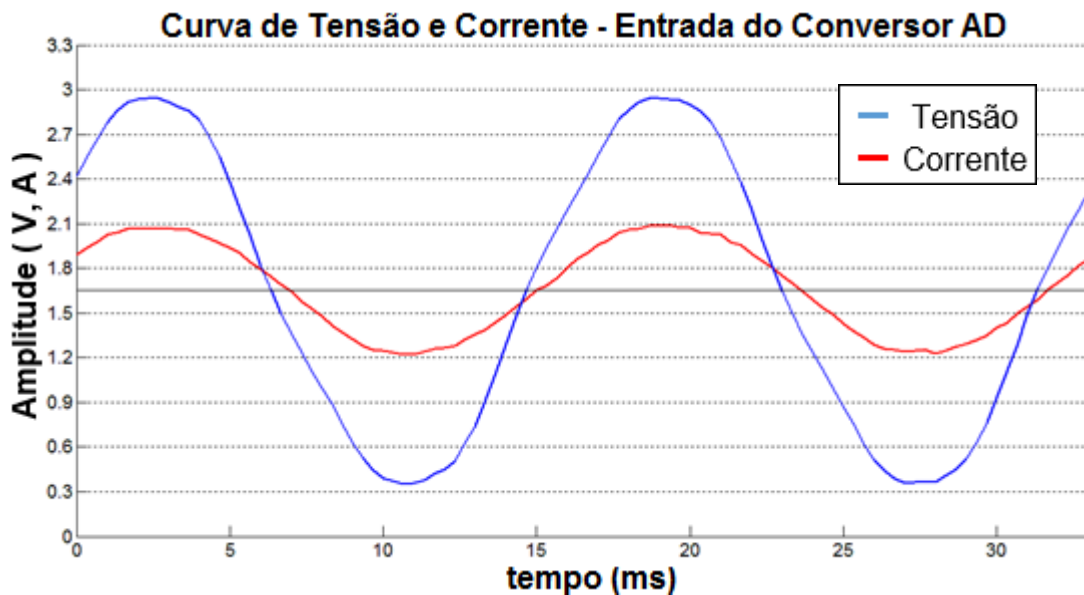


Figura 6.11 - CURVA DA TENSÃO E CORRENTE RECUPERADO NA ENTRADA DO CONVERSOR AD.

A Figura 6.12, apresenta os valores das grandezas elétricas na entrada do conversor AD (após a realização de todo o processamento dos dados).

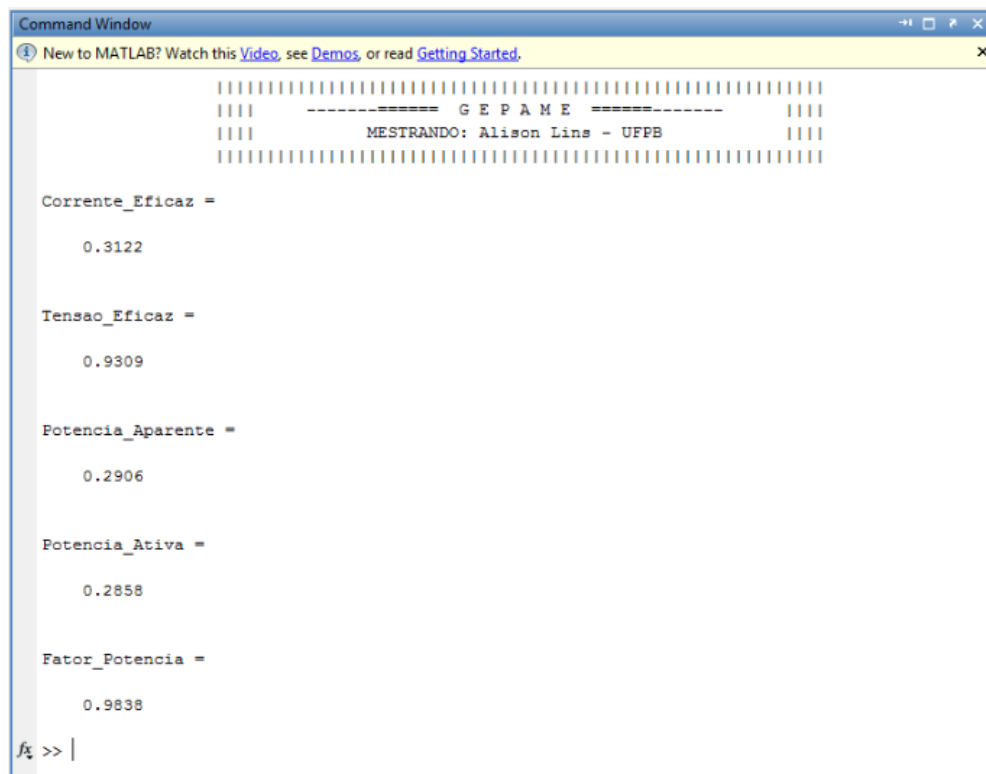


FIGURA 6.12 - VALORES DAS GRANDEZAS ELÉTRICAS NA ENTRADA DO CONVERSOR AD.

6.3.3 MONITORAMENTO DAS GRANDEZAS ELÉTRICAS DO SISTEMA.

Foi apresentado anteriormente, no texto, que os dados são enviados ao computador de duas formas, sendo a primeira a comunicação padrão, e a outra por meio de um operador que exporta os dados durante a execução do programa no ambiente de desenvolvimento CCS.

Para o ensaio do sistema foram utilizadas duas cargas: uma carga resistiva com potência de 340W, formada por quatro lâmpadas incandescentes; e uma carga indutiva, um motor elétrico monofásico de 750W.

6.3.3.1 RESULTADOS - COMUNICAÇÃO PADRÃO

Os dados são enviados ao computador, continuamente, através da porta serial, pela interface USB. Para visualizar as grandezas do sistema basta utilizar um *software* que interprete os dados da porta serial, em que a plataforma *TivaWare* está conectada. O *software Putty*, visto na Figura 6.13, foi o escolhido para a aplicação.



Figura 6.13 - SOFTWARE PUTTY MONITORAMENTO DA CARGA RESISTIVA.



FIGURA 6.14 - MEDIÇÃO DOS VALORES DE TENSÃO E CORRENTE DA CARGA RESISTIVA.

As Figuras 6.15 e 6.16, apresentam medições de tensão e de corrente, onde são comparadas aos valores exibidos pelo *software putty* em relação aos dos instrumentos de medições, onde pode-se constatar um alto grau de concordância.

Esses resultados foram obtidos utilizando o motor de elétrico.

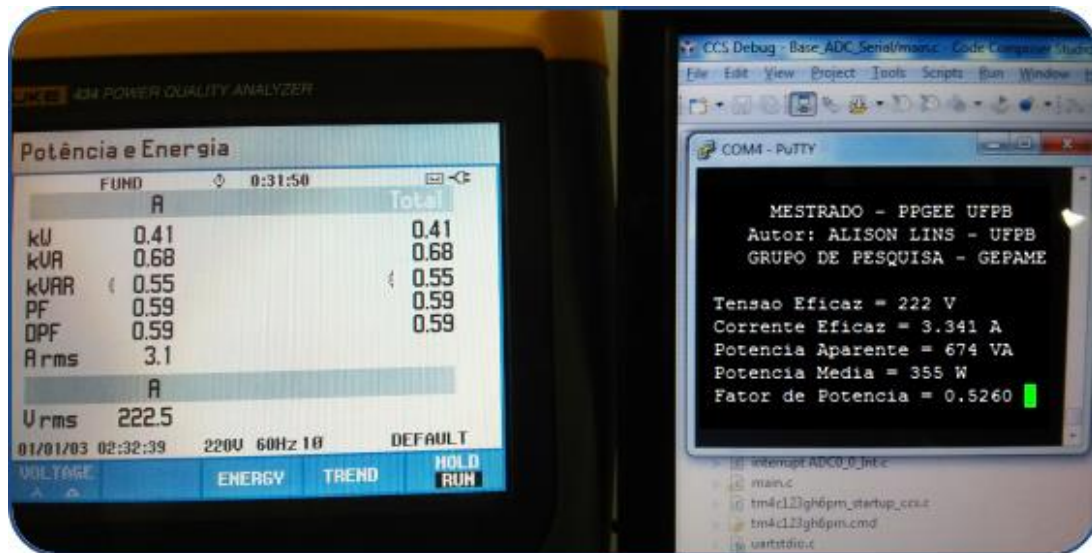


FIGURA 6.15 - MEDIÇÃO DOS VALORES DE TENSÃO E CORRENTE DO MOTOR ELÉTRICO.

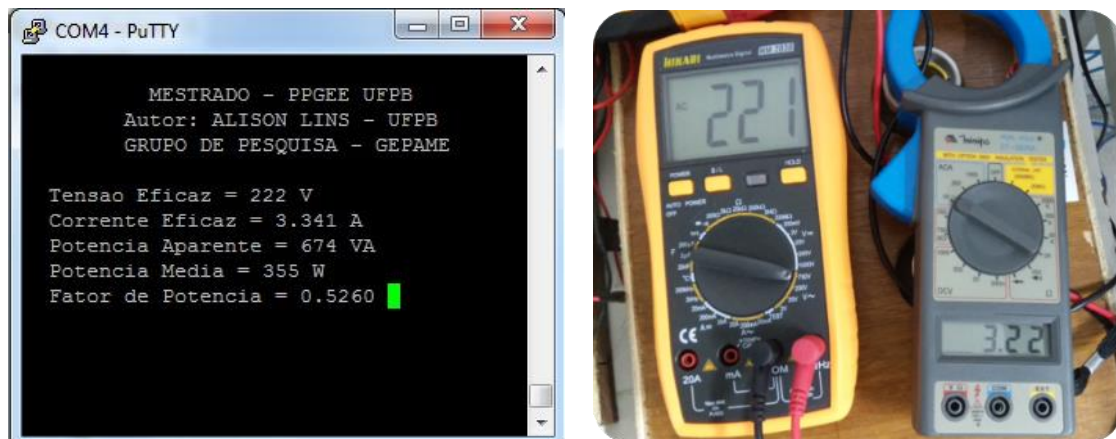


FIGURA 6.16 - MEDIÇÃO DOS VALORES DE TENSÃO E CORRENTE DO MOTOR ELÉTRICO.

6.3.3.2 RESULTADOS - EXPORTADOS PELO OPERADOR

Nessa modalidade de envio é necessário que os dados sejam exportados pelo operador, e antes de serem apresentados devem ser processados.

A Figura 6.17, mostra o sinal de tensão na carga resistiva ao ser recuperado.

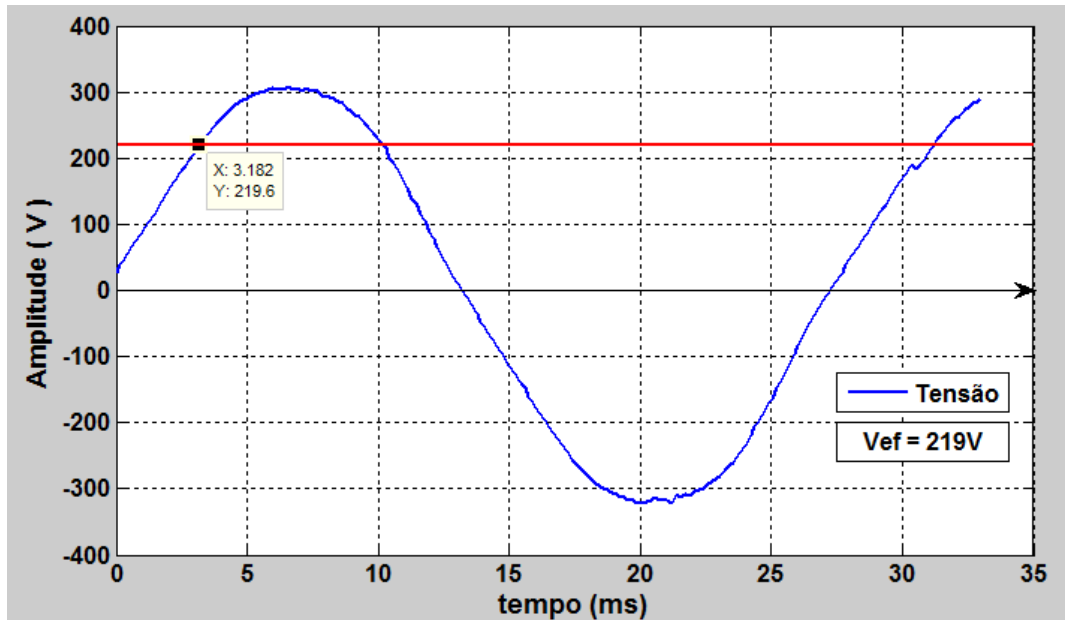


FIGURA 6.17 - CURVA DA TENSÃO NA CARGA RESISTIVA - SINAL RECUPERADO.

A Figura 6.18, exibe o sinal de corrente na carga resistiva ao ser recuperado.

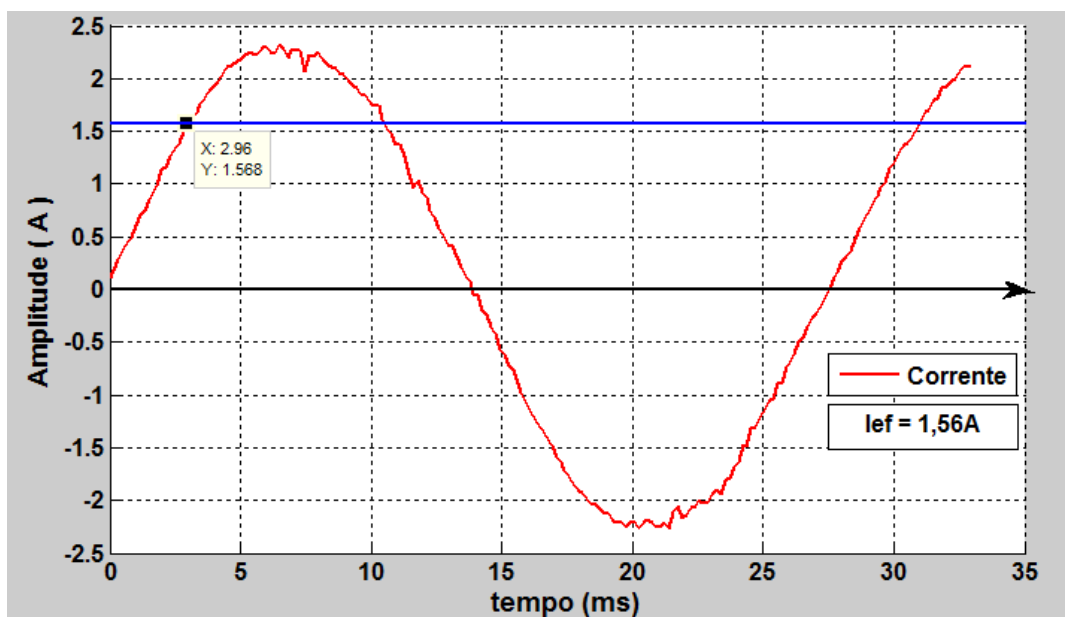


FIGURA 6.18 - CURVA DA CORRENTE NA CARGA - SINAL RECUPERADO.

A Figura 6.19, apresenta as curvas de tensão e de corrente na carga resistiva.

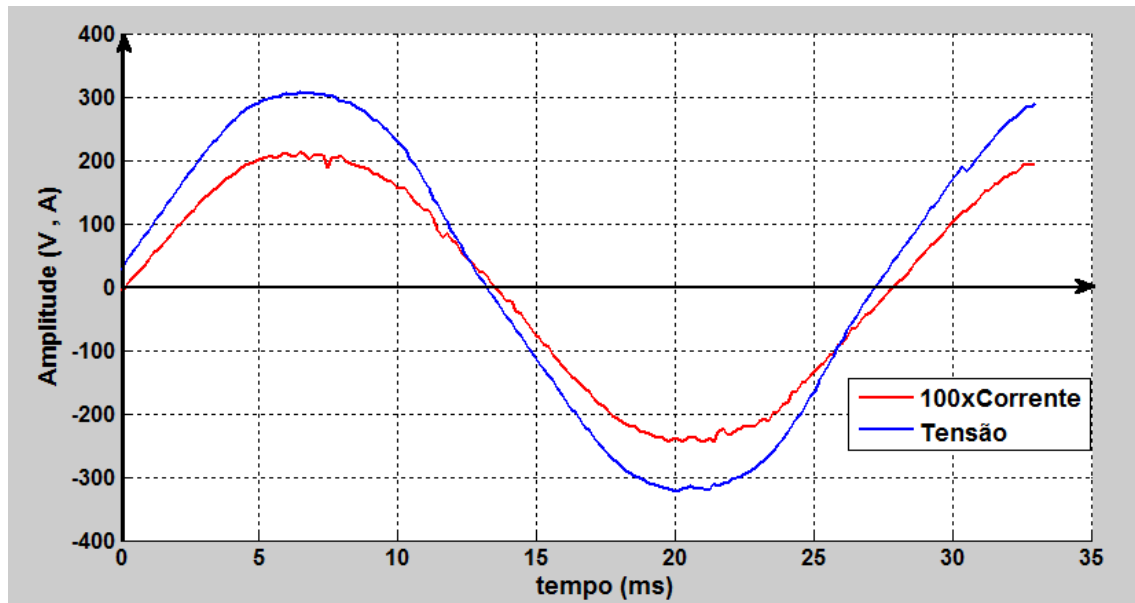


FIGURA 6.19 - CURVA DA TENSÃO E CORRENTE NA CARGA RESISTIVA.

Na Figura 6.20 são mostrados os valores das grandezas elétricas do sistema.

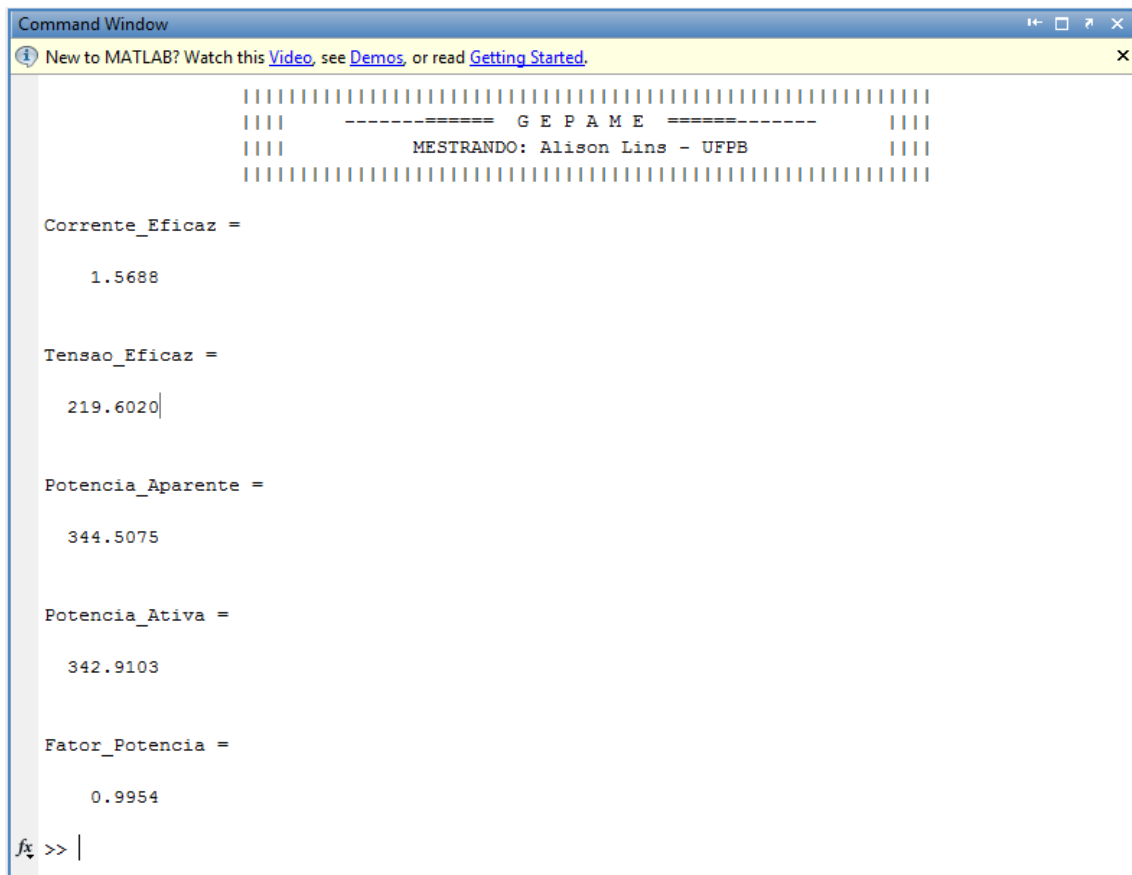


FIGURA 6.20 - VALORES DAS GRANDEZAS ELÉTRICAS.

Para o motor foi verificada as curvas de tensão e corrente, definindo a uma frequência de amostragem de 3kHz e 10kHz.

✓ Para a frequência de 3kHz;

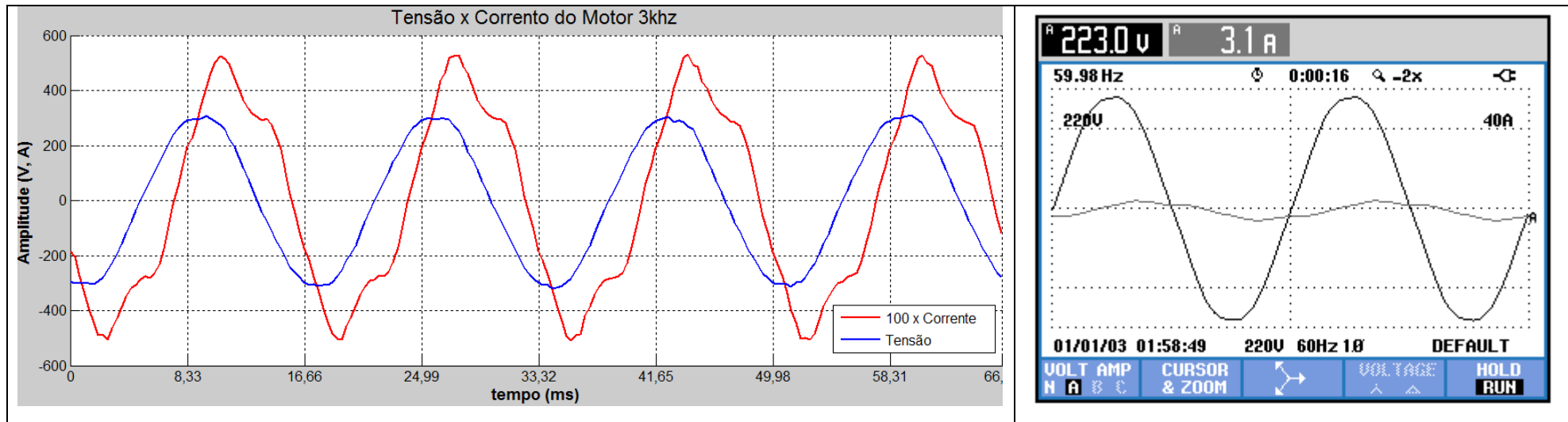


FIGURA 6.21 - TENSÃO X CORRENTE DO MOTOR A 3KHZ.

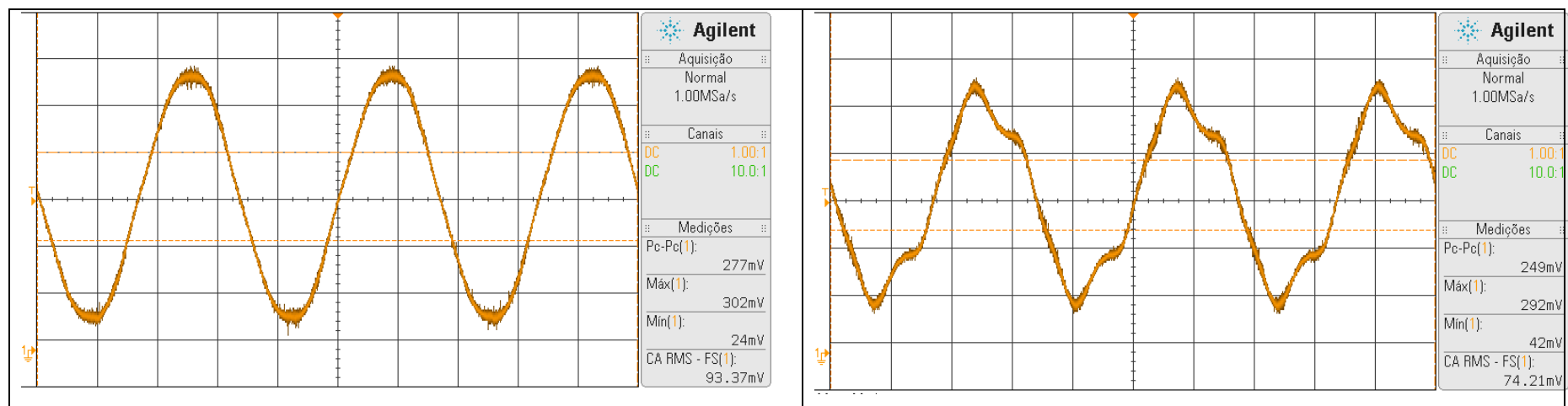


FIGURA 6.22 - SINAL DE TENSÃO E CORRENTE DE REFERENCIA.

✓ Para a frequência de 10kHz;

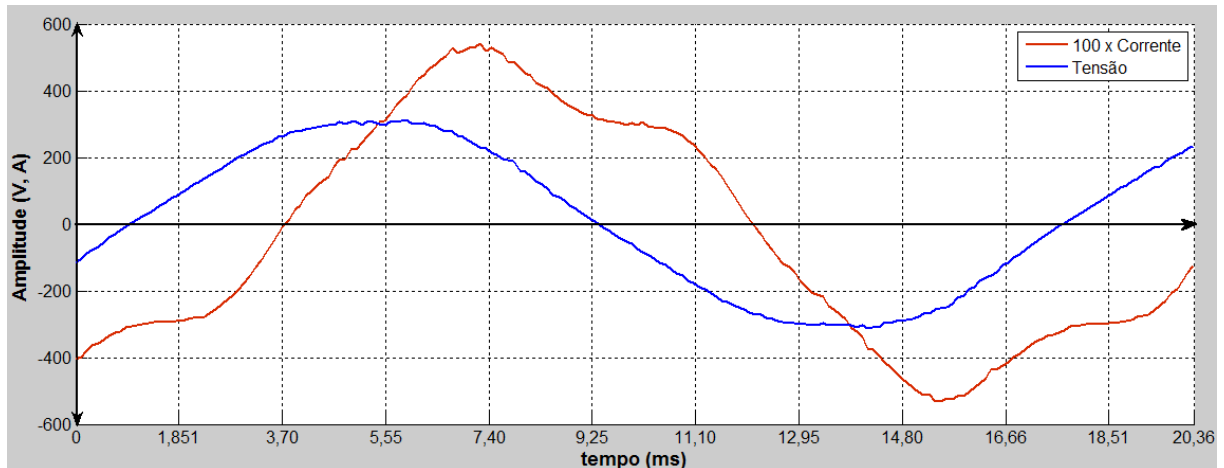


FIGURA 6.23 - TENSÃO X CORRENTE DO MOTOR A 10KHZ.

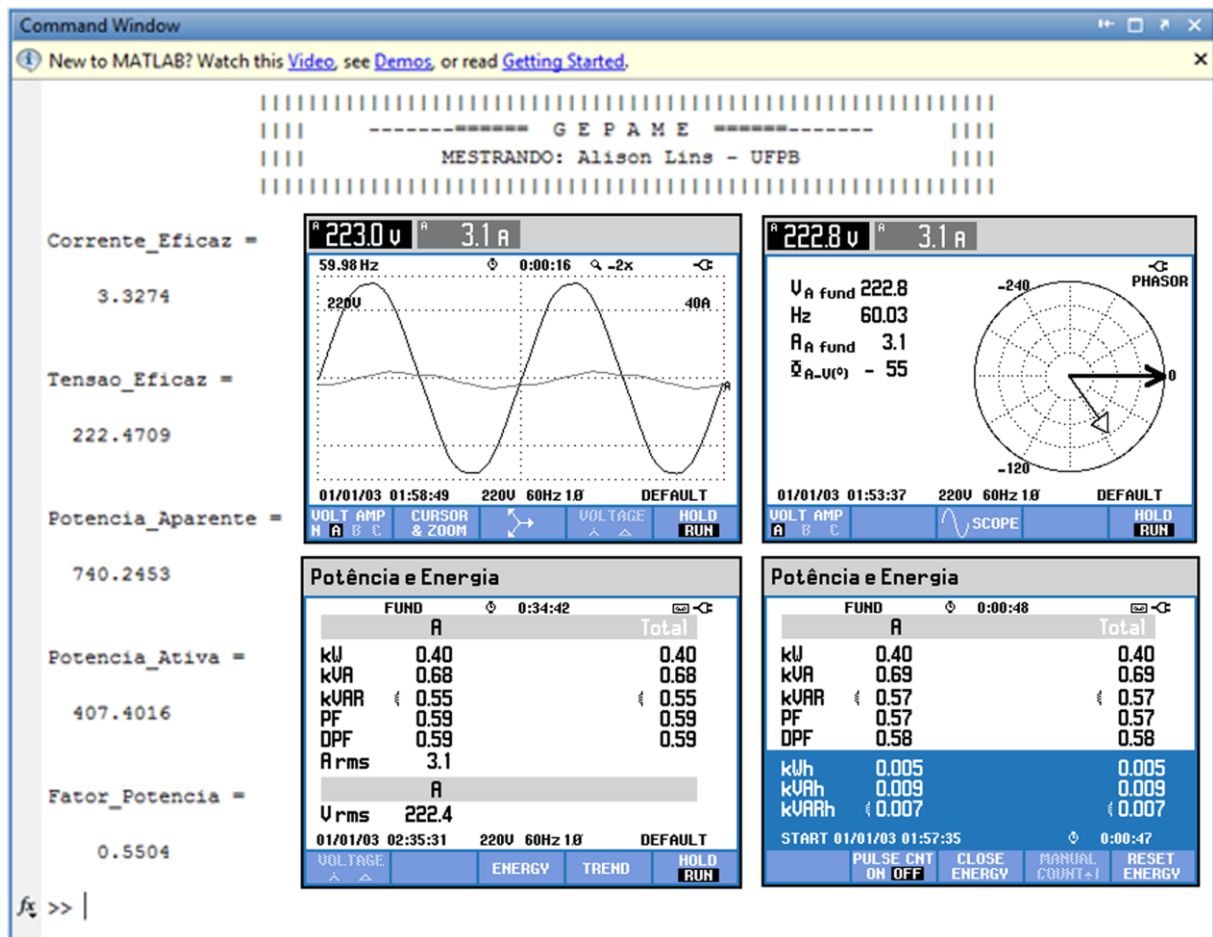


FIGURA 6.24 - RESULTADOS DA MEDIÇÃO A 10KHZ COMPARADOS COM OS DO FLUKE 434/435.

Se necessário, para aplicações em sistemas de controle, o sistema tem capacidade de aquisição com frequências maiores, como 20kHz e 30kHz.

Para verificar a linearidade do sistema foi utilizado um variador de tensão e realizadas medições de 05 (cinco) em 05V (cinco volts) na faixa de 0V a 235V.

Os resultados obtidos, contidos na Tabela 6.2 e Tabela 6.3, pelo sistema foram comparados aos do instrumento de referência, o Analisador de Qualidade de Energia Trifásica - Fluke 434/435, e por final foram traçadas as curvas.

TABELA 6.2 - VALORES DE TENSÃO.

Tensão Eficaz (V)		
Sistema	Fluke 434/435	Alicate Amperímetro
9,00	0,70	0,60
9,00	5,00	4,90
9,00	9,90	9,60
14,00	15,00	14,80
19,00	20,00	19,60
23,00	25,00	24,60
28,00	30,00	29,70
33,00	35,00	34,50
38,00	40,00	40,00
43,00	45,00	44,50
48,00	50,00	43,60
53,00	55,00	54,50
57,00	60,00	59,30
63,00	65,00	64,60
68,00	70,00	69,90
72,00	75,00	74,50
77,00	80,00	79,40
83,00	85,00	84,50
87,00	90,00	89,30
93,00	95,00	94,20
97,00	100,00	99,30
102,00	105,00	104,40
107,00	110,00	109,10
112,00	115,30	114,40
117,00	120,20	119,30
122,00	125,00	124,00
127,00	130,60	129,40
132,00	134,90	133,80
137,00	140,00	139,00
142,00	144,80	143,80
147,00	150,00	148,70
152,00	154,90	153,80
157,00	159,80	158,60
162,00	165,40	164,30
167,00	169,90	169,80
172,00	175,20	174,00
177,00	180,50	179,10
182,00	185,10	183,70
187,00	189,90	188,70
192,00	195,30	194,00
197,00	200,00	198,80
202,00	205,30	204,00
207,00	210,00	207,00
212,00	215,20	212,00
217,00	220,10	217,00
222,00	225,10	222,00
227,00	230,10	227,00
231,00	235,10	231,00

TABELA 6.3 - VALORES DE CORRENTE.

Corrente Eficaz (A)		
Sistema	Fluke 434/435	Alicate Amperímetro
0,35	0,10	0,02
0,35	0,30	0,32
0,35	0,30	0,41
0,54	0,40	0,47
0,58	0,40	0,52
0,61	0,50	0,57
0,65	0,50	0,62
0,68	0,60	0,66
0,72	0,60	0,70
0,75	0,60	0,74
0,78	0,70	0,78
0,81	0,70	0,81
0,84	0,70	0,85
0,87	0,80	0,89
0,90	0,80	0,92
0,93	0,80	0,95
0,95	0,80	0,99
0,98	0,90	1,02
1,00	0,90	1,05
1,03	0,90	1,08
1,05	1,00	1,11
1,08	1,00	1,14
1,10	1,00	1,17
1,13	1,00	1,20
1,15	1,10	1,23
1,17	1,10	1,25
1,19	1,10	1,28
1,22	1,10	1,30
1,23	1,20	1,33
1,25	1,20	1,35
1,28	1,20	1,38
1,29	1,20	1,39
1,32	1,20	1,39
1,34	1,30	1,40
1,35	1,30	1,42
1,37	1,30	1,44
1,39	1,30	1,46
1,41	1,30	1,48
1,43	1,40	1,51
1,45	1,40	1,53
1,46	1,40	1,55
1,48	1,40	1,57
1,50	1,40	1,59
1,51	1,50	1,61
1,53	1,50	1,63
1,55	1,50	1,65
1,57	1,50	1,67
1,58	1,50	1,69

Resposta da tensão eficaz do sistema, comparadas com as do analisador de quantidade de energia fluke 434/435 e o multímetro HM-2030 – HIKARI.

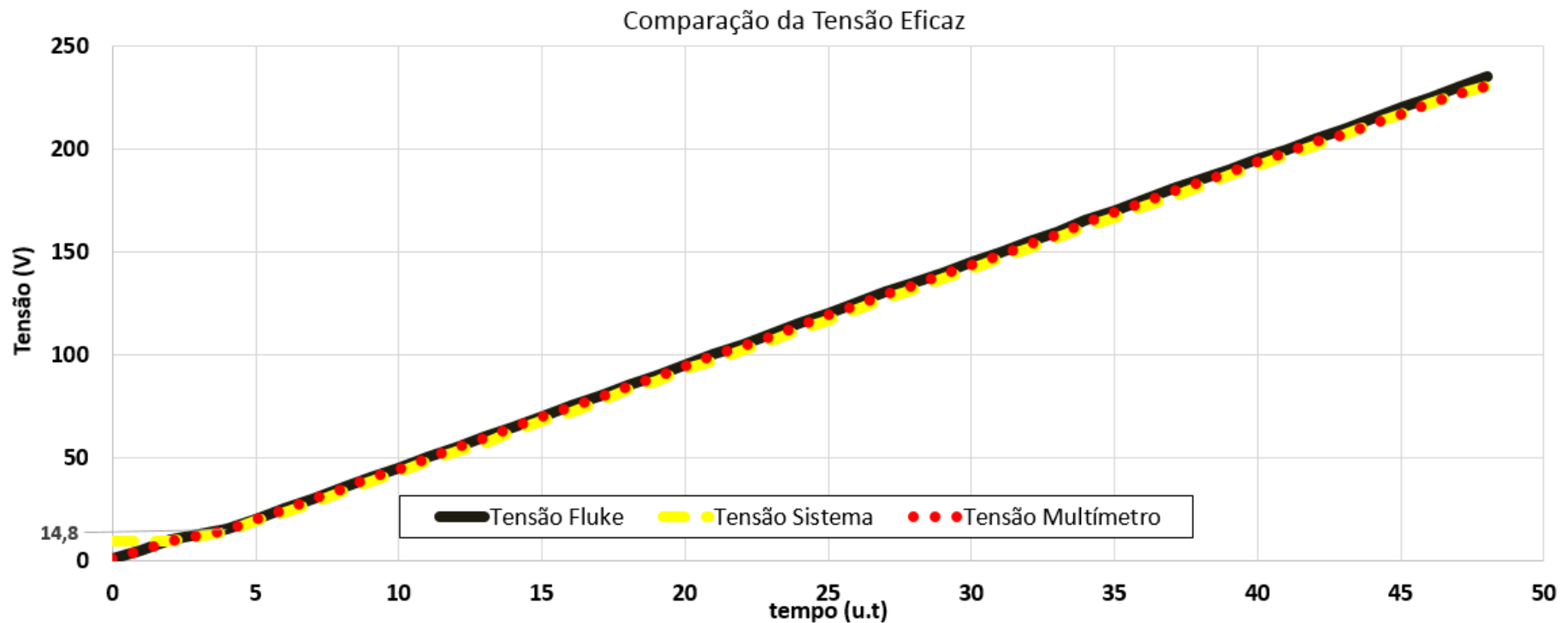


FIGURA 6.25 - COMPARAÇÃO DOS VALORES DE TENSÃO.

Em análise do gráfico, pode-se verificar um grau de concordância relevante entre os valores dos sinais apresentados pelo sistema em relação aos dos equipamentos de medição, em particular o do fluke 434/435.

A linearidade entre as medidas do sistema ao longo das medições são indicativos da funcionalidade do sistema proposto. O erro médio entre os valores medidos pelo sistema e fluke 434/435 foi de 3V.

A curva de corrente foi obtida medido o valor da corrente no sistema, a medida em que a tensão aumentava de 0,5 V. A resposta da corrente eficaz do sistema, comparadas com as do analisador de quantidade de energia fluke 434/435 e o alicate amperímetro Et-3200 – Minipa.

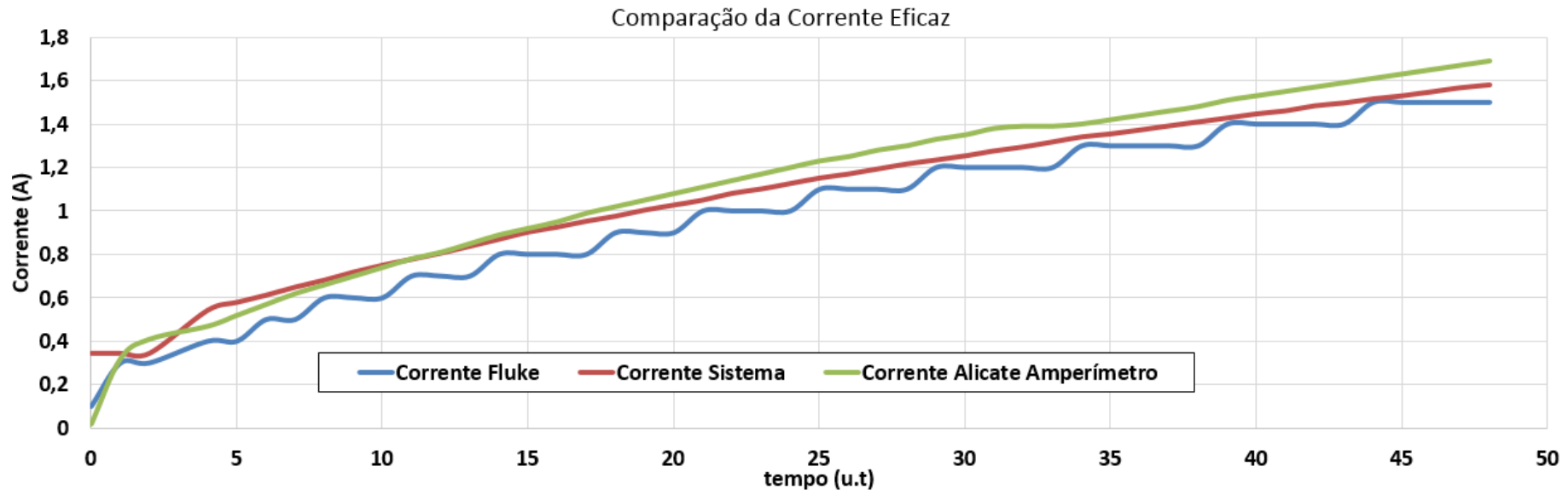


FIGURA 6.26 - COMPARAÇÃO DA CORRENTE

Em análise do gráfico, observa-se uma pequena disparidade entre os valores de corrente, isso é devido a resolução de cada instrumento.

O fluke 434/435, possui uma exatidão de apenas uma casa decimal, para as pinças utilizadas de 0 a 40A, isso explica os passos constantes da corrente medida, enquanto que a corrente medida pelo sistema e o alicate amperímetro possuem exatidão de três casas decimais, com isso apresenta uma leitura mais próxima do valor real.

6.4 IMAGENS DO SISTEMA

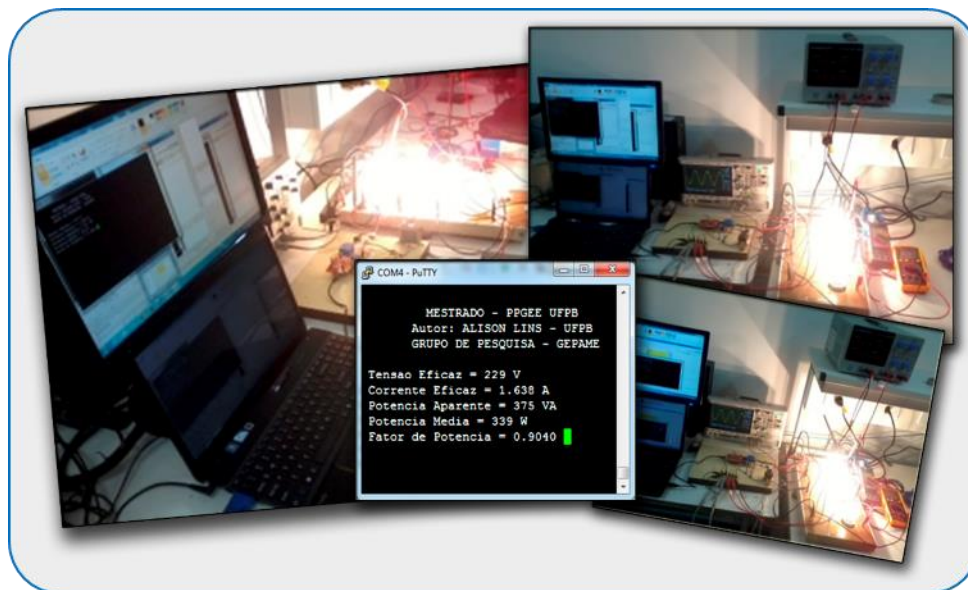


FIGURA 6.27 - IMAGEM DO SISTEMA.

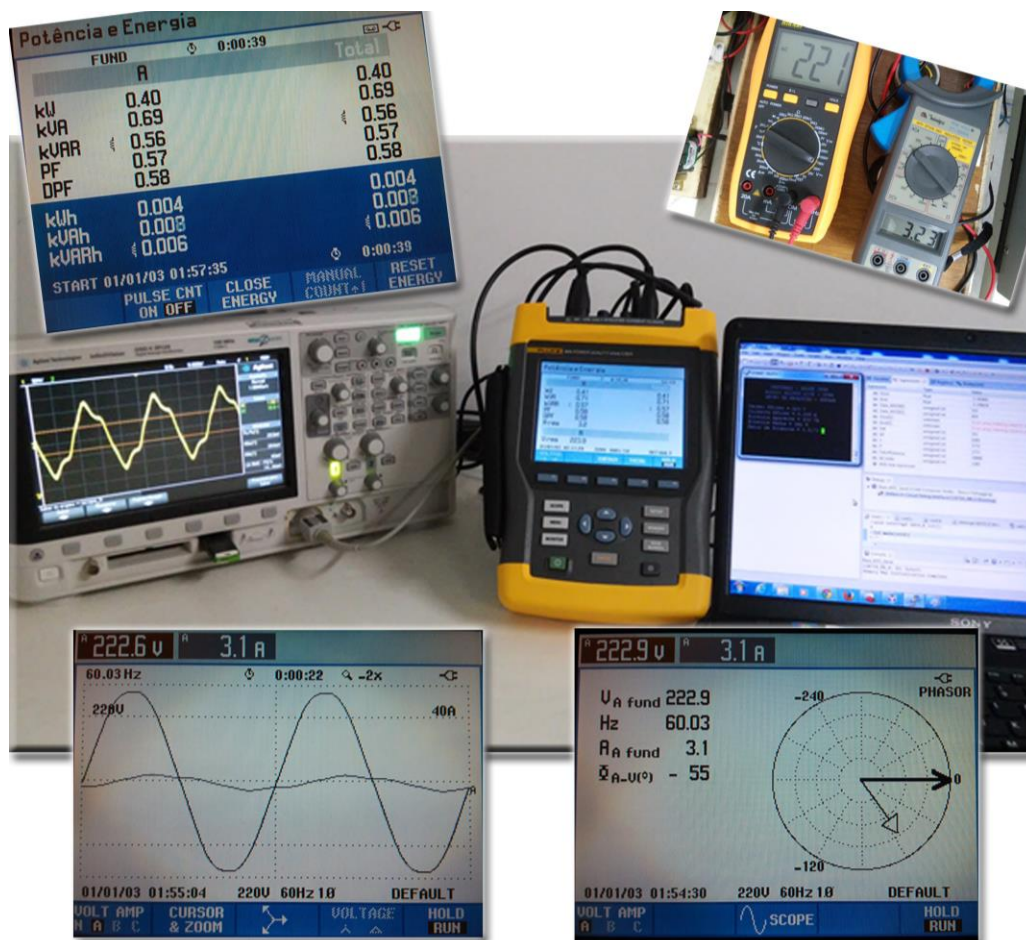


FIGURA 6.28 - IMAGEM DO SISTEMA 2.

6.5 CONCLUSÃO

Nesse capítulo foram apresentados os resultados obtidos utilizando a plataforma de aquisição de dados.

A construção da plataforma foi baseada em um projeto simples e montada com componentes de baixo custo, no entanto, apesar da simplicidade, os resultados apresentaram um alto grau de concordância quando comparados aos valores apresentados pelos instrumentos de medição profissionais.

Essa validação dos dados são indicadores de que a plataforma funciona e pode ser utilizada em diversas outras aplicações.

Por fim, foram exibidas imagens do sistema em execução.

7 CONCLUSÕES

7 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

Este trabalho desenvolveu o projeto e a implantação de uma plataforma para aquisição de dados aplicável na medição dos parâmetros da rede elétrica, com um alto grau de exatidão. Os resultados foram comparados com valores obtidos por instrumentos de medição, como o Osciloscópio DSO-X-2012A, da *Agilent* e o Analisador de Qualidade de Energia Trifásica Fluke 434/435.

Um ponto relevante do projeto é a facilidade que a UCS possui de ser incorporada a outras tecnologias microprocessadas, a exemplo da plataforma *BeagleBone Black*, que apresenta a limitação de tensão na entrada dos seus conversores ADs, de 1,8V, bastando ajustar a tensão no potenciômetro (POT1).

A característica principal do sistema de aquisição de dados proposto, é de ter sido desenvolvido segundo as normas vigentes da ANEEL, no que tange a qualidade de energia elétrica, possibilitando a plataforma vir a ser utilizada em aplicações comerciais.

Ainda, com base nas normas da ANEEL, o sistema proposto, apresentou vantagens em relação aos trabalhos citados na revisão bibliográfica, pois nenhum deles se adequam, simultaneamente, a menor frequência de corte, que deve permitir a passagem do sinal até no mínimo a 25ª harmônica, e a frequência de amostragem mínima, que consiste na obtenção de pelo menos 16 amostras dentro de um ciclo de 16,66 milissegundos, como exigidos no módulo 8 do PRODIST, apresenta oportunamente.

Com base nos testes realizados, foi verificado que o sistema apresenta linearidade numa ampla faixa de sem as necessidades de constantes calibrações.

Apesar do sistema ter sido desenvolvido apenas para o monitoramento de um sistema monofásico, o mesmo pode ser facilmente expandido para uma versão trifásico, bastando a utilização de três módulos. Essa é uma sugestão para trabalhos futuros, como também verificar o comportamento da plataforma para diferentes valores de temperaturas.

Com fins de agregar funcionalidades a plataforma, uma outra sugestão consiste em desenvolver uma comunicação sem fio, entre a unidade sensora e a unidade de processamento, para a realização de uma rede de monitoramento distribuída, buscando sempre construir o conceito de redes *Smart Grids*.

Por fim, a plataforma de aquisição de dados atendeu as necessidades do projeto, e se apresenta com uma ferramenta funcional que poderá ser tomada como ponto de partida em outros trabalhos.

8 REFERÊNCIAS

- [1] PETRY, Clóvis A., “Estabilizadores de Tensão para Alimentação de Cargas NãoLineares: Estudo de Variações Topológicas e Métodos de Controle”, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – INEP – UFSC, Florianópolis, 2005.
- [2] Salvadori, F.; Gehrke, C.S.; de Oliveira, A.C.; de Campos, M.; Sausen, P.S., "Smart Grid Infrastructure Using a Hybrid Network Architecture," *Smart Grid, IEEE Transactions on* , vol.4, no.3, pp.1630,1639, Sept. 2013 doi: 10.1109/TSG.2013.2265264
- [3] Vehbi C. Güngör et al., "Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards.," *IEEE Transactions on Industrial Informatics.*, vol. 7, no. 4, pp. 529-539, November 2011.
- [4] P. Palensky and D. Dietrich, "Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads.," *IEEE Transactions on Industrial Informatics.*, vol. 7, no. 3, pp. 381-388, August 2011.
- [5] G.R. Yousefi, A. Ebrahimi, and S. Haghbin, A. Moshari, "Demand-Side Behavior in the Smart Grid Enviroment. ," in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*, Gothenburg - Sweden, October 2010, pp. 1-7
- [6] C. S. Gehrke et al., "Industrial and commercial power system automation system based on a hybrid network architecture.," in *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting.*, vol. Único, Houston, Texas, USA., 2009.
- [7] LAMIN, HUGO. (2013). Análise de Impacto Regulatório da implantação de redes inteligentes no Brasil. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.TD-076/13, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 300p.
- [8] IEA – *INTERNATIONAL ENERGY AGENCY*, “*Energy Efficiency, Electricity Demand and Smart Grids*”, 33 rd IAEE Conference, Rio de Janeiro, Junho 2010.
- [9] Grupo de Trabalho de Redes Elétricas Inteligentes. Ministério de Minas e Energia. Relatório *Smart Grid*. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/acoes/Energia/Relatxro_GT_Smart_Grid_Portaria_440-2010.pdf>. Acesso em: 26 Fevereiro 2014.
- [10] LACERDA, Sergio L. M., “avaliação da eficiência da comunicação via rádio-frequência utilizando o *transceiver* nrf-24l01+® para monitoramento de sistemas elétricos no conceito de *smart grid*” Dissertação (Pós

- Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE), UFPB, João Pessoa, 2015.
- [11] R. A. Kennedy and D. D. Rickey, "*Monitoring and Control of Industrial Power Systems*," *IEEE Computer Applications in Power*, vol. 2, no. 1, pp. 42-46, October 1989.
 - [12] A. Malinowski and Hao Yu, "*Comparison of Embedded System Design for Industrial Applications*," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 7, no. 2, pp. 244-254, May 2011.
 - [13] D. Dolezilek and B. McDermott, "*Remote Data Monitoring and Data Analysis for Substations-A Case Study in Implementation*," *Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources*, pp. 496-500, March 2006.
 - [14] J. A. Bright and Wei-Jen Lee, "Integrated Monitoring, Protection, and Control Systems for Industrial and Commercial Power Systems [Artigo]," *IEEE Transactions on Industry Application.*, vol. Vol. 36, Jan/Feb 2000.
 - [15] F. Salvadori, et al., "Monitoring in Industrial Systems Using Wireless Sensor Network With Dynamic Power Management.," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.*, vol. 58, September 2009.
 - [16] L. Wu, T. G. Habetler, R. G. Harley, and J. Gutierrez B. Lu, "Wireless sensor networks: a survey.," *IEEE Transactions on Computer Networks.*, vol. 38, no. 7, pp. 393-422, July 2002
 - [17] Khosrow Moslehi and Ranjit Kumar, "A Reliability Perspective of the Smart Grid.," *IEEE Transaction on Smart Grid*, vol. 1, no. 1, pp. 57-64, June 2010.
 - [18] Zhuo Yue et al., "Hybrid Network Architecture: A Prospective Integrated Information Infrastructure for Manufacturing Enterprise.," in *IEEE International Conference on Intelligent Processing Systems.*, Beijing - China, October 1997, pp. 1659-1663.
 - [19] Qiang Yang and C., Javier A. Barria and Tim Green, "Communication Infrastructures for Distributed Control of Power Distribution Networks.," *IEEE Transactions on Industrial Informatics.*, vol. 7, no. 2, pp. 316-327, May 2011.
 - [20] IEEE Std 1613, IEEE Standard Environmental and Testing Requirements for Communications Networking Devices in Electric Power Substations., 2003.
 - [21] R. Moghe, "Smart "Stick-on" Sensors for the Smart Grid," *IEEE Transactions on Smart Grid* , vol. 3, no. 1, pp. 241-252, January 2012.
 - [22] GUSSOW, M. Eletricidade Básica. [S.l.]: Editora Person, 1997.

-
- [23] Boylestad, Robert L., *Introdução à Análise de Circuitos*. São Paulo : Prentice-Hall, 2004.
- [24] LIMA, Marcelo A. A., “Desenvolvimento de Um Sistema de Medidas em Tempo Real de Tensão, Corrente, Potência e Energia Conectado à Porta Paralela do Computador”, UFV, Viçosa – MG, 2007.
- [25] GEHRKE, Camila. S. “Detecção e Diagnóstico de Falhas (DDF) em um Sistema Isolado Baseado em um Gerador de Indução”, Trabalho de Conclusão de Curso, IJUÍ, 2008
- [26] Datasheet do sensor de Corrente na página da LEM HAIS 100-P <<http://www.lem.com/docs/products/hais-p%20and%20-tp.pdf>>. Acesso em: 12 Out 2014.
- [27] TEIXEIRA, Leandro L., “Medidor de Energia Eletrônico”, Projeto de Diplomação, UFRGS, Porto Alegre, 2009.
- [28] HELOE, Amine Y., JUNIOR, Antonio A. F., “Um Estudo Sobre Viabilidade de Implementação de Circuitos Eletrônicos Controladores de Demanda de Energia Elétrica”. International Conference on Engineering and Technology Education, Ilhéus, BRAZIL, March, 2010.
- [29] ALMEIDA, André L. B., “Desenvolvimento de um Sistema sem Fios e Microcontrolado de Medição Inteligente de Energia Elétrica para Cargas Residenciais”. UFOP, Ouro Preto , 2011.
- [30] DANDA, Everton F., “Desenvolvimento e Implementação de Interface de Comunicação Zigbee para Aplicação em Medição de Energia Elétrica”. IFPB, João Pessoa, 2014.
- [31] Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica Revisão 6 – 01/01/2015. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo8_Revisao_6.pdf>. Acesso em 14/05/2015
- [32] PROAKIS, John G.; MANOLAKIS, Dimitris K.. *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications*. 4. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2006.
- [33] KEHTARNAVAZ, Nasser; KIM, Namjin. *Digital Signal Processing System-Level Design Using LabVIEW*. Burlington: Newnes, 2005.
- [34] SHIN, Kihong; HAMMOND, Joseph Kenneth. *Fundamentals of Signal Processing: for Sound and Vibration Enginners*. London: Wiley, 2008.
- [35] HAYKIN, Simon. *Sistema de Comunicação: Analógicos e Digitais*. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

-
- [36] UNSER, Michael. Sampling-50 years after Shannon. Proceedings of the IEEE, vol.88, no.4, pp.569-587, April 2000.
- [37] SHANNON, Claude Elwood. Classic Paper: Communication In The Presence Of Noise. Proceedings of the IEEE, vol.86, no.2, pp.447-457, Feb. 1998.
- [38] HAYKIN, Simon; MOHER, Michael. Introdução aos sistemas de comunicação. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.
- [39] Filtros Ativos de Primeira e Segunda Ordem, <http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/leonardo/materiais/Lab_7_Filtros_ativos.pdf>. Acesso 22/01/2015.
- [40] Notas de Aula. Cap.5 Filtros Ativos. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/marlio/te054/capitulo5.pdf>>. Acesso em 22 Jan 2015.
- [41] Notas de Aula, Filtros. Disponível em: <http://docentes.fam.ulusiada.pt/~d1095/Filtros_Elec_0607.pdf>. Acesso em 22 Jan 2015.
- [42] EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL. Disponível em:<<http://www.galeon.com/kagiva/3ds/tutores/opam.html>>. Acesso em 12 Fev 2015.
- [43] FILHO, S. de M. Medição de Energia Elétrica. 7. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1997.
- [44] VICENTE, Eduardo M., “Projeto e Implementação do Controle de uma Ponte Retificadora Tiristorizada Utilizando um Psoc”. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UNIFEI), Itajubá, MG, 2009.
- [45] Datasheet LA25-NP. Disponível em: <<http://www.lem.com/docs/products/la%2025-np.pdf>>. Acesso em: 12 Fev 2015.
- [46] Datasheet do Microcontrolador TM4C123GH6PM. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tm4c123gh6pm.pdf>>.

Acesso em: 16 Maio 2015.

- [47] *Software Putty*. Disponível em: <<http://www.putty.org/>>.
Acesso em: 16 Mai 2015.