

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LARISSA RODRIGUES SOUZA

**IMPACTO DA TAXA DE AMOSTRAGEM EM MEDIÇÕES DE POTÊNCIA
ELÉTRICA BASEADAS NA TEORIA DE POTÊNCIA CONSERVATIVA**

CAMPO GRANDE - MS

2020

LARISSA RODRIGUES SOUZA

**IMPACTO DA TAXA DE AMOSTRAGEM EM MEDIÇÕES DE POTÊNCIA
ELÉTRICA BASEADAS NA TEORIA DE POTÊNCIA CONSERVATIVA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no curso de Mestrado em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Ruben Barros Godoy

CAMPO GRANDE - MS

2020

LARISSA RODRIGUES SOUZA

IMPACTO DA TAXA DE AMOSTRAGEM EM MEDIÇÕES DE POTÊNCIA ELÉTRICA BASEADAS NA TEORIA DE POTÊNCIA CONSERVATIVA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no curso de Mestrado em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Ruben Barros Godoy

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ruben Barros Godoy
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

Prof. Dr. Moacyr Aureliano Gomes de Brito
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

Prof. Dr. Tiago Henrique de Abreu Mateus
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

CAMPO GRANDE - MS

2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me guiar e me dar forças e saúde para enfrentar as dificuldades nesta jornada.

À minha mãe Eliana de Almeida Rodrigues, pelo apoio e incentivo, pela confiança no meu progresso.

Ao meu orientador Ruben Barros Godoy, por me incentivar a ingressar na pós-graduação, pelos ensinamentos, pelo apoio e incentivo, pela disponibilidade e paciência em me orientar, pelas contribuições, por todo o suporte necessário para a conclusão deste trabalho.

Ao meu namorado Neilton José Barbosa, pelo amor, amizade, companheirismo, por estar sempre ao meu lado. Obrigada por cuidar de mim e sempre me apoiar durante toda a trajetória acadêmica.

RESUMO

Este trabalho propõe a análise da influência da taxa de amostragem em medições de potência elétrica baseadas na Teoria da Potência Conservativa (TPC). As definições de potência ativa e reativa da TPC foram previamente aplicadas no MATLAB[®], variando-se a taxa de amostragem e utilizando um medidor digital de potência como referência. As medições foram efetuadas em cenários com cargas lineares e não lineares. Durante o trabalho, em consequência da sua implementação digital, foram verificadas algumas restrições da TPC. Dentre os problemas, destaca-se o erro agregado à integral discreta em função da baixa taxa de amostragem. Os erros de medição foram avaliados estatisticamente a fim de validar a exatidão em diferentes cenários e concluir qual deles poderia ser classificado como adequado para aplicações da TPC. O código de medição de potência foi posteriormente escrito no microcontrolador dsPIC33FJ32MC204. Verificou-se que o processador de baixo custo possui memória limitada e recursos de processamento restritos para os cálculos de potência em taxas de amostragem adequadas. Mesmo com tais restrições, vale ressaltar que a Teoria de Potência Conservativa é eficaz para lidar com cargas lineares e não lineares e técnicas para superar as limitações da taxa de amostragem são boas linhas de pesquisa para trabalhos futuros.

Palavras-chave: Implementação digital, medidor de potência elétrica, modelagem de erros, taxa de amostragem, Teoria de Potência Conservativa.

ABSTRACT

This work proposes the analysis of the sampling rate influence on Conservative Power Theory (CPT) based electrical power measurements. The CPT active and reactive power definitions were previously applied in MATLAB[®], varying the sampling rate and using a digital power meter as a reference. Measurements were performed in scenarios with linear and nonlinear loads. During the work, in consequence of its digital implementation, some CPT constraints were addressed. Among the problems, it is highlighted the error added to the discrete integral as a result of the low sampling rate. The measurement errors were statistically evaluated in order to validate the accuracy in different scenarios and to conclude which one could be classified as appropriate for CPT applications. The power measurement code was later written on the dsPIC33FJ32MC204 microcontroller. It was found that the low-cost processor has limited memory and restricted processing resources for the power calculations in suitable sampling rates. Even with digital restrictions, it is worth mentioning that the Conservative Power Theory is effective for dealing with linear and nonlinear loads and techniques to overcome the sampling rate limitations are good lines of research for future works.

Keywords: Digital implementation, electric power meter, error modeling, sampling rate, Conservative Power Theory.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Microrrede com ACHMI.....	14
Figura 2 – CHMI conectado à rede	15
Figura 3 – Sistema com FAP.....	15
Figura 4 – Conversor trifásico conectado à rede	16
Figura 5 – Microrrede com rede de comunicação entre conversores	17
Figura 6 – Diagrama do sistema de compartilhamento de carga.....	17
Figura 7 – Estrutura de comunicação	18
Figura 8 – Diagrama do sistema com sistema de carregamento de bateria.....	19
Figura 9 – Diagrama do sistema de turbina eólica conectado à rede	20
Figura 10 – Energia reativa instantânea para $\cos(\delta) = 0,92$ e $\cos(\delta) = 0,3$	28
Figura 11 – Erro médio de energia reativa	30
Figura 12 – Arranjo experimental para coleta de resultados	32
Figura 13 – Potência reativa para uma carga resistiva	36
Figura 14 – Potência reativa para duas cargas resistivas em paralelo	36
Figura 15 – Potência reativa para três cargas resistivas em paralelo.....	37
Figura 16 – Potência reativa para carga indutiva em série com uma carga resistiva	41
Figura 17 – Potência reativa para carga indutiva em série com duas cargas resistivas em paralelo	41
Figura 18 – Potência reativa para carga indutiva em série com três cargas resistivas em paralelo	41
Figura 19 – Formas de onda da tensão e da corrente na entrada do retificador	43
Figura 20 – Potência reativa para carga não linear com ângulo de disparo de 0°	47
Figura 21 – Potência reativa para carga não linear com ângulo de disparo de 30°	47
Figura 22 – Potência reativa para carga não linear com ângulo de disparo de 60°	47
Figura 23 – Potência reativa para carga não linear com ângulo de disparo de 90°	48
Figura 24 – Diagrama do protótipo do medidor	51
Figura 25 – Esquemático de comunicação do dsPIC33FJ32MC204 com o display LCD	52
Figura 26 – Placa de desenvolvimento do dsPIC	53
Figura 27 – Circuito de condicionamento de tensão	54
Figura 28 – Circuito de condicionamento de corrente	54
Figura 29 – Placa de condicionamento de sinais	55
Figura 30 – Fluxograma do <i>firmware</i> do medidor	56

Figura 31 – Protótipo do medidor.....	57
Figura 32 – Arranjo do sistema	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variáveis e operações matemáticas	22
Tabela 2 – Valores esperados de potência para cargas resistivas a partir dos sinais de tensão e corrente	34
Tabela 3 – Potências obtidas pelo medidor Yokogawa® para cargas do cenário 1	34
Tabela 4 – Potências calculadas pela TPC para cargas resistivas para 16, 32, 64 e 128 amostras por ciclo	35
Tabela 5 – Potências calculadas pela TPC para cargas resistivas para 256, 512, 1024, e 2048 amostras por ciclo	35
Tabela 6 – Testes de hipóteses para carga resistiva.....	38
Tabela 7 – Valores esperados de potência para carga RL	39
Tabela 8 – Potências do medidor Yokogawa® para carga RL.....	39
Tabela 9 – Potências calculadas pela TPC para carga RL para 16, 32, 64 e 128 amostras por ciclo	40
Tabela 10 – Potências calculadas pela TPC para carga RL para 256, 512, 1024, e 2048 amostras por ciclo	40
Tabela 11 – Testes de hipóteses para carga resistiva-indutiva	42
Tabela 12 – Análise espectral de corrente do retificador	44
Tabela 13 – Valores esperados de potência para carga não linear	44
Tabela 14 – Valores de potência calculados com componentes fundamentais para carga não linear	45
Tabela 15 – Potências calculadas para carga não linear para 16, 32, 64 e 128 amostras por ciclo	46
Tabela 16 – Potências calculadas para carga não linear para 256, 512, 1024, e 2048 amostras por ciclo	46
Tabela 17 – Testes de hipóteses para carga não linear	49
Tabela 18 – Potências medidas e valores de referência para cargas resistivas.....	59
Tabela 19 – Potências medidas e valores de referência para cargas indutivas.....	61
Tabela 20 – Potências medidas e valores de referência para carga não linear	62

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. OBJETIVO GERAL	13
1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	13
2. POTENCIAIS APLICAÇÕES DA TPC	14
2.1. CONCLUSÕES.....	20
3. FUNDAMENTAÇÃO MATEMÁTICA DA TEORIA DE POTÊNCIA CONSERVATIVA	22
3.1. VARIÁVEIS E OPERAÇÕES MATEMÁTICAS UTILIZADAS NA TPC	22
3.2. POTÊNCIA, ENERGIA E PARCELAS DE CORRENTE	23
3.3. CONCLUSÕES.....	25
4. MODELAGEM DE ERROS	26
4.1. INFLUÊNCIA DO DESLOCAMENTO DA CORRENTE EM RELAÇÃO A TENSÃO.....	26
4.2. INFLUÊNCIA DO ATRASO DA INTEGRAL IMPARCIAL DE TENSÃO	29
4.3. INFLUÊNCIA DA TAXA DE AMOSTRAGEM	31
4.4. CONCLUSÕES.....	31
5. AVALIAÇÃO DA TPC EM FUNÇÃO DA TAXA DE AMOSTRAGEM	32
5.1. ARRANJO PARA LEVANTAMENTO DE DADOS.....	32
5.2. CÁLCULOS E COMPARAÇÕES OBTIDAS	33
5.2.1. Cenário 1 – Carga resistiva	33
5.2.2. Cenário 2 – Carga resistiva-indutiva.....	39
5.2.3. Cenário 3 – Carga não linear	43
5.3. CONCLUSÕES.....	49
6. MEDIDOR IMPLEMENTADO	51
6.1. HARDWARE.....	51
6.1.1. Placa de condicionamento de sinais.....	53
6.2. SOFTWARE	55
6.3. ARRANJO PARA LEVANTAMENTO DE DADOS.....	57
6.4. RESULTADOS DE MEDIÇÃO.....	59
6.4.1. Cenário 1 – Carga resistiva	59

6.4.2.	Cenário 2 – Carga indutiva	61
6.4.3.	Cenário 3 – Carga não linear	61
6.5.	CONCLUSÕES.....	62
6.5.1.	Erros associados à baixa taxa de amostragem	62
6.5.2.	Erros presentes nas medições de baixa potência.....	62
6.5.3.	Erros nas medições de potência ativa	63
7.	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	64
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65

1. INTRODUÇÃO

No passado, as cargas elétricas eram predominantemente cargas lineares, ou seja, previam tensões e correntes puramente senoidais. Desta forma, a teoria de potência utilizada na época e ainda nos dias atuais presume definições aplicáveis à essas condições [1].

A propagação do uso de conversores eletrônicos de potência em meio residencial e industrial causou um impacto importante na rede elétrica. As cargas não lineares ocasionam distorções harmônicas nas formas de onda de corrente ou tensão da rede e desbalanço em sistemas polifásicos. À vista disso, os conceitos clássicos passaram a não ser mais adequados às novas formas de onda [2].

A partir de 1920, novas definições de teorias de potência foram propostas na tentativa de compreender e analisar corretamente as cargas lineares e não lineares. Primeiramente, Budeanu e Fryze [3] contribuíram com suas propostas para sistemas monofásicos, porém, apresentaram parcelas de potência vinculadas a componentes harmônicas, o que dificulta a compensação. Buchholz [3] estendeu a teoria de Fryze para sistemas polifásicos. Depenbrock [4] baseou-se nos trabalhos de Fryze e Buchholz e apresentou a primeira tentativa de decomposição de parcelas de corrente em sistemas polifásicos, todavia, ainda sem significado físico para todas as variáveis envolvidas. A teoria de Akagi [5] foi desenvolvida para sistemas trifásicos e baseia-se na transformada de Clarke. Apesar dessa teoria não se preocupar com o significado físico estrito de cada parcela de potência ou corrente, se demonstra muito eficaz para procedimentos de compensação no que abrange os filtros ativos de potência. Por outro lado, a teoria de Tenti [6], foco deste trabalho, se concentra na caracterização das grandezas dentro do significado físico que cada uma possui. Sendo assim, a teoria propõe a decomposição da corrente em diversas parcelas que podem ser conduzidas aos cálculos de potência e de energia. Além disso, as parcelas de corrente possibilitam a compensação de energia por meio de filtros apropriados à cada situação, podendo ser ativos ou passivos.

A busca por técnicas de medição adequadas visa, acima de tudo, garantir a qualidade da energia elétrica para a operação eficiente e adequada de equipamentos elétricos. O montante de cargas não lineares conectadas à rede elétrica pode provocar efeitos indesejáveis como distúrbios na rede de distribuição e desequilíbrios entre fases em circuitos polifásicos, o que pode prejudicar o fluxo de potência e o funcionamento dos equipamentos conectados a ela.

Algumas cargas são mais susceptíveis aos efeitos das harmônicas. O impacto das harmônicas em motores e geradores, por exemplo, está relacionado ao aumento do aquecimento

e consequentes perdas no ferro e no cobre, ao aumento do ruído audível e à redução do torque, rendimento e vida útil das máquinas. Nos transformadores, harmônicas na tensão e na corrente elevam as perdas no ferro e no cobre. Nos capacitores, pode ocorrer a ressonância e gerar níveis elevados de corrente e/ou tensão. Os dispositivos de medição de potência também podem ter suas medidas afetadas por distúrbios na qualidade de energia, incluindo a presença de harmônicas, ressonâncias e transitórios. Além disso, medidores de energia com discos de indução, por exemplo, podem apresentar erros consideráveis de medição caso o nível de distorção harmônica seja elevado [7].

Os sistemas de geração distribuída, além de injetar potência ativa na rede elétrica, também podem ser fontes de harmônicos. Nos pontos de conexão destes sistemas com a rede elétrica, pode haver distorções na tensão e variação da frequência em virtude dos algoritmos de anti-ilhamento [8], [9]. A preocupação com a expansão dos sistemas de geração distribuída tem motivado o aperfeiçoamento de normas nacionais e internacionais visando a imposição de limites na injeção de conteúdo harmônico por parte de sistemas de geração conectados à rede elétrica [10]-[12]. Ao passo que os limites impostos precisam ser atendidos, estudos recentes se preocupam com a criação de técnicas de anti-ilhamento que não causem distúrbios que violem os padrões pré-estabelecidos [9], [13], [14].

Cada vez mais, a realização de medições mais exatas da potência elétrica e a detecção das parcelas prejudiciais de corrente elétrica vêm ganhando espaço no meio científico e industrial. Entre todas as vantagens desse avanço, a principal se resume em possibilitar ações corretivas que contribuam com o desempenho mais eficiente do sistema elétrico. Isso é bastante interessante para as concessionárias de energia elétrica, pois garante a obtenção de valores corretos de consumo para o faturamento e facilita a atribuição de responsabilidades relacionadas à geração de harmônicas e reativos. Tais medidas podem proporcionar diminuição de perdas técnicas, detecção de fraudes e um maior controle da qualidade da energia elétrica.

Com base nas modernas teorias de potência, o desenvolvimento de medidores de baixo custo que forneçam medidas exatas de energia elétrica e de potência elétrica em circunstâncias de tensões e correntes distorcidas se torna um desafio. Tal implementação depende de um condicionamento apropriado para aquisição de sinais, assim como de um processamento rápido o suficiente que não incorra em erros provenientes dos atrasos de amostragem e cálculos.

1.1. OBJETIVO GERAL

Considerando a temática apresentada com relação à importância da realização de medições exatas de potência elétrica de cargas lineares e não lineares, este trabalho tem como objetivo avaliar o efeito da taxa de amostragem em medições de potência baseadas na Teoria de Potência Conservativa (TPC), e analisar a viabilidade da implementação dessa teoria em um controlador digital de baixo custo.

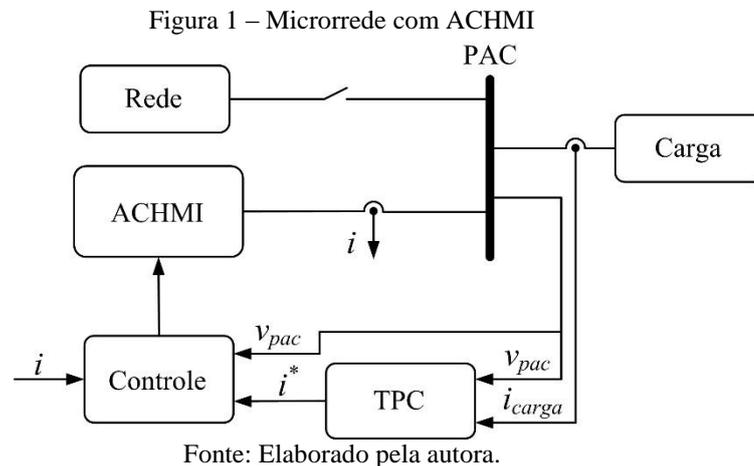
1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho foi organizado de modo que no capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica destacando-se a TPC. No capítulo 3 é apresentada a fundamentação matemática da TPC, contendo suas variáveis, operações matemáticas e definições. O capítulo 4 demonstra a modelagem matemática de erros da TPC. O capítulo 5 mostra a verificação da influência da taxa de amostragem nos cálculos da TPC. É exibido o sistema onde foram levantados os dados para a análise e os resultados obtidos. O capítulo 6 tem como objetivo apresentar o protótipo do medidor. São detalhadas as etapas de hardware e software. Também são mostrados os resultados de medição. O capítulo 7 apresenta as conclusões do trabalho e propostas de trabalhos futuros.

2. POTENCIAIS APLICAÇÕES DA TPC

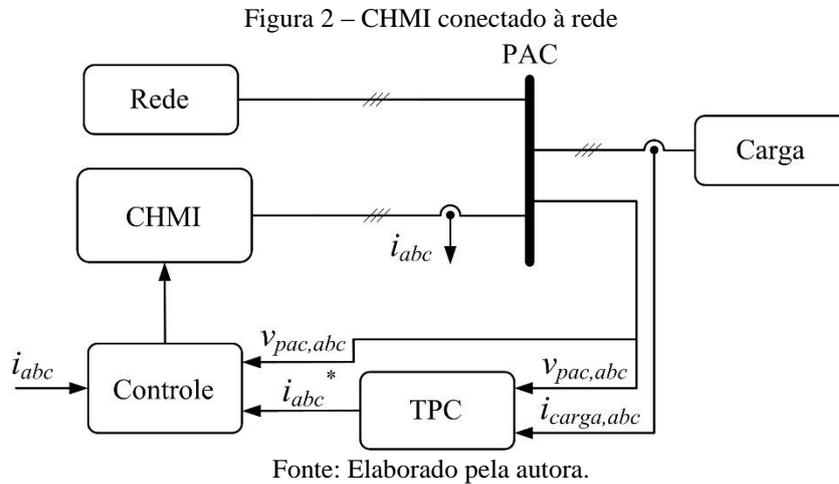
Com o surgimento de sistemas elétricos de geração distribuída, a tensão da rede pode apresentar distorções consideráveis além da variação da frequência. Nesse contexto, a TPC proposta por Tenti et al. [6], oferece uma base adequada para lidar com tais condições de operação [3], apresentando definições de potência ativa e de energia reativa que se conservam. A TPC pode ser utilizada tanto para fins de medição quanto para compensação de parcelas de corrente prejudiciais à rede elétrica.

Em [15] é proposta a aplicação de um inversor monofásico multinível em ponte H em cascata assimétrico (ACHMI), do inglês *asymmetrical cascaded H-bridge multilevel inverter* em microrredes com cargas não lineares. Esse inversor pode operar no modo autônomo ou conectado à rede. Neste último, a estratégia de controle baseia-se na TPC, onde a teoria é utilizada para gerar referências de corrente para a mitigação de distúrbios. O algoritmo de controle foi implementado no processador digital DSP TMSF28335, a planta de potência foi implementada no MATLAB/Simulink®, e o sistema foi compilado em um simulador em tempo real. A Figura 1 mostra o diagrama simplificado de um (ACHMI) monofásico conectado em uma rede de distribuição, sendo o PAC o ponto de acoplamento comum.

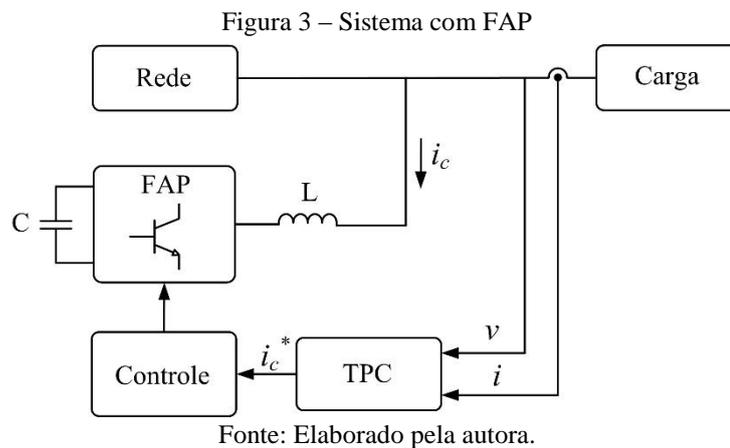


Um sistema similar a [15] é apresentado em [16], onde foi apresentada a aplicação de um inversor trifásico multinível em ponte H em cascata simétrico (CHMI), do inglês *cascaded H-bridge multilevel inverter*, conectado à rede. Da mesma forma que em [15], essa aplicação utiliza a TPC para obter referências de corrente para compensar distorções e lidar com o desbalanço do sistema elétrico. De forma similar a [15], o sistema foi implementado para

simulação em tempo real. A Figura 2 mostra o diagrama do sistema com CHMI trifásico conectado à rede.



A fim de propor uma estratégia para melhorar os índices da qualidade de energia de sistemas bifásicos a três fios, a literatura [17] apresenta a aplicação de um conversor a três braços como filtro ativo paralelo (FAP). A TPC é utilizada para calcular as componentes de corrente que servirão de referência para o controle para compensar corrente reativa, corrente de distorção, e corrente de desbalanço. O sistema foi implementado apenas em simulação. A Figura 3 mostra o diagrama simplificado do sistema bifásico a três fios com o filtro ativo paralelo.

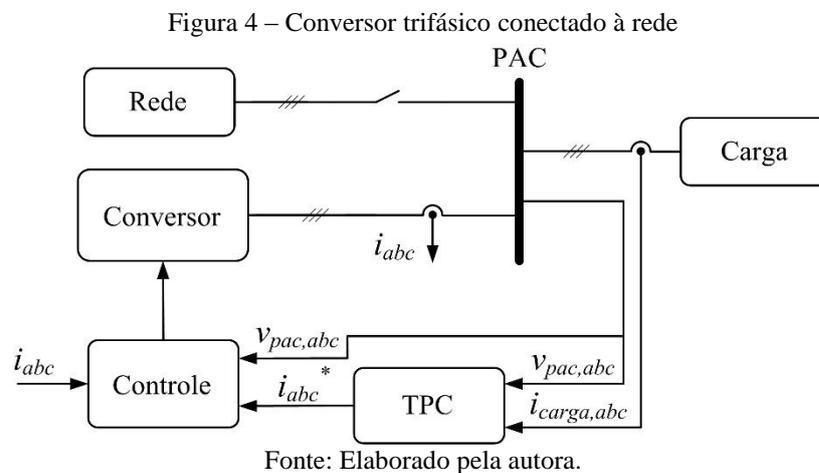


A TPC pode também ser aplicada para compensação em sistemas trifásicos a quatro fios [18]. Nesse caso, além da componente de corrente reativa e de distorção, pode haver o desbalanço no sistema devido à presença de componentes de sequência negativa e de sequência

zero. Em [18] propõe-se a aplicação de um compensador a quatro braços com o algoritmo de controle baseado nas definições da TPC. O algoritmo de controle foi embarcado na plataforma DSPACE 1103.

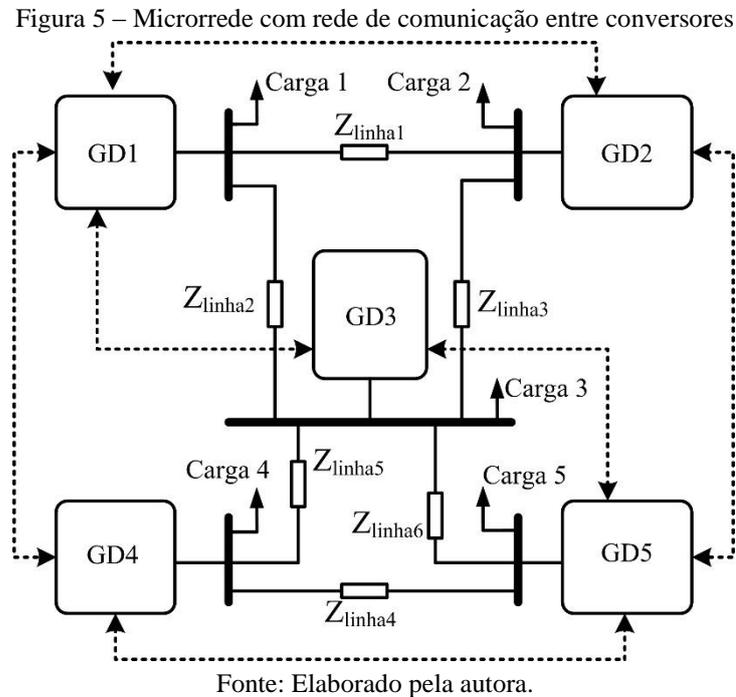
A TPC também é implementada em [19] para compensar a corrente de distorção e corrente reativa da rede. Nesse caso, o conversor de um sistema de geração de energia fotovoltaica conectado à rede também atua como filtro ativo paralelo utilizando as parcelas de corrente obtidas por intermédio da TPC. Esse trabalho propõe a aplicação do modelo preditivo de controle como algoritmo de chaveamento. O desempenho do controlador foi demonstrado por meio de simulação no MATLAB/Simulink®.

Em [20] A TPC é utilizada para o mesmo fim que [19], porém em um sistema trifásico com técnica de controle baseada na análise da resposta em frequência. Foi utilizado um protótipo trifásico para validar a proposta de controle. Para efetuar as leituras de tensão e corrente foram utilizados sensores de efeito Hall da fabricante LEM® e o algoritmo de controle foi implementado no controlador TMSF28335 da Texas Instruments®. A Figura 4 mostra o diagrama com o conversor conectado à rede, carga e sistema de controle.



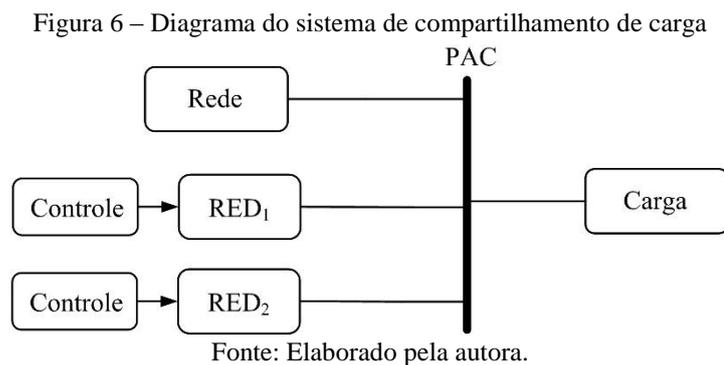
A TPC é utilizada em [21] para verificar componentes harmônicas e de desbalanço em uma microrrede isolada a quatro fios. Cargas desbalanceadas podem produzir componentes de corrente de sequência negativa e de sequência zero em sistemas trifásicos a quatro fios. A sobrecarga em uma das fases pode reduzir a capacidade de geração de energia distribuída. Por essa razão, [21] propõe a aplicação de conversores a quatro braços em uma microrrede com uma rede de comunicação distribuída conforme a Figura 5, onde os GDs correspondem às unidades de geração distribuída. Através do algoritmo de controle e da rede de comunicação, é possível compartilhar entre os conversores o fornecimento das componentes de distorção e

desequilíbrios solicitados pelas cargas, de acordo com a capacidade de cada conversor, evitando a sobrecarga de um ou mais conversores.



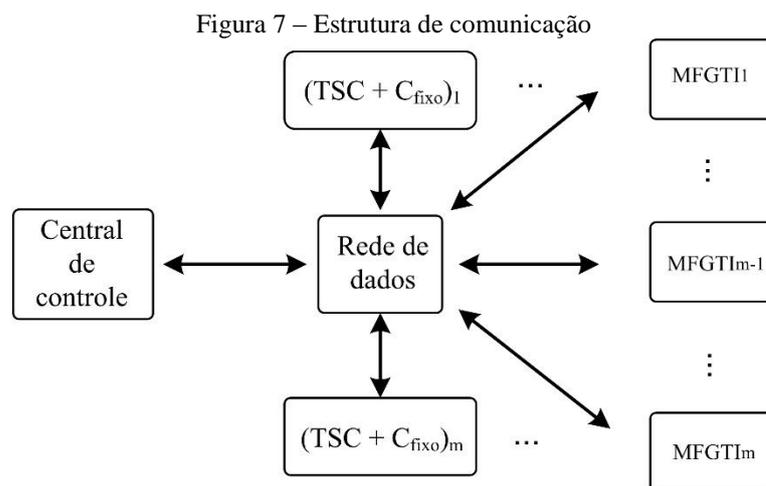
Para a validação experimental, o algoritmo de controle baseado no controlador Proporcional Ressonante (PR) foi implementado em computadores que controlam os conversores em tempo real.

Em [22] é proposta uma estratégia de compartilhamento de carga, baseada em um algoritmo de decisão, entre duas fontes de energia distribuída conectadas à rede. A Figura 6 mostra o diagrama simplificado do sistema trifásico contendo dois Recursos Energéticos Distribuídos (RED). A TPC é aplicada para decompor a corrente em parcelas que servirão de referência para o sistema de controle. O sistema foi validado em um simulador digital em tempo real.



Os fatores calculados por meio da TPC, tais como o fator de distorção e o fator de desbalanço, podem ser utilizados para treinar um algoritmo de aprendizado supervisionado baseado no vizinho mais próximo (*K-Nearest Neighbor*) [23] visando melhorar o desempenho de sistemas modernos de potência através de compensadores otimizados. Como resultado, os compensadores melhor sintonizados contribuirão para minimizar as perdas na rede e melhorar o fator de potência conforme as normas estabelecidas.

Conforme [24], as definições da TPC podem ser utilizadas para gerar referências de corrente a serem compensadas por inversores multifuncionais conectados à rede (MFGTIs), do inglês *multifunctional grid-tie inverters*. Nesse trabalho, propõe-se uma plataforma composta por uma central de controle e inversores com capacidade de comunicação. O controle centralizado é capaz de transmitir e receber dados dos inversores remotamente permitindo que o operador da microrrede possa definir e ajustar parâmetros dos inversores indicando sua funcionalidade em cada situação. A central de controle pode enviar as referências de corrente de distorção e/ou corrente reativa aos inversores para realizar a compensação, o que possibilita a cooperação entre os conversores e entre estes e os compensadores passivos presentes na rede. A Figura 7 mostra o diagrama da estrutura de comunicação da microrrede contendo os inversores multifuncionais e compensadores do tipo TSC do inglês *Thyristor Switched Capacitor*, e banco de capacitores fixos.



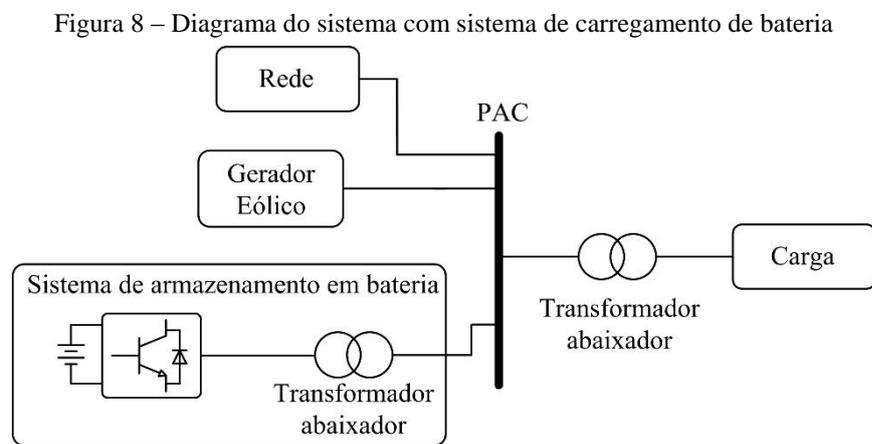
Fonte: Elaborado pela autora.

O sistema de processamento é composto por dois núcleos de processamento, sendo o primeiro núcleo o DSP, e o segundo um microcontrolador da série ARM Cortex M4. Ambos trocam dados através de uma memória RAM compartilhada. O DSP processa os algoritmos de controle e calcula os fatores de conformidade da carga. O ARM executa o programa de

gerenciamento do DSP e comunica com um centro remoto via Protocolo de Controle de Transmissão/Protocolo de Internet (TCP/IP) do inglês *Transmission Control Protocol/Internet Protocol*.

Tendo como base a TPC, em [25] é proposta uma estratégia de controle “multi-mestre-escravo” em uma microrrede isolada onde a referência de corrente das unidades de conversores “escravos” é sintetizada a partir das correntes de carga. Conversores “mestres” e “escravos” são conectados a um barramento comum, onde os “escravos” injetam sua energia disponível para compensar localmente as componentes indesejadas de corrente originadas de cargas não lineares locais e/ou desbalanceadas, e as unidades “mestres” compartilham a carga restante com grupos distantes. O sistema foi implementado em simulação no software PSIM. A decomposição da corrente conforme a TPC foi implementada por meio de um algoritmo programado em um compilador C.

Um sistema de armazenamento em bateria, do inglês *battery storage system (BSS)* com dupla função é proposto em [26]. A função primária é a compensação da flutuação de potência produzida por um gerador eólico a fim de garantir o fornecimento de energia ininterrupta. A Figura 8 mostra o diagrama simplificado do sistema.

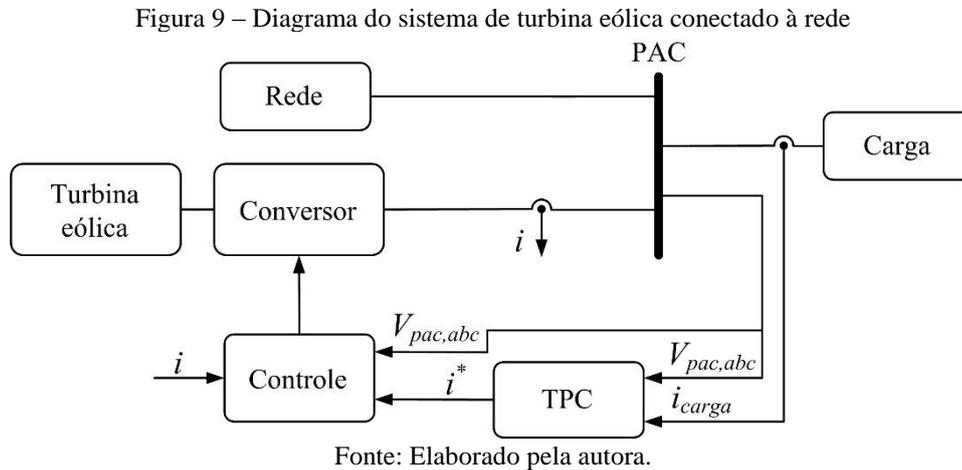


Fonte: Elaborado pela autora.

Através da aplicação de um algoritmo de decisão, a função secundária de filtro ativo pode ser ativada em momentos específicos de operação. Assim, a TPC é aplicada para calcular a potência ativa entregue pelo gerador eólico e pelo sistema de armazenamento em bateria, sendo o resultado utilizado como referência para o controle do conversor de potência. O sistema foi simulado no software PSIM®.

Segundo [27], a TPC pode ser aplicada para identificar e quantificar diferentes referências de corrente para mitigação de distúrbios através de um conversor de um sistema de

turbina eólica conectado à rede. O controle do conversor foi implementado em um coprocessador DSP (TI TMS230F28335) e o sistema de potência foi compilado em um simulador em tempo real Opal-RT®. A Figura 9 mostra o diagrama simplificado do sistema.



Também existem aplicações da TPC em *Smart Grids*, onde a TPC pode ser utilizada para otimizar o fluxo de potência [28], [29]. Tais redes podem apresentar variações de amplitude e de frequência da tensão o que pode afetar a estabilidade da rede, o fluxo de potência e prejudicar a precisão das medidas. A realização da medição a partir de uma teoria de potência adequada é muito importante para o desenvolvimento de técnicas capazes de avaliar melhor o desempenho de um sistema elétrico.

Na literatura [30], também se encontra a aplicação da TPC em sistemas de medição capazes de analisar e caracterizar cargas. No caso citado [30], utilizou-se um processador digital de sinais para o desenvolvimento de um medidor protótipo para validações experimentais

2.1. CONCLUSÕES

Tendo em vista as diversas aplicações da TPC, verifica-se que essa teoria de potência tem potencial extremo para identificar e quantificar parcelas de corrente e potência que permitem compreender fisicamente o comportamento dos sistemas elétricos. Dessa forma, a TPC tem importância significativa em aplicações onde são necessárias não somente a compensação de energia reativa ou de componentes harmônicas, mas também para medições de potência e energia. Observa-se que dentre as aplicações apresentadas é necessário o uso de processadores com desempenho elevado. Diante disso, o presente trabalho encontra sua motivação ao analisar o impacto da taxa de amostragem nas medições de potência baseadas na

TPC. Com menores taxas de amostragem e, conseqüentemente, mais tempo para o processamento dos dados, processadores de baixo desempenho passam a ser uma alternativa para essas aplicações. No capítulo seguinte serão exploradas as equações, conceitos matemáticos e definições da TPC.

3. FUNDAMENTAÇÃO MATEMÁTICA DA TEORIA DE POTÊNCIA CONSERVATIVA

A TPC [6], define variáveis a partir de derivadas e de integrais, com destaque àquelas definidas como *unbiased integral* (integral sem interferência do valor médio). Tal teoria é denominada conservativa, pois comprova que à semelhança da potência ativa, a energia reativa se conserva mesmo em condições não senoidais e em sistemas polifásicos em desequilíbrio.

Nas seções seguintes serão apresentados os conceitos matemáticos utilizados na TPC.

3.1. VARIÁVEIS E OPERAÇÕES MATEMÁTICAS UTILIZADAS NA TPC

Para compreender as definições da TPC é necessário destacar alguns conceitos matemáticos definidos sob hipótese periódica. Ou seja, durante os cálculos são considerados o período (T), a frequência fundamental (f) e a frequência angular (ω). A fim de facilitar o desenvolvimento das equações que regem a TPC, a Tabela 1 traz um resumo das operações matemáticas que definem as principais variáveis a serem utilizadas.

Tabela 1 – Variáveis e operações matemáticas

Valor médio	$\bar{x} = \langle x \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$
Derivada temporal instantânea	$\dot{x}(t) = \frac{dx(t)}{dt}$
Integral temporal instantânea	$x_f(t) = \int_0^t x(\tau) d\tau$
Integral imparcial (<i>Unbiased integral</i>)	$\hat{x}(t) = x_f(t) - \bar{x}_f$
Produto interno	$\langle x, y \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t) dt$
Norma eficaz	$X = \ x\ = \sqrt{\langle x, x \rangle}$

Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme (1), se o produto interno das grandezas periódicas $x(t)$ e $y(t)$ for igual a zero, pode-se afirmar que essas grandezas são ortogonais.

$$\langle x, y \rangle = 0 \quad (1)$$

As propriedades da integral imparcial e da derivada no tempo são apresentadas entre as equações (2) e (6).

$$\langle x, \check{x} \rangle = 0 \quad (2)$$

$$\langle x, \hat{x} \rangle = 0 \quad (3)$$

$$\langle x, \check{y} \rangle = -\langle \check{x}, y \rangle \quad (4)$$

$$\langle x, \hat{y} \rangle = -\langle \hat{x}, y \rangle \quad (5)$$

$$\langle x, y \rangle = -\langle \check{x}, \hat{y} \rangle = -\langle \hat{x}, \check{y} \rangle \quad (6)$$

3.2. POTÊNCIA, ENERGIA E PARCELAS DE CORRENTE

Os valores instantâneos de tensão e corrente utilizados nos cálculos de potência e de energia são representados por u e i respectivamente.

A potência instantânea monofásica é definida pelo produto entre tensão e corrente conforme (7).

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (7)$$

A energia reativa instantânea monofásica pode ser expressa por (8), a mesma é definida pelo produto entre integral imparcial de tensão e corrente.

$$w(t) = \hat{u}(t) \cdot i(t) \quad (8)$$

O valor médio de potência ativa monofásica é definido pelo produto interno entre tensão e corrente, conforme (9).

$$P = \bar{p} = \langle u, i \rangle \quad (9)$$

O valor médio de energia reativa monofásica é representado por (10), sendo definido pelo produto interno entre a integral imparcial de tensão e a corrente.

$$W = \bar{w} = \langle \hat{u}, i \rangle \quad (10)$$

Segundo [6], a potência reativa está condicionada à frequência da linha ω e à distorção harmônica total da tensão $DHT(u)$. Portanto, a potência reativa só é conservativa em situações de frequência constante e de tensões senoidais. Sendo assim, muito embora o cálculo de energia reativa possa ser realizado com precisão a partir da TPC, a potência reativa fica comprometida em situações onde são esperados desvios de frequência e distorções de tensão. A potência reativa pode ser expressa conforme (11).

$$Q = \frac{U}{\hat{U}} W = W \frac{U_f \sqrt{1 + (DHT(u))^2}}{\hat{U}_f \sqrt{1 + (DHT(\hat{u}))^2}} = \omega W \frac{\sqrt{1 + (DHT(u))^2}}{\sqrt{1 + (DHT(\hat{u}))^2}} \quad (11)$$

De acordo com [6], as definições de potência ativa e energia reativa podem ser aplicadas para decompor a corrente de um sistema com operação senoidal ou não. A corrente pode ser decomposta em componente ativa, reativa e residual (nula). As decomposições de corrente ficarão restritas a sistemas monofásicos, apesar de haver suporte teórico suficiente na TPC para a decomposição em sistemas polifásicos.

A corrente ativa i_a é a mínima corrente necessária para o fornecimento de potência ativa e pode ser expressa por (12), onde G_e é a condutância equivalente e U é o valor eficaz da tensão.

$$i_a = \frac{\langle u, i \rangle}{\|u\|^2} u = \frac{P}{U^2} u = G_e u \quad (12)$$

A corrente reativa i_r é a mínima corrente necessária para o fornecimento de energia reativa e é definida conforme (13), onde B_e é a susceptância equivalente e \hat{U} é o valor eficaz da integral imparcial da tensão.

$$i_r = \frac{\langle \hat{u}, i \rangle}{\|\hat{u}\|^2} \hat{u} = \frac{W}{\hat{U}^2} \hat{u} = B_e \hat{u} \quad (13)$$

A componente de corrente residual é representada por i_v , sendo v do inglês *void*. Tal parcela é obtida a partir da corrente total subtraindo-se da mesma as parcelas de corrente ativa e reativa conforme (14). A corrente i_v não transfere potência ativa ou energia reativa.

$$i_v = i - i_a - i_r \quad (14)$$

A corrente residual pode ser dividida em três componentes, corrente ativa dispersa i_{as} , corrente reativa dispersa i_{rs} , e corrente harmônica gerada pela carga i_g . As duas primeiras componentes são consequência da coexistência de harmônicas de mesma frequência na tensão e na corrente. A corrente harmônica gerada pode surgir em virtude das componentes harmônicas presentes apenas na corrente, devido a não linearidade da carga [3].

Finalmente, obtém-se (15) a partir dos valores eficazes de corrente levando em conta a ortogonalidade das componentes.

$$I^2 = I_a^2 + I_r^2 + I_v^2 \quad (15)$$

3.3. CONCLUSÕES

Neste capítulo foram apresentadas as operações matemáticas e variáveis utilizadas na TPC, bem como as definições de potência e energia que são conservativas mesmo sob condições não senoidais de operação. Também foi mostrado que a corrente pode ser decomposta em parcelas que contém significado físico específico.

Entretanto, a TPC possui limitações quando aplicada no domínio discreto. O capítulo posterior irá apresentar a modelagem matemática de erros que essa teoria enfrenta ao ser embarcada em sistemas digitais.

4. MODELAGEM DE ERROS

A implementação da TPC no domínio discreto deve ser realizada com alguns cuidados a fim de evitar a propagação de erros por conta da taxa de amostragem. Nas seções a seguir serão resumidas as três principais situações que resultam em desvios nas medidas de energia, sendo que uma dessas foi objeto de melhor análise ao longo dos resultados desta pesquisa.

4.1. INFLUÊNCIA DO DESLOCAMENTO DA CORRENTE EM RELAÇÃO A TENSÃO

A energia reativa pode ser calculada a partir do produto entre a integral imparcial de tensão e a corrente. Considerando um sistema monofásico, livre de frequências harmônicas, a tensão (v) e a corrente (i), ambas em função do tempo (t), podem ser expressas por (16) e (17), respectivamente. Para essa situação hipotética, V_m corresponde ao valor de pico da tensão, I_m ao valor de pico da corrente e ω à velocidade angular.

$$v(t) = V_m \cdot \sin \omega t \quad (16)$$

$$i(t) = I_m \cdot \sin(\omega t + \delta) \quad (17)$$

Para facilitar os cálculos, atribuiu-se ângulo zero para a tensão e δ para a corrente. Quando δ corresponde a uma pequena defasagem, ou seja, um valor próximo a zero, predomina-se energia ativa e conseqüentemente o fator de potência $\cos(\delta)$ resulta num valor elevado, que se aproxima da unidade. Por outro lado, com δ próximo a $\pm \pi/2$, predomina-se energia reativa, cujo fator de potência se aproxima de zero.

O cálculo da energia reativa a partir da TPC dependerá da integral imparcial de tensão que para esse caso hipotético resultará em (18).

$$\hat{v}(t) = -\frac{V_m}{\omega} \cdot \cos \omega t \quad (18)$$

Conforme definido na seção 3, mais especificamente na equação descrita em (8), o produto das expressões (17) e (18) resultará na equação de energia reativa instantânea, conforme se observa em (19).

$$w(t) = -\frac{V_m I_m}{\omega} \sin(\omega t + \delta) \cos \omega t \quad (19)$$

Manipulando-se matematicamente a equação (19), a mesma pode ser reescrita a partir da soma de duas componentes como pode ser observado em (20).

$$w(t) = -\frac{V_m I_m}{\omega} \left(\frac{\sin 2\omega t}{2} \cdot \cos \delta + \cos^2 \omega t \cdot \sin \delta \right) \quad (20)$$

Desenvolvendo-se um pouco mais (20), obtém-se (21) onde claramente se observa que a energia reativa instantânea é composta de uma parcela constante e uma parcela oscilante.

$$w(t) = -\frac{V_m I_m}{2\omega} (\sin(2\omega t + \delta) + \sin \delta) \quad (21)$$

Sendo assim, a partir de (21), pode-se definir o valor médio da energia reativa conforme (22).

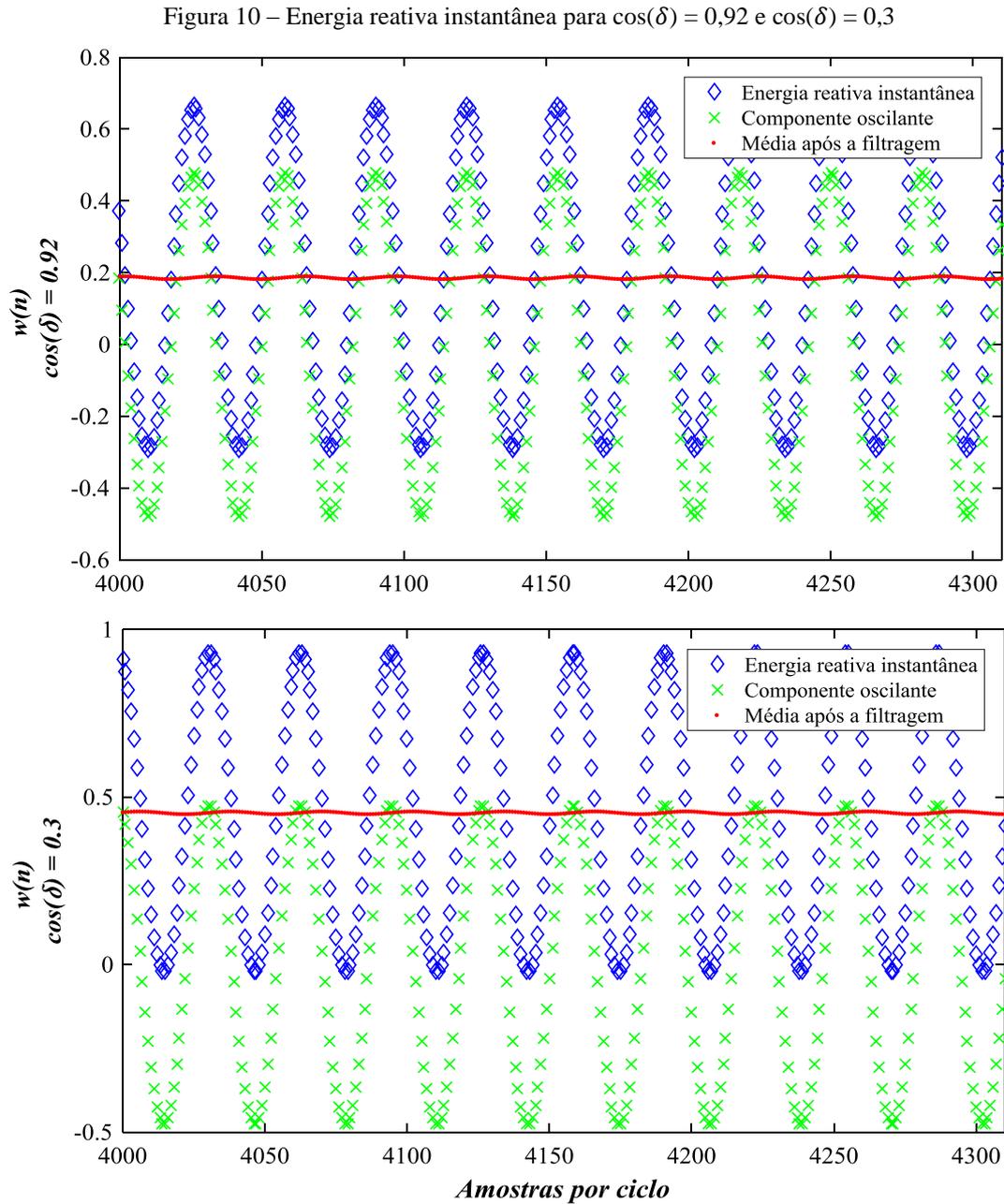
$$W = -\frac{V_m I_m}{2\omega} (\sin \delta) \quad (22)$$

Como se observa em (23), (21) pode ser reescrita no domínio discreto tendo-se N como o número de amostras por ciclo e n como cada instante do domínio discreto.

$$w(n) = -\frac{V_m I_m}{2\omega} \left(\sin \left(\frac{4\pi n}{N} + \delta \right) + \sin \delta \right) \quad (23)$$

Através de (23) é possível observar que, independentemente do valor de δ , a parcela oscilante está sempre presente. Por essa razão, em situações de fator de potência elevado, a parcela oscilante torna-se mais expressiva quando comparada à parcela constante. Essas oscilações são atenuadas por filtros passa baixa com o objetivo de se extrair a média. Porém, devido aos casos de fator de potência elevado, quando a parcela média se aproxima de zero, a filtragem necessita ser muito bem sintonizada a fim de evitar imprecisão nas medidas resultantes. Na Figura 10 é possível observar o resultado da medição instantânea de energia reativa tanto para uma situação com elevado fator de potência quanto para a situação com baixo

fator de potência. Para ambas medições foi utilizado o mesmo filtro passa-baixa, de ordem 1 e sintonizado em 1 Hz.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.2. INFLUÊNCIA DO ATRASO DA INTEGRAL IMPARCIAL DE TENSÃO

Em procedimentos de conversão analógico digital, é natural que existam atrasos durante as amostragens. A situação pode ser agravada quando procedimentos matemáticos são impostos às variáveis, uma vez que os cálculos demandam tempo e, em na maioria dos controladores digitais, as rotinas são executadas de forma serial.

Como já discutido, para o cálculo da energia reativa são necessárias duas variáveis: a integral imparcial de tensão $\hat{v}(t)$ e a corrente $i(t)$. Ambos valores são instantâneos, contudo, $\hat{v}(t)$, é resultado de um cálculo integrativo. Qualquer atraso, seja da amostragem não simultânea das grandezas ou dos cálculos preliminares na tensão, pode resultar em erros nos resultados.

A equação (24) apresenta a integral imparcial de tensão cujo resultado apresentou uma defasagem θ podendo ser consequência de qualquer um dos problemas mencionados no parágrafo anterior.

$$\hat{v}(t) = -\frac{V_m}{\omega} \cdot \cos(\omega t + \theta) \quad (24)$$

Se valendo de algumas propriedades trigonométricas, (24) e (17) resultam, respectivamente, em (25) e (26).

$$\hat{v}(t) = -\frac{V_m}{\omega} \cdot (\cos \omega t \cdot \cos \theta - \sin \omega t \cdot \sin \theta) \quad (25)$$

$$i(t) = I_m \cdot \sin \omega t \cdot \cos \delta + I_m \cdot \cos \omega t \cdot \sin \delta \quad (26)$$

A energia reativa instantânea pode ser calculada pelo produto entre (25) e (26), conforme se observa em (27).

$$w(t) = -\frac{V_m I_m}{\omega} \left(\frac{\sin(2\omega t)}{2} \cdot \cos(\theta + \delta) + \cos^2 \omega t \cdot \cos \theta \cdot \sin \delta - \sin^2 \omega t \cdot \sin \theta \cdot \cos \delta \right) \quad (27)$$

Manipulando-se matematicamente (27), obtém-se (28), onde, como esperado, pode ser representada por uma parcela oscilante e uma parcela constante.

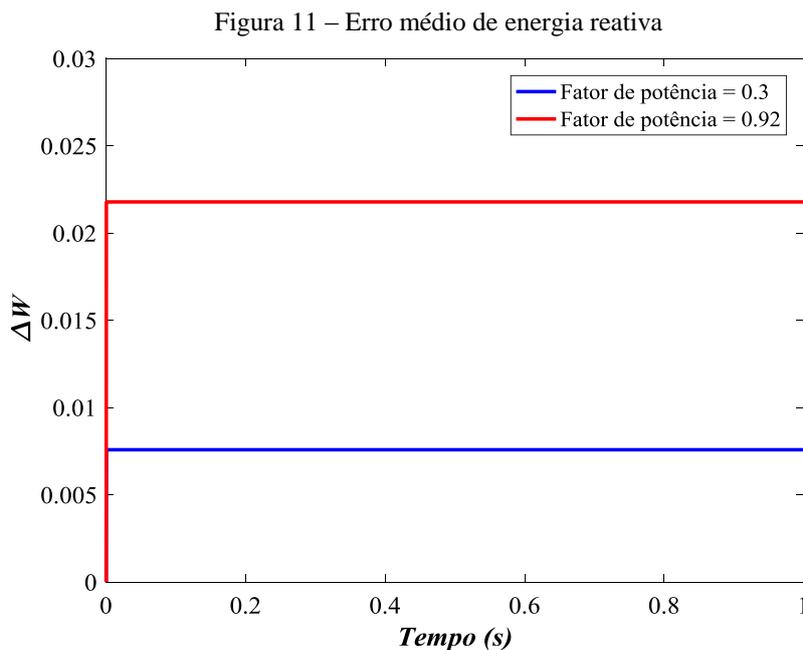
$$w(t) = -\frac{V_m I_m}{2\omega} (\sin(2\omega t + \delta + \theta) + \sin(\delta - \theta)) \quad (28)$$

A partir de (28) é possível concluir que para casos onde o fator de potência é elevado, ou seja, situações em que δ é pequeno, o atraso da integral imparcial de tensão pode se tornar relevante no cálculo da parcela média de energia reativa. A componente oscilante, muito embora tenha sua fase alterada por θ , sua amplitude e sua frequência não são alteradas em relação a (21), portanto, não comprometerão os resultados da energia reativa instantânea.

Sendo assim, em termos dos valores médios presentes em (21) e (28), pode-se dizer que a diferença entre esses valores resultará no erro médio de energia ΔW conforme (29).

$$\Delta W = -\frac{V_m I_m}{2\omega} (\sin \delta - \sin(\delta - \theta)) \quad (29)$$

Considerando que θ tende a ser um valor pequeno, a partir de (29) pode-se concluir que quanto maior for o ângulo δ , menor será o valor de ΔW . Isso significa que nos casos de fator de potência elevado o efeito do atraso na integral imparcial de tensão será mais significativo. Na Figura 11 é possível observar o valor de ΔW para as condições de baixo (0,30) e elevado (0,92) fatores de potência, considerando θ igual a $2,81^\circ$.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.3. INFLUÊNCIA DA TAXA DE AMOSTRAGEM

Um outro ponto que pode comprometer significativamente os cálculos de energia reativa na TPC está relacionado à taxa de amostragem. Uma vez que a teoria depende da integral imparcial de tensão, ao se integrar um sinal discreto, o erro agregado será inversamente proporcional à frequência de amostragem. Em virtude da complexa modelagem matemática, os capítulos subsequentes serão dedicados para avaliar o efeito da taxa de amostragem nas medições da TPC. Considerando que o erro proveniente da taxa de amostragem estará sempre presente nos cálculos, torna-se essencial confirmar até que ponto o mesmo poderá influenciar nas medições e, inclusive, inviabilizar a implementação da TPC em medidores digitais, como será apresentado nos capítulos 5 e 6.

4.4. CONCLUSÕES

Nesse capítulo foram demonstrados matematicamente os principais erros que podem ser agregados ao cálculo de energia reativa. O deslocamento de corrente em relação a tensão pode acarretar imprecisão nas medidas de energia reativa média em situações de fator de potência elevado. Para essa mesma condição, o atraso da integral imparcial de tensão pode promover um elevado valor de erro médio de energia reativa. Por fim, a taxa de amostragem também pode prejudicar os cálculos de energia reativa. O objetivo deste trabalho é analisar principalmente as consequências do erro acumulado à integral discreta em função da taxa de amostragem. Toda análise é efetuada tendo em vista a possibilidade de aplicação de tal teoria em dispositivos digitais de baixo custo.

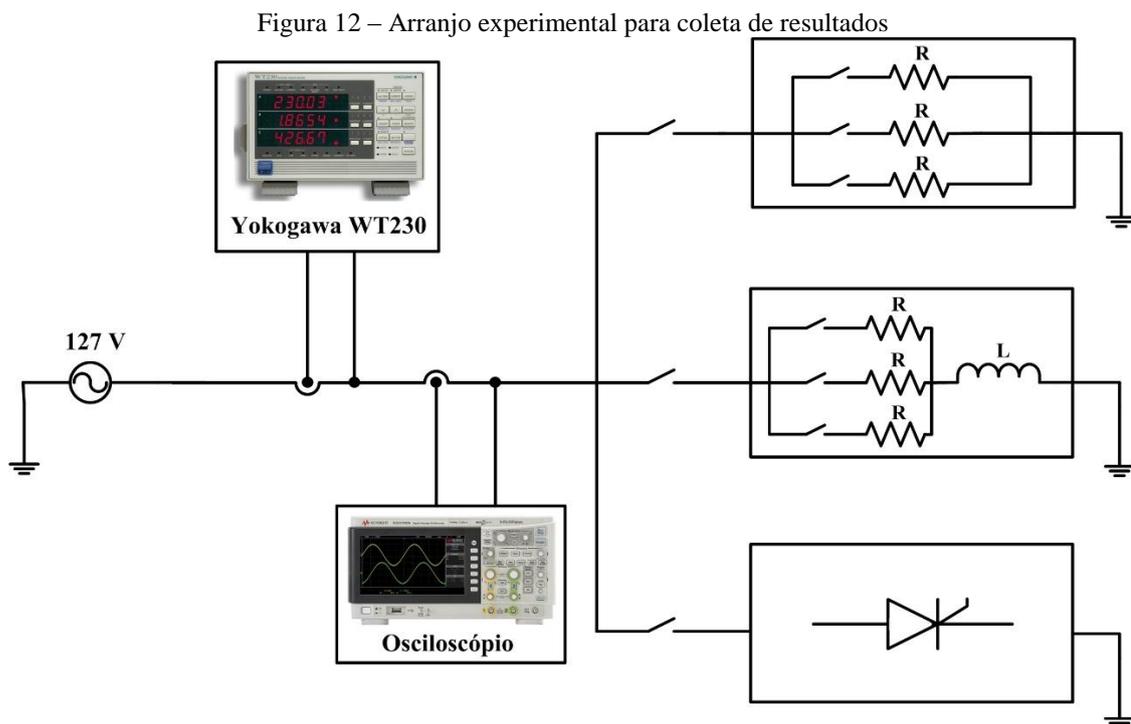
O capítulo subsequente irá examinar a influência da taxa de amostragem com o objetivo de analisar a viabilidade ou não da implementação da teoria em um controlador digital de baixo custo.

5. AVALIAÇÃO DA TPC EM FUNÇÃO DA TAXA DE AMOSTRAGEM

A fim de avaliar os efeitos na taxa de amostragem, optou-se pela construção de um conjunto experimental contendo cargas lineares e não lineares. Sendo assim, os dados de corrente poderiam ser coletados em diferentes taxas de amostragem para realização de cálculos e análises computacionais. Na sequência, o arranjo experimental, os equipamentos e as ferramentas computacionais utilizadas serão apresentados, bem como os cálculos e comparações dos resultados alcançados.

5.1. ARRANJO PARA LEVANTAMENTO DE DADOS

O arranjo do sistema montado em bancada para o levantamento de dados pode ser representado pela Figura 12.



Fonte: Elaborado pela autora.

A tensão eficaz de alimentação do sistema é de 127 V. Foram empregadas cargas lineares e não lineares a fim de verificar os resultados em diferentes cenários. O primeiro cenário é composto somente por cargas resistivas cujo valor aproximado de cada resistência é 138 Ω . No segundo cenário é utilizada uma indutância com valor aproximado de 20 mH que é colocada em série com um arranjo de cargas resistivas similares às descritas anteriormente. É

importante ressaltar que esses valores podem sofrer variações principalmente em virtude das variações de temperatura. No último cenário, utiliza-se uma carga não linear, sendo essa um retificador semicontrolado.

Com o propósito de analisar a influência da taxa de amostragem nos cálculos de potência, foram adquiridas amostras de tensão e corrente a partir do osciloscópio da marca Agilent Technologies®, modelo DSO7034A. Para a aquisição em formato CSV, a amostragem é limitada em 1000 pontos. Foram amostrados seis ciclos de tensão e de corrente, logo, foram adquiridas aproximadamente 167 amostras por ciclo, o que corresponde a 10 kHz. Efetuou-se o aumento do número de amostras por ciclo utilizando o MATLAB/Simulink® para a frequência de 1 MHz, e posteriormente os dados em alta frequência foram reamostrados em diferentes frequências para analisar os cálculos de potência realizados de acordo com as definições da TPC.

Como referência para os cálculos de potência pela TPC, os resultados foram comparados aos de um medidor digital de potência, marca Yokogawa®, modelo WT230 [31]. Tal medidor, que ao longo do texto é denominado medidor referência, verifica os sinais de corrente e de tensão do circuito conforme se observa na Figura 12.

5.2. CÁLCULOS E COMPARAÇÕES OBTIDAS

Nas seções seguintes, serão apresentados os resultados dos cálculos de potência e as comparações para três cenários diferentes.

5.2.1. Cenário 1 – Carga resistiva

O primeiro ensaio foi realizado com cargas resistivas dispostas em paralelo com a intenção de variar a potência. Foram obtidos resultados para diferentes frequências de amostragem.

A fim de se obter um padrão de medida de referência de potência, foram levantados os sinais de tensão e de corrente da carga para cada situação. De forma idêntica ao que foi detalhado na seção 5.1, adquiriu-se 167 amostras por ciclo. Utilizando o software MATLAB/Simulink® efetuou-se o aumento do número de amostras por ciclo, e posteriormente os dados foram utilizados nos cálculos de potência. Para tal, foi aplicado ao MATLAB/Simulink® um método de cálculo de potência semelhante ao método utilizado pelo

medidor Yokogawa[®] [31]. Vale mencionar que, para este cenário, a análise de Fourier demonstrou que as harmônicas de tensão, e consequentemente as de corrente, são desprezíveis. Sendo assim, foram calculados os valores de potência esperados para a configuração, conforme se observa na Tabela 2. Na primeira linha da tabela, *R* indica a aplicação de uma carga resistiva, e nas próximas linhas, *R/2* e *R/3* indicam, respectivamente, o uso de duas e três cargas resistivas em paralelo.

Tabela 2 – Valores esperados de potência para cargas resistivas a partir dos sinais de tensão e corrente

	P (W)	Q (VAr)
R	103,5	0,1
R/2	204,1	0,3
R/3	302,1	0,4

Fonte: Elaborado pela autora.

A Tabela 3 mostra os valores de potência ativa e de potência reativa medidos pelo medidor referência. Similar ao valor teórico apresentado na Tabela 2, na primeira linha, *R* indica a aplicação de uma carga resistiva, e nas próximas linhas, *R/2* e *R/3* apontam o uso respectivo de duas e três cargas resistivas em paralelo. Comparando-se as Tabelas 2 e 3, observa-se que, para a potência reativa, o erro máximo do medidor Yokogawa[®] em relação ao valor teórico calculado no MATLAB/Simulink[®] foi de 0,2 VAr, para a potência ativa, o erro máximo foi de -6,9 W. Na Tabela 3 também é mostrado o erro médio de potência do medidor referência em relação ao valor esperado, tal como o desvio padrão amostral do erro entre a potência do medidor referência e o valor esperado. Os valores de erro médio e desvio padrão serão utilizados para análise estatística posterior.

Tabela 3 – Potências obtidas pelo medidor Yokogawa[®] para cargas do cenário 1

	P (W)	Q (VAr)
R	101,7	0,3
R/2	199,5	0,4
R/3	295,2	0,6
Erro médio	-4,4	0,2
Desvio padrão	2,6	0,1

Fonte: Elaborado pela autora.

As Tabelas 4 e 5 mostram os resultados das potências ativa e reativa a partir dos cálculos da TPC realizados em rotina do MATLAB[®] variando-se a frequência de amostragem. As duas primeiras linhas das tabelas indicam, respectivamente, o número de amostras por ciclo

e a frequência de amostragem. Logo abaixo, nas colunas de cada respectiva indicação da frequência, estão os resultados de potência ativa (P) e de potência reativa (Q). Há três linhas de resultados nas tabelas, sendo que, *R* indica o uso de uma carga resistiva e nas linhas subsequentes, *R/2* e *R/3* indicam a aplicação de duas e três cargas resistivas em paralelo, respectivamente. As duas últimas linhas das tabelas apresentam o erro médio de potência da TPC em relação ao valor esperado calculado no MATLAB/Simulink®, bem como o desvio padrão amostral do erro entre a potência da TPC e o valor esperado.

Tabela 4 – Potências calculadas pela TPC para cargas resistivas para 16, 32, 64 e 128 amostras por ciclo

Amostras	16		32		64		128	
Frequência (kHz)	0,96		1,92		3,84		7,68	
	P (W)	Q (VAr)						
R	103,3	20,3	103,3	10,3	103,3	5,2	103,3	2,7
R/2	201,3	40,0	203,6	20,2	203,6	10,2	203,6	5,2
R/3	301,4	59,2	301,4	29,9	301,4	15,2	301,4	7,8
Erro médio	-1,2	39,6	-0,5	19,9	-0,5	9,9	-0,5	5,0
Desvio padrão	1,4	19,3	0,3	9,7	0,3	4,9	0,3	2,4

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 5 – Potências calculadas pela TPC para cargas resistivas para 256, 512, 1024, e 2048 amostras por ciclo

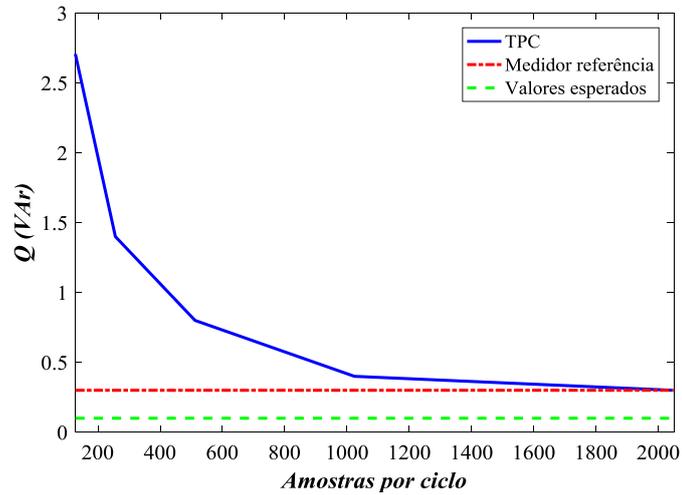
Amostras	256		512		1024		2048	
Frequência (kHz)	15,36		30,72		61,44		122,88	
	P (W)	Q (VAr)	P (W)	Q (VAr)	P (W)	Q (VAr)	P (W)	Q (VAr)
R	103,3	1,4	103,3	0,8	103,3	0,4	103,3	0,3
R/2	203,6	2,7	203,6	1,5	203,6	0,9	203,6	0,6
R/3	301,4	4,1	301,4	2,2	301,4	1,3	301,4	0,8
Erro médio	-0,5	2,5	-0,5	1,2	-0,5	0,6	-0,5	0,3
Desvio padrão	0,3	1,2	0,3	0,6	0,3	0,3	0,3	0,1

Fonte: Elaborado pela autora.

Como era de se esperar, nota-se que a taxa de amostragem tem pouca influência no valor de potência ativa. Contudo, para o cálculo de Q, a taxa de amostragem possui grande interferência por conta da integral imparcial. Fica evidente que os resultados de Q se aproximam do valor esperado à medida que se aumenta a taxa de amostragem.

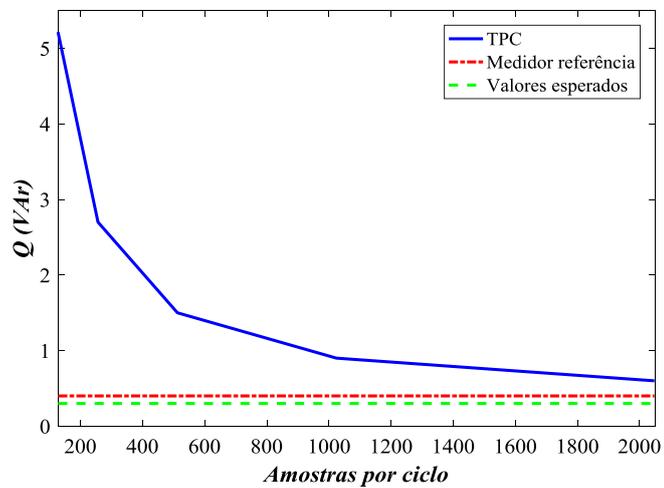
A fim de se observar melhor a convergência da potência reativa em função da taxa de amostragem, as Figuras 13, 14 e 15 apresentam os gráficos onde podem ser comparados os valores calculados pela TPC com as referências medida e esperada.

Figura 13 – Potência reativa para uma carga resistiva



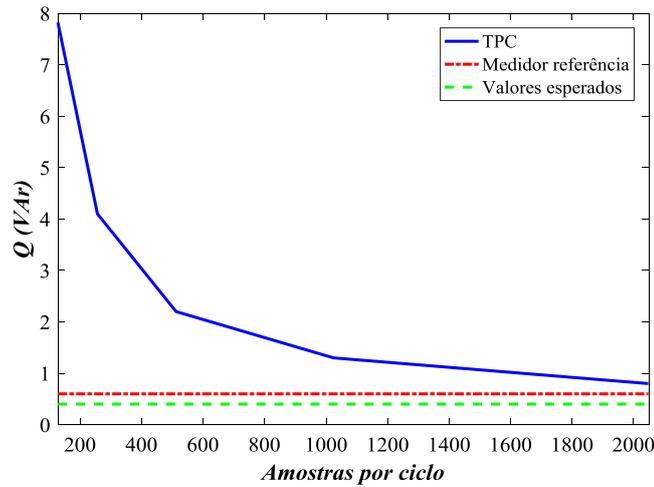
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 14 – Potência reativa para duas cargas resistivas em paralelo



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 15 – Potência reativa para três cargas resistivas em paralelo



Fonte: Elaborado pela autora.

5.2.1.1. Análise estatística

Com o propósito de comparar o erro médio da TPC com o erro médio do medidor referência, foi proposta a realização de testes de hipóteses para cada frequência de amostragem. Para tanto, executou-se o teste das hipóteses nula (H_0) e alternativa (H_1) apresentadas em (30). Onde μ_1 representa o erro médio da TPC, e μ_2 corresponde ao erro médio do medidor referência.

$$\begin{cases} H_0 : \mu_1 = \mu_2 \\ H_1 : \mu_1 > \mu_2 \end{cases} \quad (30)$$

Os valores de erro médio e desvio padrão amostrais da TPC utilizados nos testes são mostrados nas Tabelas 4 e 5 localizadas na seção 5.2.1, os valores referentes ao medidor referência são apresentados na Tabela 3. Supõe-se que as populações desconhecidas são normalmente distribuídas com variâncias σ_1^2 e σ_2^2 desconhecidas. Por essa razão, a estatística t é utilizada para testar as hipóteses [32]. Preliminarmente é necessário inferir a diferença ou igualdade das variâncias populacionais, isto posto, efetivou-se o teste de hipóteses conforme (31) para todas as situações de frequência, adotando nível de significância (α) igual a 5%.

$$\begin{cases} H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 \\ H_1 : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2 \end{cases} \quad (31)$$

Em grande parte dos testes rejeitou-se a hipótese nula, portanto supõe-se que as variâncias populacionais não são iguais. Sendo assim, aplicou-se a estatística t para essa

circunstância. Admitindo α igual a 5%, obtém-se a região crítica e a região de aceitação para as hipóteses definidas conforme (30). Rejeita-se H_0 se $t_0^* > t_{\alpha, \nu}$, sendo ν o grau de liberdade. A Tabela 6 apresenta para todos os casos, os graus de liberdade, os critérios de rejeição de H_0 , os valores de t_0^* e as conclusões dos testes.

Tabela 6 – Testes de hipóteses para carga resistiva

Amostras	Frequência (kHz)	Potência	ν	Critério de rejeição	t_0^*	Conclusão
16	0,96	P	3	$t_0^* > 2,4$	1,9	Não rejeita H_0
		Q	2	$t_0^* > 2,9$	3,5	Rejeita H_0
32	1,92	P	2	$t_0^* > 2,9$	2,6	Não rejeita H_0
		Q	2	$t_0^* > 2,9$	3,5	Rejeita H_0
64	3,84	P	2	$t_0^* > 2,9$	2,6	Não rejeita H_0
		Q	2	$t_0^* > 2,9$	3,4	Rejeita H_0
128	7,68	P	2	$t_0^* > 2,9$	2,6	Não rejeita H_0
		Q	2	$t_0^* > 2,9$	3,5	Rejeita H_0
256	15,36	P	2	$t_0^* > 2,9$	2,6	Não rejeita H_0
		Q	2	$t_0^* > 2,9$	3,3	Rejeita H_0
512	30,72	P	2	$t_0^* > 2,9$	2,6	Não rejeita H_0
		Q	2	$t_0^* > 2,9$	2,9	Não rejeita H_0
1024	61,44	P	2	$t_0^* > 2,9$	2,6	Não rejeita H_0
		Q	2	$t_0^* > 2,9$	2,2	Não rejeita H_0
2048	122,88	P	2	$t_0^* > 2,9$	2,6	Não rejeita H_0
		Q	4	$t_0^* > 2,1$	1,2	Não rejeita H_0

Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados dos testes permitem concluir que ao nível de significância de 5%, o erro médio de potência ativa da TPC não pode ser considerado maior do que o erro médio de potência ativa do medidor referência em todos os casos. Constatou-se que para a potência reativa, considerando probabilidade de erro de 5%, o erro médio do cálculo da TPC é maior do que a referência para frequências abaixo de 256 amostras por ciclo.

5.2.2. Cenário 2 – Carga resistiva-indutiva

Efetuuou-se um ensaio similar ao apresentado na seção 5.2.1, tendo-se como diferença a inserção de uma indutância de 20 mH em série com as cargas resistivas. A fim de se levantar os valores de referência para as potências ativa e reativa, foram realizados procedimentos idênticos àqueles explicados para o primeiro cenário. Os valores teóricos de potência são mostrados na Tabela 7 e os valores medidos pelo medidor referência, assim como o erro médio e desvio padrão amostral do erro entre medidor referência e valor esperado estão apresentados na Tabela 8. Comparando-se os valores de referência observa-se que o erro máximo associado ao medidor foi de -0,9 VAr.

Tabela 7 – Valores esperados de potência para carga RL

	P (W)	Q (VAr)
R	102,1	5,0
R/2	198,4	20,1
R/3	287,2	43,9

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 8 – Potências do medidor Yokogawa® para carga RL

	P (W)	Q (VAr)
R	100,5	5,0
R/2	194,3	19,7
R/3	281,0	43,0
Erro médio	-4,0	-0,4
Desvio padrão	2,3	0,5

Fonte: Elaborado pela autora.

As Tabelas 9 e 10 mostram os resultados das potências ativa e reativa do MATLAB® variando-se a frequência de amostragem. Também são apresentados os resultados do erro médio da TPC em relação ao valor esperado e o desvio padrão amostral do erro.

Tabela 9 – Potências calculadas pela TPC para carga RL para 16, 32, 64 e 128 amostras por ciclo

Amostras	16		32		64		128	
Frequência (kHz)	0,96		1,92		3,84		7,68	
	P (W)	Q (VAr)						
R	101,8	24,8	101,8	15,0	101,8	10,0	101,8	7,5
R/2	197,9	58,3	197,9	39,3	197,9	29,7	197,9	24,9
R/3	286,5	98,9	286,5	71,7	286,5	57,8	286,5	50,8
Erro médio	-0,5	37,7	-0,5	19,0	-0,5	9,5	-0,5	4,7
Desvio padrão	0,2	17,6	0,2	8,9	0,2	4,5	0,2	2,2

Fonte: Elaborado pela autora.

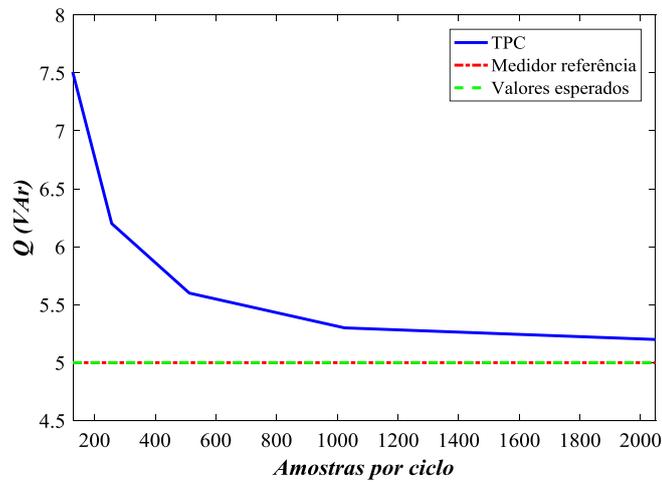
Tabela 10 – Potências calculadas pela TPC para carga RL para 256, 512, 1024, e 2048 amostras por ciclo

Amostras	256		512		1024		2048	
Frequência (kHz)	15,36		30,72		61,44		122,88	
	P (W)	Q (VAr)	P (W)	Q (VAr)	P (W)	Q (VAr)	P (W)	Q (VAr)
R	101,8	6,2	101,8	5,6	101,8	5,3	101,8	5,2
R/2	197,9	22,4	197,9	21,2	197,9	20,6	197,9	20,3
R/3	286,5	47,3	286,5	45,6	286,5	44,7	286,5	44,2
Erro médio	-0,5	2,3	-0,5	1,1	-0,5	0,5	-0,5	0,2
Desvio padrão	0,2	1,1	0,2	0,6	0,2	0,3	0,2	0,1

Fonte: Elaborado pela autora.

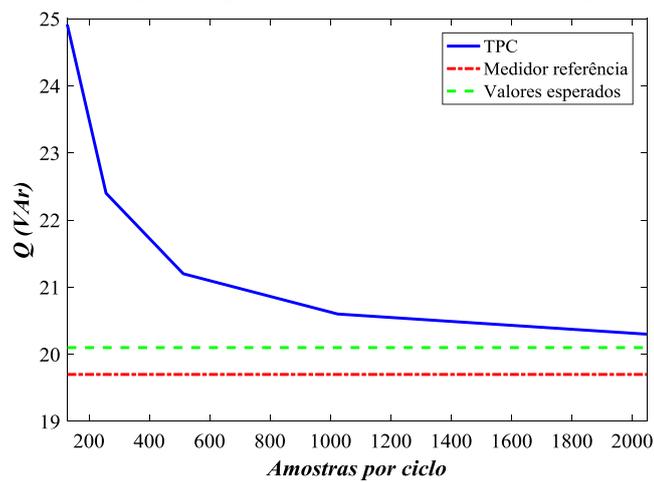
Similar ao ocorrido com os ensaios realizados para o cenário 1, percebe-se que os valores de potência ativa não são influenciados pela taxa de amostragem. É ainda confirmado que os valores calculados de potência reativa se aproximam dos resultados do medidor referência e dos valores esperados com o aumento da taxa de amostragem. As Figuras 16, 17 e 18 apresentam os gráficos que confirmam a convergência da potência calculada com o aumento da taxa de amostragem.

Figura 16 – Potência reativa para carga indutiva em série com uma carga resistiva



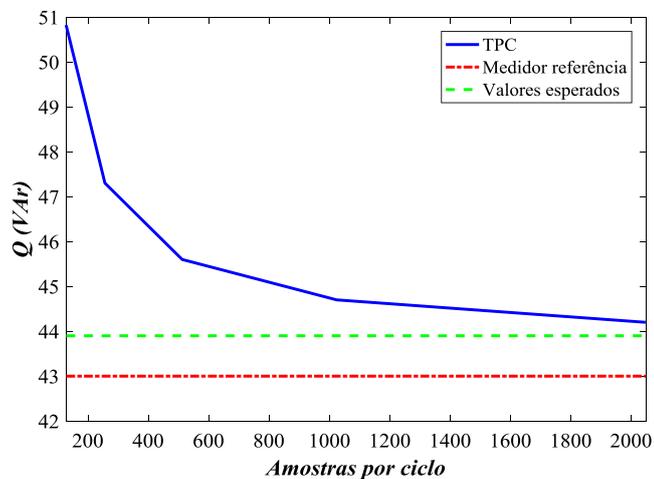
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 17 – Potência reativa para carga indutiva em série com duas cargas resistivas em paralelo



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 18 – Potência reativa para carga indutiva em série com três cargas resistivas em paralelo



Fonte: Elaborado pela autora.

5.2.2.1. Análise estatística

Para a carga resistiva-indutiva efetuou-se um procedimento idêntico ao descrito na seção 5.2.1.1 para testar as hipóteses apresentadas em (30). As últimas linhas das Tabelas 9 e 10 mostram os valores de erro médio e desvio padrão amostral do erro da TPC em relação ao valor teórico para a carga resistiva-indutiva. Na Tabela 8 encontram-se os valores de erro médio e desvio padrão amostral do erro de potência do medidor referência em relação ao valor teórico. Igualmente ao cenário 1, admitiu-se população desconhecida com distribuição normal, variâncias desconhecidas e não iguais. A Tabela 11 apresenta os graus de liberdade, os respectivos critérios de rejeição de H_0 , os valores de t_0^* , e as conclusões dos testes para todas as situações de frequência de amostragem.

Tabela 11 – Testes de hipóteses para carga resistiva-indutiva

Amostras	Frequência (kHz)	Potência	ν	Critério de rejeição	t_0^*	Conclusão
16	0,96	P	2	$t_0^* > 2,9$	2,6	Não rejeita H_0
		Q	2	$t_0^* > 2,9$	3,8	Rejeita H_0
32	1,92	P	2	$t_0^* > 2,9$	2,6	Não rejeita H_0
		Q	2	$t_0^* > 2,9$	3,8	Rejeita H_0
64	3,84	P	2	$t_0^* > 2,9$	2,6	Não rejeita H_0
		Q	2	$t_0^* > 2,9$	3,8	Rejeita H_0
128	7,68	P	2	$t_0^* > 2,9$	2,6	Não rejeita H_0
		Q	2	$t_0^* > 2,9$	3,9	Rejeita H_0
256	15,36	P	2	$t_0^* > 2,9$	2,6	Não rejeita H_0
		Q	2	$t_0^* > 2,9$	3,9	Rejeita H_0
512	30,72	P	2	$t_0^* > 2,9$	2,6	Não rejeita H_0
		Q	3	$t_0^* > 2,4$	3,3	Rejeita H_0
1024	61,44	P	2	$t_0^* > 2,9$	2,6	Não rejeita H_0
		Q	3	$t_0^* > 2,4$	2,7	Rejeita H_0
2048	122,88	P	2	$t_0^* > 2,9$	2,6	Não rejeita H_0
		Q	2	$t_0^* > 2,9$	2,0	Não rejeita H_0

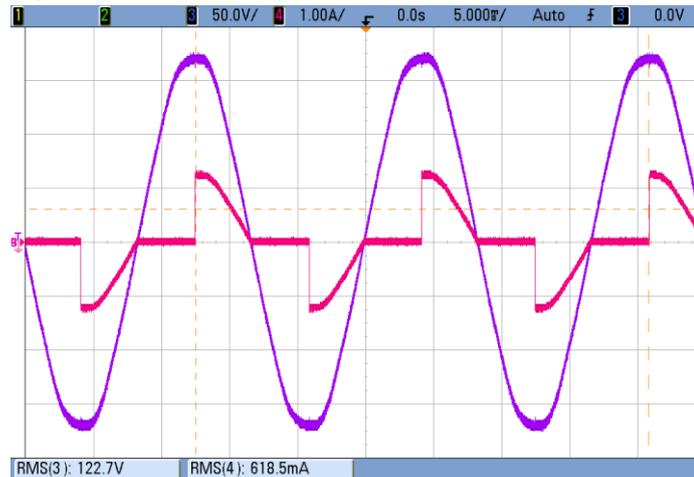
Fonte: Elaborado pela autora.

Com relação a potência ativa, verifica-se que a hipótese nula não pode ser rejeitada em nenhuma situação de frequência a um nível de significância de 5%. Os testes indicam que o erro médio de potência reativa da TPC é maior do que a referência para frequências de amostragem menores do que 122,88 kHz.

5.2.3. Cenário 3 – Carga não linear

Para este cenário utilizou-se como carga um retificador semicontrolado alimentando uma carga resistiva na saída. O experimento foi realizado variando-se os ângulos de disparo e verificando as potências ativa e reativa para cada situação. A título de exemplificar as formas de onda que alimentam a carga não linear, a Figura 19 contém a tensão e a corrente para o ângulo de disparo de 90° . A Tabela 12 mostra os resultados do espectro harmônico da corrente correspondente à Figura 19.

Figura 19 – Formas de onda da tensão e da corrente na entrada do retificador



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 12 – Análise espectral de corrente do retificador

Tempo de amostragem	1 μ s	
Amostras por ciclo	16667	
Componente CC	0,02791	
Fundamental	0,7346 pico (0,5195 rms)	
DHT	64,51%	
0 Hz (DC)	3,80%	90,0°
60 Hz (Fnd)	100,00%	-29,8°
120 Hz (h2)	1,24%	269,3°
180 Hz (h3)	54,51%	98,0°
240 Hz (h4)	1,18%	98,3°
300 Hz (h5)	18,55%	-79,8°
360 Hz (h6)	1,14%	-79,2°
420 Hz (h7)	18,03%	105,1°
480 Hz (h8)	1,21%	108,5°
540 Hz (h9)	10,57%	-71,7°
600 Hz (h10)	1,27%	-69,9°

Fonte: Elaborado pela autora.

Através da Tabela 12, constata-se um atraso de 29,8° na componente fundamental da corrente, o que é interessante de se observar, pois apesar de a carga não ser reativa, o ângulo de disparo implica no atraso da fundamental de corrente em relação à tensão de alimentação. Sendo assim, de forma similar ao que fora feito para os cenários anteriores, a partir dos sinais de tensão e corrente foram calculados os valores das potências ativa e reativa aplicando-se no MATLAB/Simulink® o método de cálculo de potência utilizado pelo medidor Yokogawa® [31]. A Tabela 13 mostra os valores esperados para a carga não linear com diferentes ângulos de disparo dos tiristores.

Tabela 13 – Valores esperados de potência para carga não linear

Ângulo de disparo	P (W)	Q (VAr)
0°	106,5	0,1
30°	103,7	8,3
60°	84,5	25,8
90°	53,0	33,5

Fonte: Elaborado pela autora.

Visto que as distorções na forma de onda de tensão são desprezíveis, pode-se concluir que a energia reativa deste cenário dependerá exclusivamente das componentes fundamentais

de tensão e de corrente. Desta forma, a fim de se obter uma segunda medida de referência, optou-se por calcular a potência utilizando um método de cálculo pertinente à maioria dos medidores de baixo custo, os quais não lidam com distorções harmônicas nas formas de onda de tensão e de corrente. Sendo assim, o cálculo de potência foi realizado com auxílio do bloco de medição de potência do MATLAB/Simulink[®], considerando apenas parcelas fundamentais. Os valores calculados, tal como o erro médio e desvio padrão amostral do erro entre valores calculados e valores esperados são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Valores de potência calculados com componentes fundamentais para carga não linear

Ângulo de disparo	P (W)	Q (VAr)
0°	106,4	0,1
30°	103,6	8,3
60°	84,6	25,9
90°	52,7	33,7
Erro médio	-0,1	0,1
Desvio padrão	0,2	0,1

Fonte: Elaborado pela autora.

A Tabela 15 e a Tabela 16 mostram os resultados de potência ativa e potência reativa do MATLAB[®] para cada situação de ângulo variando-se a frequência de amostragem. As primeiras linhas das tabelas indicam o número de amostras por ciclo e a frequência de amostragem, logo abaixo de cada indicação da frequência estão os resultados de P e de Q. As linhas da primeira coluna indicam o ângulo de disparo dos tiristores do retificador. Nas últimas linhas são apresentados os valores de erro médio e desvio padrão amostral do erro da TPC em relação ao valor esperado.

Tabela 15 – Potências calculadas para carga não linear para 16, 32, 64 e 128 amostras por ciclo

Amostras	16		32		64		128	
Frequência (kHz)	0,96		1,92		3,84		7,68	
Ângulo de disparo	P (W)	Q (VAr)						
0°	106,2	20,8	106,3	10,5	106,3	5,3	106,3	2,7
30°	103,4	28,4	103,4	18,4	103,4	13,4	103,4	10,8
60°	84,1	41,8	84,3	34,0	84,3	29,9	84,3	27,9
90°	53,0	43,3	52,8	38,6	52,8	36,1	52,8	34,9
Erro médio	-0,3	16,7	-0,2	8,5	-0,2	4,3	-0,2	2,2
Desvio padrão	0,2	5,0	0,0	2,4	0,0	1,2	0,0	0,5

Fonte: Elaborado pela autora.

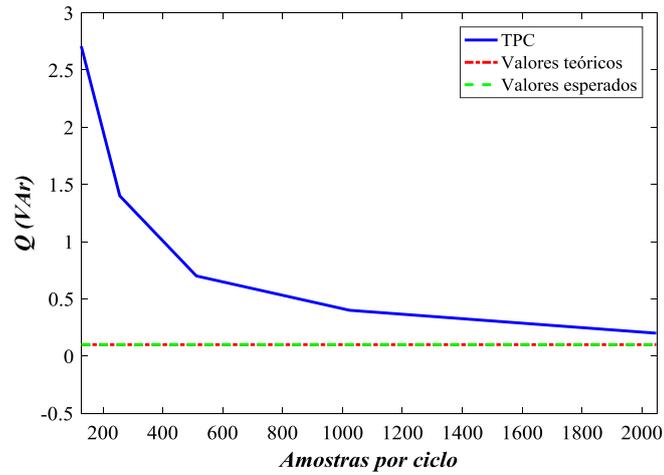
Tabela 16 – Potências calculadas para carga não linear para 256, 512, 1024, e 2048 amostras por ciclo

Amostras	256		512		1024		2048	
Frequência (kHz)	15,36		30,72		61,44		122,88	
Ângulo de disparo	P (W)	Q (VAr)	P (W)	Q (VAr)	P (W)	Q (VAr)	P (W)	Q (VAr)
0°	106,3	1,4	106,3	0,7	106,3	0,4	106,3	0,2
30°	103,4	9,6	103,4	8,9	103,4	8,6	103,4	8,5
60°	84,3	26,8	84,3	26,3	84,3	26,1	84,3	25,9
90°	52,8	34,2	52,8	33,9	52,8	33,7	52,8	33,7
Erro médio	-0,2	1,1	-0,2	0,5	-0,2	0,3	-0,2	0,2
Desvio padrão	0,0	0,3	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1

Fonte: Elaborado pela autora.

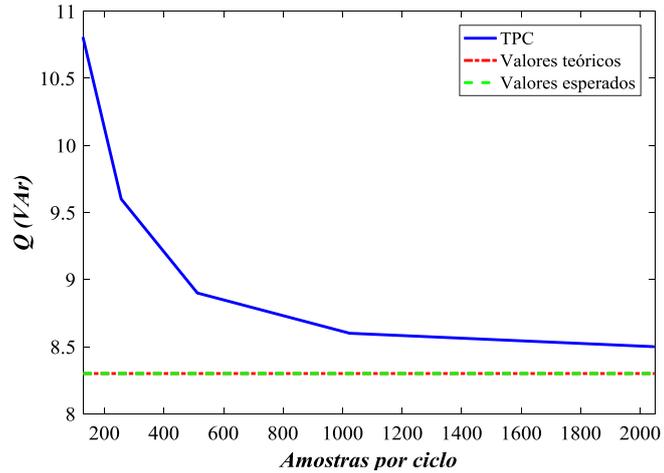
Devido ao incremento do ângulo de disparo, a componente fundamental da corrente é atrasada em relação à tensão, o que justifica os altos valores de potência reativa mesmo a carga não sendo reativa. Muito embora não seja o escopo do trabalho, é interessante destacar a presença de energia reativa em virtude da não linearidade da carga, justificando o uso de teorias de potência que possam ser aptas a dar sentido físico às cargas, bem como lidar com situações de distorções de tensão e corrente. Além disso, as tabelas 15 e 16 confirmam uma vez mais a ampla influência da taxa de amostragem no cálculo da energia reativa. As Figuras 20 à 23 apresentam os gráficos da potência reativa em relação ao número de amostras por ciclo para a carga não linear com os ângulos de disparo de 0°, 30°, 60° e 90° respectivamente.

Figura 20 – Potência reativa para carga não linear com ângulo de disparo de 0°



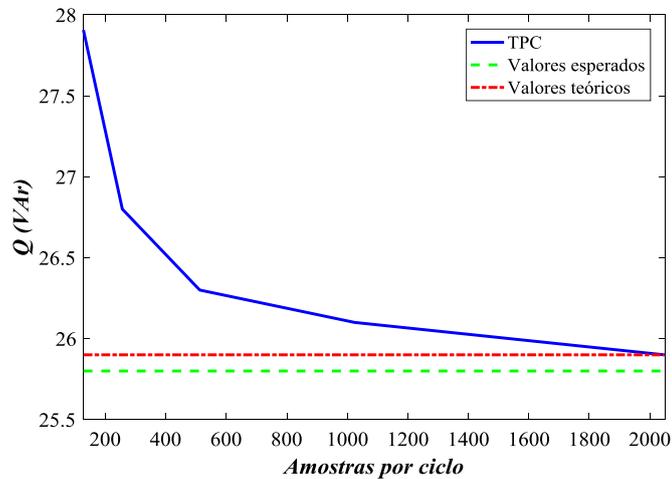
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 21 – Potência reativa para carga não linear com ângulo de disparo de 30°



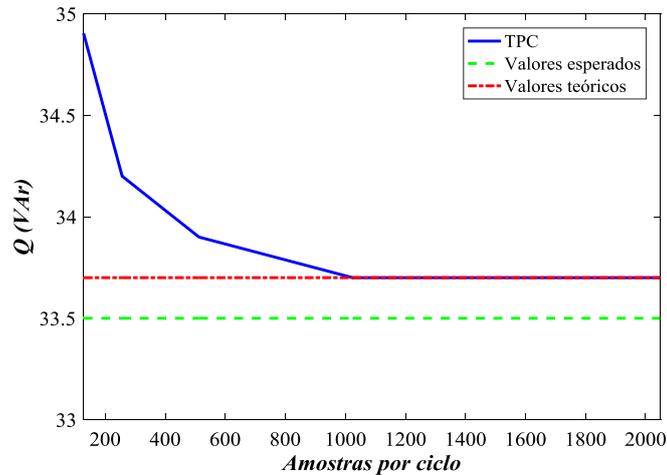
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 22 – Potência reativa para carga não linear com ângulo de disparo de 60°



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 23 – Potência reativa para carga não linear com ângulo de disparo de 90°



Fonte: Elaborado pela autora.

5.2.3.1. Análise estatística

Realizou-se o mesmo processo detalhado nos cenários anteriores para testar as hipóteses indicadas em (30). Contudo, o erro médio da TPC será comparado ao erro médio dos valores calculados com componentes fundamentais. Logo, μ_1 corresponde ao erro médio da TPC em relação aos valores esperados, e μ_2 simboliza o erro médio dos valores calculados somente com parcelas fundamentais em relação aos valores esperados. Os valores de erro médio e desvio padrão amostral associados a TPC são apresentados nas Tabelas 15 e 16, o erro médio e desvio padrão amostral relacionados aos valores calculados com componentes fundamentais são mostrados na Tabela 14. A Tabela 17 mostra os resultados dos testes de hipótese para a carga não linear, são indicados os graus de liberdade, os critérios de rejeição de H_0 , os valores de t_0^* , e as conclusões dos testes.

Tabela 17 – Testes de hipóteses para carga não linear

Amostras	Frequência (kHz)	Potência	ν	Critério de rejeição	t_0^*	Conclusão
16	0,96	P	6	$t_0^* > 1,9$	-1,4	Não rejeita H_0
		Q	3	$t_0^* > 2,4$	6,6	Rejeita H_0
32	1,92	P	3	$t_0^* > 2,4$	-1,0	Não rejeita H_0
		Q	3	$t_0^* > 2,4$	7,0	Rejeita H_0
64	3,84	P	3	$t_0^* > 2,4$	-1,0	Não rejeita H_0
		Q	3	$t_0^* > 2,4$	7,0	Rejeita H_0
128	7,68	P	3	$t_0^* > 2,4$	-1,0	Não rejeita H_0
		Q	3	$t_0^* > 2,4$	8,2	Rejeita H_0
256	15,36	P	3	$t_0^* > 2,4$	-1,0	Não rejeita H_0
		Q	3	$t_0^* > 2,4$	6,3	Rejeita H_0
512	30,72	P	3	$t_0^* > 2,4$	-1,0	Não rejeita H_0
		Q	6	$t_0^* > 1,9$	5,7	Rejeita H_0
1024	61,44	P	3	$t_0^* > 2,4$	-1,0	Não rejeita H_0
		Q	3	$t_0^* > 2,4$	4,0	Rejeita H_0
2048	122,88	P	3	$t_0^* > 2,4$	-1,0	Não rejeita H_0
		Q	6	$t_0^* > 1,9$	1,4	Não rejeita H_0

Fonte: Elaborado pela autora.

De forma semelhante aos cenários anteriores, ao nível de significância de 5% os valores de erro médio de potência ativa podem ser considerados iguais em todas as situações de frequência. Para a potência reativa, a hipótese nula pode ser rejeitada para as frequências abaixo de 122,88 kHz que corresponde a 2048 amostras por ciclo.

5.3. CONCLUSÕES

Avaliar a influência da taxa de amostragem nos cálculos de potência conforme as definições da TPC foi muito importante tendo em vista o objetivo de implementá-los em um processador de baixo custo cujos recursos de memória e de processamento são limitados. Para o cálculo de Q, de acordo com as definições da TPC, é utilizada a integral imparcial da tensão, o que pode maximizar possíveis erros, como o erro de quantização. Por esse motivo, observa-se que quanto maior a taxa de amostragem, menor é o erro do valor de potência reativa. Por

outro lado, não há mudança significativa no valor de potência ativa com a alteração da frequência de amostragem. A partir dos testes de hipóteses foi possível validar estatisticamente esses resultados, e evidenciar até que ponto o erro associado à taxa de amostragem interfere nas medições. Com base nisso, o capítulo posterior irá analisar a viabilidade de aplicação da TPC em um controlador digital de baixo custo.

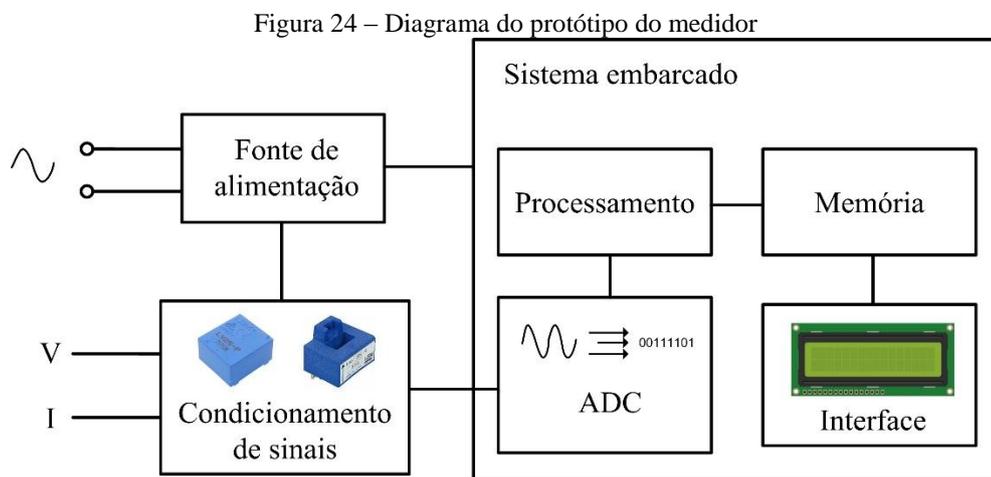
6. MEDIDOR IMPLEMENTADO

A fim de avaliar a viabilidade de implementação da TPC em um processador de baixo custo, foi proposto embarcar o código de medição de potência ativa e potência reativa no dsPIC33FJ32MC204 da Microchip® [33]. Para tanto, foi desenvolvido um hardware de condicionamento de sinais e também uma arquitetura de programação que será apresentada a seguir.

6.1. HARDWARE

Os valores provenientes da leitura dos sinais de tensão e corrente devem ser condicionados antes de serem enviados ao sistema embarcado. É necessária a transformação desses sinais para níveis adequados ao conversor analógico-digital (ADC – *Analog Digital Converter*) do controlador digital. O circuito utilizado para o condicionamento de sinais será detalhado na próxima seção.

O diagrama do protótipo do medidor é mostrado na Figura 24.



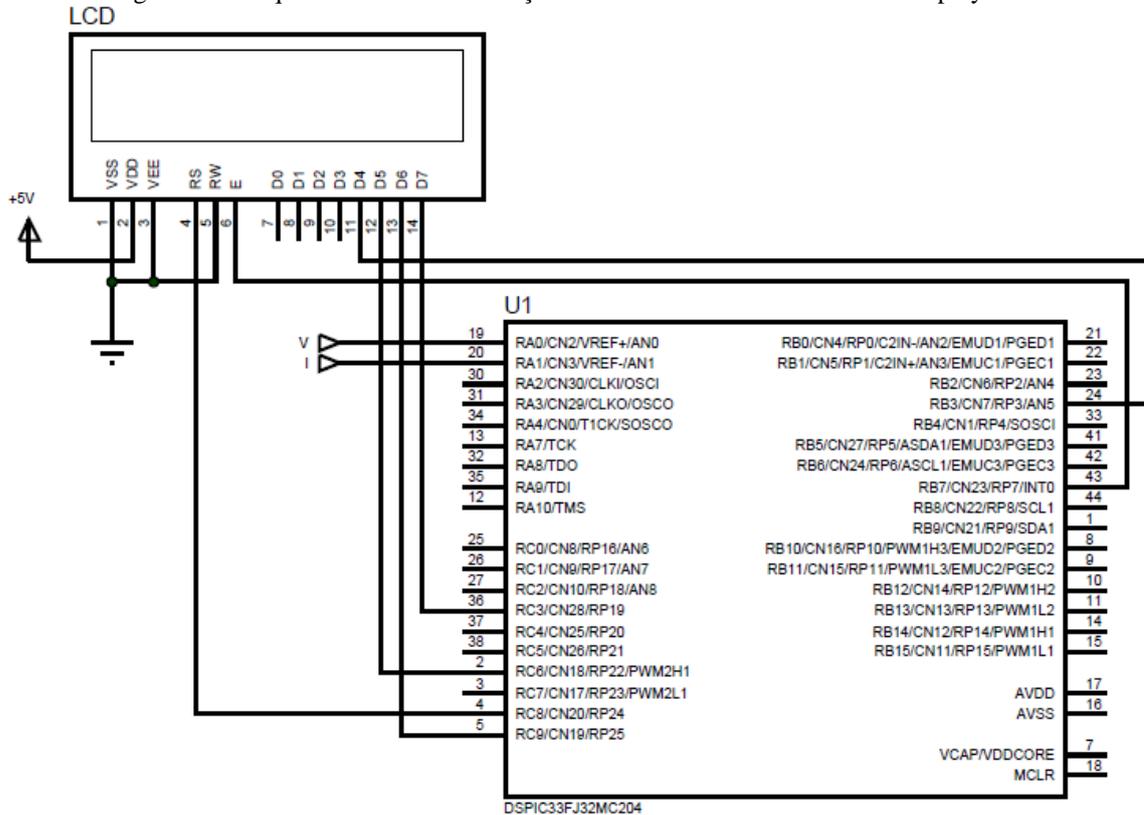
Fonte: Elaborado pela autora.

Um sistema embarcado é definido como um conjunto de instruções (software) e uma unidade de processamento, memória e periféricos (hardware). Seus recursos são utilizados da melhor maneira possível para atender uma aplicação específica.

Neste trabalho, para o sistema embarcado foi utilizado o microcontrolador dsPIC33FJ32MC204. As instruções com a implementação da TPC são gravadas no mesmo, essas instruções são processadas e os resultados requeridos são enviados à um display.

O esquemático indicando a comunicação do display LCD com o dsPIC e as portas analógicas utilizadas para receber os sinais monitorados é mostrado na Figura 25.

Figura 25 – Esquemático de comunicação do dsPIC33FJ32MC204 com o display LCD

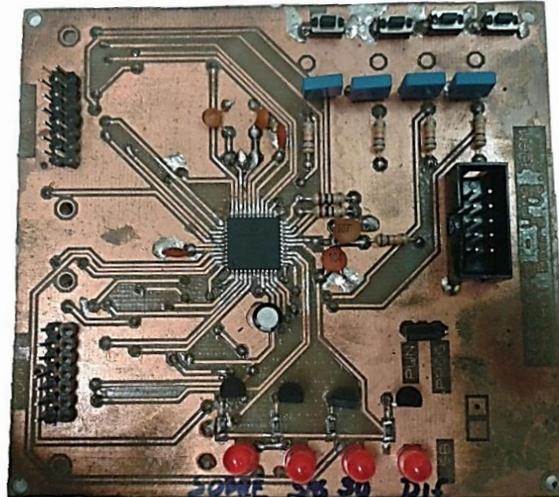


Fonte: Elaborado pela autora.

Foram utilizadas as entradas analógicas AN0 e AN1 para os sinais monitorados de tensão e corrente. Seis I/O digitais foram empregadas na comunicação do microcontrolador com o display.

A Figura 26 apresenta a placa de desenvolvimento para utilização do microcontrolador.

Figura 26 – Placa de desenvolvimento do dsPIC



Fonte: Elaborado pela autora.

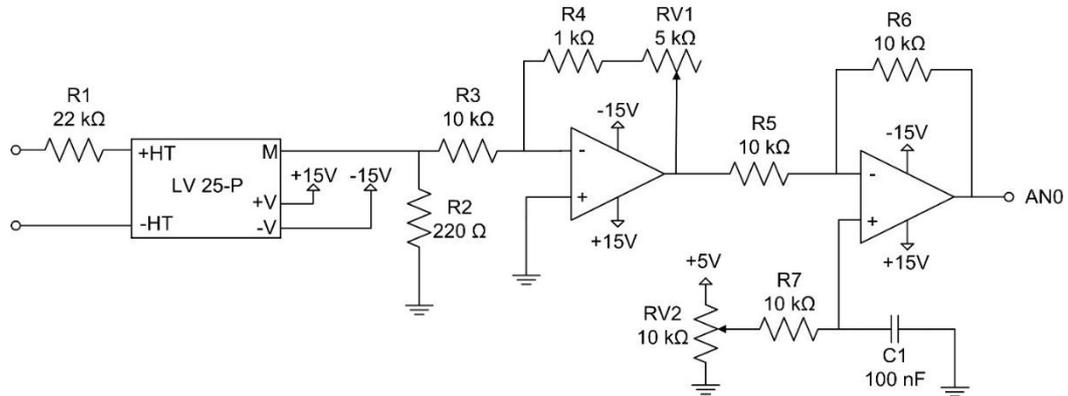
6.1.1. Placa de condicionamento de sinais

O conversor analógico-digital do dsPIC apresenta uma tensão de operação de 0 à 3,3 V. Portanto, os sinais monitorados de tensão e de corrente devem ter seus níveis reduzidos, tornando-os compatíveis com as entradas do ADC.

Para o monitoramento de tensão CA, foi utilizado o transdutor de tensão LV 25-P da fabricante LEM® [34]. O mesmo apresenta uma capacidade de efetuar a leitura de tensão de 10 a 500 V, com a corrente de entrada limitada a 10 mA. Portanto, deve-se dimensionar o resistor de entrada de forma que para a máxima tensão monitorada, o limite de corrente de entrada do sensor não seja ultrapassado. A corrente no secundário pode chegar até 25 mA, dependendo do nível da corrente primária. Este valor de corrente deve ser convertido em tensão através do resistor R2 representado no esquemático da Figura 27.

A tensão de saída não deve ultrapassar o valor de 3,3 V_p. O ajuste do ganho de tensão é efetuado através do resistor variável RV1, presente na realimentação negativa do amplificador operacional mostrado na Figura 27. Deve ser adicionado um offset para fornecer somente valores positivos de tensão para o ADC. Este ajuste é realizado por meio do resistor variável RV2, presente no circuito mostrado também na Figura 27.

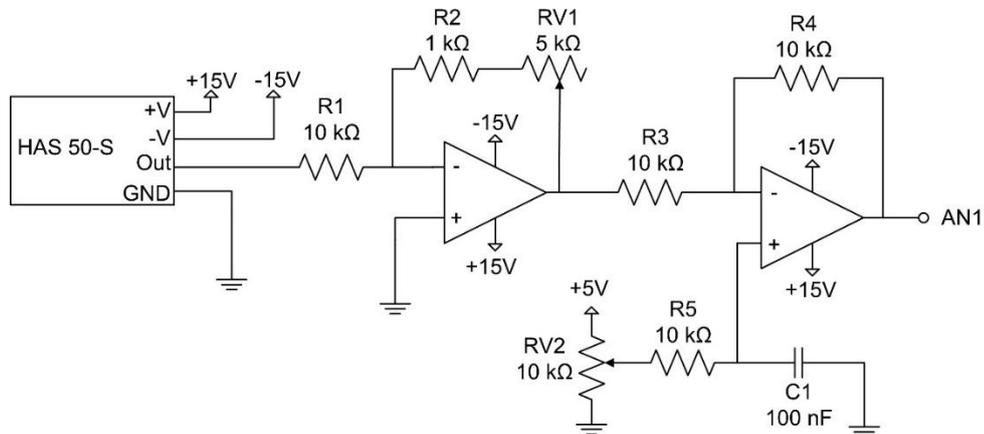
Figura 27 – Circuito de condicionamento de tensão



Fonte: Elaborado pela autora.

Para realizar a leitura de corrente utilizou-se o transdutor HAS 50-S da fabricante LEM[®] [35]. Este sensor realiza leitura de corrente de até 50 A. Apresenta tensão máxima de 4 V no secundário para a corrente máxima no primário. Para melhorar a linearidade nas leituras e não depender somente dos ganhos dos amplificadores operacionais, foram utilizadas sete voltas no primário do transdutor. O circuito para ajustes de ganho e offset é semelhante ao circuito utilizado para o monitoramento de tensão, conforme o circuito mostrado na Figura 28.

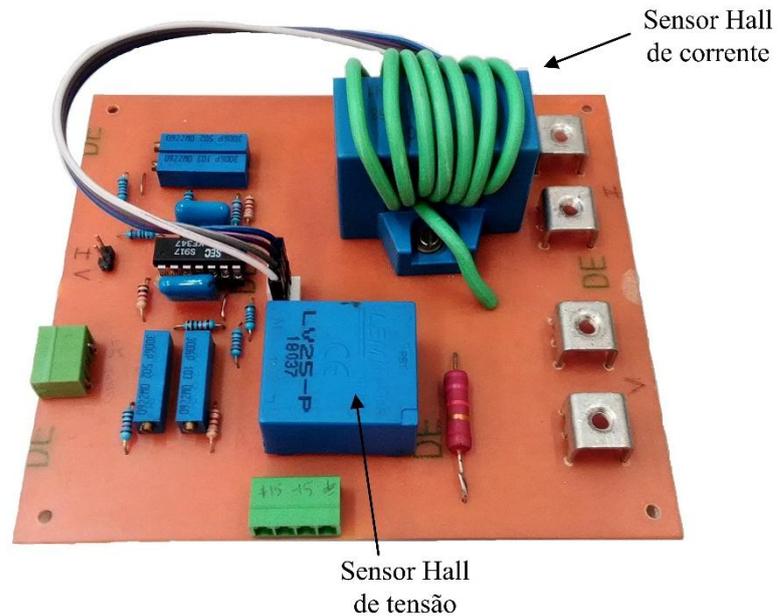
Figura 28 – Circuito de condicionamento de corrente



Fonte: Elaborado pela autora.

A placa de condicionamento de sinais confeccionada é mostrada na Figura 29.

Figura 29 – Placa de condicionamento de sinais

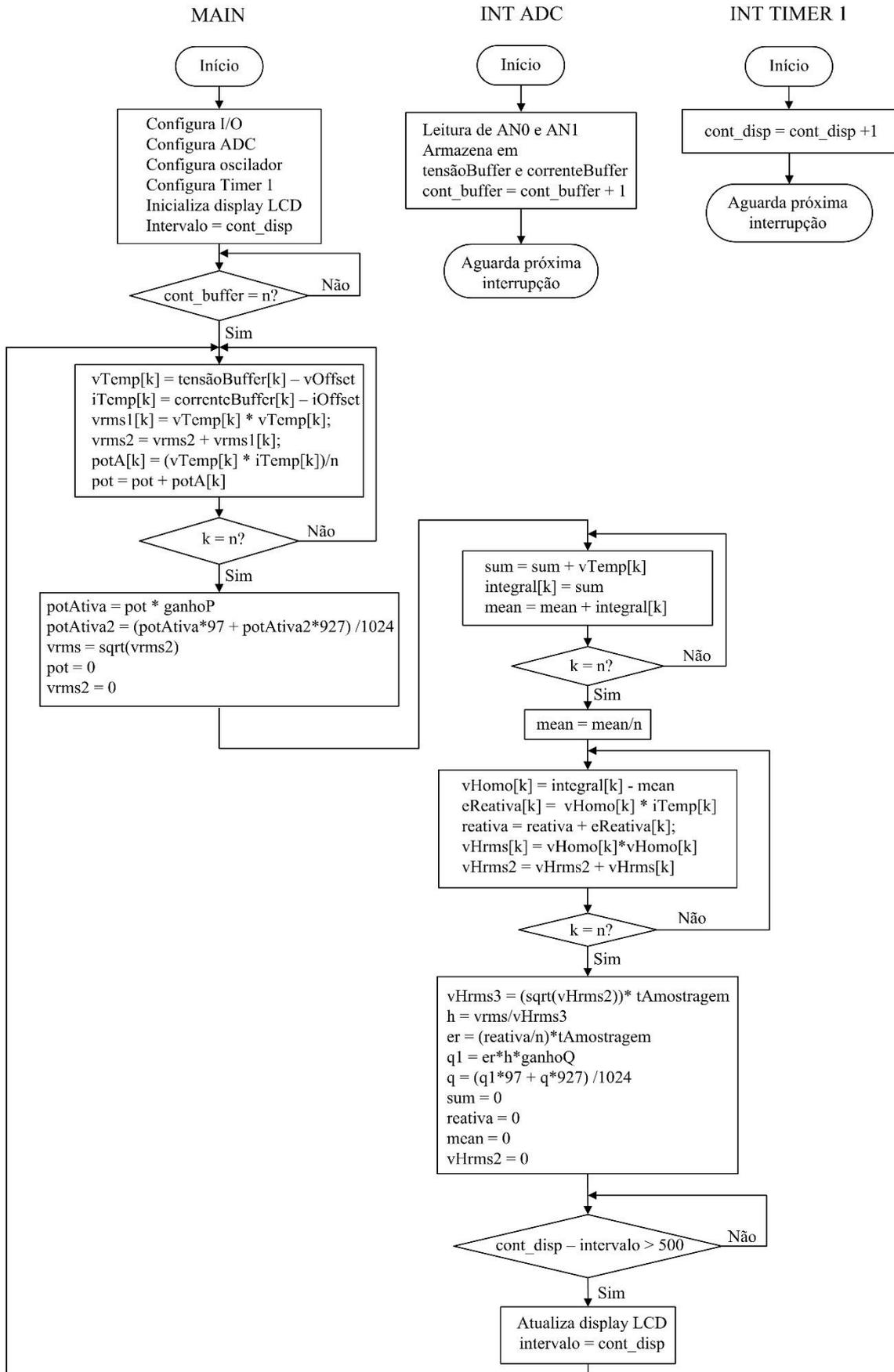


Fonte: Elaborado pela autora.

6.2. SOFTWARE

Neste trabalho foram implementadas as definições de potência ativa e potência reativa da TPC, conforme expressões (9) e (11).

As instruções programadas no controlador são representadas através do fluxograma mostrado na Figura 30.

Figura 30 – Fluxograma do *firmware* do medidor

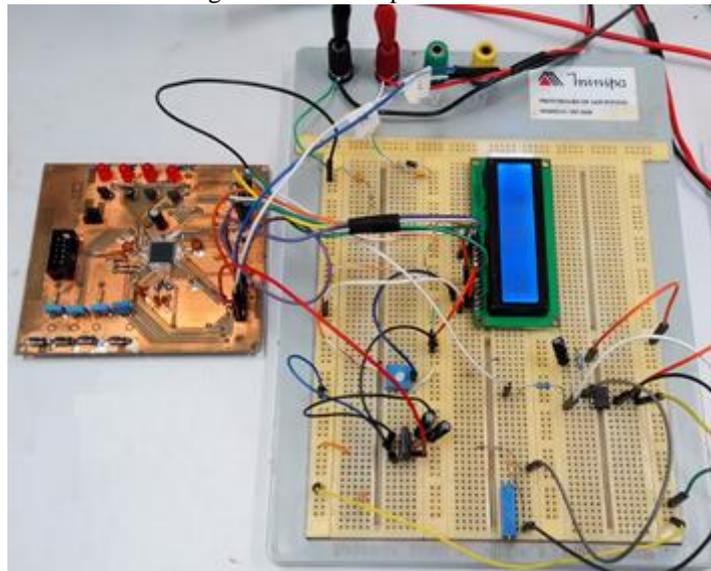
Fonte: Elaborado pela autora.

Optou-se por utilizar a interrupção do ADC para coletar as amostras dos sinais de tensão e corrente, portanto a interrupção foi habilitada e configurada para a frequência de amostragem definida. Depois de convertidos pelo ADC, os valores discretos são armazenados em *buffers*, ou seja, as amostras a cada ciclo da rede são acumuladas na frequência de amostragem configurada. Em seguida, o valor do offset é subtraído das amostras de tensão e corrente. Após essa operação, são realizados todos os cálculos referentes às potências de acordo com as definições da TPC. Antes de serem mostrados no display, os valores de P e Q são filtrados por um filtro digital com frequência de corte em 1 Hz.

O timer 1 foi configurado para criar uma base de tempo de 1 ms. Definiu-se que a amostragem dos resultados no display deve ocorrer a cada 500 ms, sendo assim, um contador presente no timer 1 irá contar até 500, após isso, são mostrados os resultados no display LCD.

Na Figura 31 é mostrado o conjunto montado para funcionamento do display.

Figura 31 – Protótipo do medidor

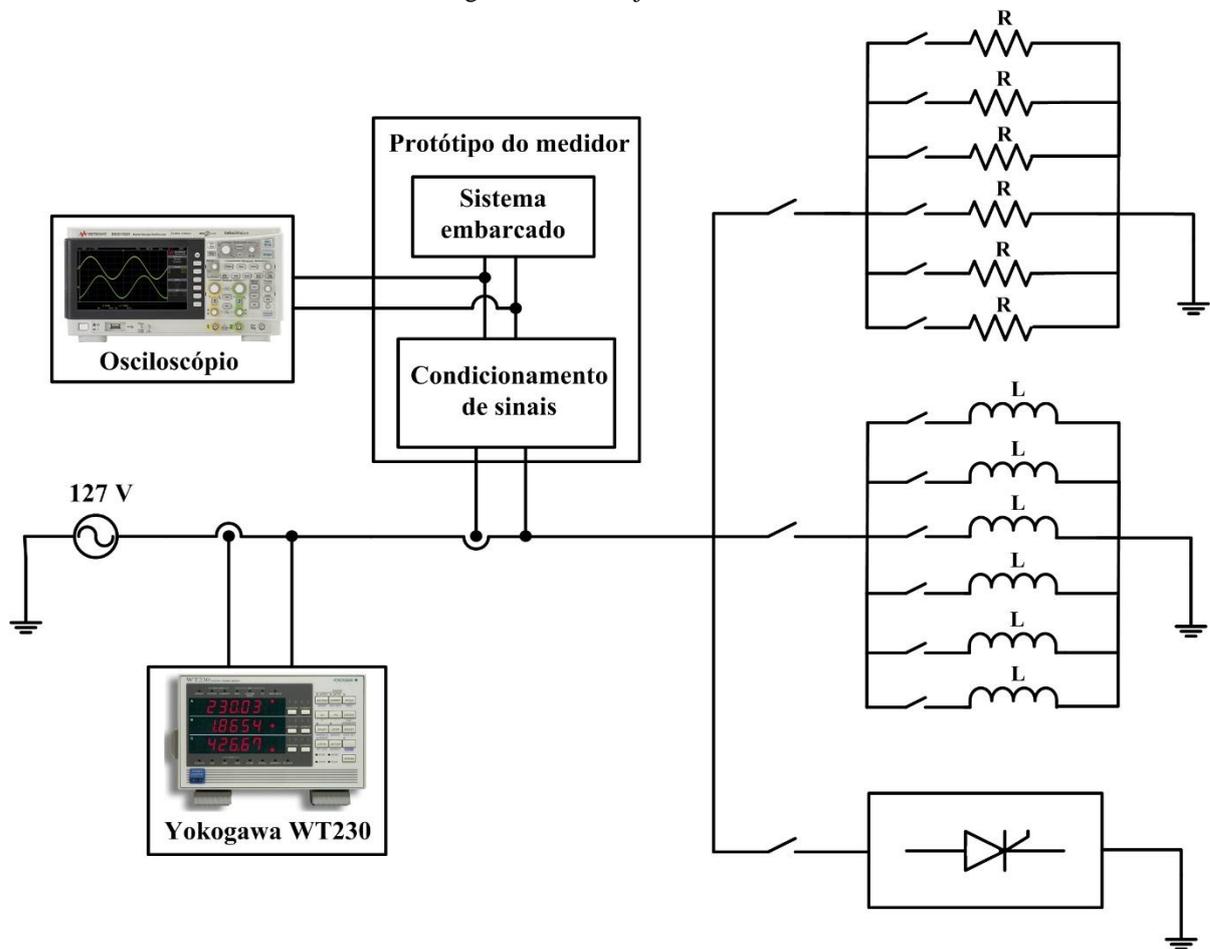


Fonte: Elaborado pela autora.

6.3. ARRANJO PARA LEVANTAMENTO DE DADOS

O arranjo do sistema montado em bancada para o levantamento de dados está representado na Figura 32. Conforme se observa, para o arranjo experimental foram considerados cenários similares aos apresentados no capítulo 5. Contudo, optou-se por aumentar a variação de potência, a fim de aumentar o espaço amostral de medições, e, optou-se por restringir o cenário 2 a cálculos específicos de potência reativa.

Figura 32 – Arranjo do sistema



Fonte: Elaborado pela autora.

Devido às limitações do processador, foram obtidos resultados para 32 amostras por ciclo. Com o propósito de gerar medidas de referência, foram levantadas as amostras de tensão e corrente na saída dos circuitos de condicionamento. Essas amostras, adquiridas através do osciloscópio, foram utilizadas no MATLAB/Simulink[®] para o cálculo das potências utilizando a TPC. A fim de se obter a mesma condição de cálculo do medidor, a frequência de amostragem estabelecida no MATLAB/Simulink[®] foi de 1920 Hz, o que corresponde a 32 amostras por ciclo.

Visando uma segunda medida de referência de potência, os resultados experimentais foram comparados aos resultados de potência do mesmo medidor digital de apresentado no capítulo anterior. Para o medidor, as medidas foram obtidas a partir dos sinais reais de tensão e de corrente, obtidos diretamente da rede.

6.4. RESULTADOS DE MEDIÇÃO

As seções a seguir apresentam os resultados para os três cenários de carga representados na Figura 32. O primeiro cenário é composto somente por cargas resistivas, sendo que cada resistência possui valor aproximado de 138Ω . Tais cargas foram paralelizadas com o intuito de variar a potência. No segundo cenário são utilizadas cargas indutivas paralelizadas, cujo valor aproximado de reatância indutiva é de 138Ω . Finalmente, para o último cenário utilizou-se uma carga não linear, sendo essa um retificador semicontrolado, com três cargas resistivas em paralelo na saída. Os valores de resistência e reatância indutiva apresentaram certa variação ao longo dos experimentos, dependendo da temperatura de operação. Além disso, o valor da tensão da rede apresentou certas oscilações que também contribuíram para certa variação no valor de potência medida.

6.4.1. Cenário 1 – Carga resistiva

A Tabela 18 mostra os resultados do protótipo do medidor e valores de referência para cargas resistivas. Utilizou-se até seis cargas resistivas paralelizadas. Na primeira coluna da tabela, são indicadas as cargas equivalentes. Nas próximas colunas estão os valores de P e Q medidos, respectivamente, pelo medidor implementado, pela rotina de cálculo do MATLAB/Simulink® e pelo medidor referência.

Tabela 18 – Potências medidas e valores de referência para cargas resistivas

	Protótipo do medidor		MATLAB		Medidor referência	
	P (W)	Q (VAr)	P (W)	Q (VAr)	P (W)	Q (VAr)
R	98	6	96	20	107	0
R/2	194	14	195	31	210	1
R/3	288	21	292	42	311	1
R/4	383	29	389	51	411	1
R/5	474	36	482	61	508	2
R/6	565	43	573	70	603	2

Fonte: Elaborado pela autora.

Num primeiro momento, as medições de potência efetuadas através do protótipo foram comparadas às medidas obtidas pela TPC implementada no MATLAB/Simulink®. Para averiguar se os valores obtidos por ambos os métodos podem ser considerados iguais, utilizou-se novamente o teste de hipóteses. Algo importante de se considerar é que, neste capítulo, as

medidas obtidas pelo MATLAB[®] foram realizadas a partir dos sinais condicionados, diferentemente do capítulo anterior, em que as medições foram coletadas a partir dos sinais de tensão e de corrente obtidos diretamente da rede elétrica. Esse cuidado foi tomado no sentido de evitar que possíveis distorções impostas pelo circuito de amostragem agregassem erros que contribuíssem para a divergência dos resultados.

O teste de hipóteses foi realizado a partir da estatística t , admitindo-se α igual a 5% e considerando as hipóteses apresentadas em (32) a fim de verificar se o erro médio entre as medidas do protótipo e os valores obtidos a partir da implementação da TPC no MATLAB/Simulink[®] é igual a zero.

$$\begin{cases} H_0 : \mu = 0 \\ H_1 : \mu \neq 0 \end{cases} \quad (32)$$

O teste mostrou que para a potência ativa, a hipótese nula não pode ser rejeitada, em contrapartida as medidas de potência reativa não podem ser consideradas iguais. Essa divergência associada aos valores de potência reativa pode ser justificada por possíveis erros de amostragem, pois o sistema de aquisição de sinais do dsPIC está condicionado à qualidade da tensão de alimentação do mesmo e à presença de ruídos acoplados aos sinais condicionados.

Em relação ao medidor referência, é indiscutível, e já foi averiguado no capítulo 5, que 32 amostras por ciclo não garantirão confiabilidade na aplicação da TPC no cálculo da potência reativa. Contudo, chama-se atenção observar a discrepância agregada também a potência ativa. Sendo assim, sugere-se que o circuito de condicionamento não esteja apropriado para garantir os mesmos níveis de erros obtidos no capítulo anterior. Considerando somente a composição para as três primeiras cargas (R, R/2 e R/3), observa-se que o desvio alcançado para a potência ativa obtida a partir dos valores tensão e corrente da rede foi de 2,3 W, enquanto que para medições a partir da tensão e da corrente condicionadas subiu para 4 W. É ainda relevante confirmar que o desvio para a potência reativa também se elevou, saindo de 9,7 VAR para 10,7 VAR. Ou seja, por mais que seja confirmado que as medidas do medidor protótipo possam ser consideradas idênticas às medidas obtidas pelo cálculo da TPC via MATLAB[®], o erro em relação ao medidor digital se apresentou ainda maior, visto que, além da baixa taxa de amostragem, o circuito de condicionamento inseriu distúrbios nas tensões e correntes que resultaram em alterações nos valores finais.

6.4.2. Cenário 2 – Carga indutiva

A Tabela 19 mostra os resultados do medidor e valores de referência para carga indutiva. Foram aplicadas até seis cargas indutivas paralelizadas. Avaliando-se as medições do protótipo em comparação com as medições realizadas através das rotinas implementadas no MATLAB®, constatou-se para o teste de hipóteses, considerando ($H_0: \mu = 0$), que as medidas de potência reativa podem ser consideradas idênticas enquanto que as medidas de potência ativa não garantem a hipótese nula. Fica evidenciado que no medidor implementado, a imprecisão é maior quanto menor for a medida de potência. Isso reforça a possível presença de ruídos e erros de quantização nos processamentos digitais do controlador.

Em comparação ao medidor referência, é esperado que se tenha erro associado às medições de potência reativa, principalmente em virtude da baixa taxa de amostragem. É importante observar que os distúrbios impostos à tensão e à corrente por conta dos circuitos de condicionamento também agregam um erro, até certo ponto inesperado, às medidas de potência ativa.

Tabela 19 – Potências medidas e valores de referência para cargas indutivas

	Protótipo do medidor		MATLAB		Medidor referência	
	P (W)	Q (VAr)	P (W)	Q (VAr)	P (W)	Q (VAr)
L	6	99	2	105	7	103
L/2	14	198	10	203	15	208
L/3	22	303	19	305	23	315
L/4	33	406	29	407	33	421
L/5	44	509	39	510	42	528
L/6	57	611	50	611	53	634

Fonte: Elaborado pela autora.

6.4.3. Cenário 3 – Carga não linear

A Tabela 20 mostra os resultados do medidor e valores de referência para carga não linear. A primeira coluna da tabela indica o ângulo de disparo dos tiristores do retificador.

Tabela 20 – Potências medidas e valores de referência para carga não linear

Ângulo de disparo	Protótipo do medidor		MATLAB	
	P (W)	Q (VAr)	P (W)	Q (VAr)
0°	295	22	293	5
30°	275	50	279	34
60°	233	88	237	68
90°	146	107	151	86

Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme se observa, os valores de potência ativa estão bem próximos. O teste de hipótese, tendo ($H_0: \mu = 0$), confirma que o valor obtido pelo protótipo pode ser considerado idêntico àquele calculado através da TPC implementada no MATLAB/Simulink®. Com respeito a potência reativa, mais uma vez fica evidente que para baixos valores de potência a imprecisão do protótipo aumenta, reforçando a baixa relação sinal ruído e os possíveis erros de quantização decorrentes da amostragem.

6.5. CONCLUSÕES

Neste capítulo foram detalhadas as etapas de desenvolvimento do hardware e software do medidor, assim como os resultados de medição para 32 amostras por ciclo.

6.5.1. Erros associados à baixa taxa de amostragem

É importante destacar a dificuldade de implementação das definições da TPC em um processador de baixo custo. Conforme mostrado no capítulo anterior, é necessária uma maior taxa de amostragem para se obter resultados adequados de potência reativa, contudo, para implementar o algoritmo mostrado foi necessário limitar a taxa de amostragem em 32 amostras por ciclo em virtude da insuficiência de memória e de processamento do controlador utilizado.

6.5.2. Erros presentes nas medições de baixa potência

Ficou evidenciado que a imprecisão das medidas é maior para baixos valores de potência, sugerindo a presença de ruído nos sinais amostrados e possíveis erros de quantização por oscilações ou ruídos na alimentação do dsPIC.

6.5.3. Erros nas medições de potência ativa

Conforme demonstrado no capítulo 5, a potência ativa não deveria agregar erros oriundos da baixa taxa de amostragem. Além disso, para valores maiores, o valor calculado pela TPC se aproximava muito das medições de referência. Contudo, as medições do medidor protótipo no capítulo 6, apesar de estarem alinhadas com os cálculos utilizando a TPC no MATLAB/Simulink®, divergiram consideravelmente do valor apresentado pelo medidor referência. Sendo assim, é possível intuir que o sinal condicionado possua distorções e deslocamentos de fase em relação ao sinal original.

Em resumo, pode-se afirmar que o protótipo implementado não possui uma estrutura adequada para um medidor. Conforme observado nas Figuras 29 e 31, o medidor montado está distante de cumprir os requisitos mínimos para mitigar interferências eletromagnéticas conduzidas ou irradiadas. Além disso, as conexões por meio de *jumpers* são muito precárias, maximizando a presença de ruídos e de mau contato. É válido apontar que o circuito de condicionamento de sinais não teve maiores critérios de aferição, sendo que, para um medidor, torna-se essencial revisar cada estágio implementado com vistas a avaliar o desempenho do conjunto a ponto de ser capaz de reproduzir linearmente tensões e correntes com níveis de tensão ajustados para os canais de conversão AD.

Apesar das limitações encontradas, pode-se verificar que o algoritmo implementado opera de forma satisfatória no microcontrolador escolhido. É importante lembrar que a operação ficou limitada a uma taxa de amostragem de 1920 Hz. Mitigadas as interferências de ruídos e se valendo de circuitos de condicionamento mais adequados, observa-se que o medidor tende a apresentar boas medidas de potência ativa e reativa, principalmente, para maiores valores de potência reativa.

7. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

A Teoria de Potência Conservativa é uma proposta interessante para sistemas de medição de potência de cargas lineares e não lineares, pois é capaz de lidar com tensões e correntes distorcidas, além de atribuir significado físico às parcelas de corrente. Entretanto, a TPC apresenta algumas limitações quando aplicada no domínio discreto. No decorrer do trabalho foi averiguado especialmente o erro associado à integral imparcial de tensão em função da taxa de amostragem.

Mediante a análise estatística constatou-se que o erro médio das medidas de potência reativa é maior para baixas frequências de amostragem enquanto que os valores de potência ativa não são alterados com a mudança da taxa de amostragem.

Com respeito à implementação no processador de baixo custo, o microcontrolador utilizado demonstrou ser inadequado para a aplicação do cálculo de potência reativa da TPC, pois mesmo operando em sua capacidade máxima, não foi possível empregar uma taxa de amostragem suficiente para se obter medidas confiáveis de potência reativa.

Mesmo com as limitações, o algoritmo implementado no processador operou de forma satisfatória segundo a análise estatística. Todavia, certas medidas de potência apresentaram divergências devido à presença de ruídos e erros de quantização. Por esse motivo, o circuito de condicionamento e a estrutura do protótipo devem ser criteriosamente desenvolvidos a fim de mitigar interferências nos sinais. À vista disso, sugere-se para trabalhos futuros a elaboração de um circuito de condicionamento apropriado com o propósito de evitar a presença de ruídos e deslocamento de fase nos sinais de tensão e corrente condicionados, e a montagem de uma estrutura adequada para o medidor.

A implementação do algoritmo em um processador com melhor desempenho seria muito interessante, pois possibilitaria a aplicação de uma taxa de amostragem elevada evitando erros de exatidão. Contudo, valendo-se de processadores com baixo desempenho, poderiam ser analisadas possíveis técnicas para solucionar as restrições ocasionadas pela baixa taxa de amostragem.

Independente das melhorias que possam ser realizadas, é imprescindível que os resultados sejam devidamente validados, dessa forma, é necessário ainda a complementação da análise estatística. Foram realizados testes estatísticos para analisar a exatidão dos resultados, no entanto, é importante analisar também a precisão das medidas por meio da realização de testes de hipóteses sobre o desvio padrão do erro.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] POMÍLIO, J. A.; DECKMANN, S. M. Teorias de potência elétrica. *In*: POMÍLIO, J. A.; DECKMANN, S. M. Condicionamento de Energia Elétrica e Dispositivos FACTS. p. 6-1 – 6-64. Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/it741/cap6.pdf>. Acesso em: 24 fev. 2020.
- [2] HARIRCHI, F.; SIMÕES, M. G. Enhanced Instantaneous Power Theory Decomposition for Power Quality Smart Converter Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 33, n. 11, p. 9344-9359, nov. 2018.
- [3] PAREDES, H. K. M. Teoria de Potência Conservativa: uma nova abordagem para o controle cooperativo de condicionadores de energia e considerações sobre atribuição de responsabilidades. 2011. 221 p. Tese (Doutorado) – Curso de Doutorado em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.
- [4] DEPENDROCK, M. The FBD-method, a generally applicable tool for analyzing power relations. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 8, n. 2, p. 381-387, maio 1993, doi: 10.1109/59.260849.
- [5] AKAGI, H.; KANAZAWA, Y.; NABAE, A. Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. IA-20, n. 3, p. 625-630, maio 1984, doi: 10.1109/TIA.1984.4504460.
- [6] TENTI, P.; MATTAVELLI, P.; PAREDES, H. K. M. Conservative Power Theory, sequence components and accountability in smart grids. 2010 International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation, Lagow, 2010, p. 37-45.
- [7] POMÍLIO, J. A. Efeitos e causas de harmônicas no sistema de energia elétrica. Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/htmlfile/harmo/fpcap4/cap4.html>. Acesso em: 24 fev. 2020.
- [8] TENTI, P.; MATTAVELLI, P.; PAREDES, H. K. M. Accountability and revenue metering in smart micro-grids. 2010 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems, Aachen, 2010, p. 74-79, doi: 10.1109/AMPS.2010.5609516.
- [9] OSHIRO, M. R. et al. Performance Analysis of Active Anti-islanding Techniques for Photovoltaic Application. 2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), Santos, Brasil, 2019, p. 1-6, doi:10.1109/COBEP/SPEC44138.2019.9065606.

- [10] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. 2016.
- [11] ENERGISA. NDU – 013, Critérios para a Conexão em Baixa Tensão de Acessantes de Geração Distribuída ao Sistema de Distribuição. João Pessoa, 2019.
- [12] IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, in IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992), v., n., p.1-29, 11 jun. 2014, doi: 10.1109/IEEESTD.2014.6826459.
- [13] BRITO, M. A. G. et al. Estratégias de anti-ilhamento aplicadas a sistemas de geração distribuída fotovoltaica. *Eletrônica de Potência*, Joinville, v. 23, n. 2, p. 226-234, abr./jun. 2018.
- [14] CARVALHO, M. S. C. et al. Active anti-islanding protection method based on active power flow applied to VSI-based distributed generation. 2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP), Juiz de Fora, 2017, p. 1-6, doi: 10.1109/COBEP.2017.8257398.
- [15] MORTEZAEI, A. et al. Multifunctional Control Strategy for Asymmetrical Cascaded H-Bridge Inverter in Microgrid Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 53, n. 2, p. 1538-1551, mar./abr. 2017.
- [16] MORTEZAEI, A. et al. Grid-Connected Symmetrical Cascaded Multilevel Converter for Power Quality Improvement. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 54, n. 3, p. 2792-2805, maio/jun. 2018.
- [17] ALONSO, A. M. S. et al. Selective Power Conditioning in Two-Phase Three-Wire Systems Based on the Conservative Power Theory. 2019 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Baltimore, MD, USA, 2019, p. 1-6.
- [18] BURGOS-MELLADO, C. et al. Experimental Evaluation of a CPT-Based Four-Leg Active Power Compensator for Distributed Generation. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, v. 5, n. 2, p. 747-759, jun. 2017.
- [19] TAHER, S. A.; ALAEE, M. H.; DEHGHANI ARANI, Z. Model predictive control of PV-based shunt active power filter in single phase low voltage grid using conservative power theory. 2017 8th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC), Mashhad, 2017, p. 253-258.
- [20] MORTEZAEI, A. et al. Three-phase smart inverter for flexible power conditioning in low voltage distribution systems. 2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Cincinnati, OH, 2017, p. 1-8.

- [21] BURGOS-MELLADO, C. et al. Distributed Control Strategy Based on a Consensus Algorithm and on the Conservative Power Theory for Imbalance and Harmonic Sharing in 4-Wire Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 11, n. 2, p. 1604-1619, mar. 2020.
- [22] BUSARELLO, T. D. C. et al. Application of the Conservative Power Theory Current Decomposition in a Load Power-Sharing Strategy Among Distributed Energy Resources. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 54, n. 4, p. 3771-3781, jul./ago. 2018.
- [23] MOREIRA, A. C. et al. Intelligent Expert System for Power Quality Improvement Under Distorted and Unbalanced Conditions in Three-Phase AC Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 9, n. 6, p. 6951-6960, nov. 2018.
- [24] PAREDES, H. K. M.; BONALDO, J. P.; POMILIO, J. A. Centralized Control Center Implementation for Synergistic Operation of Distributed Multifunctional Single-Phase Grid-Tie Inverters in a Microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 65, n. 10, p. 8018-8029, out. 2018.
- [25] MORTEZAEI, A. et al. Cooperative control of multi-master-slave islanded microgrid with power quality enhancement based on conservative power theory. 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Chicago, IL, 2017, p. 1-1.
- [26] BUASARELLO, T. D. C.; POMILIO, J. A. Battery storage system with active filtering function based on the conservative power theory for wind generators. 2018 IEEE International Conference on Industrial Electronics for Sustainable Energy Systems (IESES), Hamilton, 2018, p. 21-26.
- [27] BUBSHAIT, A. S. et al. Power Quality Enhancement for a Grid Connected Wind Turbine Energy System. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 53, n. 3, p. 2495-2505, maio/jun. 2017.
- [28] TENTI, P.; PAREDES, H. K. M.; MATTAVELLI, P. Conservative Power Theory, a Framework to Approach Control and Accountability Issues in Smart Microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 26, n. 3, p. 664-673, mar. 2011, doi: 10.1109/TPEL.2010.2093153.
- [29] TENTI, P. et al. Accountability in Smart Microgrids Based on Conservative Power Theory. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 60, n. 9, p. 3058-3069, set. 2011, doi: 10.1109/TIM.2011.2162351.
- [30] SOUZA, W. A. et al. Load Analyser using Conservative Power Theory. International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation 2013 (ISNCC 2013), Zielona Góra, 2013, p. 1-6, doi: 10.1109/ISNCC.2013.6604454.

- [31] Yokogawa Meters & Instruments Corporation. Harmonic Measurement Function (Option). *In: Yokogawa Meters & Instruments Corporation. WT210/WT230 Digital Power Meter - User's Manual. 5. Ed. 2013. p. 7-1 - 7-9. Disponível em: <https://cdn.tmi.yokogawa.com/IM760401-01E.pdf>. Acesso em: 02 dez. 2020.*
- [32] MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros. 6ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- [33] Microchip®. dsPIC33FJ32MC204 - datasheet. Disponível em: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70283K.pdf>. Acesso em: 23 maio 2018.
- [34] LEM®. Voltage transducer LV 25-P - datasheet. Disponível em: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/87952/LEM/LV25-P.html>. Acesso em: 23 maio 2018.
- [35] LEM®. Current Transducer HAS 50...600-S - datasheet. Disponível em: https://img.ozdisan.com/ETicaret_Dosya/3312_5761434.PDF. Acesso em: 23 maio 2018.