

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Geraldo Pereira de Souza

**ALINHAMENTO TEMPORAL DE MEDIÇÕES DE TENSÃO USANDO
SÉRIES TEMPORAIS DE VALORES EFICAZES PARA SUPORTE A
MEDIÇÕES DE QUALIDADE DA ENERGIA**

Belo Horizonte

2024

Geraldo Pereira de Souza

**ALINHAMENTO TEMPORAL DE MEDIÇÕES DE TENSÃO USANDO
SÉRIES TEMPORAIS DE VALORES EFICAZES PARA SUPORTE A
MEDIÇÕES DE QUALIDADE DA ENERGIA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Wallace do Couto Boaventura

Belo Horizonte

2024

S729a

Souza, Geraldo Pereira de.

Alinhamento temporal de medições de tensão usando séries temporais de valores eficazes para suporte a medições de qualidade da energia [recurso eletrônico] / Geraldo Pereira de Souza. - 2024.

1 recurso online (137 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Wallace do Couto Boaventura.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 136-137.

Bibliografia: f.129-135.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Energia elétrica - Qualidade - Teses. 3. Energia elétrica - Medição - Teses. 4. Análise de séries temporais - Teses. I. Boaventura, Wallace do Couto. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
COLEGIADO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
FOLHA DE APROVAÇÃO

"Alinhamento Temporal de Medições de Tensão Usando Séries Temporais de Valores Eficazes para Suporte a Medições de Qualidade da Energia"

GERALDO PEREIRA DE SOUZA

Tese de Doutorado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 30 de agosto de 2024.

Por:

Prof. Dr. Wallace do Couto Boaventura
DEE (UFMG) - Orientador

Prof. Dr. Victor Flores Mendes
DEE (UFMG)

Prof. Dr. Lenin Martins Ferreira Morais
DELT (UFMG)

Prof. Dr. João Victor Matos Farias
UNIFEI

Prof. Dr. Alan Kardek Rego Segundo
DECAT (UFOP)



Documento assinado eletronicamente por **Wallace do Couto Boaventura, Professor do Magistério Superior**, em 02/09/2024, às 15:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lenin Martins Ferreira Moraes, Professor do Magistério Superior**, em 02/09/2024, às 17:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Victor Flores Mendes, Professor do Magistério Superior**, em 04/09/2024, às 15:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Victor Matos Farias, Usuário Externo**, em 10/09/2024, às 09:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alan Kardek Rêgo Segundo, Usuário Externo**, em 10/09/2024, às 13:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3492452** e o código CRC **8F3A6E48**.

ERRATA

SOUZA, Geraldo Pereira de. **Alinhamento temporal de medições de tensão usando séries temporais de valores eficazes para suporte a medições de qualidade da energia**. 2024. 141f. Tese (doutorado). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

A versão de controle deste documento é 14.8.035. Caso identifique algum erro, inconsistência, tenha sugestões ou dúvidas sobre o trabalho, favor entrar em contato com o autor por meio das informações disponíveis no Apêndice A deste documento.

Dedico este trabalho à minha família e aos meus amigos. Em especial, aos meus pais, Maria da Conceição Maciel Souza e José Pereira de Souza, pelo amor, pela dedicação e pelo apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

Foram inúmeras e desafiadoras batalhas ao longo desta jornada para realizar este sonho. Não poderia deixar de registrar meus agradecimentos às pessoas que, de forma direta ou indireta, contribuíram para que eu atingisse este objetivo. A seguir, apresento os meus contatos e sinceros agradecimentos.

Ao Prof. Dr. Wallace do Couto Boaventura, pela orientação, paciência e apoio, além de ter sido um mentor profundamente dedicado, profissional e brilhante durante todo o processo. Agradeço também pelo suporte na minha transformação pessoal, proporcionando-me uma nova perspectiva de mundo.

À comunidade acadêmica do PPGEE e da UFMG. Em especial, ao Prof. Dr. José Osvaldo Saldanha Paulino, por me aceitar como aluno de disciplina isolada e por me apresentar ao Prof. Wallace. Meu agradecimento também aos colegas dos laboratórios LAPIS, Oficina, LEAT e LCE, pelo apoio e pelos momentos de descontração, em especial ao Mozar Dênio.

Aos colegas das IES UFOP, IFMG e PUC Minas, meus sinceros agradecimentos. À CAPES, FAPEMIG e ao CNPq, pelo trabalho e pelo apoio aos programas de pós-graduação, com especial agradecimento à CAPES pela concessão da bolsa de doutorado.

Aos moradores e ex-alunos da República Marragolo, à turma do Chaves, e aos colegas e amigos das comunidades Vila Samarco e Antônio Pereira, meus agradecimentos. À Associação de Moradores da Vila Residencial Antônio Pereira (AMVRAP), da qual fiz parte no período 2021-2022. Aos amigos da nossa querida Rua Águas Marinhas, que estará sempre em nossa memória e em nossos corações, especialmente aos queridos vizinhos Zezé, Dora e seus filhos Kênia, Raquel e Tiago.

À juíza da Primeira Vara Cível da Comarca de Ouro Preto, Dra. Kellen Cristina Souza, e aos membros do Ministério Público de Minas Gerais (MPMG), em especial, ao promotor de justiça Dr. Domingos Ventura e ao analista da Coordenadoria de Inclusão e Mobilização Sociais (CIMOS), Marcelo de Andrade Vilarino, por defenderem a comunidade de Antônio Pereira no processo de descaracterização da barragem Doutor, em Mariana-MG.

À minha rede de apoio: à psicóloga, Dra. Andréa Chicri Torga Matiassi, pelo inestimável auxílio na manutenção da minha saúde mental; à advogada e amiga, Dra. Raquel Priscila Souza, pela orientação e pelo cuidado com meus assuntos jurídicos; e à bacharela em Letras, Ana Luiza Greco, pelo valioso suporte na revisão desta tese.

Finalmente, aos meus pais e a toda a minha família, especialmente aos meus irmãos Pedro e Arlindo, pelo apoio de sempre. Às minhas cunhadas, sobrinhos, sobri-

nhas, primos e primas, meu amor e gratidão. Caso tenha me esquecido de alguém, peço desculpas, e saibam que todos vocês moram no meu coração.

"Se você quer encontrar os segredos do universo, pense em termos de energia, frequência e vibração."

Nikola Tesla

RESUMO

A modernização das redes elétricas convencionais em direção às chamadas redes elétricas inteligentes, conhecidas internacionalmente como *Smart Grids* (SGs, ou redes inteligentes), constitui uma necessidade estratégica de alcance global. Para viabilizar e orientar essa transformação tecnológica, torna-se imprescindível a implementação e o desenvolvimento das chamadas Infraestruturas de Medição Avançadas (*Advanced Metering Infrastructures* – AMIs). Nesse contexto, o presente trabalho de doutorado está alinhado a essa visão transformadora, apresentando contribuições relevantes para o avanço e a consolidação das tecnologias AMIs. A primeira contribuição a ser destacada é o desenvolvimento da técnica denominada RmsSync (*RMS Time-Alignment Synchronization Technique*), uma abordagem de alinhamento temporal baseada em cálculos de valores RMS (*Root Mean Square*) realizados sobre os ciclos de tensão da rede elétrica. A técnica RmsSync é aplicada para estabelecer alinhamento temporal em medições não sincronizadas, ou seja, medições realizadas por equipamentos que operaram com relógios dessincronizados. Tal abordagem apresenta uma solução para uma demanda significativa no campo de medições em plantas de energia elétrica, pois possibilita a continuidade dos serviços de medição de energia, mesmo em situações em que os medidores tenham perdido, por qualquer motivo, a fonte de sincronização de seus relógios, uma vez que os dados poderão ter seu sincronismo reconstituído. Adicionalmente, a técnica tende a apresentar menor custo de aplicação, quando comparada às abordagens convencionais, tais como a utilização de GPS, uma vez que demanda uma infraestrutura menor. Outra contribuição relevante deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo arquitetural escalável, integrando hardware e software em forma de protótipo, que pode servir como base para o desenvolvimento de novos medidores de energia alinhados com a visão das AMIs, onde o sincronismo das medições é proporcionado pela aplicação da técnica RmsSync. O protótipo foi testado em condições reais de medição e amostragem, tendo demonstrado capacidade para realizar medições de tensão em redes trifásicas em uma configuração distribuída, abrangendo diversos pontos de uma rede elétrica simultaneamente.

Palavras-chave: infraestruturas avançadas de medição; medidores inteligentes de energia; métodos de alinhamento temporal de medições; medição de energia.

ABSTRACT

Modernizing traditional power grids towards to the so-called Smart Grids (SG) is a strategic demand of global reach. To enable and guide this technological transformation, the implementation and development of so-called Advanced Metering Infrastructures (AMIs) is essential. In this context, this work is aligned with the transformation ahead, aiming to present relevant contributions to the advancement and consolidation of AMI technologies. The first contribution to be highlighted is the development of the RmsSync (RMS time-alignment synchronization technique) technique, a time-alignment approach based on calculations of RMS (Root Mean Square) values performed on the voltage cycles of the power grid. This technique can be used to determine the time alignment for non-synchronized measurements, i. e., measurements obtained from equipment operating on non-synchronized clocks. This approach presents a solution to a significant demand in the field of measurements in electrical power plants, as it enables the continuity of energy measurement services, even in situations where the meters have lost, for whatever reason, the source of synchronization of their clocks, since the data can have its synchronism reconstituted. Additionally, the technique tends to have a lower application cost when compared to conventional approaches, such as the use of GPS, since it requires less infrastructure. Another relevant contribution of this work is the development of a scalable architectural model, integrating hardware and software in prototype form, which can serve as a basis for the development of new energy meters aligned with the AMIs vision, where the synchronization of measurements is provided by the application of the RmsSync technique. The prototype was tested under real measurement and sampling conditions, demonstrating the ability to perform voltage measurements in three-phase networks in a distributed configuration, covering several points of an electrical network simultaneously.

Keywords: advanced metering infrastructure; smart power meters; measurement time-alignment methods; electrical network monitoring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo Conceitual do <i>Smart Grid Framework, Release 1</i>	37
Figura 2 – Modelo Conceitual do <i>Smart Grid Framework, Release 3</i>	38
Figura 3 – Modelo conceitual do NIST para Micro-redes e as suas interfaces.	39
Figura 4 – Índices de correlação-cruzada entre dois sinais simulados no Matlab TM	48
Figura 5 – <i>Zoom</i> na correlação cruzada entre os sinais s_1 e s_1 , com valor máximo do índice de correlação na posição equivalente à defasagem -350.	49
Figura 6 – Janelas de simulação e processamento de P_x	59
Figura 7 – (a) <i>Zoom</i> nos picos de tensão dos sinais de P_x mostrados na Figura 6 e (b) detalhe nas séries temporais de valores rms, de todas as fases de P_x (Rótulo do eixo Y: V. v.: <i>Voltage variability</i> ou em português variabilidade de tensão).	60
Figura 8 – Correlação da fase R de P_x com a fase R de P_y usando as séries temporais de valores rms calculados ciclo a ciclo. Índice de correlação máximo em 20 ciclos.	62
Figura 9 – Janelas de simulação de P_x e P_y com atrasos de 20 ciclos destacados.	63
Figura 10 – Sinais simulados para P_x e P_y antes e após o alinhamento temporal utilizando a RmsSync, janelas entre os instantes 100 e 180 ciclos (Rótulo do eixo Y: V. v.: <i>Voltage variability</i> ou em português variabilidade de tensão).	64
Figura 11 – Fluxograma da técnica RmsSync	66
Figura 12 – Circuito de simulação compreendendo alimentador da CEMIG, linhas aéreas e cabo subterrâneo até a entrada da subestação de energia da Escola de Engenharia da UFMG.	70
Figura 13 – Circuito de simulação desde a subestação de energia da Escola de Engenharia até o laboratório da sala 2514 da Escola de Engenharia da UFMG.	70
Figura 14 – Circuito utilizado na variação estocástica da magnitude da fonte do alimentador.	72
Figura 15 – Modelagem da carga de potência variável $P_3 Var$	72
Figura 16 – Circuito utilizado para controlar os valores das resistências elétricas de $P_3 Var$	72
Figura 17 – Variabilidade das tensões de P_x , fases R, S e T utilizando como referencial $127 V_{rms}$	77
Figura 18 – Variabilidade das tensões de P_y , fases R, S e T utilizando como referencial $127 V_{rms}$	78

Figura 19 – Zoom nas janelas de processamento para P_x e P_y , fase R, antes e após o alinhamento temporal estabelecido pela RmsSync (Rótulo do eixo Y: V. v.: <i>Voltage variability</i> ou em português variabilidade de tensão).	78
Figura 20 – Fases R, S e T de P_x e P_y , após o alinhamento temporal, janela de processamento e <i>zoom</i> entre 100 e 180 ciclos (Rótulo do eixo Y: V. v.: <i>Voltage variability</i> ou em português variabilidade de tensão).	79
Figura 21 – Valores rms para as fases de P_x , dados originais.	82
Figura 22 – Valores rms para as fases de P_x , dados filtrados.	82
Figura 23 – Valores rms para as fases de P_y , dados originais.	83
Figura 24 – Valores rms para as fases de P_y , dados filtrados.	83
Figura 25 – Fases R de P_x e P_y , sinais filtrados, antes e após o alinhamento temporal (Rótulo do eixo Y: V. v.: <i>Voltage variability</i> ou em português variabilidade de tensão).	84
Figura 26 – Fases R de P_x e P_y , sinais não filtrados, antes e após o alinhamento temporal.	85
Figura 27 – Fases R, S e T de P_x e P_y , sinais filtrados, após o alinhamento temporal (Rótulo do eixo Y: V. v.: <i>Voltage variability</i> ou em português variabilidade de tensão).	86
Figura 28 – Valores rms das fases de P_x (sala 1110), sinais filtrados.	87
Figura 29 – Valores rms das fases de P_y (sala 2514), sinais filtrados.	87
Figura 30 – Fases R de P_x (sala 1110) e P_y (sala 2514), sinais filtrados, antes e após o alinhamento temporal (Rótulo do eixo Y: V. v.: <i>Voltage variability</i> ou em português variabilidade de tensão).	88
Figura 31 – Fases R de P_x (sala 2514) e P_y (lab 2514), sinais não filtrados, após o alinhamento temporal (Rótulo do eixo Y: V. v.: <i>Voltage variability</i> ou em português variabilidade de tensão).	88
Figura 32 – Sinais das fases de P_x (lab 1110) e P_y (lab 2514), sinais filtrados, após o alinhamento temporal (Rótulo do eixo Y: V. v.: <i>Voltage variability</i> ou em português variabilidade de tensão).	89
Figura 33 – Duas unidades do protótipo MIQE em bancada	94
Figura 34 – MIQE: visão interna do protótipo	96
Figura 35 – Diagrama de implantação do protótipo MIQE	97
Figura 36 – Gerador de Sinais Kkmoon modelo FY6900-60M	101
Figura 37 – MIQE: ajuste em bancada com osciloscópio Hantek modelo DSO4254C	101
Figura 38 – Etapas das Operações de Medição de QEE	102
Figura 39 – Amostragem, DMA, <i>Buffer</i> , Pré-processamento e Mensagem do tipo JSON	105
Figura 40 – Primitivas de comunicação do protótipo MIQE	106
Figura 41 – Persistência de uma campanha de medição	107

Figura 42 – Curvas de ajuste da placa de amostragem	109
Figura 43 – Valores rms de P_x	110
Figura 44 – Variabilidades rms de P_x	110
Figura 45 – Medição de P_x	118
Figura 46 – Medição de P_x	119
Figura 47 – P_x após filtrar	119
Figura 48 – Medição de P_y	119
Figura 49 – P_y após filtrar	119
Figura 50 – P_x e P_y , fases R	119
Figura 51 – Sinais alinhados	119
Figura 52 – Campanha 464: Fases R	120
Figura 53 – Campanha 464: Fases T	120
Figura 54 – Campanha 464: Fase S de P_x e P_y alinhadas	120
Figura 55 – Campanha 542: Fases R	122
Figura 56 – Campanha 542: Fases S	122
Figura 57 – Campanha 542: Fase T de P_x e P_y após alinhamento temporal	122
Figura 58 – Fases R de P_x alinhadas	124
Figura 59 – Fases R de P_y alinhadas	124
Figura 60 – Variabilidades rms de P_x	125
Figura 61 – Variabilidades rms de P_y	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Índices de correlação cruzada usando os valores instantâneos dos sinais.	61
Tabela 2 – Índices de correlação cruzada usando as séries temporais de valores rms calculados ciclo a ciclo.	62
Tabela 3 – Atrasos (Índices de correlação cruzada) usando os valores rms ciclo a ciclo.	64
Tabela 4 – RmsSync: Acurácias.	65
Tabela 5 – Limites para os valores das resistências elétricas para carregamento baixo do transformador e variabilidade de 10 % das cargas elétricas de potências variáveis.	74
Tabela 6 – RmsSync: Acurácias.	76
Tabela 7 – Atraso de tempo em ciclos (Índice de correlação cruzada).	77
Tabela 8 – Características dos osciloscópios.	81
Tabela 9 – Deslocamento de tempo em ciclos (Índice de correlação-cruzada). . . .	81
Tabela 10 – Deslocamento no tempo em ciclos (Índice de correlação-cruzada). . . .	84
Tabela 11 – RmsSync: Acurácias.	86
Tabela 12 – Desvio padrão.	89
Tabela 13 – Ajuste do MIQER (M) utilizando um Gerador de Sinais (G)	108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADC	<i>Analogic Digital Conversor</i>
AD	<i>Analogic to Digital Conversion</i>
AMI	<i>Advanced Metering Infrastructure</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ARM	<i>Advanced RISC Machine</i>
BT	Baixa Tensão
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CCF	<i>Cross-Correlation Function</i>
CEFET	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CPH	Centro de Pesquisa e Recursos Hídricos
DAC	<i>Digital to Analogic Conversor</i>
DHCP	<i>Dynamic Host Configuration Protocol</i>
DMA	<i>Direct Memory Access</i>
DSP	Digital Signal Processor
EE	Escola de Engenharia
FAPEMIG	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FPU	<i>Float point unit</i> , ou Unidade de Ponto Flutuante em português.
FP	Fator de Potência
GD	Geração Distribuída

GPS	<i>Global Position System</i>
HVAC	<i>Heating, Venting, and Air Conditioning</i>
IFMG	<i>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais</i>
IRUP	<i>IBM Rational Unified Process</i>
LAPIS	Laboratório de Aplicações e Processamento de Informações e Sinais
LCE	Laboratório de Compatibilidade Eletromagnética
MIQE	Medidor Industrial de Qualidade da Energia Elétrica
MVP	<i>Minimum Viable Product</i>
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
NTP	<i>Network Time Protocol</i>
OO	Orientação à objetos
PC	<i>Personal Computer</i>
PIC	<i>Programmable Interface Controllers</i>
PPGEE	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
PPGIT	Programa de Pós-Graduação em Inovação Tecnológica
PTP	<i>Precision Time Protocol</i>
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
QE	Qualidade da Energia
RISC	<i>Reduced Instruction Set Computer</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RUP	<i>Rational Unified Process</i>
RmsSync	<i>RMS time-alignment synchronization technique</i>
SE	Sistemas de Energia
SG	<i>Smart Grids</i>
SIG	Sistemas de Informação Gerenciais
SI	Sistemas de Informação

SMDQEE	Sistemas de Monitoramento Distribuído de Qualidade da Energia Elétrica
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TI	Tecnologia da Informação
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto
UML	<i>Unified Modeling Language</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Objetivos	26
1.1.1	Gerais	26
1.1.2	Específicos	26
1.2	Justificativa e Relevância	27
1.3	Metodologia	29
1.4	Principais Contribuições	30
1.5	Estrutura e Organização da Tese	31
2	REFERENCIAL TEÓRICO	33
2.1	<i>Smart Grids, Advanced Metering Infrastructure e Internet Of Things</i>	34
2.2	Qualidade da Energia Elétrica (QEE)	40
2.3	Sincronização de Relógios em Sistemas de Energia	43
2.4	Função de Correlação-Cruzada	46
2.5	Algumas Iniciativas de Medidores de QEE Alinhadas com a Visão das AMIs	51
2.6	Conclusões do Capítulo	55
3	RmsSync: UMA TÉCNICA INOVADORA PARA ALINHAMENTO TEMPORAL DE MEDIÇÕES NÃO SINCRONIZADAS	56
3.1	Introdução	57
3.1.1	Variações dos Perfis de Tensão de Uma Rede Elétrica	57
3.1.1.1	Magnitude das Variações	58
3.1.1.2	Simulações das Variações	58
3.1.1.3	Testes com a Função de Correlação Cruzada	60
3.1.2	Passos para Aplicação da Técnica RmsSync	61
3.2	Pareamento da Técnica RmsSync com Referências Bibliográficas Mais Próximas	65
3.3	Simulações Utilizando o PSCAD TM	69
3.3.1	Variabilidade dos Perfis de Tensão da Rede Elétrica	71
3.3.2	Simulações pelos Tipos de Carregamentos dos Transformadores	73
3.4	Testes de Performance da Técnica RmsSync com Medições Simuladas no PSCAD TM	75
3.4.1	Acurácias da RmsSync	75
3.4.2	Acurácias da Técnica RmsSync: Execução Única	76
3.4.3	Aplicação da Técnica RmsSync para Identificação Física dos Condutores e Sequência de Fases de uma Rede Elétrica Polifásica	79
3.5	Testes da Técnica RmsSync Com Medições de Campo	80

3.5.1	Primeira Campanha de Medição	81
3.5.2	Segunda Campanha de Medição	83
3.6	Alguns Resultados Estatísticos da Técnica RmsSync	86
3.7	Conclusões do Capítulo	90
4	MIQE: PROTÓTIPO DE UM MEDIDOR DE QUALIDADE DA ENER-	
	GIA ELÉTRICA (QEE)	92
4.1	Introdução	93
4.2	Amostragem em Condições Desafiadoras	95
4.3	Principais Provas de Conceito	99
4.3.1	Seleção dos Kits DSP	99
4.3.2	Camada de Medição e Pré-Processamento	99
4.3.2.1	Módulo de Amostragem	102
4.3.2.2	Módulo de Pré-Processamento das Medições	104
4.3.3	Camada de Transmissão, Persistência e Processamento dos Dados .	106
4.4	Primeiros Testes em Bancada	107
4.5	Conclusões do Capítulo	111
5	PROTÓTIPO MIQE E O MODO DE OPERAÇÃO RMSSYNC	113
5.1	Introdução	114
5.2	MIQE: Estratégia para a Implementação do <i>Modo de Operação RmsSync</i> .	115
5.3	MIQE Modo RmsSync: Medições e Testes na Sala 1110 (Laboratório LAPIS)	116
5.3.1	MIQE Modo RmsSync: Versão Trifásica do Protótipo e Testes na	
Sala 1110 (Laboratório LAPIS)	118	
5.4	MIQE Modo RmsSync: Medições e Testes na Sala 1111 (Oficina da Escola	
de Engenharia da UFMG)	121	
5.5	MIQE Modo RmsSync: Medições e Testes na Sala 2514 (Laboratório de	
Compatibilidade Eletromagnética, LCE)	123	
5.6	Conclusões do Capítulo	125
6	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	126
6.1	Conclusões	126
6.2	Propostas de Trabalhos Futuros	127
	REFERÊNCIAS	129
	A APÊNDICE — INFORMAÇÕES SOBRE O AUTOR E ORIENTA-	
	DOR	136
A.1	Autor: Geraldo Pereira de Souza	136
A.2	Orientador: Prof. Dr. Wallace do Couto Boaventura	137

1 INTRODUÇÃO

A comunidade científica, a indústria, os agentes públicos e diversos interessados ao redor do mundo estão empenhados em estabelecer um novo marco para as redes elétricas convencionais. O principal objetivo é migrar, ou modernizar, as antigas estruturas para um novo conceito de redes elétricas que sejam mais flexíveis, inteligentes, abertas e preparadas para atender principalmente a diversificação e o aumento constante da demanda por energia elétrica, ou simplesmente energia. Em contrapartida, espera-se que os diversos tipos de consumidores ao redor do mundo tornem-se mais conscientes e façam uso mais eficiente e racional da energia, principalmente por questões de custos, já que esse é um insumo essencial para a nossa sobrevivência e está a cada dia mais demandado e caro. As redes elétricas do futuro têm sido chamadas de *Smart Grids (SGs)* pelas comunidades científicas ao redor do mundo (FARHANGI, 2010) e (HEYDT, 2010).

As redes elétricas na configuração atual e de um modo geral não estão preparadas para dar suporte às novas e crescentes demandas do setor elétrico. O Brasil em especial está em uma posição bem desfavorável nesse quesito. Novos desafios como dar suporte aos veículos elétricos, integração com as novas fontes geradoras de energia da geração distribuída (GD), cobertura e atendimento aos requisitos de um mundo cada dia mais digitalizado, etc.; são apenas alguns exemplos de problemas a serem resolvidos (FANG et al., 2012). Outra carência crítica nas SGs está relacionada à necessidade de desenvolvimento de novos sistemas de hardwares e/ou softwares com escopos diferentes, como para aplicações de faturamento, proteção, gestão e/ou para o monitoramento de ativos diversos das redes (SHAHIDEHPOUR, 2010). Espera-se também uma melhor integração com os vários sistemas já existentes e em funcionamento de áreas diversas.

Nas SGs, a demanda por novos equipamentos de medição, seja para fins de faturamento e/ou para o monitoramento da qualidade da energia elétrica (QEE) tem exigido sistemas mais integrados, flexíveis e robustos (GUERRERO, 2017) e (PERERA; SABIN, 2017). Dentre as várias mudanças a serem destacadas pode-se citar, por exemplo, o fluxo de energia que nas SGs pode ser bidirecional nos vários pontos de conexão entre fornecedores e consumidores de energia (MORELLO et al., 2017). Os consumidores que antes tinham a opção de apenas comprar e serem abastecidos por um fornecedor de energia que atendesse a sua localidade, no modelo das SGs têm a opção de injetar o excedente da sua geração/produção nos sistemas elétricos. A operação pode estar associada a uma compensação por permuta de negociação/transação de troca de energia ou até mesmo a venda do excedente da sua produção para interessados diversos. Já o monitoramento da QEE é uma operação necessária e praticamente mandatária nos dias atuais para quaisquer que sejam os tipos e tamanhos das redes elétricas. As empresas precisam

monitorá-las para que se tenha informações precisas sobre a QEE e/ou para evitar a propagação de uma energia de baixa qualidade pelas camadas dos sistemas elétricos (SE). Além do mais, o monitoramento da QEE é uma atividade que deve ser feita independente do sentido do fluxo da energia ou de quem esteja atuando como fornecedor/consumidor em um determinado momento. Ao consumidor, há o interesse de saber se a energia que ele está comprando/recebendo é de boa qualidade. E do ponto de vista do fornecedor, é necessário garantir que o seu produto não seja passível de questionamentos por parte dos consumidores devido à baixa qualidade. É necessário monitorar a QEE em todos os seus percursos, desde os pontos de geração até os pontos de consumo da energia, para detectar e tratar possíveis fontes de contaminação que possam comprometer a qualidade do produto.

Os equipamentos medidores de energia requeridos para as SGs têm sido chamados de medidores inteligentes de energia (MORALES-VELAZQUEZ et al., 2017) e fazem parte das chamadas *Advanced Metering Infrastructure* (AMI). Os projetos e a visão estratégica das *Smart Grids* apontam oito áreas-chaves a serem desenvolvidas prioritariamente e o desenvolvimento das AMI é uma delas (GREER et al., 2014) e (GUNGOR et al., 2013). A qualidade da energia está associada às formas de onda, fase e frequência dos sinais de tensão e/ou corrente das redes elétricas, sejam elas de baixa (BT), média (MT) ou alta tensão (AT) (DUGAN et al., 2004). A frequência dos sinais nos sistemas elétricos convencionais pode ser de 50 ou 60 Hz. Já os sistemas elétricos não convencionais podem adotar e trabalhar com outros valores de frequências, como os navais que operam com frequências típicas da ordem de 400 Hz (TARASIUK; MINDYKOWSKI, 2012) e (MINDYKOWSKI; TARASIUK, 2010). O sistema elétrico brasileiro opera com frequência de 60 Hz e diz-se que a energia elétrica tem boa qualidade se os sinais são senoidais, não apresentam distúrbios e operam dentro dos limites estabelecidos pela agência reguladora do sistema elétrico brasileiro. No Brasil, a entidade reguladora é a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), autarquia vinculada ao Ministério das Minas e Energia. A resolução normativa ANEEL nº 956/2021 entrou em vigor em 1º de janeiro de 2022 e estabelece os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - (PRODIST, 2021). Este trabalho está mais relacionado aos módulos 8, que regulamenta os parâmetros referentes à qualidade da energia elétrica, e 5, que aborda os sistemas de medição e procedimentos de leitura.

Muitos são os desafios para a medição da qualidade da energia de uma planta industrial nas configurações e requisitos das SGs. Pode-se destacar, por exemplo, a amostragem em condições desafiadoras exigida nos projetos dos novos equipamentos medidores. Normalmente os equipamentos devem suportar e operar com uma quantidade crescente de distúrbios, eventos e pontos de medição em uma configuração denominada medição distribuída. As medições de diferentes pontos de uma rede elétrica geralmente devem ser feitas de forma simultânea, contínua e correlacionadas para que se tenha uma visão ampla

e integrada do estado da rede elétrica e dos eventos/distúrbios que se deseja monitorar. Tanto na medição distribuída quanto do ponto de vista do usuário, um conjunto de equipamentos medidores deverão ser vistos de forma transparente como um único equipamento medidor de QEE, para um conjunto de eventos/distúrbios que se deseja monitorar. Analogia feita com o conceito de um sistema distribuído em sistemas computacionais, onde um conjunto de computadores independentes interligados em rede devem ser vistos pelo usuário como uma única máquina (COULOURIS et al., 2013). Nos dois tipos de sistemas, deve-se idealmente acertar e manter os relógios dos diversos equipamentos atualizados utilizando a mesma referência temporal. No caso de um sistema computacional, embora eventuais erros na sincronização dos relógios seja problemática, o problema não impede o funcionamento geral dos sistemas. Situação diferente para o caso de uma medição distribuída de QEE, na qual é mandatória a sincronização dos relógios dos equipamentos medidores para que as medições possam ser correlacionadas. Ou, alternativamente, deve haver algum mecanismo que permita que as campanhas de medições geradas pelos diversos equipamentos em rede sejam alinhadas temporalmente em um pós-processamento, ou seja, após a etapa de medição das campanhas.

Dentre as contribuições desta tese, será abordada, no capítulo 3, a técnica RmsSync (*RMS time-alignment synchronization technique*). A técnica permite estabelecer alinhamento temporal para campanhas de medições não sincronizadas, ou seja, geradas por equipamento medidores que tenham operado com relógios defasados. A técnica RmsSync é uma importante contribuição para o desenvolvimento de novos equipamentos medidores de energia, *Internet Of Things (IoT)* (KABUGO et al., 2020) e automação de subestações (AFTAB et al., 2020), pois é uma alternativa para aumentar a disponibilidade e a continuidade dos serviços de medições mesmo que os relógios dos medidores estejam defasados. O núcleo principal da técnica RmsSync é implementado sobre a função estatística clássica de correlação cruzada, mas calculada não sobre os valores instantâneos dos sinais de tensão e, sim, sobre as séries temporais de valores rms (*Root Mean Square*) calculados ciclo a ciclo. Os perfis de tensão das redes elétricas apresentam assinaturas únicas que ficam ainda mais evidentes quando se trabalha com os seus valores eficazes calculados ciclo a ciclo. Tal dinâmica se deve às variações estocásticas dos sinais de tensão causadas em grande parte pelos diferentes tipos de acionamentos e desligamentos de cargas ao longo das redes elétricas. Seus efeitos se propagam por toda a extensão das redes elétricas, a partir de diferentes níveis de tensão e setores da rede. Tais variações também são influenciadas pela dinâmica característica das fontes de tensão dos alimentadores das redes elétricas nos pontos de conexão que apresentam pequenas variabilidades estocásticas.

Outro ponto a ser destacado é que o compartilhamento da técnica RmsSync é bastante relevante para o desenvolvimento de novos equipamentos medidores, pois permitirá que os projetos sejam mais econômicos em comparação com outras abordagens de sincronização de relógios, conforme será abordado no capítulo 3. A integração e implementação

da técnica torna possível que os equipamentos medidores em uma medição distribuída de QEE operem de forma contínua e não dependam da sincronização dos relógios dos equipamentos. A técnica pode ser aplicada também para a identificação física de cabos condutores em um sistema elétrico polifásico. Esse tipo de aplicação é bastante útil na indústria, pois contribui para a diminuição de custos, aumento da segurança e eficiência em eventuais intervenções de manutenção e/ou mudança de configuração da rede elétrica.

Como orientação e requisito para os projetos de novos equipamentos medidores de qualidade de energia, a norma brasileira estabelece a utilização de medições de até o 50° harmônico como referência para o sistema elétrico brasileiro (PRODIST, 2021). Considerando esse requisito, bem como a frequência de uma rede elétrica de 60 Hz e o princípio da frequência de Nyquist para evitar o efeito de *aliasing* na reconstrução dos sinais (OPPENHEIM; SCHAFER; BUCK, 1999), adotou-se, nos testes em bancada e nas prototipagens, a frequência de amostragem de referência de 15.360 amostras por segundo, o que corresponde a 256 amostras por ciclo de um sinal de 60 Hz, conforme será detalhado ao longo desta tese. Considerando as redes elétricas polifásicas e dependendo dos eventos e distúrbios a serem monitorados, pode ser necessário aplicar, além das altas taxas de conversão analógico/digital (AD), uma configuração em que as amostragens dos canais tenham de ser feitas de forma simultânea. Tais requisitos exigem sistemas digitais com hardwares mais robustos e que os seus módulos de amostragem sejam equipados com mais de um conversor AD (ou ADC), para a maioria das medições a serem realizadas. Outro ponto a ser destacado é que no geral as medições geram um grande volume de dados, quando configuradas com altas taxas de amostragem e considerando medições de vários pontos de forma simultânea e distribuída. Logo, é necessário criar estratégias que permitam que os sistemas digitais executem de forma eficiente as operações de medição, processamento e armazenamento das campanhas de medições. Se forem consideradas medições remotas, o que tem se tornado cada vez mais comum nas plataformas de medições atuais, é necessário empregar um esforço extra para a transmissão segura e eficiente dos dados via rede Ethernet.

Muitas das técnicas de programação exigidas nos projetos dos novos medidores de energia têm dinâmica de várias operações matemáticas do tipo MAC (*Multiply and Accumulate*). As operações de somatórios, por exemplo, muito comuns nos arcabouços matemáticos das operações de processamento de sinais, basicamente se resumem a operações de multiplicação e soma. Os chamados DSP (*Digital Signal Processors*) são processadores desenvolvidos especialmente para executar de forma eficiente muitas operações do tipo MAC. Já os chamados kits DSPs são placas eletrônicas equipadas com um ou mais processadores do tipo DSP e possuem hardwares e bibliotecas de softwares capazes de dar o suporte necessário ao desenvolvimento rápido de sistemas digitais que exigem amostragem em condições desafiadoras e críticas. No geral, os kits são equipados com um ou mais processadores do tipo DSPs, barramentos de alta velocidade, canais que permitem execu-

tar transferência direta de dados entre ADCs e memória (*Direct Memory Access-DMA*), ADCs paralelos com resoluções de até 16 *bits* e que operam com altas taxas de conversão AD. Possuem também suporte para comunicação via rede Ethernet, botões, chaves e outros periféricos diversos dependendo do kit. Todas essas características e disponibilidade de hardwares avançados e robustos são facilitadores para a prototipação e construção de novos equipamentos medidores de energia.

Nos projetos de novos medidores de energia, apenas os requisitos e a disponibilidade de hardwares e softwares abordados nos parágrafos anteriores não é o bastante. É necessário também que os projetistas e desenvolvedores criem mecanismos e estratégias adicionais que permitam executar as operações de amostragem e processamento de sinais em condições desafiadoras de forma eficiente, para contornar as várias limitações e restrições, principalmente de hardware e janelas de tempo reduzidas. No capítulo 4 da tese, será apresentada uma estratégia bastante robusta baseada na utilização de conversores ADCs paralelos, canais DMAs e *buffers*, que pode ser customizada e adaptada em projetos de novos medidores de energia e que tenham como requisito executar amostragem de sinais em condições desafiadoras. A estratégia foi utilizada no módulo de amostragem do protótipo MIQE (Medidor Industrial de Qualidade da Energia Elétrica), construído durante os trabalhos de doutoramento e baseado em uma arquitetura robusta de processamento de sinais utilizando processadores do tipo DSP. O protótipo, embora em sua versão inicial, é capaz de realizar operações de amostragem em condições desafiadoras e críticas. Além disso, pode ser aplicado para executar medições de forma distribuída e de forma remota, ou seja, em rede. O protótipo incorpora parcialmente a técnica RmsSync e os modos de operação que permitem medir de forma distribuída o espectro harmônico e as potências reais e reativas de uma rede elétrica polifásica.

De forma sucinta, pode-se associar o termo “amostragem em condições desafiadoras” ao requisito de medir e amostrar os sinais de tensão e/ou corrente de uma rede elétrica utilizando altas taxas de conversão AD e de forma simultânea, requisitos quase que mandatórios para equipamentos de medição das AMIs. Se o sistema digital tiver essa capacidade, o restante do esforço computacional a ser empregado pode ser resumido e concentrado no emprego de técnicas de processamento de sinais (OPPENHEIM; SCHAFER; BUCK, 1999) para processar e extrair as informações de interesse sobre a QEE das plantas industriais. Medidor de energia e medidor de qualidade da energia elétrica, sob a ótica da amostragem dos sinais de tensão e/ou corrente de uma rede elétrica em condições desafiadoras e críticas pode ser entendido como sendo um mesmo equipamento. Logo, quando for mencionado o termo medidor de energia ou medidor de QEE neste documento, trata-se do mesmo equipamento.

Para melhor organização do capítulo, os objetivos gerais e específicos são abordados na seção 1.1, a justificativa e a relevância da pesquisa na seção 1.2. Em 1.3, é

apresentada a metodologia utilizada para a realização dos trabalhos e, em 1.4, são elencadas as principais contribuições até a escrita deste documento. Já em 1.5, é apresentada a organização e a estrutura da tese.

1.1 Objetivos

1.1.1 Gerais

Este trabalho tem como objetivo pesquisar, modelar e desenvolver novas técnicas e mecanismos que apoiem a criação de medidores inteligentes para a qualidade da energia elétrica (QEE) das *Advanced Metering Infrastructure* (AMIs). Essas soluções visam proporcionar o monitoramento remoto e distribuído da QEE, com ênfase na disponibilidade, segurança e continuidade dos serviços de medição. Como parte desse esforço, foram desenvolvidos a técnica RmsSync e o protótipo MIQE (Medidor Industrial de Qualidade da Energia Elétrica), que representam avanços significativos na criação de uma plataforma de medição de QEE, voltada para empresas e consumidores com diferentes necessidades de monitoramento da qualidade da energia elétrica.

1.1.2 Específicos

A partir da definição dos objetivos gerais do trabalho, pode-se destacar os principais objetivos específicos elencados desde o início das atividades:

1. Pesquisar e entender melhor a dinâmica das pequenas variabilidades estocásticas presentes nos perfis de tensão das redes elétricas e como tal fenômeno poderia ser utilizado e aplicado para o desenvolvimento de novas técnicas e equipamentos para a medição de energia;
2. Pesquisar e desenvolver novas técnicas que permitam realizar o alinhamento temporal de campanhas de medições não sincronizadas, ou seja, geradas por equipamentos que tenham operado com relógios defasados. Os resultados obtidos nessa etapa dos trabalhos propiciaram e levaram ao desenvolvimento da técnica RmsSync, utilizando os resultados obtidos na etapa 1 desta seção, e que será abordada no capítulo 3 da tese;
3. Pesquisar e desenvolver novas técnicas que permitam fazer o monitoramento da QEE de vários pontos de uma rede elétrica, de forma remota, distribuída e garantindo a simultaneidade das medições. O monitoramento de vários pontos de uma rede elétrica tem por objetivo proporcionar o correlacionamento dos eventos/distúrbios ocorridos em diferentes pontos da rede elétrica, de forma a proporcionar uma visão ampla e integrada da rede elétrica;

4. Validar um modelo arquitetural robusto, de hardware e software, que permita fazer a amostragem de sinais de tensão e/ou corrente em sistemas de energia e em altas taxas de amostragem. Os hardwares pesquisados, os softwares e o modelo arquitetural desenvolvido serviram de base para a construção do protótipo nomeado MIQE, que permite fazer medições de forma remota, distribuída e contínua; e será abordado nos capítulos 4 e 5 da tese.

1.2 Justificativa e Relevância

O desenvolvimento de novos modelos, técnicas e equipamentos de medição é uma atividade crítica e já apontada como estratégica para o desenvolvimento das AMIs, no projeto das SGs. Em um contexto de medição distribuída em sistemas de energia, no qual vários equipamentos medidores operando em rede podem ser utilizados para gerar medições de diferentes pontos de uma rede elétrica, muitos desafios devem ser vencidos para permitir medições de energia seguras, confiáveis e escaláveis. Um desses desafios está relacionado à sincronização dos relógios dos diversos equipamentos. Alternativamente, pode-se aplicar alguma técnica que permita estabelecer alinhamento temporal para as campanhas de medições não sincronizadas. Esse tipo de pesquisa e estudos são críticos e muito importantes para o desenvolvimento de novos equipamentos medidores de energia de acordo com a visão das SGs. Tais equipamentos podem ter escopo para a medição de energia para fins de faturamento e/ou para o monitoramento de eventos/distúrbios, como os de qualidade da energia elétrica, referência principal e foco deste trabalho de doutoramento.

O monitoramento da qualidade da energia das redes elétricas está para o bom funcionamento e detecção de problemas em uma planta industrial, assim como os exames estão para o bom diagnóstico e tratamento das doenças na área médica. Indo mais além, é necessário se antecipar para que os problemas nas plantas industriais nem aconteçam, e monitorar as redes elétricas e a qualidade da sua energia é primordial e mandatário nos sistemas elétricos, independente do porte das organizações e instalações. No capítulo 2 da tese, serão apresentados trabalhos que justificam a importância de se criar novos modelos, técnicas e serviços que contribuam para o monitoramento das redes elétricas, em especial, que tenham foco no monitoramento da QEE em uma configuração de medição distribuída. O trabalho de doutoramento, a implementação do protótipo MIQE e principalmente o desenvolvimento da técnica RmsSync, têm grande relevância por estarem alinhados às orientações e necessidades de se criar novos modelos, serviços e aplicações que ajudem na evolução das redes elétricas brasileiras para as configurações das *Smart Grids*.

Dentre os objetivos para as redes elétricas brasileiras, é notório o desejo e necessidade de se aumentar características como confiabilidade, eficiência, disponibilidade,

segurança, sustentabilidade e integração com as novas fontes renováveis de energia. As redes elétricas precisam estar preparadas para atender as novas demandas e cargas, como os veículos elétricos e os novos equipamentos eletroeletrônicos, mantendo os padrões de QEE estabelecidos pelos órgãos reguladores. No que diz respeito a receber novas cargas elétricas, principalmente eletrônicas, que já é sabido serem grandes degradadores e poluidores da QEE, novos problemas e distúrbios também precisam ser tratados. Se não for possível controlar, é necessário pelo menos medir e gerenciar os distúrbios, como o de conteúdo harmônico advindo de novas cargas eletrônicas. A iniciativa deste trabalho de doutoramento está alinhada com os grandes esforços mundiais para definir novos padrões para uma rede elétrica que seja flexível, adaptável e esteja preparada para o aumento da complexidade advinda das crescentes inovações tecnológicas e aumento da demanda dos setores de energia.

A etapa inicial dos trabalhos englobou principalmente pesquisas e estudos sobre a sincronização de relógios em sistemas de energia e técnicas aplicadas para estabelecer alinhamento temporal para campanhas de medições não sincronizadas, ou seja, geradas por equipamentos com relógios defasados. O motivo dessa escolha se deu pelo fato de que o problema da sincronização de relógios ser crítico e amplamente conhecido pela comunidade científica mundial e pode ser aplicado em quaisquer que sejam os tipos de redes de equipamentos medidores equipados com relógios autônomos. O resultado desse esforço foi o desenvolvimento da técnica RmsSync e foi de fundamental importância para a continuidade dos trabalhos. A técnica pode ser aplicada em projetos para desenvolver novos equipamentos medidores para sistemas de energia e para áreas diversas. No contexto e situações onde não for possível garantir a sincronização dos relógios dos equipamentos medidores em uma configuração de medição distribuída, pode-se aplicar a técnica RmsSync para estabelecer o alinhamento temporal das campanhas não sincronizadas, como será demonstrado no capítulo 3 desta tese.

O desenvolvimento do protótipo MIQE permitiu que fosse testado e definido um modelo arquitetural completo para um sistema de medição distribuído de energia, utilizando as abordagens e uma visão inovadora do que se espera para o projeto de novos equipamentos de medição de QEE. O desenvolvimento da técnica RmsSync e a sua integração ao MIQE, mesmo que ainda parcial como poderá ser visto nos capítulos 4 e 5 da tese, foi um grande desafio vencido e uma relevante contribuição a ser destacada. Alinhado a tudo isso, há ainda uma forte recomendação das agências de fomento brasileiras, que passam por uma escassez de recursos financeiros. A recomendação é que: “as pesquisas brasileiras sejam pensadas e orientadas para atender às reais necessidades da sociedade e não se limitem apenas às publicações”¹. Sendo assim, o desenvolvimento da técnica

¹ Menção do então presidente da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) Sr. Evaldo Ferreira Vilela proferida durante evento do Programa de Pós-graduação em Inovação Tecnológica da UFMG (PPGIT), em setembro de 2018.

RmsSync e a implementação do protótipo MIQE têm potencial e grande relevância não só de pesquisa, mas também para o mercado industrial brasileiro. Os estudos podem ser um ponto de partida para o desenvolvimento de novos serviços diferenciados e inovadores sobre o monitoramento de QEE destinado às pequenas e médias empresas brasileiras, que na maioria das vezes não dispõe de recursos e pessoal habilitado para executar tais atividades.

1.3 Metodologia

Durante a execução das atividades do doutoramento, procurou-se adotar uma filosofia de trabalho alinhado à: (i) pesquisa nas melhores bases de referências científicas, com prioridade para periódicos e revistas de renome ligados a problemas e desafios nas áreas de qualidade da energia elétrica e desenvolvimento de novos equipamentos e técnicas para a medição energia, (ii) simulação dos conceitos mais importantes e críticos em softwares especialistas de transitórios eletromagnéticos, (iii) montagem e testes em bancada dos novos conceitos pesquisados/desenvolvidos utilizando equipamentos como gerador de sinais, osciloscópios, *protoboard* e kits DSPs; (iv) prototipação dos principais conceitos que dêem suporte ao desenvolvimento de novas técnicas e equipamentos medidores inteligentes e inovadores de QEE e, por último, (v) testes de medições em campo. Os testes foram realizados parcialmente no Laboratório de Aplicações e Processamento de Informações e Sinais (LAPIS) localizado na Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), redes elétricas da UFMG e em redes elétricas residenciais, conforme será apresentado no capítulo 5 da tese. De forma detalhada, a metodologia adotada compreendeu:

1. Levantamento bibliográfico, pesquisas e maior aprofundamento nos conceitos, distúrbios, eventos, problemas e desafios mais críticos para o desenvolvimento de novas técnicas, serviços e equipamentos de medição em sistemas de energia;
2. Pesquisas e verificação em laboratório das variabilidades estocásticas dos perfis de tensão que definem assinaturas únicas para os sinais de tensão das redes elétricas. As variabilidades estocásticas dos perfis de tensão são necessárias para a aplicação da técnica RmsSync, conforme será abordado no capítulo 3 da tese;
3. Simulação das variabilidades estocásticas dos perfis de tensão das redes elétricas no software MatlabTM e PSCADTM. No capítulo 3, serão abordados e apresentados os projetos de simulação desenvolvidos;
4. Programação preliminar da técnica RmsSync no MatlabTM. A implementação foi testada para executar o alinhamento temporal de campanhas de medições não sincronizadas simuladas no MatlabTM e PSCADTM;

5. Medição dos sinais de tensão em diferentes pontos da rede elétrica da UFMG utilizando osciloscópios;
6. Validação da técnica RmsSync utilizando os dados das medições realizadas com o auxílio de osciloscópios (etapa 5). A técnica foi empregada para estabelecer o alinhamento temporal de medições que, por natureza, não são sincronizadas;
7. Testes em bancada e prototipação do MIQE;
8. Primeiros testes do MIQE em campo, conforme será abordado no capítulo 5 do documento;
9. Refinamento do protótipo MIQE para melhorar as blindagens eletromagnéticas, principalmente nos cabos utilizados para a aquisição de sinais.

1.4 Principais Contribuições

As principais contribuições resultantes deste trabalho de tese podem ser destacadas como segue:

1. Implementação e publicação da técnica RmsSync (*RMS time-alignment synchronization technique*): técnica inovadora para alinhamento temporal de campanhas de medições não sincronizadas. A técnica é uma grande contribuição e pode ser utilizada em projetos de novos equipamentos medidores em sistemas de energia com objetivos e escopos diversos. Cabe destacar que os autores estão providenciando junto à Coordenadoria de Transferência e Inovação Tecnológica (CTIT) da UFMG, o registro da patente da técnica;
2. Protótipo MIQE: a integração do protótipo com kits DSP e ARM equipados com periféricos diversos como módulos DMA, rede Ethernet, ADCs paralelos e unidades de processamentos de alto desempenho, serviu de base para a definição de um modelo arquitetural de hardware e software que pode ser utilizado para o desenvolvimento e construção de equipamentos medidores diversos. Ressalta-se que, na versão atual, o MIQE realizou medições de tensão em redes de energia elétrica trifásicas em condições distribuídas, tendo, com sucesso, reconstituído o sincronismo das medições através da técnica RmsSync. A menção à medição de qualidade da energia (QE) é pertinente devido à vocação e potencialidade da aplicação da técnica RmsSync neste contexto;
3. Conforme será abordado no capítulo 3, a técnica RmsSync pode ser customizada e adaptada para fazer a identificação física de cabos condutores em redes elétricas polifásicas. Essa é uma grande contribuição para o setor industrial e de muito interesse para as comunidades da área de sistemas de energia.

A técnica RmsSync foi publicada no artigo da revista IJEPES (International Journal of Electrical Power and Energy Systems), classificação A1 e fator de impacto 5.659, em 2023:

- **G. P. de Souza** and W. do Couto Boaventura. Time-alignment of electrical network measurements through time series of cycle RMS values. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 144:108518, jan 2023. doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108518.

O campo de aplicação da técnica RmsSync e do protótipo MIQE é vasto e os autores pretendem apresentar novas publicações neste contexto.

1.5 Estrutura e Organização da Tese

Para uma melhor organização e para facilitar a leitura, a tese foi dividida em cinco capítulos e apêndices, a saber:

- Capítulo 1: **Introdução**: foi feita uma contextualização do projeto de doutoramento, bem como apresentados os objetivos, a justificativa, a motivação, a relevância, a metodologia utilizada e as principais contribuições do trabalho;
- Capítulo 2: **Referencial Teórico**: aborda o referencial teórico que deu sustentação à realização do trabalho. Dentre os vários temas pesquisados e abordados no capítulo, merecem destaque e foco trabalhos relacionados às áreas das *Smart Grids* (SGs), *Advanced Metering Infrastructure* (AMI), qualidade da energia elétrica (QEE), sincronização de relógios e técnicas para alinhamento temporal de campanhas de medições não sincronizadas;
- Capítulo 3: **RmsSync: Uma Nova Técnica para Alinhamento Temporal de Campanhas de Medições Não Sincronizadas**: contempla as estratégias, metodologia e as etapas utilizadas para simular, implementar e testar a técnica RmsSync no software MatlabTM. Em seguida, são apresentados os resultados de uma validação mais robusta da técnica, também programada no MatlabTM. A implementação foi aplicada para estabelecer o alinhamento temporal em campanhas de medições simuladas no software PSCADTM e em campanhas de medições realizadas com osciloscópios;
- Capítulo 4: **Protótipo MIQE (Medidor Industrial de Qualidade da Energia Elétrica)**: são apresentadas as etapas e as estratégias empregadas para a construção e a execução dos testes do protótipo MIQE. São descritos os esboços de hardware, software e os kits DSPs utilizados para desenvolver o sistema destinado à aquisição,

amostragem e processamento dos sinais. Além disso, são abordadas as estratégias utilizadas para implementar os serviços utilizados para transmitir e persistir as campanhas de medições em servidores próprios;

- **Capítulo 5: Resultados Experimentais:** é dedicado às análises e discussões sobre a implementação do modo de operação RmsSync do MIQE. O protótipo é utilizado para medir e gerar campanhas de medições não sincronizadas em diferentes pontos da rede elétrica da Escola de Engenharia da UFMG. Em seguida, a técnica RmsSync, programada no MatlabTM, é aplicada para executar o alinhamento temporal dessas campanhas de medições. Essa implementação permite validar completamente o protótipo, abrangendo desde a medição até o processamento e a transmissão das campanhas de medições para um servidor remoto via rede Ethernet;
- **Apêndices A e B:** contêm, respectivamente, as informações de contato do autor e do orientador deste trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão apresentados os principais trabalhos que compõem o referencial teórico da tese. Os trabalhos têm escopos alinhados com os temas: *Smart Grids* (SGs), *Advanced Metering Infrastructure* (AMI), *Internet Of Things* (IoT), qualidade da energia elétrica (QEE), sincronização de relógios em sistemas de energia, a função de correlação cruzada, e projetos/plataformas de medição de energia de acordo com a visão das AMIs. Uma das principais contribuições do trabalho de doutoramento foi o desenvolvimento da técnica RmsSync que pode ser aplicada para executar alinhamento temporal de campanhas de medições não sincronizadas. Devido ao caráter inovador da RmsSync, poucos trabalhos foram encontrados na literatura para comparação. Os mais próximos, e que convergem em algum ponto com a aplicação da técnica, serão apresentados no capítulo 3 após o detalhamento da proposta. Após o entendimento do funcionamento geral da RmsSync, fica mais fácil entender em quais pontos ela é melhor ou pior em relação a outras técnicas que mais se aproximam de sua aplicação. A implementação da técnica RmsSync é baseada na função estatística clássica de correlação cruzada utilizada para alinhar sinais deslocados no tempo, por isso uma breve introdução sobre o tema se faz necessário. Todos os temas e trabalhos abordados neste capítulo fazem parte do alicerce para a implementação do protótipo MIQE (Medidor Industrial de Qualidade da Energia Elétrica), que será abordado nos capítulos 4 e 5 da tese. O protótipo se configura em uma importante prova de conceitos e contribuição robusta para o desenvolvimento de novos equipamentos medidores de parâmetros de qualidade da energia, de acordo com a visão das *Advanced Metering Infrastructure* (AMIs), das SGs.

Para uma melhor organização do capítulo, na seção 2.1 será feita uma introdução e apresentação de trabalhos relacionados às *Smart Grids* (SGs), *Advanced Metering Infrastructure* (AMI) e ao tema *Internet Of Things* (IoT). Em 2.2, será abordado o tema qualidade da energia elétrica (QEE) e serão apresentados trabalhos que dão sustentação e justificam a importância do monitoramento de QEE por parte das empresas. Em 2.3, serão apresentados trabalhos relacionados ao problema da sincronização de relógios em sistemas de energia. Em 2.4, será feita uma introdução aos conceitos da função estatística clássica de correlação cruzada que foi utilizada na implementação da técnica RmsSync. Serão apresentados também na seção, trabalhos que são baseados e/ou utilizam a função de correlação para alinhar sinais deslocados no tempo. No entanto, a forma de aplicação da função de correlação nesses trabalhos difere da abordagem utilizada pela técnica RmsSync, conforme poderá ser verificado ao longo da tese. Na seção 2.5, serão abordados trabalhos/plataformas de medição de energia alinhados com a visão das AMIs e na seção 2.6, serão apresentadas as conclusões do capítulo.

2.1 *Smart Grids, Advanced Metering Infrastructure e Internet Of Things*

É evidente os esforços mundiais para tentar frear a degradação do meio ambiente e diminuir a emissão de gases de efeito estufa. Alguns conceitos e iniciativas atuais que têm visões alinhadas e que contribuem com essa temática são os de *Environment, Social and Governance* (Ambiental, Social e Governança; ESG), as *Smart Cities* (Cidades Inteligentes, SCs) e as *Smart Grids* (Redes Elétricas Inteligentes, SGs). Outros tópicos de pesquisas e de grande interesse da comunidade científica mundial que merecem destaque nesse contexto são os de *Internet Of Things* (Internet das Coisas, IoT) e a busca constante por fontes alternativas de energias renováveis, as chamadas fontes de energia limpa. O termo ESG está associado com as iniciativas, compromissos e boas práticas das empresas e entidades diversas que defendam as questões ambientais, sociais e de governança corporativa (YI; LI, 2021) e (PAN et al., 2022). Já o termo *Smart Cities* está associado à visão do que se espera para as cidades do futuro. Os cidadãos e as pessoas ao redor do mundo desejam, necessitam e buscam cidades mais confortáveis, seguras, menos poluídas, inclusivas, com boa mobilidade urbana, mais conectadas, com boa infraestrutura de comunicação, com mais oportunidades, etc. Em resumo que sejam mais propícias e confortáveis para se viver e para o convívio humano (ISMAGILOVA et al., 2019).

Em Kataray et al. (2023), os autores apresentam uma revisão bibliográfica consistente sobre as oportunidades e desafios para a implantação e integração dos sistemas elétricos (SEs) com as diversas opções de fontes renováveis de energia ao redor do mundo. O trabalho foi conduzido para avaliar a situação dos SEs indianos, mas, segundo os autores, as análises e resultados podem ser aplicadas e utilizadas por qualquer país que deseje migrar os seus sistemas elétricos para as abordagens e visão das *Smart Grids* (SGs) e integrá-los às opções de fontes de energia renováveis locais. Segundo os autores, tipicamente as redes elétricas convencionais baseadas em geração térmica são sistemas unidirecionais que conseguem converter apenas um terço da energia da fonte de combustível em eletricidade e não recuperam e/ou aproveitam o calor gerado. Pelo menos 8 % da energia é perdida nas linhas de transmissão e em torno de 20 % da capacidade do sistema existe primariamente para suprir a demanda de pico. As SGs são redes elétricas inteligentes e gerenciadas que estão sendo concebidas e implantadas em várias partes do mundo com o objetivo de tentar resolver, ou pelo menos minimizar, esses e muitos outros problemas das redes elétricas convencionais. Outro objetivo primordial é tornar o uso da energia mais eficiente, racional e integrar melhor as diversas opções de fontes de energia renováveis como eólica, solar, biomassa, biogás, etc. Os autores apontam as principais barreiras no projeto das SGs na Índia, em especial, as dificuldades para a integração com as opções de fontes de energia renováveis locais. Segundo eles, as análises de um modo geral podem servir de referência para outros países. A primeira barreira apontada é a econômica, onde podem ser destacados os principais entraves: (*i*) os custos iniciais para a implantação dos

sistemas de energia renováveis são muito altos; (ii) a implantação depende muito de subsídios governamentais; (iii) as taxas para transações de energia baseada em biomassa e biogás são altas e (iv) somente o setor de agricultura tem recebido subsídios significativos do governo. No artigo são apontadas e discutidas outras barreiras, entraves e desafios principalmente tecnológicos. Os que estão diretamente ligados com o objetivo desta tese, são: (i) melhorar os investimentos para o monitoramento e melhoria na qualidade da energia e (ii) desenvolver novos sistemas inteligentes medidores de energia.

As SGs têm sido apontadas como sendo o *backbone* necessário para viabilizar as *Smart Cities* (SCs) e a chamada mobilidade elétrica conectada (PAL et al., 2021). Segundo os autores, é necessário que as SGs sejam implantadas para suprirem de forma eficiente a energia necessária para as *Smart Cities*, energia esta que tenha boa qualidade, e de preferência, seja proveniente de fontes renováveis. No trabalho os autores apresentam uma revisão bibliográfica e proposta de estado da arte para uma infraestrutura de comunicação para as SGs baseada na *Internet das Coisas* (IoT). A IoT pode ser entendida como sendo a heterogeneidade dos diferentes tipos de redes e dispositivos; e a proliferação/troca de informações por e entre esses elementos. Fazendo uma analogia, a IoT das SGs tem sido chamada de *Internet Of Energy* (IoE). Entre as expectativas com a viabilização e desenvolvimento das IoE, podem-se citar o fornecimento ótimo de energia aos dispositivos e usuários finais mesmo em horários de pico da demanda e o intercâmbio de informações amplas pela/sobre a rede. Já o conhecimento sobre o estado e a quantidade de carga das baterias, a vida útil e as suas condições gerais são informações corriqueiras e úteis nas operações entre veículos e a infraestrutura da IoE, complementa os autores.

Muitos esforços e investimentos têm sido empregados em vários países do mundo para a migração das redes elétricas convencionais para as SGs (FARHANGI, 2010), (FANG et al., 2012), (HEYDT, 2010) e (ARDITO et al., 2013). Já é sabido que as redes elétricas atuais, em sua maioria, não estão preparadas para dar suporte às novas demandas do setor elétrico. Novos desafios, como atendimento aos carros elétricos, integração com as novas fontes geradoras de energia da geração distribuída (GD), integração com os diversos sistemas de informação e atendimento aos novos requisitos do mundo digital, são apenas alguns exemplos de problemas a serem resolvidos (SHAHIDEHPOUR, 2010), (GUERRERO, 2017) e (PERERA; SABIN, 2017). Nas SGs, a demanda de novos equipamentos de medição que agora dentre outras evoluções podem ter fluxo bidirecional de energia (MORELLO et al., 2017), seja para fins de faturamento ou para o monitoramento de qualidade da energia, tem exigido sistemas mais integrados, flexíveis e robustos. Em um contexto de medição da qualidade da energia de uma planta industrial, os novos equipamentos devem suportar e operar com uma quantidade crescente de distúrbios, eventos e pontos de medição em uma configuração aqui denominada de medição distribuída. Os equipamentos capazes de atender tais requisitos nas SGs têm sido chamados de medidores inteligentes de energia (MORALES-VELAZQUEZ et al., 2017) e fazem parte das

chamadas *Advanced Metering Infrastructures* (AMIs). Para o desenvolvimento das SGs existem muitos trabalhos e padrões a serem desenvolvidos, mas a visão estratégica do *framework* aponta nove áreas-chaves prioritárias e o desenvolvimento das AMIs é uma delas (GREER et al., 2014) e (GUNGOR et al., 2013):

1. Resposta à demanda e eficiência energética do consumidor;
2. Consciência situacional ampla da rede ou do inglês *wide-area situational awareness*;
3. Recursos energéticos distribuídos ou geração distribuída;
4. Sistemas de armazenamento de energia;
5. Transmissão da energia;
6. Redes de comunicação;
7. Infraestruturas avançadas de medição ou do inglês *Advanced metering infrastructure (AMI)*;
8. Gerenciamento das redes de distribuição;
9. Cibersegurança;

O Instituto Nacional de Tecnologia e Padrões (NIST) dos EUA, apoiado pela indústria e governo americano que tem investido bilhões de dólares nos trabalhos das SGs, foi um dos pioneiros na coordenação de pesquisas para o desenvolvimento e evolução das redes elétricas nos EUA. A busca por um *framework* que garantisse a evolução das redes elétricas americanas foi descrita na primeira versão, ou *release 1* (NIST, 2010), do documento que seria o guia do NIST com orientações gerais sobre a visão a ser seguida para a realização do novo paradigma. Embora uma definição única e precisa para as SGs não tenha sido alcançada, algumas regiões dos EUA já implantaram e migraram para os novos serviços. Os trabalhos do NIST listam alguns benefícios e vantagens aos consumidores das novas redes elétricas:

- Disponibilização de informações amplas sobre o consumo de energia;
- Facilidade de expansão e incorporação de novas fontes renováveis de energia;
- Aumento da capacidade da rede para se recuperar em caso de desastres naturais ou ataques cibernéticos e/ou terroristas;
- Redução da emissão de gases poluentes, com a inclusão de veículos elétricos e outras fontes renováveis de energia;

- Maior eficiência e aumento da confiabilidade e qualidade;
- Mais opções de escolha para os consumidores, com a criação de mais produtos, serviços e mercado.

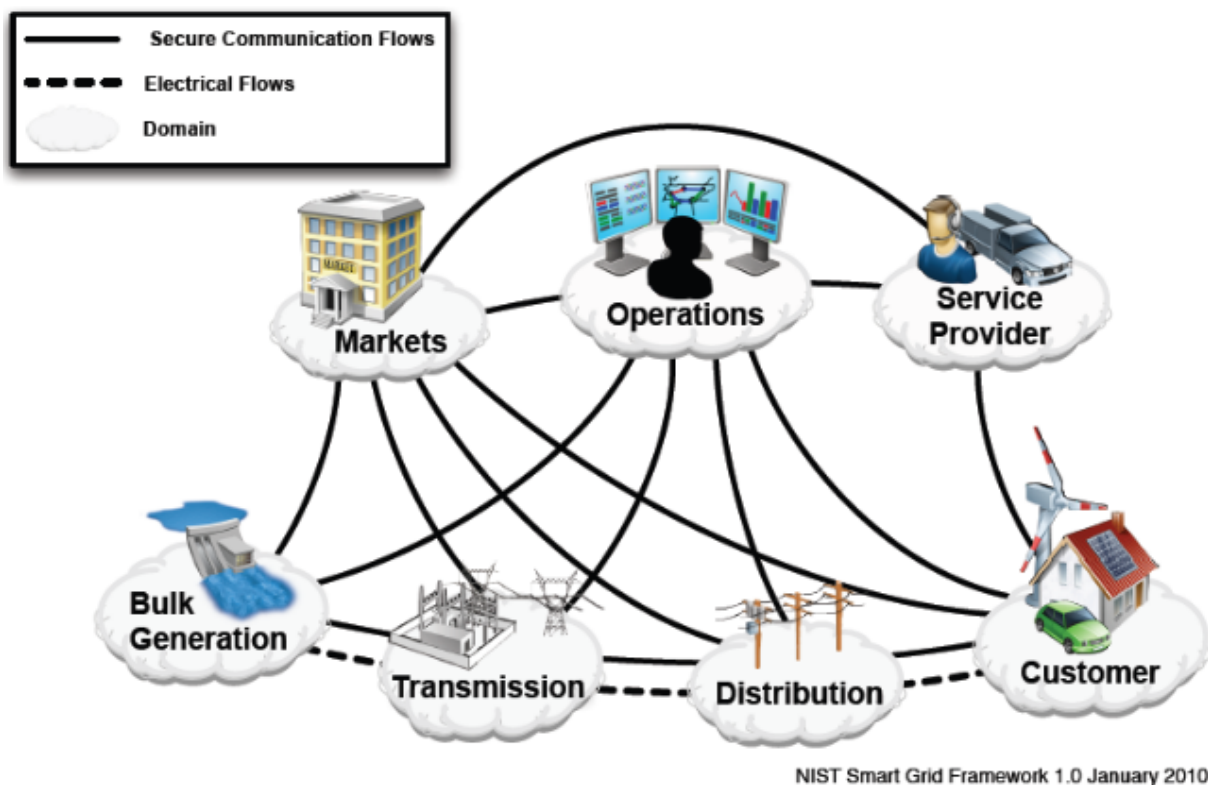


Figura 1 – Modelo Conceitual do *Smart Grid Framework*, Release 1.

Fonte: Adaptado de [NIST \(2010\)](#).

O NIST destaca outros benefícios das *Smart Grids*, tais como: *i*) melhoria da capacidade das redes elétricas, *ii*) maior disponibilidade, *iii*) característica *self-healing*, *iv*) integração com a GD (Geração Distribuída) e muitas oportunidades para quem quiser investir em suas diversas áreas. Em seu modelo conceitual para as SGs, o NIST destaca os sete principais domínios, indicados na Figura 1. Após a integração e alinhamento com outras propostas mundiais, o modelo para as *Smart Grids*, segundo o NIST, passou por revisões e evoluções que foram documentadas na *release 2* ([NIST, 2012](#)) e *release 3* ([GREER et al., 2014](#)) do documento (Figura 2). Uma importante modificação a ser mencionada, foi a atualização do domínio *Bulk Generation*. Na *release 1*, o domínio representava apenas as fontes de energia hidráulicas, ou hidrelétricas, bastante comuns no Brasil, e teve seu nome alterado na *release 3* para *Generation* com o propósito de representar melhor as diferentes possibilidades de geração de energia elétrica existentes atualmente. Em fevereiro de 2021, o NIST publicou um rascunho para a *release 4* do *framework* ([GOPSTEIN et al., 2021](#)) que tem foco no estabelecimento de padrões para facilitar a interoperabilidade das SGs.

A expectativa é que a versão final do documento, que tem a participação e colaboração de várias entidades e pessoas ao redor do mundo, seja lançada em breve.

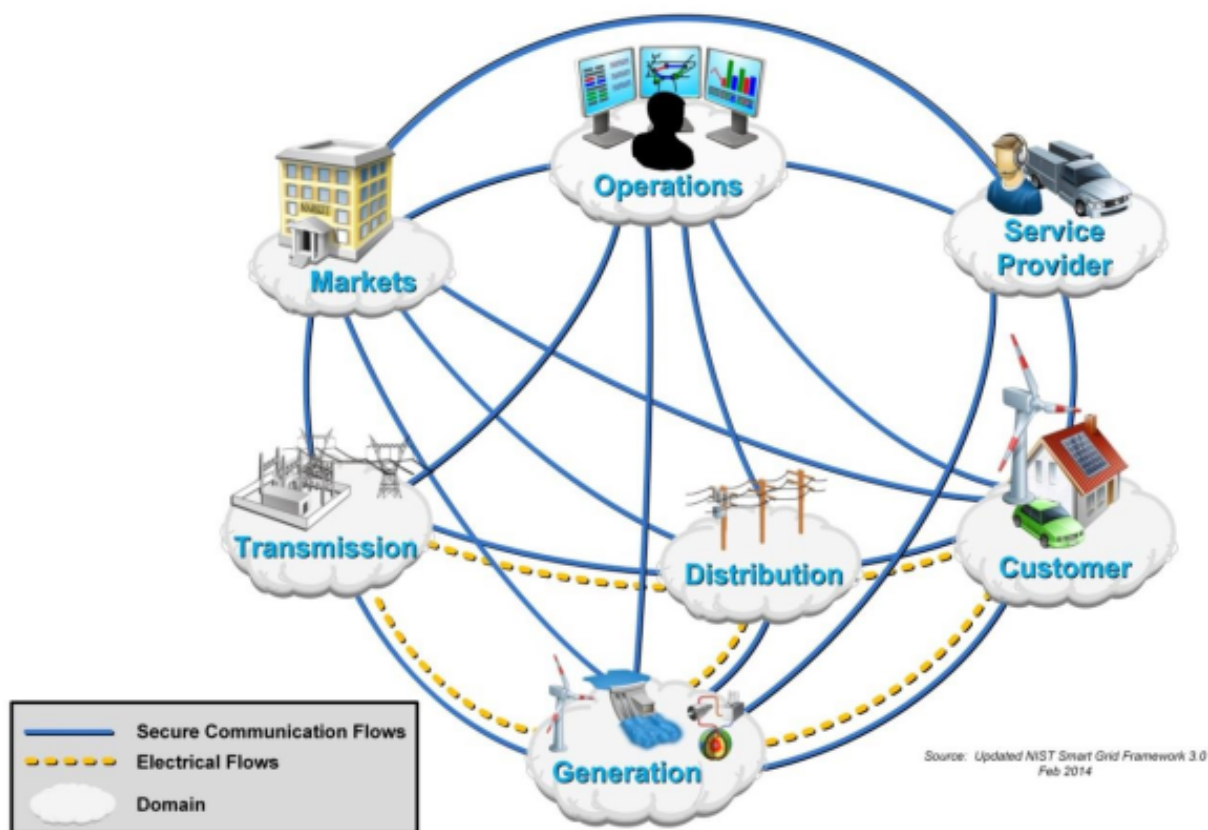


Figura 2 – Modelo Conceitual do *Smart Grid Framework*, Release 3.

Fonte: Adaptado de Greer et al. (2014).

Outros termos importantes do *framework* das *Smart Grids* estão indicados na Figura 3. Na divisão em camadas destacam-se as macro-redes (*macrogrids*), as micro-redes (*microgrids*), as **redes de informação** e as **redes de energia elétrica**. Em relação às redes de energia elétrica e as redes de informação, o objetivo principal do *framework* é proporcionar uma melhor integração entre as camadas. O nome micro-redes está associado às células contendo os diferentes tipos de consumidores e/ou provedores de energia para o sistema elétrico, independente do fluxo ou sentido da energia. As macro-redes representam os possíveis provedores de energia elétrica para as micro-redes. Pode-se ver também na figura e dentro de uma micro-rede, outras possibilidades e tipos de fontes alternativas de energia. Destacam-se as gerações do tipo eólica e a solar que podem inclusive serem geradas dentro das próprias micro-redes. Ainda no *layout* da micro-rede, foi incluído o rótulo “M” para indicar uma possibilidade de interface para a ligação de um medidor inteligente de energia. Um objetivo poderia ser, por exemplo, possibilitar a medição e o monitoramento da qualidade da energia elétrica recebida das diversas opções de macro-redes de um sistemas elétrico. Cabe ressaltar nesse ponto que, embora existam

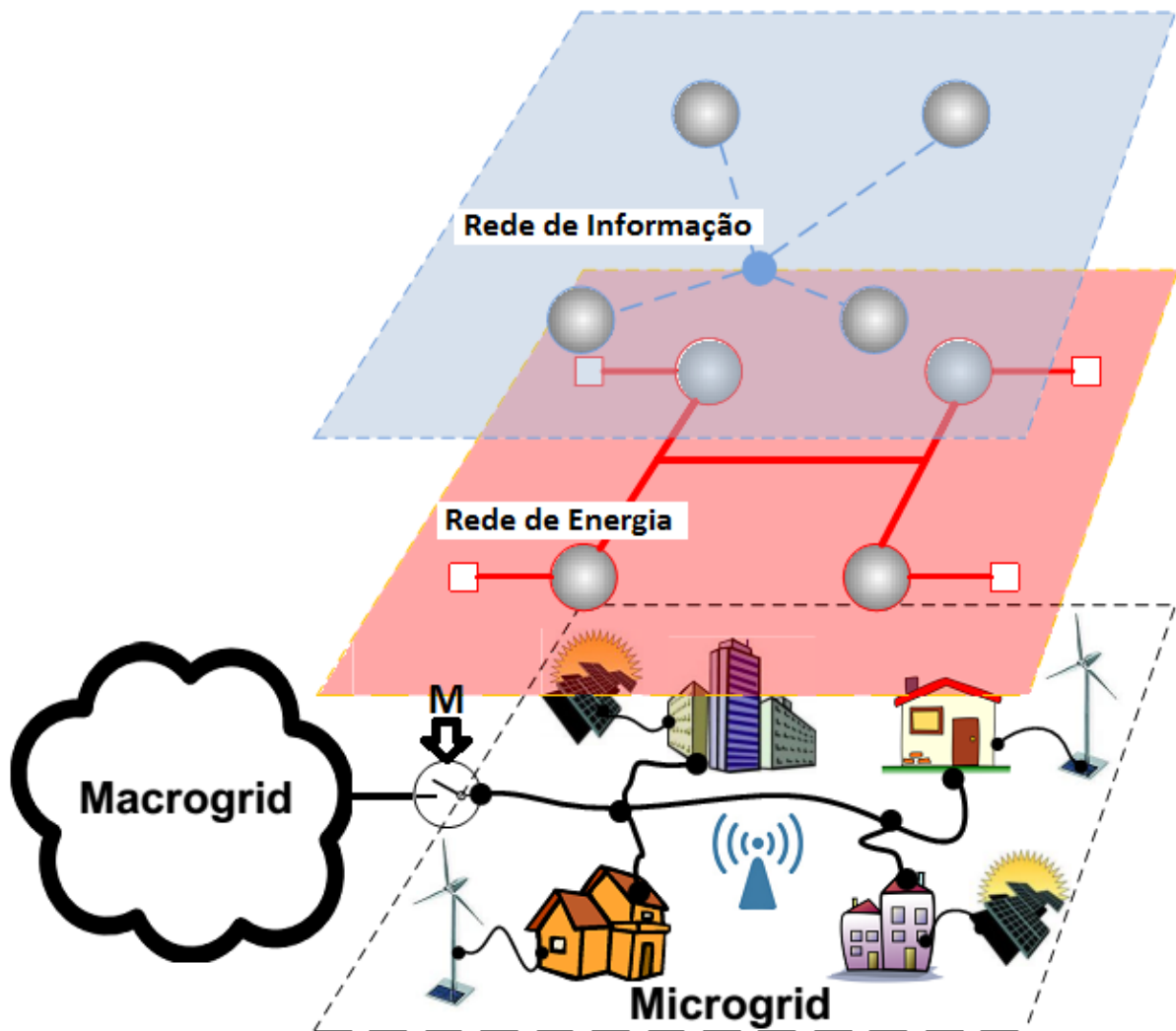


Figura 3 – Modelo conceitual do NIST para Micro-redes e as suas interfaces.

Fonte: Adaptado de Greer et al. (2014).

diversas técnicas que poderiam ser incorporadas para medir e controlar a qualidade da energia, este trabalho de tese e o protótipo MIQE não foram concebidos e/ou tiveram foco com o propósito de **corrigir** eventuais distúrbios de QEE que possam ocorrer na rede elétrica. O objetivo principal foi aprofundar os estudos e pesquisas para oferecer uma plataforma de **medição e monitoramento** de eventos e distúrbios de qualidade da energia elétrica. Ou melhor dizendo, oferecer uma espécie de **painel de controle** que possibilite e dê suporte para que as empresas monitorem a qualidade da energia de suas plantas industriais e façam melhor gestão e acompanhamento dos seus recursos e ativos energéticos.

No futuro, em uma versão mais avançada do protótipo MIQE, pode-se explorar outras frentes de trabalho e pesquisas para desenvolver funcionalidades além da medição de QEE. Em outras palavras, seria possível trabalhar, por exemplo, na evolução da plataforma para que ela incorpore características do tipo *self-healing*, isto é, a capacidade de

detectar, isolar e corrigir automaticamente falhas ou problemas. Essa característica tende a minimizar a necessidade de intervenção humana e a evitar interrupções significativas no funcionamento dos sistemas elétricos, especialmente em relação a certos problemas e distúrbios de QEE. Como exemplo, pode-se pensar em incorporar técnicas para o acionamento de bancos de capacitores, visando à correção do fator de potência em uma rede ou em cargas elétricas específicas de uma planta industrial (O'DRISCOLL; O'DONNELL, 2013). Outra possibilidade seria o uso de sistemas do tipo compensador série para mitigar e corrigir eventuais afundamentos de tensão (PIRES; SILVA; FILHO, 2015). Até o momento, devido a questões de escopo e prazo, os esforços e o foco deste trabalho têm sido direcionados ao desenvolvimento da técnica RmsSync, bem como à implementação do protótipo MIQE, em sua versão voltada para a execução das operações de medição e monitoramento da qualidade da energia elétrica (QEE) em plantas industriais de baixa tensão (BT). Essas atividades estão alinhadas com a visão de desenvolvimento de medidores inteligentes para as AMIs.

2.2 Qualidade da Energia Elétrica (QEE)

O termo qualidade da energia elétrica (QEE), ou simplesmente qualidade da energia (QE), está associado aos valores de referência com relação à forma, frequência e fase dos sinais de tensão e/ou corrente nas redes elétricas. Quando os sinais se distanciam dos valores de referência, diz-se que a energia está ruim ou com baixa qualidade (DUGAN et al., 2004).

Entre todos os temas abordados neste trabalho, este talvez seja o mais intrigante e fascinante, segundo a visão do autor. Isso não implica desconsiderar os demais, mas reflete o fato de que os outros temas, em geral, visam garantir que uma energia elétrica de boa qualidade seja fornecida aos consumidores ou que estes sejam informados quando a qualidade estiver comprometida, seja no ambiente residencial ou industrial. Em condições normais de funcionamento, os sinais de tensão e corrente em uma rede elétrica apresentam formas senoidais, estão em fase e não apresentam distorções em suas formas de ondas. No sistema elétrico brasileiro, o valor de referência para a frequência fundamental é de 60 Hz. Quando os sinais de tensão e/ou corrente apresentam distorções em sua forma de onda ou se afastam da referência de 60 Hz, seja devido a variações nos geradores elétricos ou à influência de outros distúrbios elétricos ao longo da rede, considera-se que a qualidade da energia elétrica está comprometida. O conceito se aplica para as redes elétricas de baixa (BT), média (MT) ou alta tensão (AT). O módulo 8 (Qualidade da Energia Elétrica) do documento intitulado *Regras e Procedimentos de Distribuição* (PRODIST, 2021), da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), apresenta e aborda os principais aspectos e referências para a qualidade da energia no sistema elétrico brasileiro. São apresentados os

principais conceitos, distúrbios, bem como os níveis e valores de referência para mensurar e dar os devidos tratamentos quantitativos e qualitativos à qualidade da energia. Já o módulo 5 aborda os sistemas de medição e os procedimentos de leitura, seja para fins de faturamento ou para a apuração de valores e parâmetros dos distúrbios e eventos de qualidade da energia elétrica.

O crescimento das redes elétricas tem sido acompanhado pelo aumento das fontes poluidoras da energia. Mais cargas eletrônicas de diferentes tamanhos e tipos, as fontes chaveadas dos notebooks e outros dispositivos de uso geral baseados em inversores de frequência, por exemplo, têm forte impacto e implica no aumento da poluição das redes elétricas, como a poluição harmônica. Por outro lado, o avanço da eletrônica tem contribuído com o desenvolvimento de novas tecnologias e sistemas de medição para garantir, ou pelo menos tentar, que a qualidade da energia fique dentro de níveis aceitáveis estabelecidos, devidamente monitorados, pelos órgãos reguladores dos diversos países. Nesta seção, serão elencados diversos trabalhos que corroboram com a importância de se investir no tema. Ainda citando o livro clássico e intitulado *Electrical Power Systems Quality* de [Dugan et al. \(2004\)](#), destaca-se uma abordagem não tão aprofundada, mas que apresenta uma visão geral sobre os conceitos mais relevantes relacionados à qualidade da energia. No livro são abordados temas como variações de tensão de curta e longa duração, afundamento e sobretensão, fator de potência, harmônicos, *flicker* e outros. São abordados também assuntos como medição, aterramento, cabeamento e equipamentos de medição.

Um dos primeiros trabalhos pesquisados e que despertou o interesse do autor pelo tema qualidade da energia elétrica, foi o artigo de [O'Driscoll e O'Donnell \(2013\)](#). Na pesquisa os autores fazem uma abordagem *bottom-up* e demonstram a importância para uma empresa de manufatura em monitorar a QEE de sua planta industrial. É apresentado o estado da arte sobre o termo medição e controle da qualidade da energia no contexto de uma planta industrial. O trabalho deixa muito claro que as empresas que monitoram e controlam a sua QEE tendem a ter, entre outras vantagens competitivas, o aumento da disponibilidade de sua planta industrial e até mesmo o acesso mais fácil a recursos financeiros de investidores. Um dos problemas abordados é o fator de potência (FP), que tem relação direta com a eficiência energética das empresas. Um baixo fator de potência pode acarretar multas para o consumidor além de desgaste, sobrecargas e baixo rendimento das máquinas elétricas. Outro problema abordado são os harmônicos, que estão associados à deformação das formas de onda da tensão, e/ou corrente, e que podem acarretar, entre outros problemas, o aquecimento e sobrecarga do fio neutro da rede elétrica, devido a corrente de sequência zero. Os autores defendem que a gestão da QEE em uma empresa é um fator estratégico de competitividade e três pontos devem ser observados: a empresa deve *i)* conhecer e ter controle sobre sua matriz de custo energético, *ii)* ser capaz de medir a energia consumida em suas instalações e *iii)* ser capaz de gerenciar seus gastos com a energia elétrica. Ações como escalonar suas máquinas e cadeia produtiva para funcionar

em horários onde a energia tenha menor custo, e/ou desligar as máquinas quando a QE estiver ruim, são algumas das orientações do trabalho.

Já [Bhattacharyya e Cobbe \(2011\)](#) fazem uma abordagem sistemática das consequências de uma energia elétrica de baixa qualidade para as organizações e instalações elétricas. Além de causar danos e quebras das máquinas elétricas, uma energia elétrica de baixa qualidade poderá causar indisponibilidade das plantas industriais, acionamento indevido dos sistemas de proteção, sobreaquecimento e diminuição da vida útil dos equipamentos. No relatório técnico 519-1992 da [IEEE \(2014\)](#) são apresentadas algumas orientações que podem ser utilizadas em estudos sobre distorções harmônicas de uma rede elétrica. No Brasil ainda não existem penalizações para as distorções harmônicas geradas por cargas elétricas operando no lado consumidor, mas pode-se afirmar que muitas cargas gerando distorções harmônicas ao longo dos sistemas elétricos, seja do lado consumidor ou do lado fornecedor, implica em uma energia elétrica de pior qualidade.

Em [Mindykowski e Tarasiuk \(2015\)](#), os autores defendem que o acidente ocorrido com o navio Queen Mary II na costa oeste da França, que matou 13 e feriu pelo menos 32 pessoas, pode ter tido como causa fundamental uma falha no sistema elétrico de proteção. Segundo os autores, ao que tudo indica, o sistema de proteção elétrica da casa de máquinas da embarcação não estava preparado para tratar conteúdo harmônico de ordens mais elevadas. Um surto na rede elétrica do navio pode ter levado a um mau funcionamento e ter causado uma pane geral na casa de máquinas da embarcação, o que pode ter causado o acidente. Os sistemas navais operam com frequência típica da ordem de 400 Hz e na ocasião do acidente os sistemas de medição eram limitados para tratar conteúdo harmônico de ordem mais elevada. Os mesmos autores publicaram outros trabalhos de destaque e de referência ao tratamento de qualidade da energia para sistemas navais ([MINDYKOWSKI; TARASIUK, 2010](#)) e ([TARASIUK; MINDYKOWSKI, 2012](#)). São apresentadas as boas práticas a serem adotadas no projeto de novos equipamentos navais, principalmente, que os equipamentos sejam projetados para prever e tratar conteúdo harmônico de ordem mais elevada. Embora a frequência típica dos sistemas elétricos navais seja diferente dos sistemas elétricos convencionais, as orientações e boas práticas recomendadas nos trabalhos podem ser aplicadas em sistemas de medições para as redes elétricas convencionais, sejam elas de 50 ou 60 Hz.

Em [Cooper, Pragale e Dionise \(2011\)](#), os autores aplicaram as recomendações de diferentes normas e relatórios do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) para analisar e controlar a qualidade da energia das redes elétricas de média tensão de três instalações industriais. O trabalho teve foco na análise do fator de potência (FP) e conteúdo harmônico das redes elétricas. Eles defendem que o trabalho de análise do fator de potência e conteúdo harmônico de uma instalação pode ser compreendido das seguintes etapas: fazer medições do fluxo de carga e conteúdo harmônico da rede elétrica,

analisar os dados sobre o conteúdo harmônico, analisar os dados sobre o fator de potência e demanda de energia da instalação, e projetar quando necessário a compensação de reativo utilizando banco de capacitores. Caso seja detectado poluição harmônica elevada deve-se incluir filtros de harmônicos no projeto, como o filtro para tratar o 5th harmônico. Eles utilizaram as abordagens indicadas pelo IEEE em três empresas diferentes, sendo uma empresa de distribuição de água local, o aeroporto da cidade e uma fábrica. No artigo, eles demonstram de forma sistemática os passos e as análises que foram executadas em cada etapa dos trabalhos. Nas três empresas foi detectado o problema de baixo fator de potência. Após as medições e simulações, eles dimensionaram e projetaram novos bancos de capacitores que foram instalados nas instalações. Com as mudanças e intervenções, o fator de potência de operação das redes elétricas foi corrigido para operar acima de 0,92, respeitando os limites da legislação local. Em todas as instalações foram detectadas situações de operação que poderiam levar ao surgimento do 5th harmônico. Assim, foram incluídos nos projetos filtros de harmônicos de diferentes tipos para tratar as situações. Após as intervenções propostas o problema da poluição harmônica também foi resolvido, o que gerou economia no consumo de energia e tornou as instalações mais seguras.

No trabalho de [Volkers, Frizera e Encarnacao \(2015\)](#), os autores da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória-ES, Brasil, apresentam a versão inicial do protótipo de um sistema de monitoramento de energia baseado em microcontroladores do tipo *Programmable Interface Controller* (PIC), com capacidade para fazer medições de energia residenciais e online. Através do sistema, os consumidores podem acompanhar em tempo real e pela internet o consumo energético e alguns parâmetros relacionados à qualidade da energia de suas residências. Segundo os autores, os testes iniciais têm se mostrado satisfatórios no monitoramento da QEE e no acompanhamento do consumo energético, mas o algoritmo de estimação precisará de melhorias para diminuir os erros de medição. O protótipo desenvolvido, assim como o MIQE, trabalha em rede e faz o monitoramento remoto, no entanto opera com taxas de amostragens mais baixas impostas pela limitação do hardware do microcontrolador do tipo PIC família 18F utilizado no projeto. O MIQE opera com frequências de amostragem mais altas, na ordem de kHz, como será demonstrado nos capítulos 4 e 5, viabilizadas pelo uso de microcontroladores com hardware mais robusto, como os do tipo DSP e ARM. Outra diferença a ser destacada é que o MIQE tem foco no monitoramento da qualidade da energia de redes elétricas industriais trifásicas, enquanto o trabalho apresentado tem aplicação em redes elétricas residenciais monofásicas.

2.3 Sincronização de Relógios em Sistemas de Energia

O sincronismo de relógios em sistemas de energia, em especial em sistemas de medição de QEE, é importante para que uma mesma referência temporal possa ser es-

tabelecida e eventos ocorridos em diferentes pontos de uma rede elétrica possam ser correlacionados (KHAN, 2001), (WON et al., 2002) e (ATALIK et al., 2014). Ultimamente com o aumento do tamanho e a complexidade das plantas industriais, bem como as necessidades de monitoramento completo e integrado das redes elétricas, a medição de vários pontos das redes, de preferência em tempo real e contínua, é uma necessidade cada vez mais comum (ELPHICK et al., 2017), (PERERA; SABIN, 2017) e (MORALES-VELAZQUEZ et al., 2017). Não fazia parte do escopo inicial do trabalho de doutorado, um estudo com foco no cálculo e/ou estabelecimento de localização ótima de medidores de QEE. Para alcançar esse objetivo, o leitor interessado pode consultar trabalhos como os de Won e Moon (2008) e Freitas et al. (2016).

O *North American SynchroPhasor Initiative* (NASPI) publicou em 2017, o resultado dos trabalhos de uma força tarefa designada para tratar o tema “Sincronização de Relógios”, em sistemas de comunicação (NASPI, 2017). A iniciativa privada (DICKERSON, Undated) e a academia (ZHAO et al., 2018) também têm empregado grandes esforços em buscar soluções eficientes associadas ao tema. Uma abordagem bastante utilizada, é a sincronização de relógios utilizando algum sistema baseado em GPS (*Global Position System*), no entanto uma solução bastante vulnerável quando se trata de sistemas de energia (MOUSSA; DEBBABI; ASSI, 2016) e (GIUSTINA et al., 2014). Soluções baseadas em GPS estão sujeitas a problemas de interferência, congestionamento de sinal, *spoofing*, etc.; e não podem ser utilizadas como única fonte de tempo para soluções de missão crítica. Em espaços confinados, ou onde haja dificuldade de comunicação com algum sistema de satélites disponível, problema conhecido como “falta de visada” e bastante comum em subestações de energia e plantas/galpões industriais, a solução se torna bastante limitada. Existem ainda os custos adicionais associados às compras dos kits e integração com os sistemas de GPS disponíveis, o que pode tornar a solução cara e inviabilizar os projetos.

A norma IEEE 1588 1588 (2017) define o *Precision Time Protocol* (PTP), um protocolo para sincronização de relógios, projetado para sistemas de energia. Esse protocolo é proposto como uma melhoria em relação ao *Network Time Protocol* (NTP), amplamente utilizado em redes e sistemas computacionais. Embora o NTP não seja tão preciso quanto o PTP, ele pode ser aplicado à sincronização de relógios em sistemas de energia (SALUNKHE et al., 2014). A principal diferença reside no fato de que os equipamentos utilizados em redes que implementam o PTP, conforme a norma IEEE 1588, possuem interfaces específicas para o cabeamento físico das redes interligadas, necessárias para o tráfego de dados e sincronização de relógios.

Equipamentos certificados para atender à norma IEEE 1588 são geralmente mais caros do que os dispositivos comuns em redes Ethernet, o que representa um desafio adicional para a implantação de novos projetos, considerando os investimentos necessários

para a atualização da infraestrutura de comunicação. Por outro lado, o NTP, um protocolo baseado na arquitetura TCP/IP, já é amplamente utilizado em serviços de sincronização de relógios. Tanto o PTP quanto o NTP utilizam o *User Datagram Protocol* (UDP), que opera na camada de transporte da arquitetura TCP/IP (COULOURIS et al., 2013), e requerem uma infraestrutura de comunicação adequada para sincronizar os relógios dos equipamentos.

Em Mazur et al. (2017), os autores analisaram as opções de protocolos disponíveis para a sincronização de relógios em sistemas de comunicação e energia. O estudo apresenta as características, o funcionamento, bem como as vantagens e desvantagens de três serviços: IRIG (baseado em GPS), NTP e PTP. Os autores destacam que a escolha entre essas opções depende de uma análise criteriosa do tipo de aplicação e dos recursos financeiros disponíveis para o projeto. O estudo também apresenta uma tabela comparativa das acurácias dos protocolos NTP, IRIG-B (GPS) e PTP, embora a metodologia utilizada para obtenção dos valores não tenha sido explicitada.

De maneira geral, os autores observaram que, em condições normais de operação de uma rede de equipamentos, os serviços baseados no NTP alcançam uma precisão de sincronização na faixa de 50 a 100 ms. Já os serviços baseados no PTP apresentaram uma precisão entre 20 e 100 ns. Entretanto, na conclusão do estudo, os autores sugerem que a precisão real do PTP estaria na ordem de microssegundos, indicando que os valores apresentados na tabela, na faixa de nanossegundos, podem estar incorretos. Para os serviços baseados no IRIG-B, que utilizam cabos coaxiais e dependem de GPS, a precisão reportada foi na ordem de microssegundos, especificamente na faixa de 1 a $10\mu s$.

Nos trabalhos de Scheiterer et al. (2009) e Ingram, Schaub e Campbell (2012), os autores discutem outras considerações relevantes sobre o PTP. Esses estudos reforçam que os maiores desafios para a implementação de soluções baseadas no PTP estão relacionados à necessidade de atualização da infraestrutura física das redes de comunicação. Esses custos adicionais tornam as soluções mais onerosas e, em muitos casos, podem inviabilizar projetos que demandam alta precisão na sincronização de relógios.

A interligação de dispositivos e equipamentos de sistemas de medição de energia por meio de protocolos e serviços baseados na arquitetura TCP/IP está sujeita aos atrasos de rede, que são inerentes a essa arquitetura. Considerando esse aspecto, optou-se por investigar soluções que possibilitem e garantam a continuidade dos serviços de medição, mesmo diante de falhas ou indisponibilidade dos serviços de comunicação necessários para a atualização dos relógios dos medidores. Uma alternativa viável consiste em adotar uma abordagem que permita a sincronização temporal das medições em um momento posterior à medição e ao armazenamento dos dados. Essa abordagem é amplamente conhecida como alinhamento temporal de campanhas de medições não sincronizadas. Nesse contexto, as medições são realizadas por dispositivos cujos relógios não estão necessariamente sincroni-

zados. Posteriormente, são aplicadas técnicas e algoritmos que possibilitam o alinhamento temporal dessas campanhas de medições por meio de um processo de pós-processamento nos sistemas de armazenamento das AMIs.

A continuidade lógica deste capítulo seria a apresentação de trabalhos relacionados às técnicas de alinhamento temporal de campanhas de medições não sincronizadas. Contudo, conforme mencionado no início do capítulo, esses trabalhos serão abordados no capítulo 3, após a descrição detalhada da técnica de alinhamento temporal RmsSync, desenvolvida pelos autores. Adicionalmente, será feita uma introdução à função estatística de correlação cruzada, que foi empregada na implementação da RmsSync, seguida da apresentação de alguns trabalhos correlatos que fundamentam a técnica desenvolvida.

2.4 Função de Correlação-Cruzada

Sobre a sincronização de relógios em uma rede de medidores em uma configuração de medição distribuída, espera-se que a operação seja realizada de modo automático, utilizando uma referência temporal única. No entanto, devido a restrições técnicas e/ou de custos, conforme já abordado no capítulo, isso nem sempre é viável. Uma solução adequada para esse problema é a utilização de técnicas como a RmsSync, cujo objetivo é estabelecer o alinhamento temporal para campanhas de medições não sincronizadas. A técnica RmsSync baseia-se na função estatística clássica de correlação cruzada, o que torna necessária uma introdução ao tema. A obra de [Oppenheim, Willsky e Nawab \(1996\)](#) é uma referência clássica em sinais e sistemas, abordando a função de correlação cruzada no domínio do tempo contínuo. Sua versão para o domínio do tempo discreto pode ser encontrada em [Oppenheim, Schaffer e Buck \(1999\)](#). Abordagens tanto teóricas quanto práticas de implementação são detalhadas em [\(AGUIRRE, 2015\)](#) e [\(MATLAB, 2018\)](#).

Sejam dois sinais $f(t)$ e $g(t)$ no domínio do tempo contínuo. A função de correlação cruzada entre f e g mede o grau de similaridade entre os sinais e é expressa pela equação 2.1:

$$R_{fg}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot g(t + \tau) dt \quad (2.1)$$

onde:

- $R_{fg}(\tau)$: função de correlação cruzada entre $f(t)$ e $g(t)$ no domínio do tempo contínuo;
- $f(t)$: sinal $f(t)$ no domínio do tempo contínuo;
- $g(t + \tau)$: sinal $g(t)$ no domínio do tempo contínuo deslocado no tempo por um valor τ ;

- τ : valor de deslocamento (ou atraso), comumente referido como *lag* em inglês;
- $\int_{-\infty}^{\infty}$: integração em tempo contínuo sobre todo o intervalo do sinal.

No domínio do tempo discreto, a correlação cruzada entre os sinais $f[n]$ e $g[n]$ é definida pela Equação 2.2:

$$(f \star g)[k] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f[n] \cdot g[n+k] \quad (2.2)$$

O somatório acima representa o cálculo da correlação cruzada para cada deslocamento k , obtido como o somatório dos produtos das amostras de $f[n]$ e $g[n+k]$. O valor máximo da correlação ocorre para o deslocamento k que maximiza a semelhança entre os dois sinais.

Em outras palavras, a função de correlação cruzada retorna o deslocamento k necessário para que a semelhança entre um sinal x e outro sinal y , tomado como referência, seja máxima. Caso os sinais x e y sejam idênticos, mas estejam apenas defasados temporalmente, a função retornará o valor da defasagem entre os sinais, sendo chamada de autocorrelação. Por outro lado, se os sinais x e y apresentarem formas de onda diferentes, a função retornará um índice numérico (índice de correlação cruzada) que representa o grau de semelhança entre os sinais, mesmo considerando o deslocamento de um em relação ao outro. Nesse caso, o valor retornado pela função indicará o deslocamento k que maximiza a similaridade entre os sinais.

Para ilustrar o conceito de correlação temporal entre sinais, considere a Figura 4. A figura apresenta três gráficos gerados por *scripts* adaptados da documentação padrão da função *xcorr* do MatlabTM. Os sinais S_1 e S_2 foram simulados para representar dois sensores com um atraso temporal conhecido de 350 amostras entre eles. Caso um dos sinais possua um número menor de amostras, zeros são adicionados ao final do vetor temporal para garantir que ambos tenham o mesmo comprimento. A função *xcorr* foi utilizada para calcular a correlação cruzada entre os sinais. O terceiro gráfico da figura apresenta os índices de correlação em função de cada deslocamento possível, ilustrando como a semelhança entre os sinais varia com o deslocamento aplicado.

Na Figura 5, apresenta-se uma versão normalizada dos índices de correlação cruzada, ajustados para a escala de 0 a 1. Nesse gráfico, o valor 0 indica ausência de semelhança entre os sinais para um determinado valor de deslocamento, enquanto o valor 1 representa semelhança máxima. Como ilustrado, o deslocamento de 350 amostras resultou no valor máximo de correlação cruzada (1), correspondendo exatamente ao atraso conhecido entre os sinais simulados. O sinal (positivo ou negativo) do índice de correlação está associado ao sinal tomado como referência. Nesta execução, o sinal S_1 foi definido como referência.

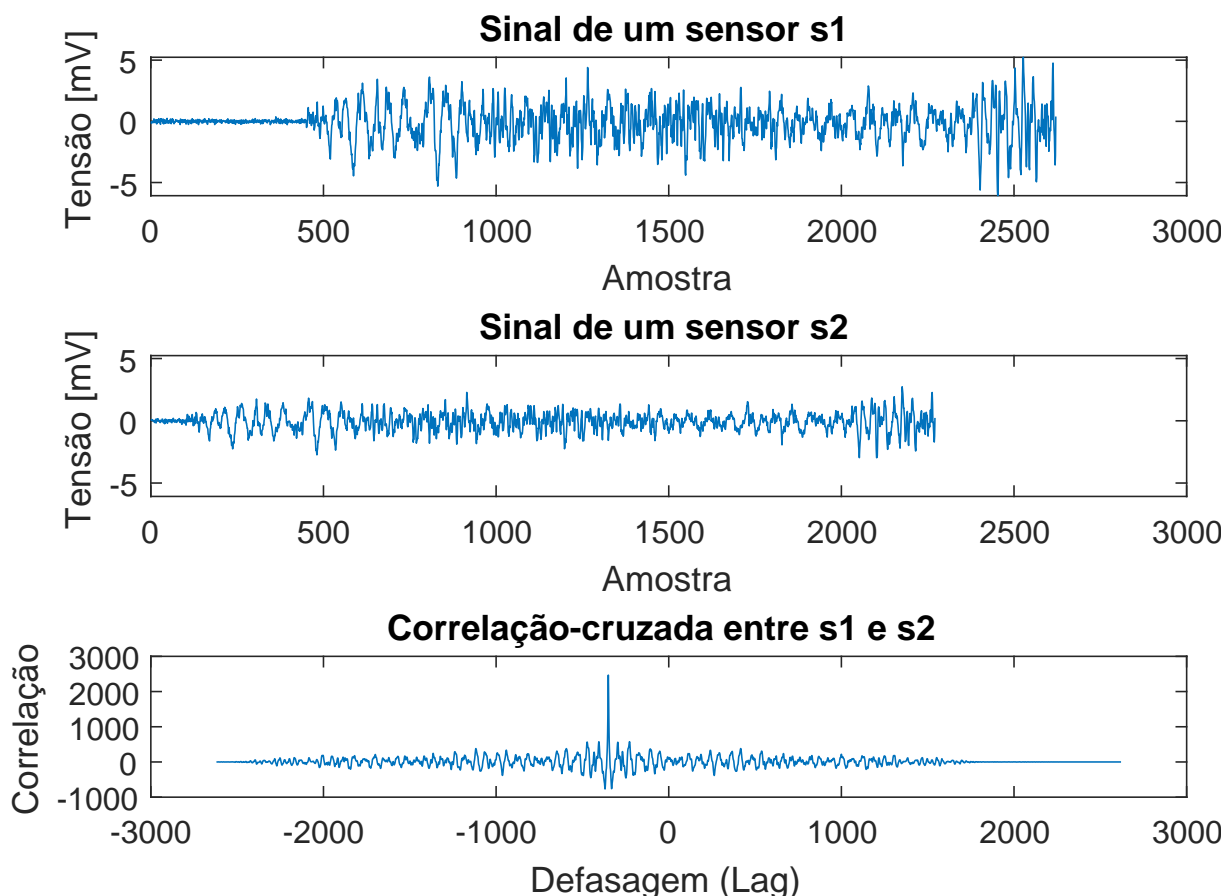


Figura 4 – Índices de correlação-cruzada entre dois sinais simulados no MatlabTM.

Fonte: Adaptado de [Matlab \(2018\)](#).

Para exemplificar e ilustrar uma aplicação do conceito de correlação cruzada em um contexto de sistemas de energia, considere dois pontos, denominados p_1 e p_2 , de uma rede elétrica trifásica, com as fases rotuladas como R, S e T, respectivamente. As séries temporais das medições de tensão nos pontos p_1 e p_2 , geradas por equipamentos com relógios defasados, podem ser alinhadas temporalmente utilizando uma implementação da função de correlação. Dependendo da localização entre os pontos, as formas dos sinais podem ser influenciadas por cargas e eventos adicionais da rede elétrica. Entretanto, pode-se afirmar que haverá uma semelhança, em maior ou menor grau, entre os sinais das fases dos dois pontos, dependendo da distância entre eles. Além disso, a função de correlação pode ser aplicada para identificar as fases desconhecidas de um ponto p_1 , comparando-as com as fases já identificadas de outro ponto p_2 . A premissa básica é que cada vetor temporal das fases R, S ou T de cada ponto possui uma assinatura própria e única, mas que apresenta correlação com o vetor temporal da fase correspondente no outro ponto, permitindo a identificação das respectivas fases.

Partindo do princípio de que os sinais de tensão das redes elétricas apresentam pequenas variabilidades estocásticas no domínio do tempo, principalmente devido ao aci-

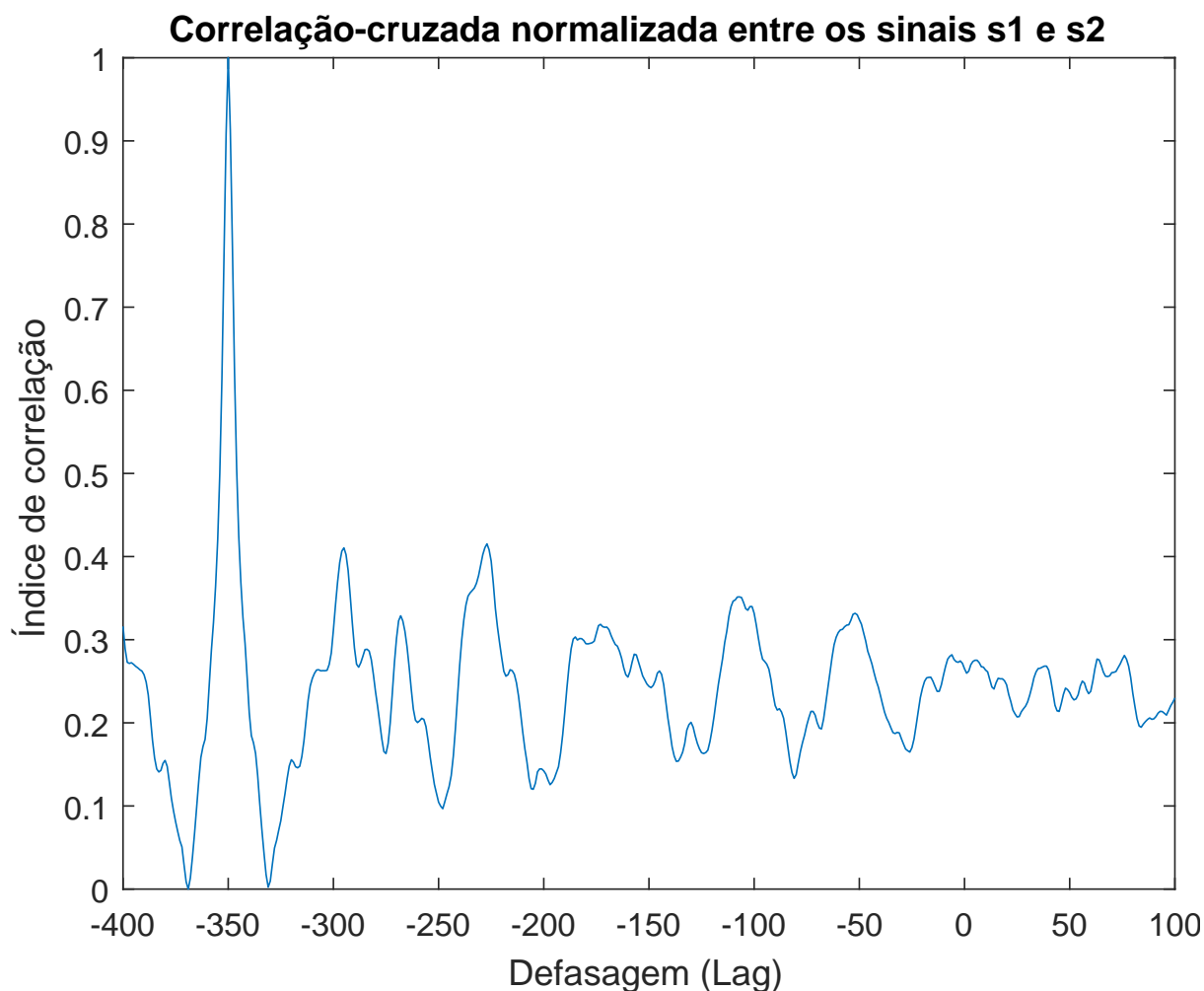


Figura 5 – *Zoom* na correlação cruzada entre os sinais s_1 e s_1 , com valor máximo do índice de correlação na posição equivalente à defasagem -350.

Fonte: Adaptado de [Matlab \(2018\)](#).

onamento de diferentes tipos de cargas elétricas ao longo das camadas da rede, técnicas adicionais podem ser aplicadas para tornar tais variabilidades ainda mais evidentes antes da aplicação da função de correlação. No caso da técnica RmsSync, utilizou-se o cálculo dos valores rms dos sinais a cada ciclo antes de determinar os índices de correlação. Após o alinhamento temporal, algoritmos de processamento de sinais, como os da classe *Fast Fourier Transform* (FFT), podem ser empregados para realizar cálculos e extrair informações relevantes sobre a rede elétrica, mesmo quando aplicados a medições não sincronizadas. Tanto o problema do alinhamento temporal em campanhas de medições não sincronizadas quanto o da identificação física dos condutores das fases em uma rede elétrica polifásica serão tratados em nível de simulação e medições nos capítulos subsequentes. Esses problemas serão abordados na apresentação da técnica RmsSync (Capítulo 3) e na descrição do protótipo MIQE (Capítulos 4 e 5).

Sobre trabalhos que utilizam a função de correlação, cabe iniciar pelo trabalho

de Hajian, Foroud e Abdoos (2014). Os autores apresentam um *framework* para executar a extração de características de sinais de tensão de uma rede elétrica e posteriormente executam uma aplicação para classificar os eventos/distúrbios de qualidade da energia. Eles utilizaram no processamento dos sinais uma variação da função de correlação para definir o grau de semelhança entre janelas das amostras dos sinais, antes de executar uma operação para extrair e reduzir as características a serem utilizadas pelos classificadores. Uma aplicação similar foi a de De e Debnath (2018), que utiliza a técnica da correlação e método *Fuzzy* para projetar um sistema com aplicação na extração de características e classificação de eventos de qualidade da energia. Conforme poderá ser verificado no capítulo 3 da tese, em comparação a esses dois trabalhos, o diferencial da técnica empregada na RmsSync é que a mesma faz o cálculo dos valores rms ciclo a ciclo dos sinais, o que reduz a grande quantidade de amostras a serem aplicadas na função de correlação, principalmente em aplicações com altas taxas de amostragem. Outro grande diferencial da técnica RmsSync é que a mesma pode ser “embarcada” em sistemas digitais para gerar informações de tempo real e de forma contínua, conforme será apresentado do capítulo 4 ao 5 da tese. Os trabalhos apresentados no início do parágrafo são aplicados e tem processamento do tipo *batch*, ou seja, é mandatório que os dados tenham sido gerados por outros medidores, como o MIQE por exemplo, e estejam disponíveis nas áreas de armazenamento das AMIs para que o processamento possa ser executado.

No trabalho de Edelson e Krolik (1988), os autores apresentaram uma versão discreta da função de correlação cruzada aplicada no campo da astrofísica, e segundo eles, um dos diferenciais é que a aplicação não tinha a necessidade de executar interpolações das amostras no domínio do tempo, quando valores de amostras nos vetores temporais eram perdidos. O trabalho, que é de 1988, merece ser citado para demonstrar a aplicação da técnica em diferentes áreas de pesquisa. Em simulações, os autores verificaram que com as diferentes flutuações do espectro de potência associadas aos componentes do tipo UV¹ de NGC 4151 ou Akn² presentes em um feixe óptico, podia-se determinar a presença ou não dos componentes. No entanto com a utilização do processamento com a interpolação, em que eles afirmam que dados eram “inventados”, era introduzido um viés que mascarava os resultados e os componentes não eram detectados. Os autores então testaram uma aplicação baseada na utilização da função de correlação. Os resultados demonstraram que na presença do feixe luminoso contendo o componente Akn 120, a função apresentava uma baixa correlação. Mas, quando foi aplicado como dado de entrada UV de NGC 4151, o resultado obtido foi um alto índice de correlação. A nova aplicação baseada na função de correlação cruzada, permitiu definir a presença ou não de tais componentes nas amostras de feixe luminoso e foi uma importante contribuição dos autores para o campo da astrofísica naquele ano.

¹ Componente ultravioleta de um feixe óptico.

² Tipo específico de um componente de um feixe óptico.

2.5 Algumas Iniciativas de Medidores de QEE Alinhadas com a Visão das AMIs

O editorial intitulado *Special Issue on IoT for Power Grids* da revista *IEEE Internet Of Things Journal* (YANG et al., 2023) fez um chamado especial para avaliar contribuições da academia para a evolução dos sistemas elétricos de potência (SEPs), de acordo com a visão das SGs. Foram submetidos 74 artigos. Destes, 23 trabalhos de alta qualidade, segundo o editorial, foram selecionados e agrupados em seis categorias para publicação. As categorias destacadas foram: (i) IoT para o monitoramento de SEPs; (ii) IoT para otimização de SEPs; (iii) IoT para resolver problemas de *cyber* segurança em SEPs; (iv) IoT para sistemas integrados de energia; (v) IoT para sistemas com veículos elétricos e, (vi) caracterização de canais para sistemas de energia IoT. Um ponto interessante é que embora o editorial tenha destacado no início do texto sobre a importância de desenvolver as AMIs, em especial novas ferramentas de medição para atender as novas demandas dos sistemas elétricos, nenhum dos trabalhos publicados tem foco no monitoramento da energia e/ou da qualidade da energia. Além disso, os cinco trabalhos publicados na categoria (i) não se enquadram em trabalhos de desenvolvimento de novos medidores ou plataformas para a medição da energia que estejam alinhados com a visão das AMIs. Os trabalhos não se enquadram em projetos de medidores de energia capazes de fazer amostragem em condições desafiadoras, de forma contínua, em tempo real e em rede, requisito importante nas AMIs. Os resultados experimentais obtidos até o momento, tanto com a técnica RmsSync quanto com o protótipo MIQE, poderiam cobrir esta lacuna, já que são contribuições consistentes para o desenvolvimento de novas ferramentas de medição para as AMIs.

O *IEEE Industrial Electronics Society* fez um convite especial para que o *IEEE Transactions on Industrial Informatics* (TII) organizasse uma chamada de trabalhos na academia e na indústria, com o objetivo de selecionar e publicar artigos que fossem contribuições relevantes na área de sistemas de potência e sistemas de energia (DABBAGH-JAMANESH et al., 2022). A chamada recebeu 80 trabalhos. Destes, sete trabalhos de alta qualidade, segundo o editorial, foram aceitos e publicados em uma seção especial do periódico. Dos sete trabalhos, o único que faz menção e se enquadra em uma contribuição direta para o desenvolvimento das AMIs é o de autoria de Fang et al. (2022). O trabalho utiliza técnicas da área de aprendizado de máquina para propor um novo sistema de gerenciamento da energia assistido por computador. O sistema usa como dados de entrada informações sobre medições das redes elétricas das áreas de armazenamento das AMIs, geradas por sensores e sistemas de medição espalhados ao longo das redes elétricas. A partir de tais dados, o sistema gera uma matriz do tipo *Hankel* e aplica um sistema especialista baseado na teoria da função estatística *Copula* para processar os dados das medições. O trabalho detalha a teoria geral da função *Copula* e as estratégias para a implementação do sistema especialista. O resultado do processamento é uma rede neural baseada em *pooling*,

cujos dados de saída são utilizados para fazer o gerenciamento e a previsão da demanda de energia. Segundo os autores, a nova abordagem do sistema supera as técnicas tradicionais de previsão e gerenciamento da energia tanto no cálculo do erro absoluto médio quanto em precisão. Os ganhos são de 12,7 % e 9,5 %, respectivamente. Conforme mencionado no próprio artigo, um dos pré-requisitos do sistema é que os dados das medições devem estar disponíveis nas áreas de armazenamento das AMIs. Esses dados precisam ser medidos ao longo das redes elétricas, processados, transmitidos e armazenados nas AMIs, por plataformas ou sistemas de medição pré-existentes. Tal pré-requisito, corrobora com a importância deste trabalho de tese, em especial com o protótipo MIQE.

Ao se pesquisar trabalhos que possam subsidiar o desenvolvimento de novos medidores de energia alinhados à visão das AMIs, observa-se uma abundância de propostas de especificações, especialmente em relação a modelos arquiteturais, mas poucos resultados práticos de implementação. Uma explicação plausível para essa limitação é a ampla variedade de componentes e dispositivos eletrônicos disponíveis para prototipagem e construção de sistemas digitais capazes de operar em altas taxas de amostragem, normalmente na faixa de quilohertz. Este requisito, é crucial para atender os requisitos dos projetos de novos equipamentos medidores das AMIs. No entanto, em relação aos hardwares com módulos ADCs de alto desempenho e suporte integrado à comunicação via rede Ethernet, ainda há um caminho significativo a ser percorrido. Poucas soluções estáveis de hardware e software são oferecidas por um único fornecedor. No geral, o fabricante de um componente de hardware utiliza software de terceiros, transferindo aos desenvolvedores de novos projetos de sistemas digitais a responsabilidade de assegurar a compatibilidade e o funcionamento integrado de todas as partes envolvidas. Além disso, muitos kits de processadores digitais dependem de bibliotecas de terceiros, frequentemente recém-lançadas e ainda em fase de testes, o que resulta em vários bugs. Kits completos capazes de fazer amostragem na casa dos quilohertz, com processadores digitais de alto desempenho, suporte à rede Ethernet e bibliotecas de software do próprio fabricante praticamente não existiam, até onde foi pesquisado. Assim, a alternativa para novos projetos é construir protótipos com kits e hardwares disponíveis no mercado que melhor atendam aos requisitos específicos. No Capítulo 4, será apresentado o modelo arquitetural e as estratégias adotadas para a implementação do MIQE.

Outra explicação para o número reduzido de pesquisas e implementação de plataformas completas de medição de acordo com a visão das AMIs, talvez seja o fato de que uma solução completa de medição, processamento, envio e armazenamento das campanhas de medições nas áreas de armazenamento das AMIs envolva diferentes áreas do conhecimento. Pode-se destacar as áreas de elétrica/eletrônica e de sistemas/computação, demandadas no ciclo de desenvolvimento do projeto de um novo medidor inteligente de energia que atenda os requisitos das AMIs. No geral, o que se observa são projetos com escopos segmentados e que atendem parte do ciclo do desenvolvimento dos novos me-

didores. Existem os projetos que só geram as campanhas de medições e as armazenam localmente nas instalações elétricas ou nas áreas de armazenamento das AMIs. E existem outros projetos que usam os dados fornecidos pelas AMIs, mas que precisam e dependem de um sistema de medição anterior para gerar tais dados. A Seção 3.3 desta tese aborda e traz justificativas para a afirmação sobre os escopos segmentados dos projetos.

Um exemplo de artigo que corrobora com a afirmação dos últimos parágrafos sobre a falta de implementações dos conceitos que atendam os requisitos das AMIs é o de [Hafidz et al. \(2023\)](#). No trabalho, os autores defendem que a geração distribuída (GD) pode ser mais rentável que os métodos tradicionais de distribuição da energia, tendo em vista, por exemplo, os custos mais baixos envolvidos na logística de distribuição. A explicação é que na GD fornecedores e consumidores estão mais próximos. Além do mais, existem mais opções para o armazenamento da energia ao longo da rede, em especial nas opções de armazenamento das micro-redes. Eles apresentam no artigo um levantamento bibliográfico amplo sobre a importância do desenvolvimento da GD, das plataformas de produção e armazenamento de energia, do monitoramento e controle da qualidade da energia, etc. E são enfáticos em afirmar que pouca atenção tem sido dada ao monitoramento da qualidade da energia das redes elétricas de distribuição e da penetração das fontes renováveis nas micro-redes. Alegam também que muitos conceitos associados à integração da GD e às redes elétricas das micro-redes ainda não têm sido implementados e testados. Eles propõem, então, um protótipo para o monitoramento da QEE e com algumas funcionalidades de proteção para as redes elétricas de baixa tensão das micro-redes. Segundo os autores, o protótipo é capaz de monitorar o fator de potência, a frequência e o conteúdo harmônico de uma rede elétrica. Entre todos os trabalhos pesquisados e analisados durante este doutorado, este foi um dos que mais se aproximou da proposta e do escopo de aplicação do MIQE, além de apresentar uma revisão de literatura bastante consistente. No entanto, o protótipo tem dois pontos fracos a serem destacados. O primeiro é que a integração do protótipo com a rede Ethernet apresentou instabilidade, isso foi mencionado pelos próprios autores no artigo. O segundo ponto fraco está relacionado ao módulo de medição dos eventos e distúrbios de qualidade da energia. O protótipo utiliza um hardware comercial que gera relatórios sobre um conjunto de eventos pré-determinados de qualidade da energia. Trata-se do kit ADE7880 da empresa Analog Devices ([DEVICES, 2014](#)). Por usar um kit comercial, a plataforma de medição está limitada a gerar as informações disponibilizadas pelo ADE7880, diferente do MIQE, que pode ser customizado e programado para medir diferentes tipos de eventos e distúrbios, em diferentes taxas de amostragem. O ADE7880 é um *chip* de hardware com capacidade de medir as potências ativa, reativa e aparente de uma rede elétrica e o conteúdo harmônico com banda passante limitada à 2,8 kHz para um sistema elétrico trifásico. A plataforma de medição proposta por [Hafidz et al. \(2023\)](#) está limitada, portanto, a um escopo limitado de medições. Os testes iniciais do MIQE foram realizados com uma banda passante de 15 kHz para atender

ao modo de operação RmsSync, conforme será abordado nos capítulos 4 e 5 desta tese. Entretanto, a banda passante da placa de amostragem pode ser configurada para outros valores de frequências que vai depender principalmente das configurações utilizadas nos módulos ADC do kit DSP (STM32FX, 2021), ou seja, parâmetros como quantidade e modos de operação dos canais de entrada, resolução em bits, etc.

Seguindo a linha de exemplos de pesquisas sobre propostas de medidores e plataformas de medição de energia para as AMIs, cabe destacar o trabalho de Orlando et al. (2022). Trata-se de uma proposta de modelo arquitetural amplo, e segundo os autores, pode ser customizada e utilizada para o desenvolvimento de aplicações IoT em um contexto das SGs. Segundo os autores, as redes elétricas convencionais estão recebendo demandas que não foram originalmente planejadas para atender. Para melhorar aspectos como confiabilidade e eficiência, o estado da arte das redes elétricas precisa melhorar a segurança, reduzir os picos de carga, melhorar a integração com as fontes renováveis e diminuir os custos de operação. Segundo os autores, o desenvolvimento das SGs é o caminho para atender tal objetivo. Em paralelo, é necessário desenvolver as plataformas de medição e os medidores inteligentes de energia que tem o papel de colher informações amplas sobre as SGs e comunicar com todas as entidades do *framework*, atendendo os requisitos e as demandas de cada setores e atores do mercado de energia. No artigo, os autores apresentam a especificação de uma proposta de infraestrutura distribuída de software para medição e um protótipo de medidor de energia trifásico.

Boa parte dos conceitos apresentados na especificação da arquitetura foram simulados na plataforma Opal-RT, e segundo os autores, os resultados experimentais demonstraram que a latência de transmissão dos dados via *Internet* é compatível com os limites impostos pela norma IEC 61850. Como consequência, os serviços propostos e embutidos na arquitetura podem operar sem afetar o status operacional das SGs, sendo uma solução viável para suportar o desenvolvimento de novos serviços. Com relação ao protótipo do medidor de energia, nomeado 3SMA, um ponto que chamou a atenção foi que o mesmo pode ser configurado para trabalhar com uma frequência de amostragem máxima de 3.2 kHz para 6 canais de entrada, o que torna a aplicação bastante limitada. Os autores não mencionam no artigo se a amostragem dos canais é feita de forma simultânea ou multiplexada. O protótipo foi testado em uma aplicação para localização de falta e outra para estimação de estado para uma configuração particular de rede elétrica. Em comparação com o protótipo MIQE, os resultados experimentais apresentados do medidor trifásico, não configuraram uma aplicação de amostragem em condições desafiadoras e medição de qualidade da energia.

2.6 Conclusões do Capítulo

No presente capítulo, foram apresentados os trabalhos que compõe o referencial teórico e dão sustentação à pesquisa e a este trabalho de tese que tem foco no desenvolvimento de novos modelos, técnicas e sistemas para a medição da qualidade da energia de redes elétricas industriais em condições desafiadoras. Foram apresentados trabalhos relacionados aos grandes temas *Smart Grids*, sincronização de relógios em sistemas de energia, qualidade da energia elétrica e alguns exemplos de pesquisas sobre plataformas de medição alinhadas com a visão das AMIs. Foram apresentados também os conceitos relacionados à função de correlação cruzada, que foi utilizada no desenvolvimento da técnica RmsSync e é aplicada no contexto de alinhamento temporal de campanhas de medições não sincronizadas que será apresentada no capítulo 3 da tese.

Os trabalhos apresentados demonstram a importância das pesquisas para o desenvolvimento de novos sistemas e técnicas associadas ao monitoramento da qualidade da energia, de acordo com a visão das AMIs, ou seja, que as medições sejam feitas de forma distribuída e de preferência em tempo real, de forma contínua e em rede; como é o caso da proposta do protótipo MIQE. A demanda por novos sistemas de monitoramento de qualidade da energia tem exigido sistemas mais integrados, inteligentes e que sejam capazes de monitorar cada vez mais eventos e pontos de medição de forma simultânea, e que sejam acessíveis às médias e pequenas empresas brasileiras que, na maioria das vezes, carecem de recursos e profissionais especializados no tema. Os trabalhos sobre alinhamento temporal, que é o campo de aplicação da técnica RmsSync, serão apresentados no próximo capítulo, conforme explicado anteriormente.

3 RmsSync: UMA TÉCNICA INOVADORA PARA ALINHAMENTO TEMPORAL DE MEDIÇÕES NÃO SINCRONIZADAS

A medição distribuída e sincronizada da qualidade da energia elétrica (QEE) de uma planta, e/ou de um sistema elétrico, é crítica e necessária para que os eventos e distúrbios acontecidos em diferentes pontos da rede possam ser correlacionados e analisados, de forma a proporcionar uma visão ampla, integrada e única da rede elétrica de uma instalação. Na medição distribuída, um conjunto de medidores são colocados em pontos estratégicos da rede elétrica e desvios nos relógios dos diversos equipamentos podem acontecer. Os perfis de tensão e corrente de toda rede elétrica possuem assinaturas únicas, caracterizadas por variações estocásticas nas magnitudes, fases e frequências dos sinais, provocadas pelo acionamento de diferentes tipos de cargas elétricas ao longo da rede. Tirando proveito de tal dinâmica, neste capítulo será apresentada a técnica RmsSync (*RMS time-alignment synchronization technique*) fruto do trabalho de doutoramento e que pode ser aplicada em operações de alinhamento temporal para campanhas de medições não sincronizadas, ou seja, geradas por equipamentos com relógios defasados. A técnica permite a continuidade dos serviços de medição mesmo que os relógios dos equipamentos não tenham uma mesma referência temporal. Para essa situação, executa-se os serviços de medição, processamento e armazenamento dos dados localmente nas instalações elétricas ou remotamente, conforme visão das *Advanced Metering Infrastructure* (AMI). Posteriormente, na etapa chamada de pós-processamento, pode-se aplicar a técnica RmsSync para executar o alinhamento temporal das medições não sincronizadas. A técnica RmsSync, ou simplesmente RmsSync, faz uso da função estatística clássica de correlação cruzada para alinhar sinais elétricos (tensão ou corrente) defasados no tempo, mas aplicada não sobre os valores instantâneos dessas grandezas, e sim sobre as séries temporais de valores rms dos sinais calculados ciclo a ciclo. Simulações e experimentos demonstraram a robustez da proposta que tem aplicabilidade não só em projetos de novos medidores de QEE, mas em quaisquer sistemas que requeiram um mecanismo alternativo de sincronismo.

Na seção 3.1, será feita uma introdução aos conceitos utilizados para o desenvolvimento da técnica RmsSync. Em 3.2, serão apresentados os requisitos, as etapas e o detalhamento da proposta. Na seção 3.3, será feita a comparação da técnica com alguns trabalhos mais próximos encontrados na literatura. Em 3.4, serão apresentadas as estratégias utilizadas para simular as variações estocásticas dos perfis de tensão de seis pontos da rede elétrica da UFMG, utilizadas para a validação dos conceitos. Os projetos foram desenvolvidos no software de simulação de transitórios eletromagnéticos PSCADTM (PSCAD, 2016). Na seção 3.5, serão apresentados os resultados do processamento dos sinais simulados utilizando uma implementação da técnica RmsSync programada no software

MatlabTM (MATLAB, 2018). Em 3.6, serão apresentados os resultados experimentais de aplicação da técnica RmsSync para alinhar medições de campo não sincronizadas. Foram medidos os sinais de tensão de diferentes pontos da rede elétrica da Escola de Engenharia da UFMG utilizando osciloscópios com relógios ligeiramente defasados. Posteriormente, aplicou-se a técnica RmsSync para estabelecer o alinhamento temporal das medições não sincronizadas. Na seção 3.7, serão apresentados alguns resultados estatísticos associados à aplicação da técnica RmsSync. E em 3.8, serão apresentadas as considerações finais do capítulo.

3.1 Introdução

A técnica RmsSync tem aplicação no estabelecimento de alinhamento temporal para medições não sincronizadas, no contexto de medição distribuída. O campo atual de aplicação da RmsSync é em medições de redes elétricas de baixa tensão de uma planta industrial. Está fora do escopo da técnica, aplicações como a de estimação de estado de grandes redes elétricas, que requerem medições espaçadas de quilômetros de distância. Existem métodos com escopos e dedicados para atender tal objetivo, como os que se baseiam em sinais de GPS. A RmsSync implementa uma nova técnica baseada na função estatística clássica de correlação cruzada, aplicada sobre as séries temporais de valores rms calculados ciclo a ciclo. É importante destacar que o cálculo dos valores rms de cada ciclo é iniciado sempre que os sinais têm uma passagem por zero positiva, de valores negativos das amostras para valores positivos. Logo, quando o alinhamento temporal é alcançado, o erro do cálculo é da ordem do período da amostragem, que é muito menor que um período de onda de 60 Hz (ou 50 Hz). Os primeiros experimentos com esta proposta de técnica para sincronização foram realizados no trabalho (GONTIJO, 2013).

3.1.1 Variações dos Perfis de Tensão de Uma Rede Elétrica

As variações estocásticas nos perfis de tensão de uma rede elétrica são necessárias para sensibilizar a função de correlação cruzada, base na implementação da técnica RmsSync. Para ilustrar o conceito, considere dois sinais discretos no tempo $x[n]$ e $y[n]$, com N amostras. A função de correlação cruzada estima o grau de similaridade entre os sinais x e y (OPPENHEIM; SCHAFER; BUCK, 1999) e (AGUIRRE, 2015), através da utilização de um índice de correlação calculado para cada deslocamento temporal possível de ser aplicado entre todas as amostras dos sinais. O melhor índice de correlação indica o melhor deslocamento a ser aplicado em um dos sinais de forma que a semelhança entre eles seja máxima. As etapas para o desenvolvimento e testes da técnica RmsSync compreenderam: (i) levantamento em laboratório das magnitudes das variações dos perfis de tensão em um dia típico de uso da rede elétrica; (ii) simulação das variações dos perfis de

tensão e testes com a função de correlação cruzada; *(iii)* implementação inicial da técnica e testes com os dados simulados; *(iv)* execução de medições em diferentes pontos da rede elétrica da Escola de Engenharia da UFMG utilizando osciloscópios de alta precisão e *(v)* refinamento e testes da técnica utilizando os dados das medições.

3.1.1.1 Magnitude das Variações

Em medições realizadas em bancada no laboratório LAPIS (sala 1110) da Escola de Engenharia da UFMG, utilizando um osciloscópio (características: 8 bits & 70 MHz, 1 GS/s & 200M) com suporte para fazer medições e exportação dos dados para o computador, verificou-se que as variabilidades dos perfis de tensão da rede elétrica trifásica eram de aproximadamente $2 V_{rms}$ a cada ciclo, para uma tensão nominal de $127 V_{rms}$ fase-neutro (V_{pn}). Os valores medidos estão de acordo com os valores de referência para as redes elétricas de baixa tensão no sistema elétrico brasileiro (*i.e.*: $117 V_{rms} \leq V_{pn} \leq 133 V_{rms}$).

3.1.1.2 Simulações das Variações

Para realizar os testes da técnica RmsSync, os sinais de tensão de dois pontos de uma rede elétrica trifásica, P_x e P_y , com magnitude igual a $127 V_{rms}$, 60 Hz, foram simulados no MatlabTM considerando a variabilidade empírica de $2 V_{rms}$ verificada nas medições em bancada. A duração das janelas de simulação foi arbitrada empiricamente em 7 segundos, a frequência de amostragem utilizada foi de 15.360 Hz, o que corresponde a vetores de 256 amostras por ciclo para as fases R, S e T de cada ponto, com um total de 107.520 elementos para o tempo total de simulação. Para simular as variações dos perfis de tensão, foram adicionados a cada um dos sinais duas parcelas de ruídos brancos de variações aleatórias com distribuição normal e média nula. A primeira parcela com variância 0,5 foi adicionada a todas as fases dos dois pontos e serviu para representar as variações comuns e que se propagam por todos os condutores fisicamente interligados da rede elétrica. A segunda parcela, também com variância 0,5, foi adicionada a cada um dos sinais das fases R, S e T e teve como propósito representar as variações aleatórias específicas de cada ponto da rede elétrica. O objetivo foi simular um conjunto de equipamentos de medição em configuração de medição distribuída capazes de executar as medições e transferir os dados para as áreas de armazenamento de servidores remotos, onde a técnica RmsSync pudesse, então, ser executada para estabelecer o alinhamento temporal das medições não sincronizadas. As questões relacionadas à transferência de dados e à comunicação das redes não foram abordadas nesta etapa do trabalho, uma vez que, geralmente, essas funcionalidades são implementadas por meio da infraestrutura de comunicação das redes Ethernet, utilizando protocolos de internet.

Naturalmente, as janelas de dados simulados estão perfeitamente sincronizadas, já que utilizaram a mesma base de tempo. Para simular problemas de alinhamento temporal, janelas com duração de 5 segundos, e com tempo inicial randômico para cada uma delas, foram recortadas das janelas de 7 segundos, para cada ponto P_x e P_y . Sem perda de generalidade, os ciclos iniciais para as janelas de processamento de P_x e P_y , dentro das janelas de simulação de 7 segundos, foram configurados, respectivamente, com $N_x=20$ e $N_y=40$. N_x e N_y são os índices (em ciclos) para as amostras iniciais das janelas de processamento para as duas séries temporais. A diferença de 2 segundos é suficiente para representar os atrasos de comunicação, bem como as diferenças entre os relógios dos equipamentos de medição. A questão agora é como definir o início das janelas de 5 segundos, 300 ciclos e com 76.800 amostras, usando a função de correlação cruzada para estabelecer o alinhamento temporal entre as janelas, de forma a obter as janelas originais sincronizadas. Na Figura 6, pode-se ver os sinais das curvas para as fases R, S e T, para o ponto P_x , para toda janela de 7 segundos, com destaque para o início e fim dos 5 segundos da janela de processamento. Para melhor visualização dos sinais, o gráfico interno da mesma figura apresenta detalhes da excursão para os sinais das fases R, S e T, entre os instantes 2,75 e 2,85 segundos.

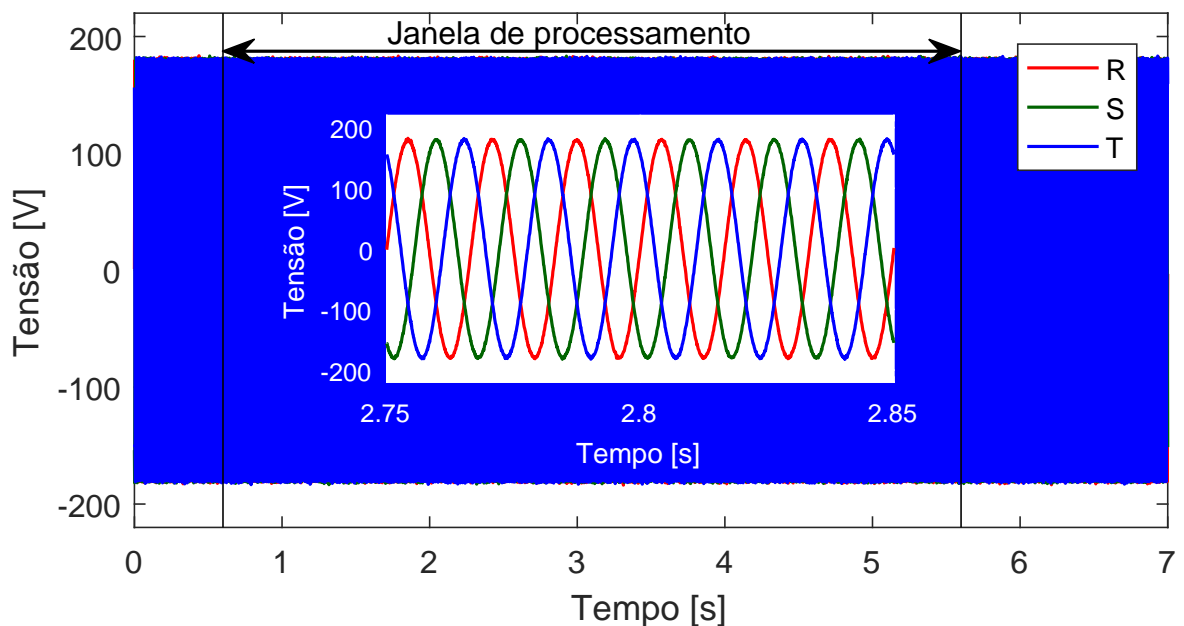


Figura 6 – Janelas de simulação e processamento de P_x .

Fonte: Autoria própria.

É praticamente impossível observar, mesmo no gráfico interno da Figura 6 e a olho nu, as pequenas variações dos sinais. Na Figura 7 (a), pode-se ver os picos das curvas mostradas no gráfico interno da Figura 6, destacando as variações aleatórias e estocásticas de cada um dos sinais. Uma visualização das séries temporais de valores rms detalhadas para o mesmo intervalo, para todas as fases de P_x , pode ser observada na Figura 7 (b).

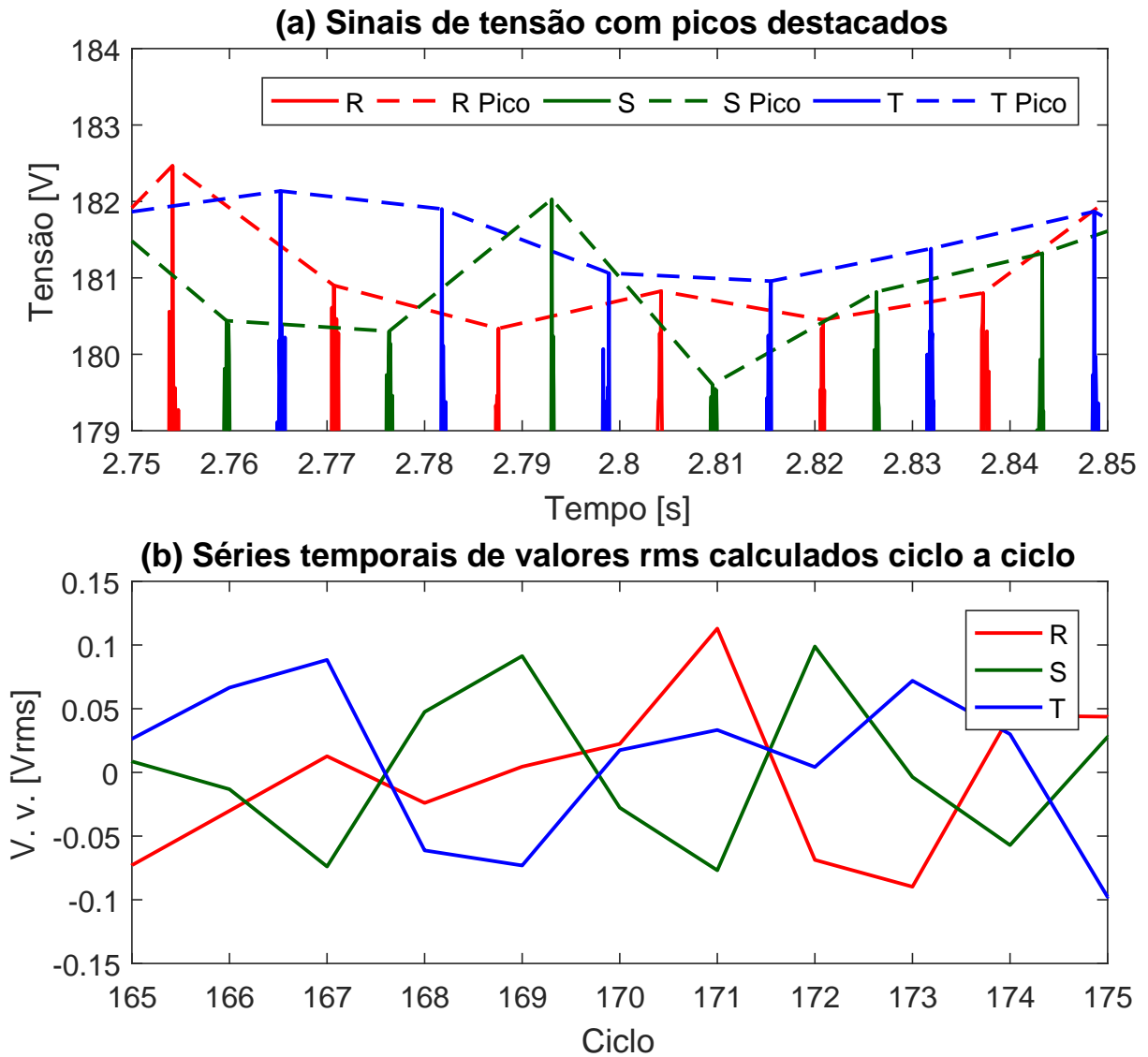


Figura 7 – (a) *Zoom* nos picos de tensão dos sinais de P_x mostrados na Figura 6 e (b) detalhe nas séries temporais de valores rms, de todas as fases de P_x (Rótulo do eixo Y: V. v.: *Voltage variability* ou em português variabilidade de tensão).

Fonte: Autoria própria.

3.1.1.3 Testes com a Função de Correlação Cruzada

Para verificar a performance da função de correlação cruzada, as séries temporais com os valores instantâneos dos sinais das fases R de P_x e R de P_y foram aplicados à função de correlação cruzada, função *xcorr* do MatlabTM. A conclusão foi que não foi possível correlacionar corretamente os sinais usando os seus valores instantâneos. Resultado similar foi obtido ao tentar correlacionar todas as fases S e T, de P_x e P_y . O processamento das 76.800 amostras para cada fase, correspondendo aos 5 segundos de medições, não foi suficiente para identificar o atraso conhecido $\tau=(N_x-N_y)$, igual a 20 ciclos de 60 Hz. Na Tabela 1, pode-se ver os melhores atrasos calculados em ciclos e os correspondentes índices de correlação (entre parênteses) obtidos pela função de correlação cruzada ao correlacionar

todas as fases dos pontos P_x e P_y . Como pode ser observado na tabela, os valores dos índices de correlação obtidos não permitem correlacionar corretamente os sinais, pois o valor numérico do índice é igual a um em módulo para diferentes valores de deslocamento dos sinais.

Tabela 1 – Índices de correlação cruzada usando os valores instantâneos dos sinais.

Ponto P_x	Ponto P_y		
	R	S	T
R	0 (0.9999)	-43 (0.9996)	43 (0.9995)
S	43 (0.9996)	0 (0.9999)	85 (0.9992)
T	-43 (0.9995)	-85 (0.9992)	0 (0.9999)

Fonte: Autoria própria.

Com um resultado completamente diferente, pode-se ver na Figura 8 o resultado da correlação cruzada da fase R de P_x com a fase R de P_y , mas, desta vez, utilizando as séries temporais de valores rms dos sinais calculados ciclo a ciclo. Obteve-se resultados similares para as fases S e T dos pontos. Pode-se notar que a função de correlação cruzada retornou o valor do índice de correlação igual a 0,7686 e calculou corretamente o atraso entre as fases R de P_x e R de P_y , igual a 20 ciclos. Os melhores índices de correlação cruzada para todas as fases foram iguais a 20 ciclos, valor igual ao atraso simulado $\tau=20$ ciclos, e podem ser vistos na Tabela 2. Outra vantagem a ser destacada quando se utiliza as séries temporais de valores rms em vez dos valores instantâneos dos sinais está relacionada à eficiência computacional. Para o mesmo intervalo de tempo de 5 segundos, trabalha-se com vetores de tamanho 300 em vez de 76.800 amostras. Cabe lembrar que a função de correlação cruzada é aplicada 9 vezes para cada operação de alinhamento temporal entre as fases. O tempo médio da execução da função utilizando os valores instantâneos dos sinais foi de 0,1574 s, enquanto a execução utilizando os valores rms ciclo a ciclo dos sinais foi de 0,0011 s, aproximadamente 143 vezes mais rápido. Os testes foram realizados em uma estação de trabalho equipada com um processador do tipo Intel core I7-7500, CPU de 2,70 GHz, 8 GB de RAM e sistema operacional Windows 10 (64 bits e versão 21H2). Os *scripts* do MATLAB® foram executados 1.002 vezes. O melhor e o pior tempo de execução foram descartados e calculou-se a média sobre os demais valores. A eficiência computacional destacada, tanto de memória quanto de tempo de processamento, é bastante interessante para a execução da técnica RmsSync em um sistema embarcado como será apresentado no capítulo 4 da tese.

3.1.2 Passos para Aplicação da Técnica RmsSync

Os passos para aplicar a técnica RmsSync para estabelecer o alinhamento temporal de medições não sincronizadas de dois pontos P_x e P_y de uma rede elétrica podem

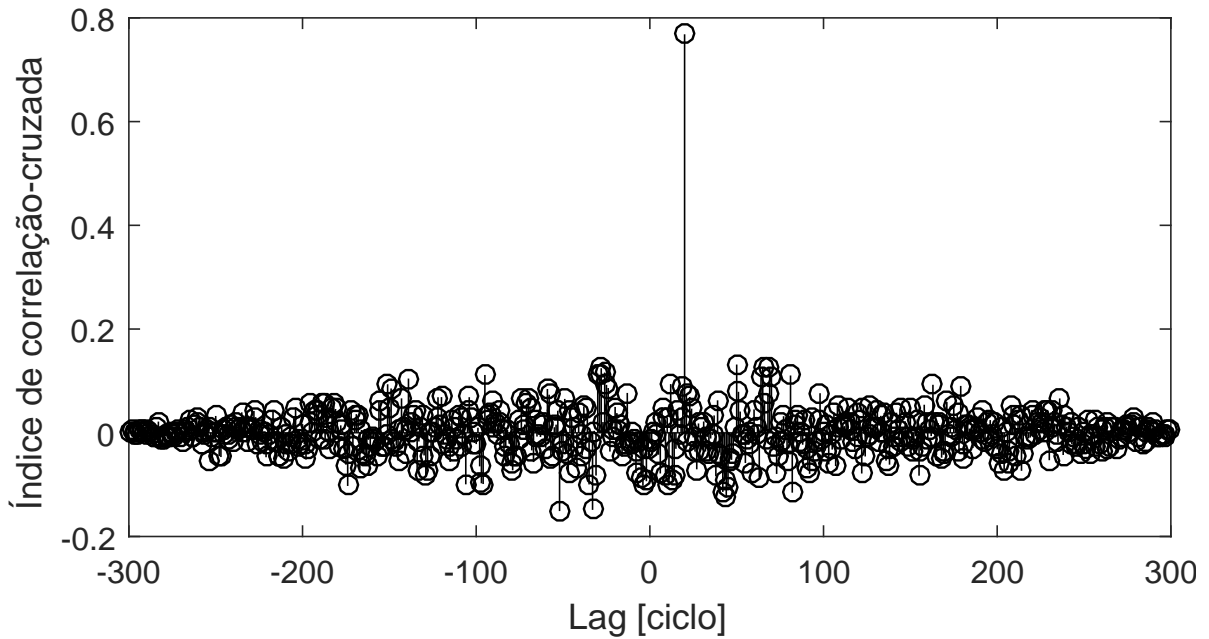


Figura 8 – Correlação da fase R de P_x com a fase R de P_y usando as séries temporais de valores rms calculados ciclo a ciclo. Índice de correlação máximo em 20 ciclos.

Fonte: Adaptado e gerado utilizando a biblioteca de implementação da função de correlação cruzada CCF (do inglês: *cross-correlation function*) de Aguirre (2015).

Tabela 2 – Índices de correlação cruzada usando as séries temporais de valores rms calculados ciclo a ciclo.

Ponto P_x	Ponto P_y		
	R	S	T
R	20 (0.7686)	-48 (0.1522)	-50 (0.1540)
S	56 (0.1439)	20 (0.7669)	-58 (0.1328)
T	1 (0.1370)	-27 (0.1512)	20 (0.7472)

Fonte: Autoria própria.

ser resumidos em:

1. Gere as janelas de medições de tensão de pelo menos 5 segundos para as fases R, S e T de P_x e P_y . Garanta que as janelas tenham pelo menos 3 segundos de medições simultâneas;
2. Aplique processos de filtragem caso os sinais apresentem muito ruído. Um filtro digital do tipo *filtfilt* foi utilizado nos testes apresentados neste capítulo;
3. Estabeleça o ponto inicial para cada janela de processamento começando em um ciclo de 60 Hz;
4. Calcule os valores rms ciclo a ciclo (também chamados de séries temporais de valores rms calculados ciclo a ciclo) para cada vetor;

5. Calcule os índices de correlação cruzada para todas as fases de P_x contra todas as fases de P_y ;
6. A partir da tabela contendo os índices de correlação gerada no item 5, identifique o melhor atraso a ser aplicado nas fases de um dos pontos e que maximize a correlação dos sinais, proporcionando o alinhamento temporal correto para as medições de P_x e P_y .

A extensão para mais localizações é trivial. Para ilustrar a aplicação da técnica RmsSync, considere os dados e gráficos da Figura 9, que representam as janelas de simulação para as fases R de dois pontos P_x e P_y . Os sinais para todas as fases (R, S e T) de cada ponto foram simulados usando as mesmas configurações (*i.e.*, $N_x=20$, $N_y=40$ e $\tau=20$ ciclos, levando aos dados não sincronizados), a frequência de amostragem utilizada foi de 15.360 Hz, o que está associado a 256 amostras por ciclo. Na Figura 9, podem-se ver destacados os atrasos impostos para os sinais de tensão de P_x e P_y . Nenhum processo de filtragem foi necessário neste caso. Para esta simulação, um ruído randômico com variância de 0,7 V foi adicionado a todas as fases de P_x e P_y , com o objetivo de aumentar a excursão vertical das variabilidades como pode ser visto nos gráficos da Figura 10.

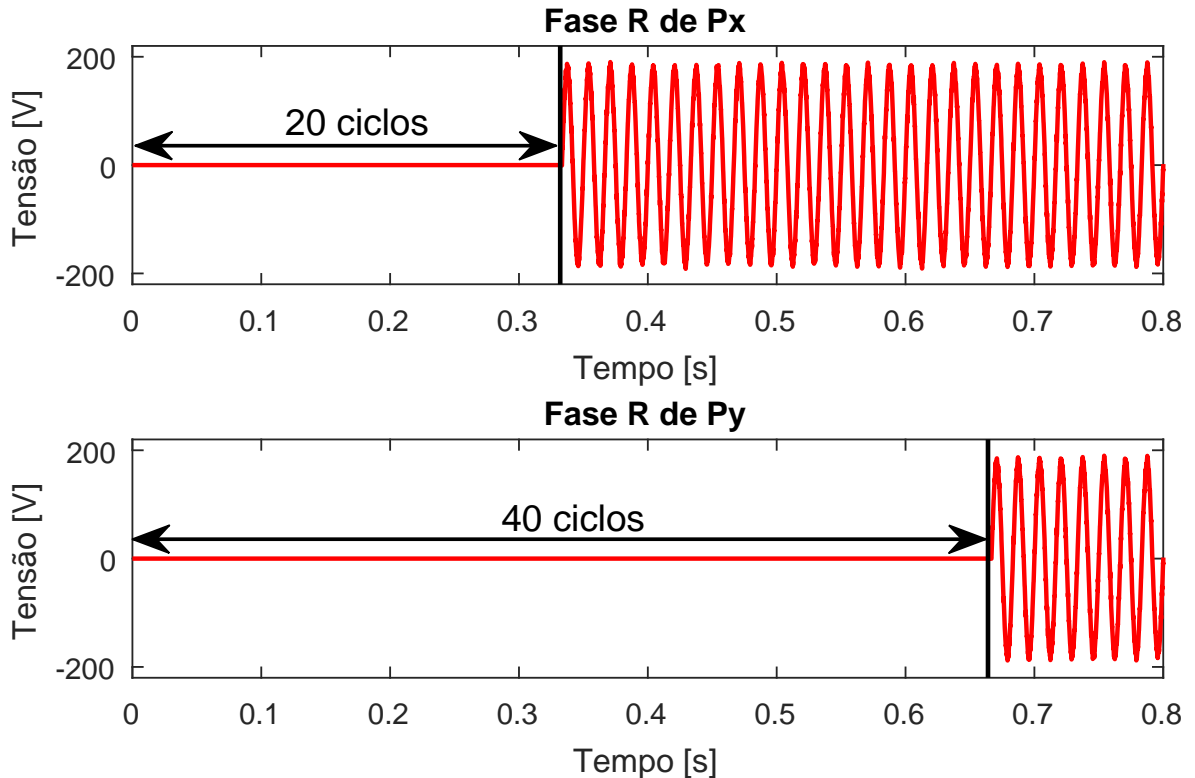


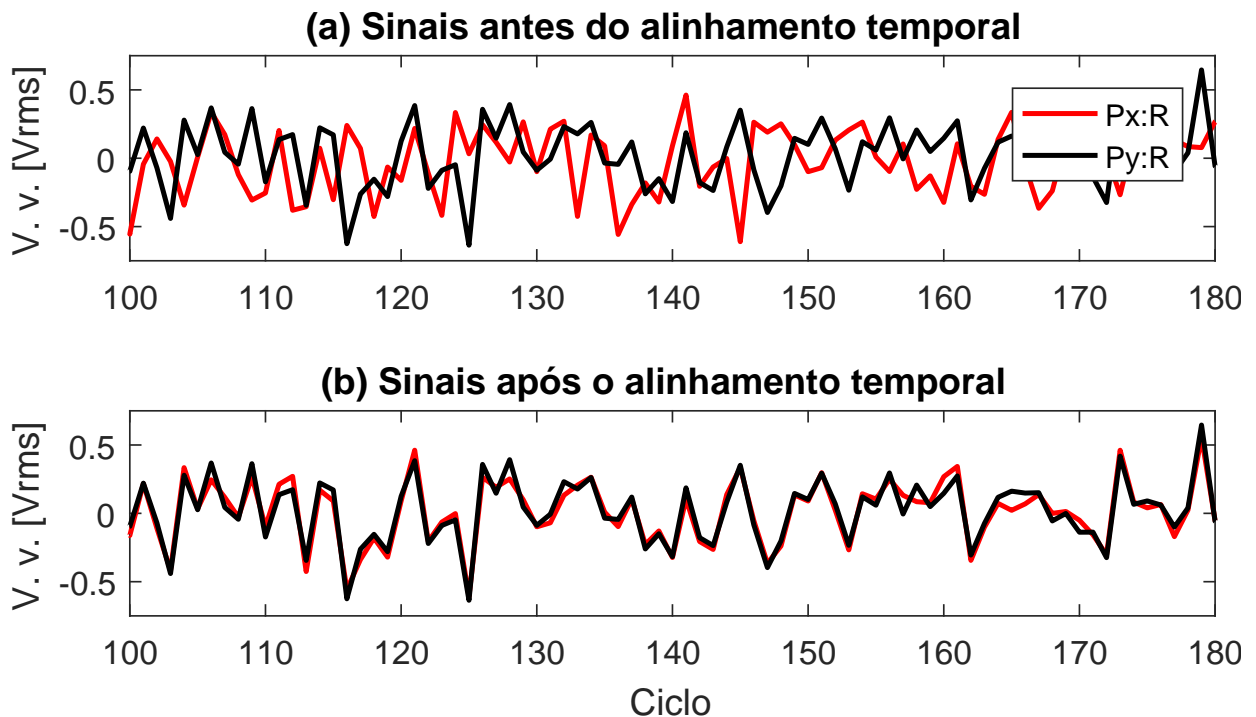
Figura 9 – Janelas de simulação de P_x e P_y com atrasos de 20 ciclos destacados.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3 – Atrasos (Índices de correlação cruzada) usando os valores rms ciclo a ciclo.

Ponto P_x	Ponto P_y		
	R	S	T
R	20 (0.9232)	50 (0.1673)	120 (0.1329)
S	92 (0.1704)	20 (0.8811)	154 (0.1435)
T	152 (0.1362)	50 (0.1261)	20 (0.9041)

Fonte: Autoria própria.

Figura 10 – Sinais simulados para P_x e P_y antes e após o alinhamento temporal utilizando a RmsSync, janelas entre os instantes 100 e 180 ciclos (Rótulo do eixo Y: V. v.: *Voltage variability* ou em português variabilidade de tensão).

Fonte: Autoria própria.

A partir do primeiro elemento dos vetores de dados para todas as fases de P_x e P_y , o início dos ciclos de 60 Hz dos vetores devem ser localizados. Deve-se então, calcular os valores rms ciclo a ciclo para os 300 ciclos. Na Figura 10 (a), pode-se ver um recorte de 80 ciclos na janela resultante desse cálculo. Após a aplicação da técnica, o atraso de 20 ciclos entre os sinais é identificado, como pode ser visto na Tabela 3. O atraso de 20 ciclos é aplicado no sinal referente à fase P_x :R e na Figura 10 (b), pode-se ver os gráficos (P_x :R e P_y :R) após a execução do alinhamento temporal. Como já era esperado, os melhores deslocamentos encontrados corresponderam a 20 ciclos para todas as fases dos pontos P_x e P_y . Os melhores resultados estão localizados na diagonal principal da tabela 3, já que os sinais foram correlacionados na mesma ordem para as fases R, S e T de P_x e P_y .

Para uma validação mais robusta, foram executadas as simulações e testes usando

uma série de 20 valores aleatórios para N_x e N_y . Em cada simulação e após a utilização da técnica RmsSync, foi possível identificar corretamente o alinhamento temporal a ser aplicado nos sinais conforme especificado na tabela 4. Na coluna *Resultado*, o valor 1 indica sucesso no resultado do alinhamento temporal e é computado somente quando os valores calculados para as três fases R, S e T coincidem. Um valor de deslocamento diferente para qualquer uma das fases implica que o alinhamento temporal não convergiu e deverá ser descartado. A técnica RmsSync foi executada para uma série de 100 casos e obteve acurácia de 100 % para todas os casos, corroborando com a sua robustez.

Tabela 4 – RmsSync: Acurácias.

#	R	S	T	Resultado	#	R	S	T	Resultado
1	32	32	32	1	6	51	51	51	1
2	37	37	37	1	7	38	38	38	1
3	46	46	46	1	8	22	22	22	1
4	25	25	25	1	9	47	47	47	1
5	39	39	39	1	10	53	53	53	1

Fonte: Autoria própria.

Os cálculos e resultados referentes à técnica RmsSync, apresentados até este ponto da tese, foram implementados e testados no MATLAB[®]. A Figura 11 ilustra, em forma de fluxograma, o processo de aplicação da técnica. Até o momento da elaboração desta tese, a aplicação da abordagem proposta pela técnica RmsSync para o alinhamento temporal de medições de tensão constitui uma contribuição original deste trabalho.

3.2 Pareamento da Técnica RmsSync com Referências Bibliográficas Mais Próximas

Baseado na metodologia do tipo dividir para conquistar para a resolução de problemas em sistemas computacionais, a técnica RmsSync pode ser dividida para solucionar dois problemas menores A e B, a saber. A geração dos vetores rms ciclo a ciclo de cada um dos pontos de uma rede elétrica está associado ao escopo do problema A e a aplicação da técnica para executar o alinhamento temporal propriamente dito, o foco do problema B. A resolução dos dois problemas compreende as etapas fundamentais para o estabelecimento de uma mesma referência temporal para as medições não sincronizadas.

Se o escopo da técnica RmsSync se resumisse à resolução do problema B, sua comparação com outras técnicas para alinhamento temporal se resumiria à comparação da já difundida técnica de correlação cruzada com outras técnicas existentes para alinhamento temporal. No trabalho de Rhudy (2014), é apresentada uma aplicação de tempo real que

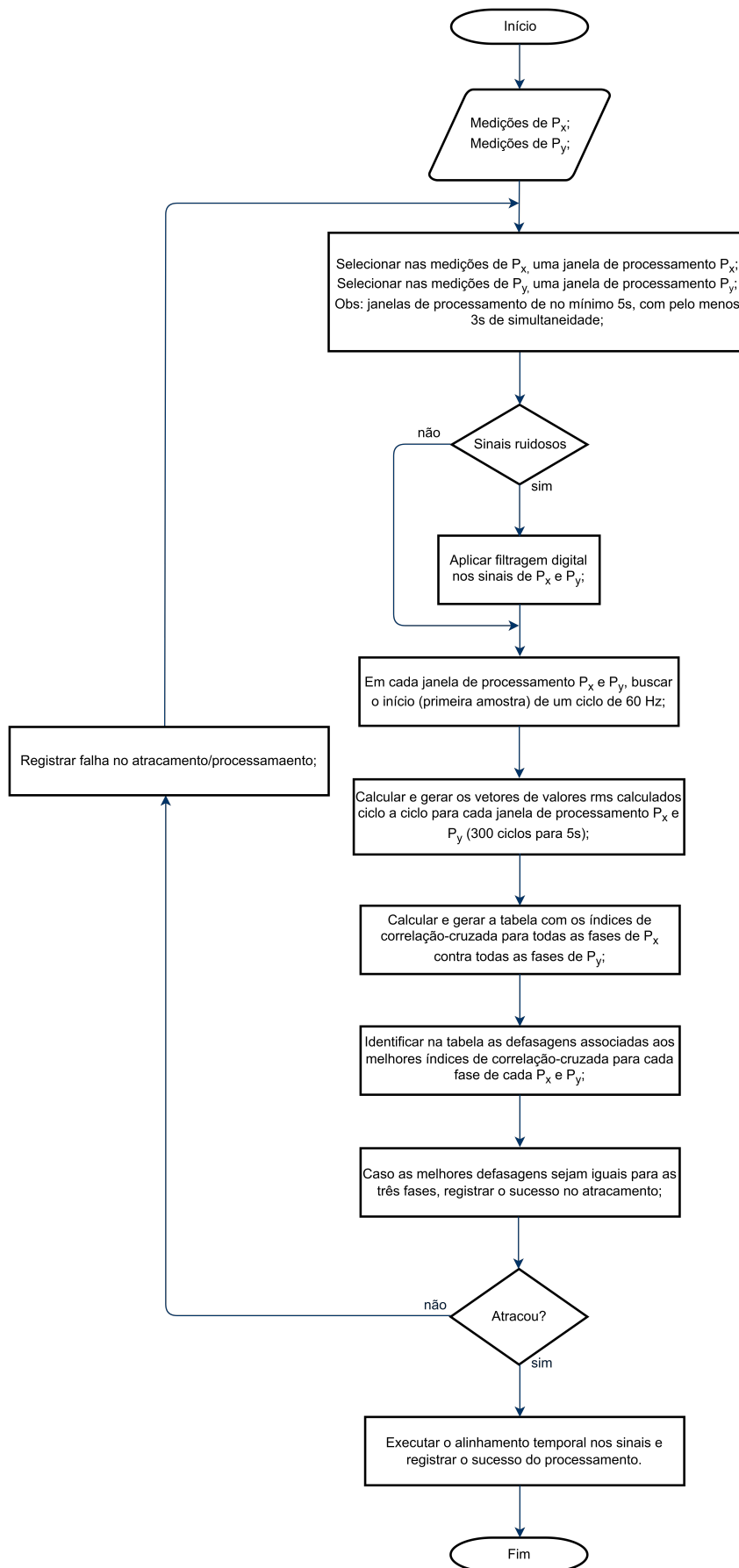


Figura 11 – Fluxograma da técnica RmsSync

Fonte: Autoria própria.

é utilizada para controlar a altitude e a posição de um aeromodelo, e são abordadas duas técnicas para alinhamento temporal utilizadas no projeto. O sistema de controle do aeromodelo faz uso da técnica *Pulse Per Second* (PPS) que se baseia no recebimento de um sinal (pulso) de controle emitido por um sistema GPS a cada segundo. O sinal de pulso recebido por uma primeira unidade de hardware é utilizado para estabelecer uma referência temporal para os demais módulos de hardware do sistema. Quatro unidades de hardware chamadas de *Inertial Measurement Units* (IMU), amostram os sinais associados à posição e altitude do equipamento em instantes de tempo ligeiramente defasados. Uma quinta unidade de hardware é a responsável por utilizar a função de correlação cruzada para executar o alinhamento temporal de todos os sinais das IMU com o sinal de referência estabelecido pelo GPS. Os módulos ADCs das IMU têm resolução de 16 bits e trabalham com frequência de amostragem de 50 amostras por segundo, considerada baixa em comparação com as altas taxas de amostragem demandadas pela técnica RmsSync e por sistemas de medição de energia de um modo geral. Na aplicação da função de correlação, foram utilizados vetores de tamanho 2.416 contendo os valores instantâneos dos sinais. No início deste capítulo, foi demonstrado que trabalhar com os valores instantâneos dos sinais torna o desempenho computacional da função de correlação cruzada bastante ruim em comparação a quando se aplica alguma técnica para sumarizar os valores instantâneos dos sinais. Se os sinais das IMUs fossem periódicos e apresentassem variabilidades estocásticas, como acontece com os perfis de tensão das redes elétricas, a utilização da técnica RmsSync nos sistemas de controle do aeromodelo diminuiriam drasticamente o esforço de processamento computacional do sistema. Pelo menos pelo fato de serem utilizados os vetores rms ciclo a ciclo dos sinais em vez dos valores instantâneos, conforme já abordado no início do capítulo. A taxa de amostragem exigida dos ADCs do sistema é baixa e isso facilitaria os cálculos dos valores rms dos sinais que são realizados em tempo real.

No trabalho de [Zhang e Wu \(2006\)](#), os autores apresentam uma proposta para otimização da função de correlação cruzada clássica. Eles sugerem que a função “Parábola” comumente utilizada nos cálculos das correlações cruzadas, seja substituída por uma função Gaussiana dependendo do tipo de aplicação. Eles defendem que a nova abordagem traz consigo uma melhor precisão no cálculo da estimação da defasagem temporal usando a estratégia de localização por máximo local. Já [Simaan \(1984\)](#), apresenta a sua contribuição para contornar um problema da função de correlação. Sem fazer uso de interpolação, o alinhamento temporal no domínio do tempo deve ser um múltiplo inteiro do período de amostragem. Em seu trabalho, o autor apresenta uma maneira de contornar tal problema com o cálculo do deslocamento temporal como um problema de otimização de tempo discreto no domínio da frequência. A abordagem evita o ajuste das “parábolas” para os picos da correlação cruzada e não requer o desempacotamento das fases dos espectros dos sinais a serem alinhados durante os cálculos.

No trabalho de [Nuttall \(1968\)](#), o autor estuda a largura da faixa dinâmica mí-

nima necessária para calcular os valores rms e para uma boa sensibilização da função de correlação. O trabalho de [Morales et al. \(2005\)](#), da área médica, pode ser aplicado em sistemas de leitura e análise de eletrocardiogramas. No trabalho, o autor aplica a função de correlação sobre os valores rms dos sinais para executar o alinhamento temporal em um sistema para processamento e análises de exames de eletrocardiogramas. Já em [Junquera et al. \(2009\)](#), também da área médica, os autores aplicaram a função de correlação em um sistema de eletrocardiograma, no entanto a função de correlação foi aplicada sobre os valores instantâneos para calcular a defasagem entre os sinais, mas sem fazer uso dos valores rms calculados ciclo a ciclo como é sugerido e feito pela técnica RmsSync.

Outro trabalho sobre métodos para alinhamento temporal a ser destacado é o de [Choi et al. \(2020\)](#). No trabalho, os autores apresentam uma proposta de otimização para o algoritmo clássico *dynamic time warping* (DTW), aplicado à extração de características e classificação de séries temporais com o objetivo de reduzir a sua complexidade computacional. Resultados experimentais utilizando 19 bases de dados demonstraram que as otimizações propostas pelos autores reduziram a complexidade computacional do DTW clássico em até 52.2 %. Os resultados apresentados se encaixam em um trabalho de classificação da área de reconhecimento de padrões. Outro trabalho utilizando técnicas de alinhamento temporal, mas também em um contexto de classificação, é o apresentado em [Folgado et al. \(2018\)](#). Os autores apresentaram um levantamento bibliográfico consistente e compararam vários métodos de reconhecimento de padrões aplicados em um contexto de alinhamento temporal para series temporais, mas não usaram a abordagem de usar séries temporais de valores rms calculados ciclo a ciclo como é realizado pela técnica RmsSync.

Cabe destacar que a técnica RmsSync tem escopo de aplicação diferente dos trabalhos apresentados no parágrafo anterior. Um dos objetivos é que a técnica seja incorporada no *kernel* de equipamentos medidores de energia de forma a permitir que o alinhamento temporal das medições e a sincronização dos relógios associados, seja realizada de forma automática. Para que isso seja possível, é necessário pré-processar o grande número de amostras geradas na etapa de amostragem, em vetores menores de informações úteis que permitam que o sistema digital trabalhe sem atingir um gargalo de processamento e transmissão dos dados. A exemplo do cálculo das séries temporais de valores rms calculados para cada ciclo dos sinais, conforme foi demonstrado no início do capítulo, é praticamente inviável para qualquer sistema digital embarcado processar o grande volume de dados gerados e enviar todas as informações via rede em tempo real e de forma contínua, sem atingir algum gargalo, seja de processamento ou de comunicação. Algum tipo de processamento deve ser aplicado para reduzir a quantidade de dados amostrados, como no caso do RmsSync que calcula os valores rms por ciclo dos sinais. A abordagem possibilita a utilização de mensagens menores durante a transmissão dos dados. Além disso, há menos consumo de recursos e necessidade de processamento do hardware embarcado. As tarefas do sistema digital poderão ser melhor escalonadas para garantir uma perfeita sincronia

para execução das tarefas de amostragem, pré-processamento e transmissão de dados. A dinâmica das operações da técnica RmsSync favorecem a implementação de sistemas de tempo real conforme será abordado no capítulo 4 da tese.

O autor está ciente que uma revisão da literatura mais aprofundada sobre técnicas para alinhamento temporal de medições, enriqueceria ainda mais esse trabalho de doutoramento. No entanto por questões de escopo e prazo, resolveu-se dividir os esforços em outras frentes de trabalho do cronograma, principalmente na solução integrada da técnica e do protótipo MIQE. A técnica RmsSync não pode ser resumida apenas em solucionar o problema A (geração das séries temporais de valores rms) apresentado no início desta seção, pois essa é uma operação relativamente simples e dominada na área de processamento de sinais e sistemas embarcados. O objetivo é que a técnica seja incorporada em equipamentos inteligentes medidores de QEE conforme a visão das AMIs e que apresentam grandes desafios, conforme já mencionado ao longo da tese. No capítulo 5, serão apresentados alguns resultados muito relevantes e promissores onde a técnica RmsSync foi parcialmente embarcada no protótipo MIQE.

3.3 Simulações Utilizando o PSCADTM

Esta seção é dedicada a descrever os projetos elaborados para fazer uma validação mais sistemática da técnica RmsSync com medições simuladas de segmentos de uma rede elétrica trifásica. Tomando a rede elétrica da UFMG como referência, circuitos contemplando uma subestação de energia, linhas aéreas de distribuição, cabos condutores, transformadores e circuitos de trechos da rede elétrica de baixa tensão (BT) foram modelados no PSCADTM. Um total de quatro pontos de medição foram escolhidos para análises: o lado BT de um transformador de potência (P_1) e três salas de laboratórios (2514, 2216 e 1110) localizados na Escola de Engenharia da UFMG (referenciados respectivamente como P_3 , P_4 e P_5 ; ou *Ponto 3*, *Ponto 4* e *Ponto 5* nos projetos de simulação). Outro ponto de medição identificado como P_2 nos projetos de simulação foi reservado para análises futuras. A variabilidade de tensão de aproximadamente $2 V_{rms}$, verificada nas medições em laboratório, foi simulada combinando variações aleatórias na subestação de energia, componente fonte de tensão com magnitude variável do PSCADTM, e variações aleatórias aplicadas em cargas localizadas próximas aos laboratórios. Os detalhes dos projetos de simulações serão apresentados na sequência.

Uma visão parcial da seção de média tensão (MV, 13,8 kV) do circuito de simulação pode ser vista na Figura 12, e na Figura 13 está representada a seção de baixa tensão (LV, 220 V). A seção de média tensão compreende uma fonte de tensão variável (138 kV), uma subestação com transformador de potência (25 MVA, 138 kV/13,8 kV), uma linha aérea de 6 km de distância, um cabo isolado subterrâneo de 50 metros e um

transformador de potência T_1 (750 kVA, 13,8 kV/220 V). O lado BT do transformador de potência corresponde ao ponto de medição P_1 (*Ponto 1* na figura).

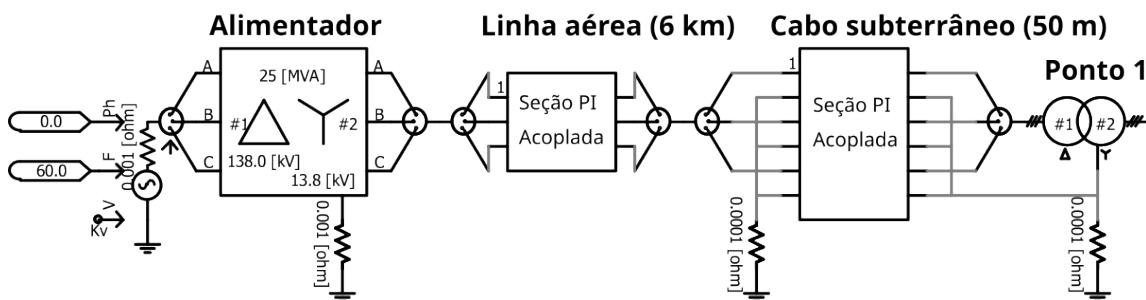


Figura 12 – Circuito de simulação compreendendo alimentador da CEMIG, linhas aéreas e cabo subterrâneo até a entrada da subestação de energia da Escola de Engenharia da UFMG.

Fonte: Autoria própria.

Um exemplo de seção de baixa tensão, Figura 13, foi modelado utilizando cabos condutores de baixa tensão e cargas variáveis. Diferentes circuitos foram usados para cada ponto de medição P_3 , P_4 e P_5 com diferentes comprimentos de cabos e bitolas. O ponto P_3 , sala 2514, está à 110 m do lado baixa tensão de T_1 , enquanto P_4 , sala 2216, e P_5 , sala 1110, estão, respectivamente, à 30 m e 50 m de distância de T_1 .

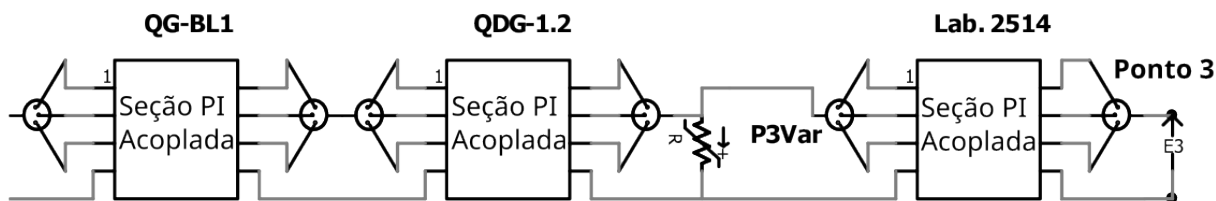


Figura 13 – Circuito de simulação desde a subestação de energia da Escola de Engenharia até o laboratório da sala 2514 da Escola de Engenharia da UFMG.

Fonte: Autoria própria.

O Centro de Pesquisa e Recursos Hídricos (CPH) está localizado a uma distância de 2,2 km da Escola de Engenharia (EE). Utilizando os mesmos passos e blocos da Figura 12, foi modelada uma linha aérea de 2,2 km com origem na EE e término na entrada do CPH. A interligação da subestação do CPH à linha aérea da concessionária de energia elétrica de Minas Gerais (CEMIG) foi modelada utilizando 4 cabos isolados subterrâneos de 30 metros. Desde a saída do transformador de potência T_2 (750 kVA, 13,8 kV/220 V) até a bancada do laboratório 29, ponto P_6 para medições e análises futuras, foram modelados os mesmos segmentos da Figura 13, no entanto com distância total de 100 metros.

Os cabos e as linhas de transmissão foram modelados utilizando seções PI, considerando que o foco do estudo era uma rede elétrica operando a 60 Hz (PSCAD, 2016).

Os parâmetros para os cabos de cobre foram modelados com base no catálogo de condutores da fabricante Prysmian (2019) e para as linhas de transmissão foram utilizados os manuais de referência da concessionária de energia elétrica CEMIG (2017). Os cabos subterrâneos foram modelados como cabos isolados de 8.7/15kV, com seção transversal de #150mm². Os segmentos que interligam os transformadores aos quadros QG-BL_x são de 0.6/1kV, com seção transversal de #240mm² e foram modelados com 20 metros. Todos os condutores foram modelados como cabos individuais para cada uma das fases R, S e T. As ligações dos quadros QG-BL_x aos quadros QDG-*x.y* foram modeladas com cabos condutores com seção transversal de #150mm², acomodados em bandejas de alumínio aterradas e presas ao teto das instalações. O comprimento total dos condutores referentes à rede elétrica de baixa tensão compreendeu a distância dos quadros de força dos respectivos laboratórios à saída dos transformadores, descontados os 20 metros referentes às ligações dos transformadores aos primeiros quadros de força localizados nos laboratórios. As ligações em cada laboratório foram modeladas como fios de cobre de seção transversal de #16mm² e comprimento total de 10 metros. Os 3 cabos da rede de distribuição da CEMIG foram modelados como cabos de alumínio AWG 1/0, com seção transversal de #50mm² e um cabo por fase.

3.3.1 Variabilidade dos Perfis de Tensão da Rede Elétrica

Para simular as variações estocásticas da ordem de $2 V_{rms}$ nos perfis de tensão da rede elétrica mencionados anteriormente, foram testadas as seguintes abordagens: (i) variar aleatoriamente a magnitude de 138 kV da fonte do alimentador da rede elétrica; (ii) variar aleatoriamente as magnitudes das potências das cargas elétricas ligadas em cada quadro de força QDG-*x.y*, carga de rótulo $P_3 Var$ na Figura 15 para o ponto P_3 ; e, por último, (iii) combinar variações aleatórias na magnitude da fonte do alimentador com variações aleatórias nas magnitudes das potências das cargas elétricas.

Abordagem (i): variações na magnitude da fonte de tensão do alimentador. A fonte de tensão do alimentador utilizada nas simulações tem controle externo para os valores da frequência, ângulo de fase e magnitude da tensão. A frequência e o ângulo de fase foram configurados com valores fixos de 60 Hz e 0°, respectivamente. Já a magnitude da fonte de tensão do alimentador, que tem unidade em kV, é controlada externamente pelo circuito da Figura 14, responsável por gerar os valores aleatórios utilizados para controlar as variações estocásticas dos perfis de tensão da fonte a cada ciclo da rede elétrica.

Abordagem (ii): variações na magnitude das potências das cargas elétricas. O arranjo de cargas elétricas da Figura 15 representa a carga de potência variável $P_3 Var$, associado ao ponto P_3 da rede elétrica. Esta carga é do tipo trifásica resistiva com magnitude de potência variável, modelada no PSCADTM como uma carga trifásica resistiva de valor fixo em paralelo com três cargas resistivas monofásicas de magnitudes de potências variáveis.

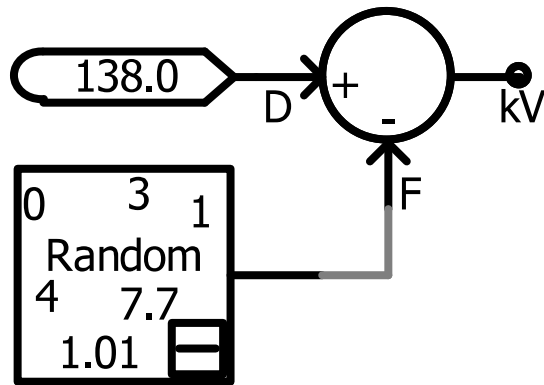


Figura 14 – Circuito utilizado na variação estocástica da magnitude da fonte do alimentador.

Fonte: Autoria própria.

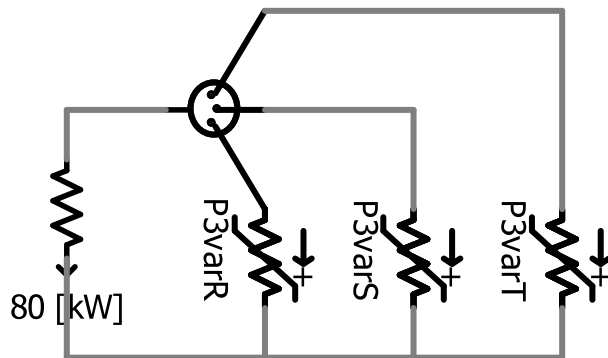


Figura 15 – Modelagem da carga de potência variável $P_3 Var$.

Fonte: Autoria própria.

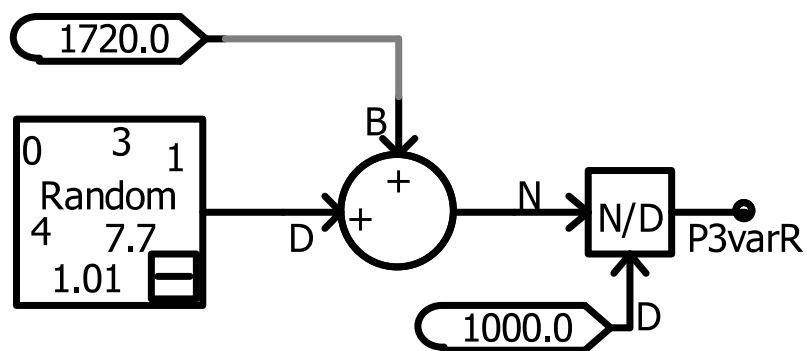


Figura 16 – Circuito utilizado para controlar os valores das resistências elétricas de $P_3 Var$.

Fonte: Autoria própria.

As cargas elétricas trifásicas de magnitude de potências variáveis simulam os acionamentos e os desligamentos de cargas elétricas em paralelo com os laboratórios, onde foram simulados os sinais de tensão. As cargas elétricas monofásicas estão associadas a cada

uma das fases R, S e T da rede elétrica e têm as magnitudes de potências controladas externamente por um circuito como o da Figura 16, sendo este utilizado para controlar a fase R. O circuito é responsável por gerar os valores aleatórios para a resistência Rvr , entre os valores mínimo (Rvr_{min}) e máximo (Rvr_{max}) a cada ciclo da rede elétrica, para a carga resistiva da fase R do ponto P_3 . Existe um circuito similar para cada uma das três fases dos quatro laboratórios, totalizando 12 circuitos de controle.

Os valores configurados para as cargas elétricas variáveis basearam-se nos carregamentos utilizados nos transformadores de potência. As configurações foram definidas como sendo carregamento BAIXO, MÉDIO, ALTO e MUITO ALTO. O carregamento BAIXO correspondeu a 25 % da carga nominal de cada um dos transformadores T_1 e T_2 . Já os carregamentos MÉDIO, ALTO e MUITO ALTO corresponderam aos valores de 50, 75 e 100 % da carga nominal, respectivamente. Para o transformador T_1 da EE, o carregamento foi distribuído com percentuais de 50 % para a carga variável de P_3 , 30 % para a carga variável de P_4 e 20 % para a carga variável de P_5 . O carregamento de T_2 foi todo atribuído à carga variável de P_6 , ou seja, 100 % do valor nominal.

Na Tabela 5, pode-se ver os valores dos parâmetros Rvr_{min} e Rvr_{max} das cargas elétricas monofásicas de potências variáveis, calculados para uma configuração de carregamento BAIXO dos transformadores e variabilidade de 10 % nas magnitudes das potências das cargas trifásicas variáveis. Para se obter tal variação nas cargas elétricas trifásicas, 80 % da carga total foi atribuída à carga elétrica de magnitude fixa. A parcela necessária para complementar a variação requerida foi distribuída entre as três cargas elétricas monofásicas que foram configuradas para variar entre 10 % e 30 % do valor nominal, de forma a garantir a variação de ± 10 % no valor total da carga. O componente *Random* da biblioteca do PSCADTM (Figura 16) é o responsável por gerar os valores aleatórios entre 0 e o valor $1.000 * (Rvr_{max} - Rvr_{min})$. O resultado deve ser somado com $Rvr_{min} * 1.000$ e dividido por 1.000, já que a unidade da carga é dada em kW, antes de ser aplicada na carga referente à fase R de P_3 , rótulo $P_3 Var_R$. Para variar as cargas elétricas trifásicas dos demais pontos, rótulos $P_x Var_y$ onde x representa cada um dos pontos e y cada uma das fases, foram modelados circuitos análogos.

3.3.2 Simulações pelos Tipos de Carregamentos dos Transformadores

Para todos os tipos de carregamentos dos transformadores, foram testadas variações estocásticas aplicadas na magnitude da fonte de tensão do alimentador e nas cargas elétricas trifásicas de potências variáveis. O objetivo era descobrir quais configurações provocavam os desvios estocásticos da ordem de $2 V_{rms}$ nos perfis de tensão da rede elétrica em cada um dos laboratórios e a cada ciclo. Vários testes foram realizados e os resultados mais relevantes foram obtidos com as seguintes configurações:

Tabela 5 – Limites para os valores das resistências elétricas para carregamento baixo do transformador e variabilidade de 10 % das cargas elétricas de potências variáveis.

Carga	Potência (kW)	Magnitude Fixa (kW)	Rvr_{max} (Ω)	Rvr_{min} (Ω)
1	93.75	75.00	5.16	1.72
2	56.25	45.00	8.60	2.87
3	37.50	30.00	12.90	4.30
4	187.50	150.00	2.58	0.86

Fonte: Autoria própria.

1. A magnitude da fonte de tensão do alimentador foi mantida sem variações e todos os tipos de carregamentos foram testados com variações de 10 %, 20 %, 30 %, 40 % e 50 %, nas magnitudes das potências das cargas trifásicas variáveis.
2. As magnitudes das cargas trifásicas variáveis foram mantidas com valores fixos e a magnitude da fonte de tensão do alimentador foi testada com variações de 1 %, 2 %, 3 %, 4 % e 5 %.
3. A magnitude da fonte de tensão do alimentador foi mantida com variações da ordem de 1 % e as magnitudes das cargas trifásicas de potências variáveis foram testadas com as variações de 50 %, 40 %, 30 %, 20 %, 10 %, 5 %, 4 %, 3 %, 2 % e 1 %.

Após executar as simulações nas configurações dadas, as conclusões foram:

1. Para o carregamento BAIXO, foi necessário aplicar pelo menos 40 % de variações nas magnitudes das potências das cargas trifásicas variáveis para gerar variabilidades de $2 V_{rms}$ nos perfis de tensão dos laboratórios. Entretanto, variações desta magnitude a cada ciclo não condizem com a realidade das redes elétricas, e por isso, a abordagem foi descartada.
2. Variações da ordem de 1 % na magnitude da fonte de tensão do alimentador provocaram desvios aproximados de $1 V_{rms}$ nos perfis de tensão dos laboratórios. Para variações da ordem de 5 % as variabilidades foram de aproximadamente $7 V_{rms}$. Entretanto, como variações de 5 % na magnitude da fonte de tensão do alimentador a cada ciclo não condizem com a realidade das redes elétricas, resolveu-se utilizar o valor 1 %.
3. Variações da ordem de 1 % na magnitude da fonte de tensão do alimentador combinadas com variações de 5 % nas potências das cargas trifásicas variáveis, proporcionaram as variações desejadas de pelo menos $2 V_{rms}$ nos perfis de tensão da rede

elétrica trifásica dos laboratórios, mesmo no pior caso de carregamento BAIXO. Estas foram as configurações utilizadas nos circuitos de simulação e que geraram os valores da Tabela 5.

As simulações foram executadas para todos os cenários de carregamento dos transformadores. As melhores configurações e que proporcionaram os desvios da ordem de 1.5 % nos valores dos perfis de tensão da rede elétrica a cada ciclo, corresponderam às variações aleatórias da ordem de 1 % aplicadas sobre a magnitude da fonte do alimentador combinadas com variações de 5 % nas magnitudes das potências das cargas trifásicas variáveis. Os desvios simulados da ordem de $2 V_{rms}$ a cada ciclo estavam próximos dos valores medidos em laboratório. Passou-se então para a fase de processamento dos sinais simulados e testes de alinhamento temporal utilizando a técnica RmsSync.

3.4 Testes de Performance da Técnica RmsSync com Medições Simuladas no PSCADTM

Os projetos de simulação de medições realizadas no MATLAB[®], seção 3.2, e no PSCADTM, seção 3.4, utilizaram os mesmos parâmetros de configuração: frequência de amostragem de 15.360 amostras por segundo, janelas de simulação de 7 segundos e janelas de processamento de 5 segundos. A abordagem utilizada para simular as campanhas de medições defasadas também foi a mesma, ou seja, simulou-se valores aleatórios para os números N_x e N_y , conforme abordado na seção 3.2 do capítulo.

3.4.1 Acurácias da RmsSync

Realizou-se dez execuções para alinhamento temporal das campanhas de medições não sincronizadas utilizando a técnica RmsSync com valores aleatórios para N_x e N_y , para uma configuração de carregamento BAIXO dos transformadores. Em todas as execuções, a implementação da técnica RmsSync foi capaz de estabelecer o alinhamento temporal corretamente (indicado nas colunas R, S e T) dos dados simulados. Os resultados podem ser vistos na Tabela 6.

No início da execução da técnica RmsSync, deve-se informar os dois pontos da rede elétrica a serem considerados no processamento do alinhamento temporal das medições simuladas, parâmetros de entrada P_x e P_y . Foram realizados testes com todas as campanhas e serão apresentados os resultados para a saída do transformador T_1 , $P_x=P_1$ e para o laboratório 2514, $P_y=P_3$. A coluna com o título “#” da tabela 6 se refere ao número da execução da operação. As colunas de rótulos “R”, “S” e “T” contêm os melhores deslocamentos (defasagem ou atraso) a serem aplicados nas três fases dos pontos P_x ou P_y para alinhar temporalmente os sinais. Conforme já foi mencionado na seção 3.2.2, o valor

Tabela 6 – RmsSync: Acurácias.

#	R	S	T	Resultado	#	R	S	T	Resultado
1	11	11	11	1	6	16	16	16	1
2	35	35	35	1	7	10	10	10	1
3	14	14	14	1	8	15	15	15	1
4	18	18	18	1	9	21	21	21	1
5	23	23	23	1	10	34	34	34	1

Fonte: Autoria própria.

1 na coluna de rótulo *Resultado* indica a convergência do alinhamento temporal para as três fases utilizando a técnica RmsSync e o valor 0 corresponde a um erro. O resultado é computado através da utilização da matriz contendo os índices de correlação cruzada de todas as fases dos dois pontos, que será explicado na subseção seguinte e que descreve as etapas e passos de execução “única” da técnica RmsSync. A RmsSync foi testada também para um número variando de 10 até 100 e de 100 até 500 execuções. Em todas as execuções, a acurácia da RmsSync foi de 100 %, o que corrobora com a sua robustez.

3.4.2 Acurácias da Técnica RmsSync: Execução Única

Para ilustrar como é feito o cálculo das acurácias nos testes de alinhamento temporal utilizando a técnica RmsSync, será considerada uma execução da operação utilizando como parâmetros de entrada os sinais de tensão dos pontos $P_x=P_1$ e $P_y=P_3$. Na Figura 17, pode-se ver os gráficos referentes aos valores rms calculados para P_x e na Figura 18, os valores calculados para P_y . O desvio médio da tensão rms para 300 ciclos foi de 2.3 V_{rms} , utilizando como referencial o valor de 127 V_{rms} .

Os resultados dos cálculos de todos os índices de correlação cruzada podem ser vistos na Tabela 7. O mesmo valor calculado de 25 ciclos para todas as fases indica a convergência do alinhamento temporal para P_x e P_y . Um valor diferente de deslocamento calculado para qualquer uma das fases implicaria em uma violação de restrição e não convergência da técnica, pois o deslocamento tem de ser o mesmo para as 3 fases. Em outras palavras, de um ponto de vista prático, não faz sentido manter uma das fases de um sistema elétrico polifásico com um referencial temporal diferente do referencial temporal das demais fases.

Os gráficos referentes às janelas de processamento de P_x e P_y , fase R, podem ser vistos na Figura 19 (a) entre os instantes de tempo 100 e 180 ciclos. É difícil perceber as semelhanças sutis nas variabilidades a olho nu, pois os sinais estão defasados no tempo. Mas, após a utilização da RmsSync para executar o alinhamento temporal, as semelhanças

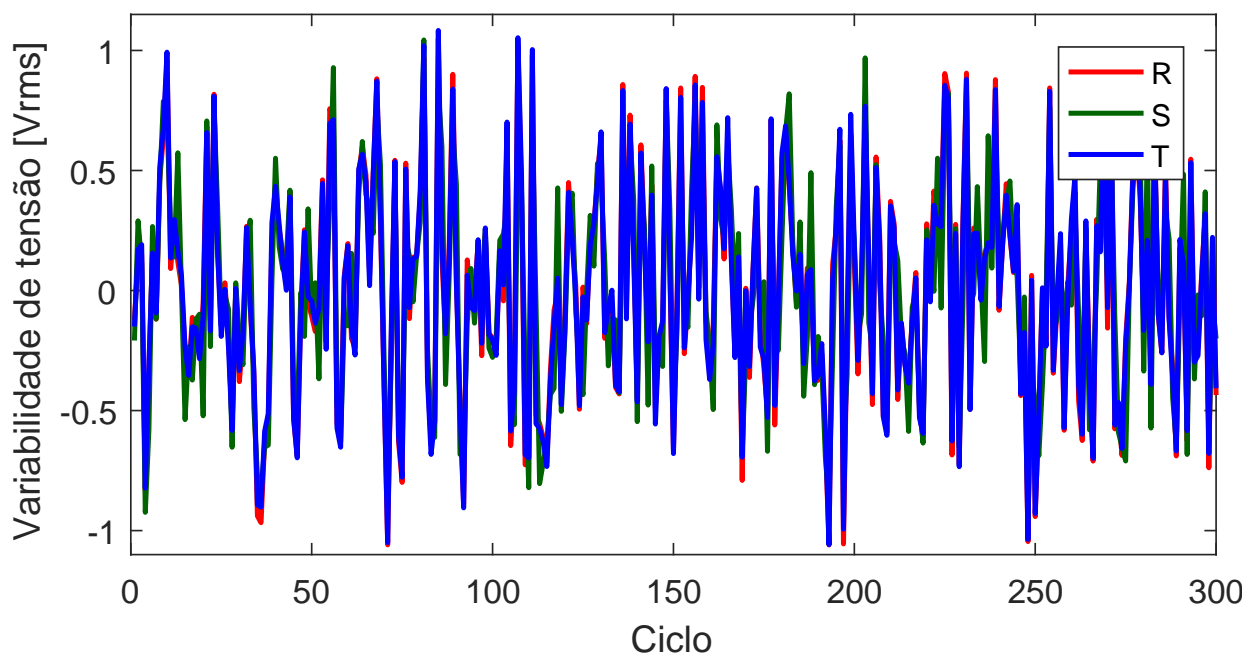


Figura 17 – Variabilidade das tensões de P_x , fases R, S e T utilizando como referencial $127 V_{rms}$.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 – Atraso de tempo em ciclos (Índice de correlação cruzada).

Ponto P_x	Ponto P_y		
	R	S	T
R	25 (0.890)	29 (0.773)	22 (0.764)
S	26 (0.770)	25 (0.884)	31 (0.830)
T	15 (0.832)	10 (0.761)	25 (0.895)

Fonte: Autoria própria.

entre os sinais ficam evidentes, como poder ser observado na Figura 19 (b).

Para demonstrar ainda mais a qualidade dos resultados que a RmsSync pode fornecer, os dados para P_x e P_y , após o alinhamento temporal, para toda janela de processamento e para um *zoom* de 80 ciclos pode ser visto na Figura 20. Cabe destacar que, para estas configurações, as variações dos perfis de tensão são muito pequenas, o que torna praticamente impossível correlacionar corretamente os sinais utilizando os seus valores instantâneos. Entretanto, o alinhamento temporal das campanhas foi realizado com sucesso utilizando a metodologia proposta, e, desta vez, utilizando medições simuladas seguindo uma metodologia mais rigorosa, proporcionada pelo PSCADTM.

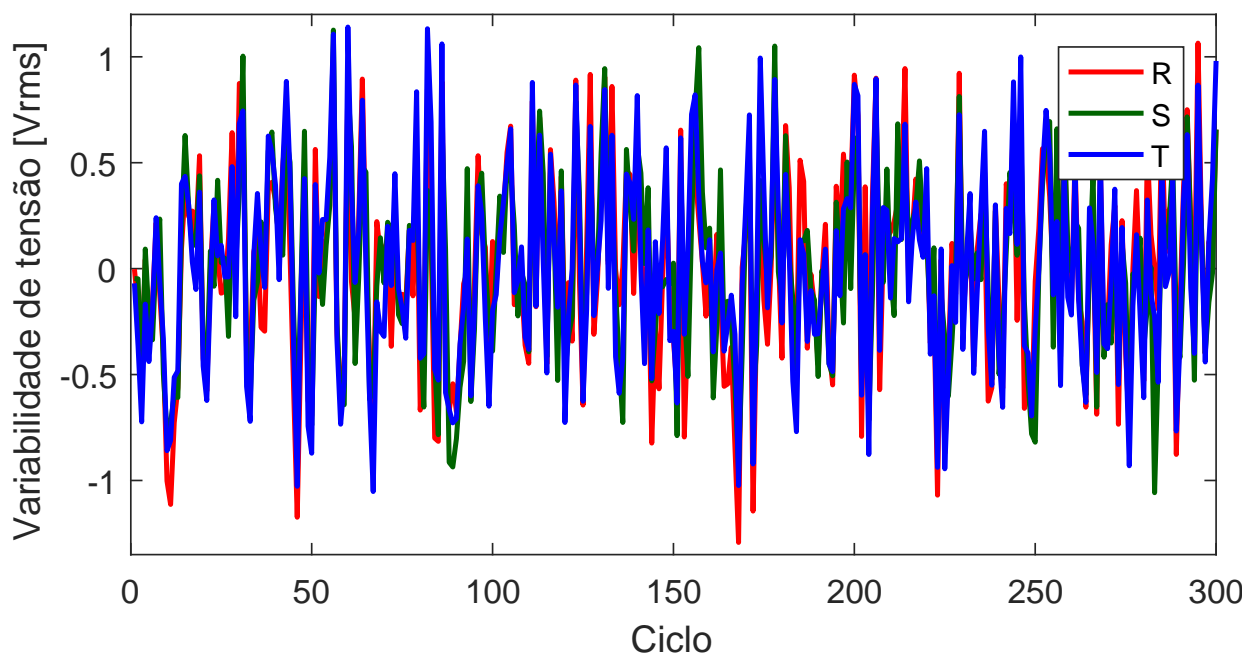


Figura 18 – Variabilidade das tensões de P_y , fases R, S e T utilizando como referencial $127 V_{rms}$.

Fonte: Autoria própria.

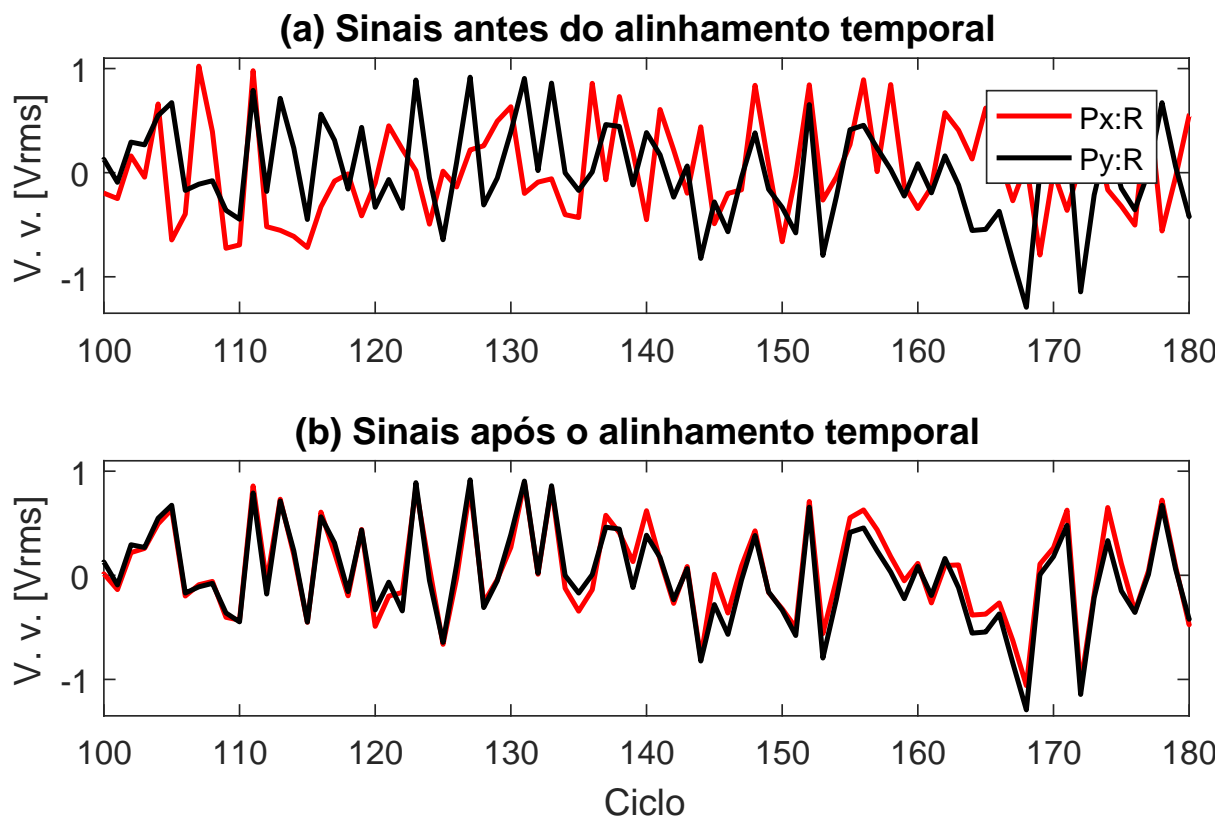


Figura 19 – Zoom nas janelas de processamento para P_x e P_y , fase R, antes e após o alinhamento temporal estabelecido pela RmsSync (Rótulo do eixo Y: V. v.: *Voltage variability* ou em português variabilidade de tensão).

Fonte: Autoria própria.

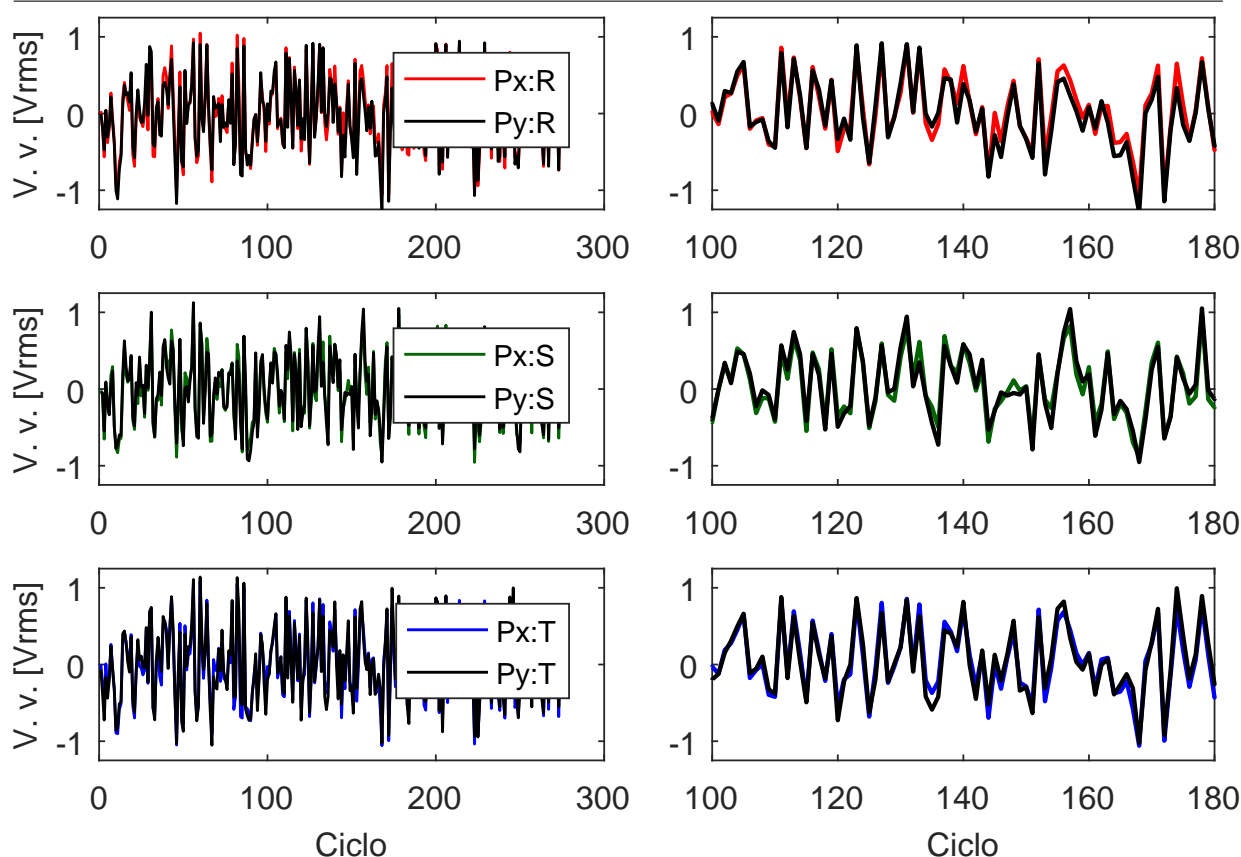


Figura 20 – Fases R, S e T de P_x e P_y , após o alinhamento temporal, janela de processamento e *zoom* entre 100 e 180 ciclos (Rótulo do eixo Y: V. v.: *Voltage variability* ou em português variabilidade de tensão).

Fonte: Autoria própria.

3.4.3 Aplicação da Técnica RmsSync para Identificação Física dos Condutores e Sequência de Fases de uma Rede Elétrica Polifásica

A correta identificação física e lógica (sequência de fases) em redes elétricas polifásicas, como em uma planta industrial, pode ser uma tarefa complexa e árdua, especialmente em pontos mais afastados das subestações de energia. A utilização de padrões de cores nos condutores, como as definidas na norma IEC-60364 (IEC, 2016) e NBR-5410 (ABNT, 2004), poderia facilitar o trabalho, mas, mesmo nesse contexto, erros durante a instalação dos cabos podem induzir à identificação incorreta das fases. Isso pode ser um sério problema durante eventuais intervenções de manutenção na rede elétrica ou na distribuição de cargas monofásicas sobre as fases de um sistema polifásico, já que o sistema pode ficar desequilibrado. A técnica RmsSync é a ferramenta perfeita para evitar ou resolver tal problema, pois pode ser aplicada para identificar corretamente as fases tanto física quanto lógica, sem a utilização de condutores adicionais, o que seria muito difícil considerando a extensão de redes elétricas industriais típicas (centenas de metros). Esse problema é abordado no trabalho de Pezeshki e Wolfs (2012), que utiliza técnicas para estimar (onde há certa margem de erro) a distribuição de cargas em um sistema elétrico

de distribuição trifásico desequilibrado. Mais estudos são necessários para fazer uma comparação mais rigorosa de desempenho da técnica RmsSync com a solução proposta por Pezeshki e Wolfs, mas a priori pode-se dizer que a técnica RmsSync tem o mesmo escopo de aplicação, com a vantagem de ser uma aplicação de tempo real em comparação com uma aplicação de estimação apresentada pelos autores.

3.5 Testes da Técnica RmsSync Com Medições de Campo

A rede elétrica do prédio da Escola de Engenharia da UFMG foi escolhida como área de testes para verificar o desempenho da técnica RmsSync com medições de campo. Trata-se de um edifício de 5 andares, com mais de 40 salas por piso, que contém várias topologias de laboratórios, gabinetes, um sistema central de HVAC (*Heating, Venting, and Air Conditioning*) e vários elevadores. Sua diversidade e quantidade de cargas fornecem um campo de teste robusto para a validação da RmsSync.

As campanhas de medições foram realizadas utilizando dois osciloscópios, cujas características podem ser vistas na Tabela 8. Os relógios dos osciloscópios foram ajustados simultaneamente, mas manualmente, e o *trigger* para as medições também foi ajustado manualmente, mas com uma ligeira defasagem temporal. Tal arranjo permitiu obter janelas de medições que são naturalmente deslocadas no tempo, mas com um intervalo de tempo simultâneo, maior que 5 segundos, apropriadas para permitir executar a operação de alinhamento temporal utilizando a técnica RmsSync. Janelas de medições com tamanhos diferentes precisam ser testadas e o valor de 5 segundos foi arbitrado baseado nas características dos equipamentos e em testes empíricos em bancada. Em cada campanha de medição, uma série de cinco experimentos de coleta de dados foi realizada, usando duas equipes de medição, uma para cada sala de laboratório, onde foram feitas medições da tensão fase-neutro para cada uma das fases da rede elétrica trifásica. O osciloscópio Osc_1 foi configurado para operar com uma frequência de amostragem de 12.500 Hz, valor possível de ser ajustado pelos controles do equipamento, que assegura uma resolução próxima de 256 amostras por ciclo, ou seja, próximo da frequência de 15,360 Hz requisito do projeto. Essa configuração foi suficiente para gerar janelas de medição com pelo menos 16 segundos de duração, resultando em um total de 200.000 amostras. Por outro lado, o osciloscópio Osc_2 que tem características diferentes de Osc_1 foi configurado com uma frequência de amostragem de 10.000 Hz, 120.000 amostras, resultando em gravações de 12 segundos. Após executar as medições e exportação dos dados para o computador, foi possível trabalhar com janelas de medições de 10 segundos e janelas de processamento de 5 segundos (300 ciclos). É importante destacar e ressaltar que o uso de diferentes osciloscópios (com diferentes conversores ADC de diferentes resoluções e frequências de amostragem) representou um desafio extra para a técnica RmsSync, conforme será verificado a seguir, agora operando com dados de medições reais.

Tabela 8 – Características dos osciloscópios.

Descrição	ADC	Características
Osc_1	8 bits	70 MHz, 1 GS/s & 200M
Osc_2	10 bits	70-300 MHz, 2.5 GS/s & 10M

Fonte: Autoria própria.

3.5.1 Primeira Campanha de Medição

Na primeira campanha de medição, os osciloscópios Osc_1 e Osc_2 foram alocados para medir os sinais de tensão de um mesmo ponto da rede elétrica: uma tomada trifásica do laboratório LAPIS, sala 1110 localizada no primeiro piso da Escola de Engenharia. Os dados obtidos por meio de Osc_1 , referenciado como P_x , podem ser vistos na Figura 21, onde a influência de um ADC de baixa resolução, 8 bits, fica evidente. Para atenuar a influência dos ruídos de alta frequência, foi aplicado um filtro de média móvel de tamanho 5 resultando no sinal que pode ser visto na Figura 22. Os dados equivalentes obtidos usando Osc_2 (10 bits), P_y , podem ser vistos na Figura 23 e 24, sendo este último o resultado do sinal filtrado. É evidente a qualidade superior das medições realizadas pelo osciloscópio Osc_2 .

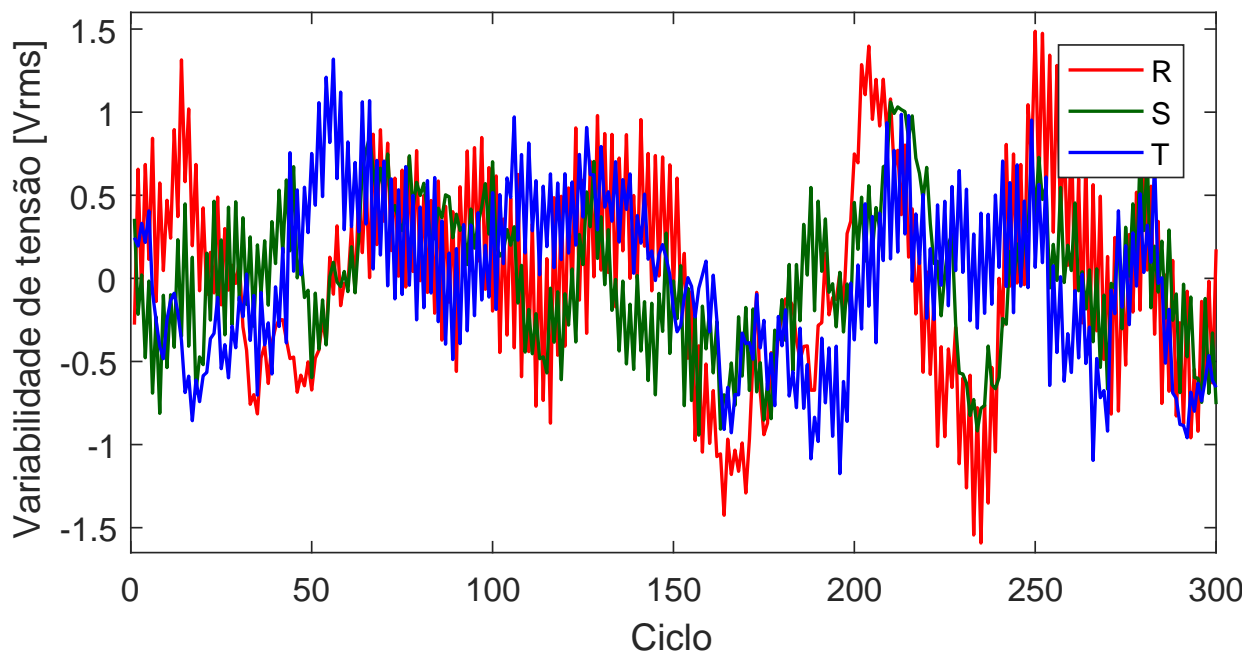
A operação de alinhamento temporal utilizando a técnica RmsSync foi executada e foi detectado claramente um deslocamento de 40 ciclos entre as medições P_x e P_y , conforme pode ser visto na Tabela 9. Como as medições foram feitas em um mesmo ponto da rede elétrica, na mesma tomada de força trifásica, foi garantida a correlação (mas não a simultaneidade) entre as medições para cada fase, P_x :R e P_y :R, por exemplo. Outro ponto a ser destacado é que as pontas de provas de cada osciloscópio foram colocadas não só obedecendo as mesmas sequências lógicas de fases da rede elétrica, mas também fisicamente sobre os mesmos cabos condutores de cada uma das fases em cada ponto da rede elétrica. Isso explica o motivo dos melhores índices de correlação cruzada estarem localizados na diagonal principal da tabela.

Tabela 9 – Deslocamento de tempo em ciclos (Índice de correlação-cruzada).

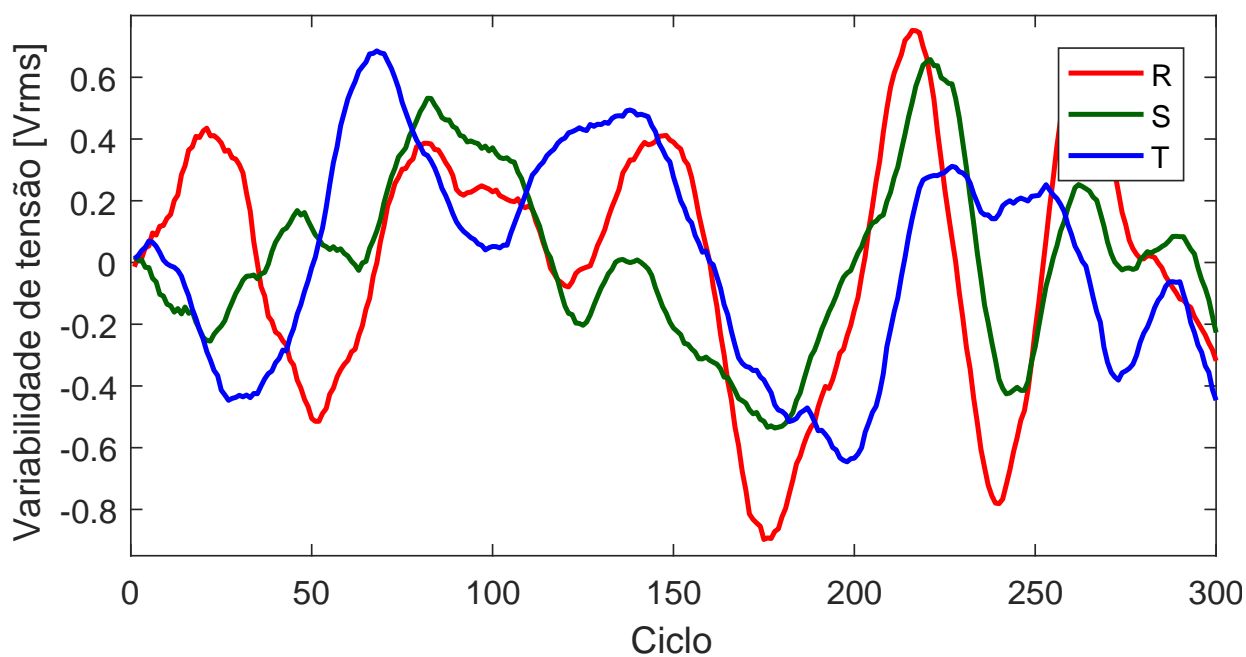
Ponto P_x	Ponto P_y		
	R	S	T
R	40 (0.735)	40 (0.545)	40 (0.286)
S	39 (0.534)	40 (0.832)	67 (0.330)
T	40 (0.298)	10 (0.412)	40 (0.758)

Fonte: Autoria própria.

Após a realização do alinhamento temporal, pode-se fazer uma análise visual e

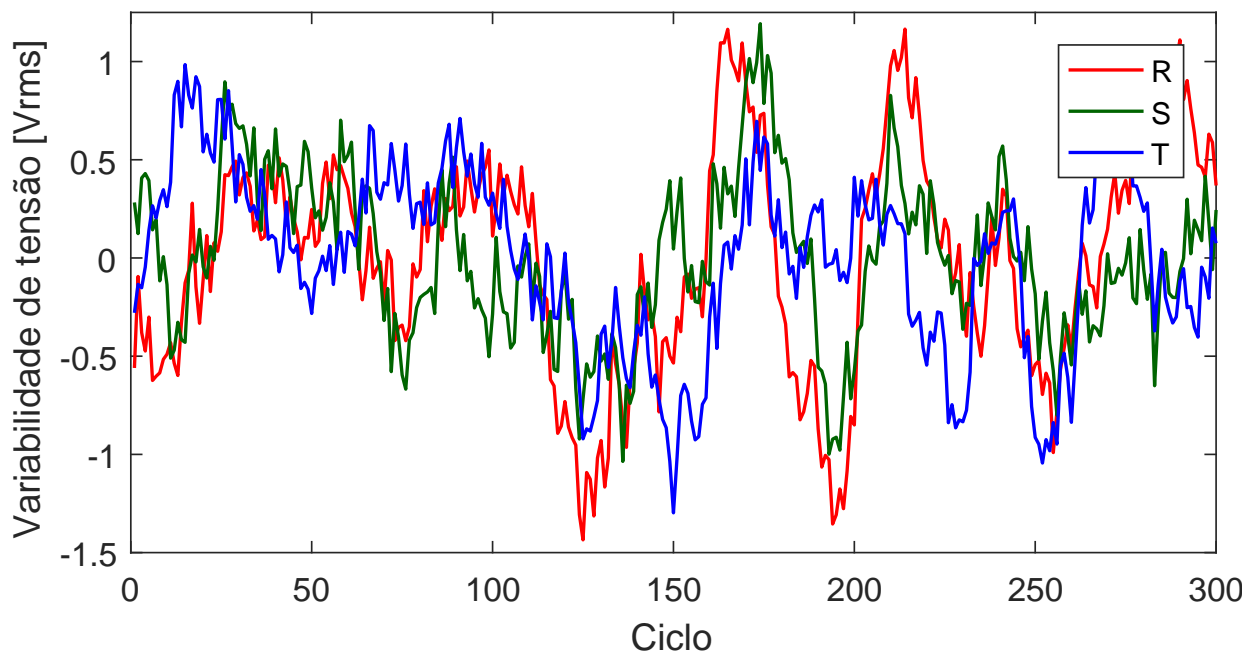
Figura 21 – Valores rms para as fases de P_x , dados originais.

Fonte: Autoria própria.

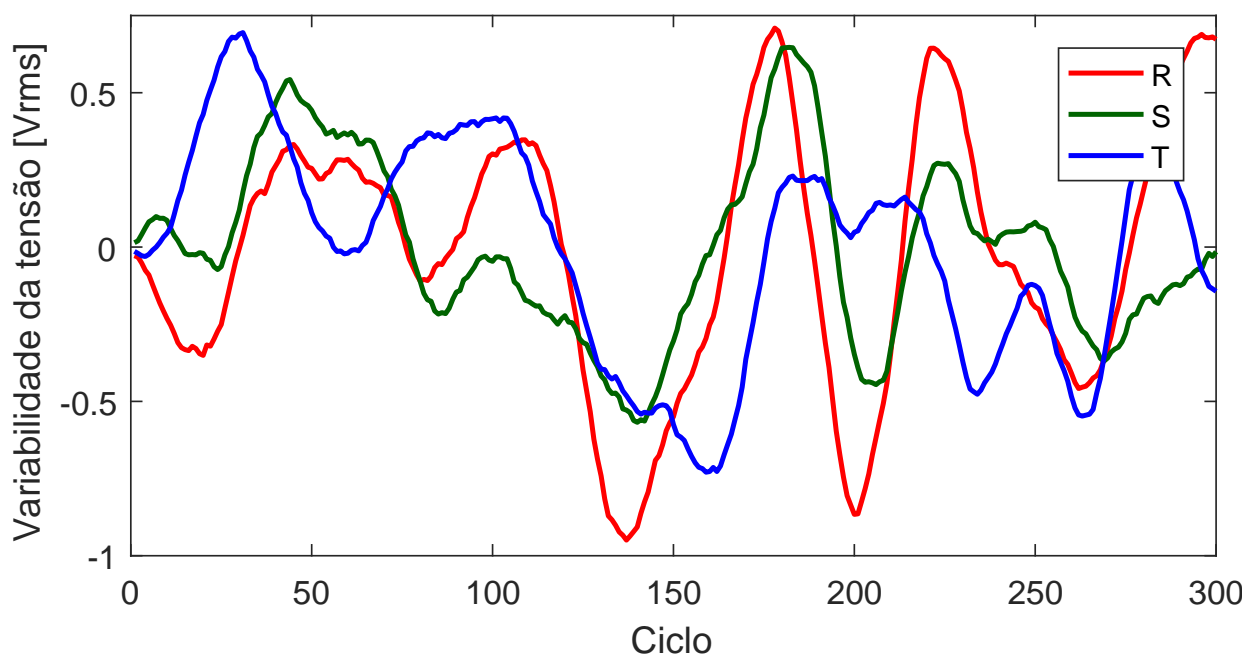
Figura 22 – Valores rms para as fases de P_x , dados filtrados.

Fonte: Autoria própria.

comparação dos sinais usando as Figuras 25 à 27, que contém os valores rms ciclo a ciclo após a aplicação do filtro de média móvel de tamanho 5, onde as legendas identificam cada caso.

Figura 23 – Valores rms para as fases de P_y , dados originais.

Fonte: Autoria própria.

Figura 24 – Valores rms para as fases de P_y , dados filtrados.

Fonte: Autoria própria.

3.5.2 Segunda Campanha de Medição

A segunda campanha de medições compreendeu a alocação dos osciloscópios em salas distintas da Escola de Engenharia (EE). O osciloscópio Osc_1 foi alocado para medir os sinais de tensão de uma tomada de força trifásica localizada na sala 1110 (laboratório LAPIS), e o osciloscópio Osc_2 em outra tomada, no entanto, localizada na sala do labora-

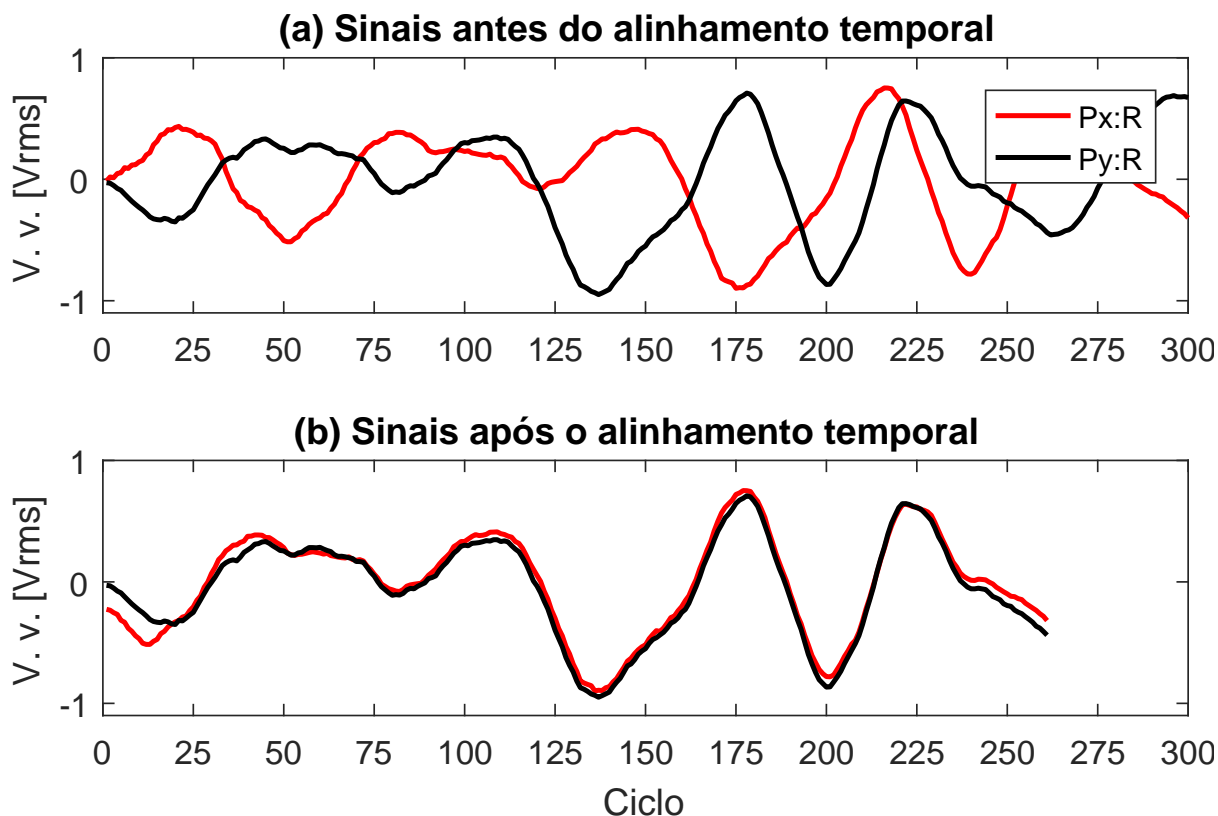


Figura 25 – Fases R de P_x e P_y , sinais filtrados, antes e após o alinhamento temporal (Rótulo do eixo Y: V. v.: *Voltage variability* ou em português variabilidade de tensão).

Fonte: Autoria própria.

tório 2514. A sala do laboratório 2514 está localizada a uma distância de 110 metros do transformador T_1 e no segundo andar do prédio. Já o ponto de medição do laboratório LAPIS está distante 30 m de T_1 e está localizado no primeiro andar. Como na primeira campanha, as medições de Osc_1 foram referenciadas como P_x e as de Osc_2 como P_y . Os gráficos das séries temporais de valores rms calculados ciclo a ciclo podem ser vistos nas Figuras 28 e 29, após filtragem dos sinais utilizando o mesmo filtro digital de média móvel de tamanho 5 da campanha 1.

Tabela 10 – Deslocamento no tempo em ciclos (Índice de correlação-cruzada).

Ponto P_x	Ponto P_y		
	R	S	T
R	107 (0.418)	106 (0.606)	-56 (0.353)
S	106 (0.513)	107 (0.424)	103 (0.226)
T	-95 (0.366)	-95 (0.313)	106 (0.589)

Fonte: Autoria própria.

A operação de alinhamento temporal utilizando a técnica RmsSync foi aplicada e os melhores índices de correlação cruzada para as fases de P_x e P_y podem ser vistos na

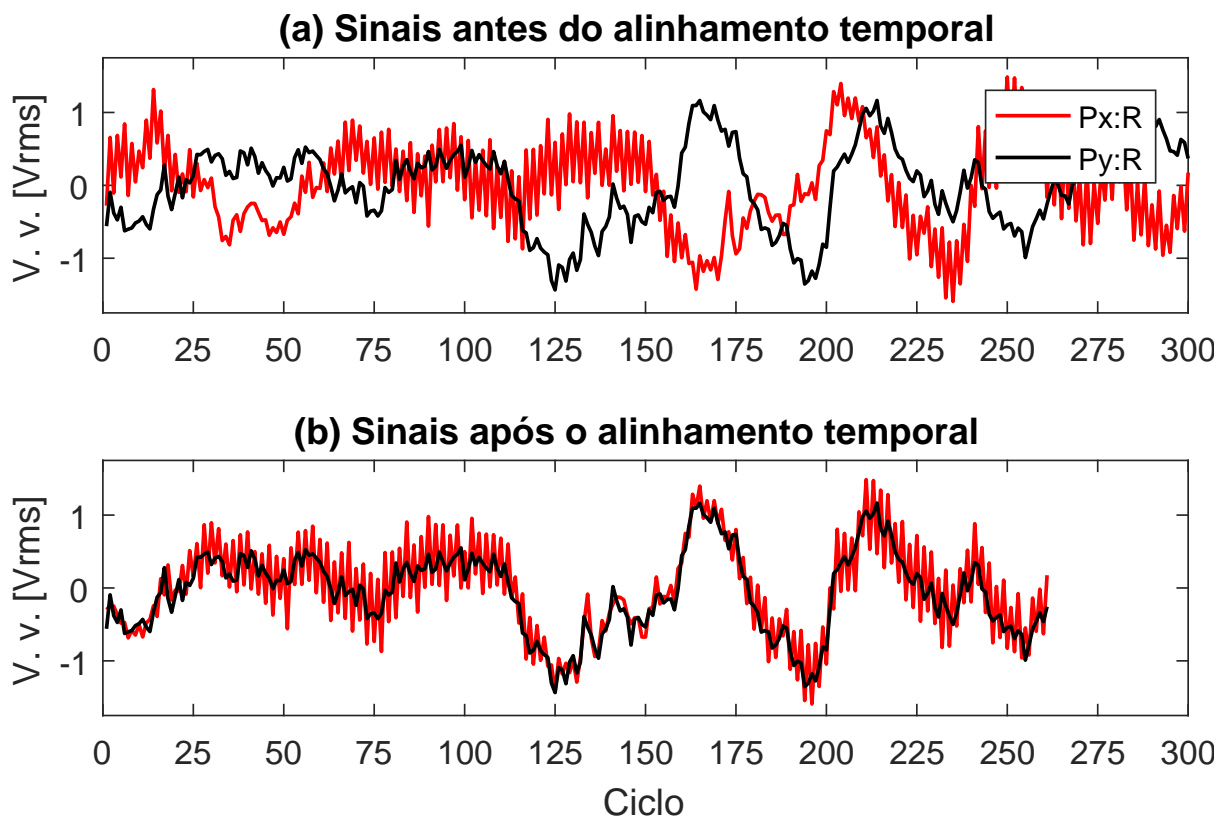


Figura 26 – Fases R de P_x e P_y , sinais não filtrados, antes e após o alinhamento temporal.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 10. Os melhores índices de correlação calculados indicam um deslocamento de 106 ciclos e são convergentes, pois o melhor valor calculado foi o mesmo para todas as fases da rede elétrica. No entanto, como pode ser observado na tabela, a fase R em P_x foi melhor correlacionada com a fase S em P_y , assim como a fase $P_y \cdot R$ foi melhor correlacionada com a fase $P_x \cdot S$, indicando um eventual erro na operação de identificação das fases para a sala do laboratório 2514. No entanto, após uma verificação mais cuidadosa nos diagramas elétricos dos laboratórios foi detectada a causa fundamental do problema. As pontas de prova de cada um dos osciloscópios foram colocadas sobre os condutores respeitando as mesmas sequências lógicas de fases, mas fisicamente as pontas de provas foram colocadas de forma invertida sobre os que seriam os condutores das fases R e S da rede elétrica, problema apontado na seção 3.5.3. Após executar a operação de alinhamento temporal de 106 ciclos, os gráficos resultantes e correlacionados podem ser vistos nas Figuras 30 e 31, onde as legendas identificam os casos. Os resultados mostram boa correlação dos sinais após o alinhamento temporal, corroborando com a robustez e aplicabilidade da técnica RmsSync.

Ainda utilizando a segunda campanha de medições, foi realizada uma série de 5 execuções da RmsSync com deslocamentos aleatórios, N_x e N_y . Os resultados podem ser vistos na Tabela 11 e a acurácia foi de 100 % em todos os testes.

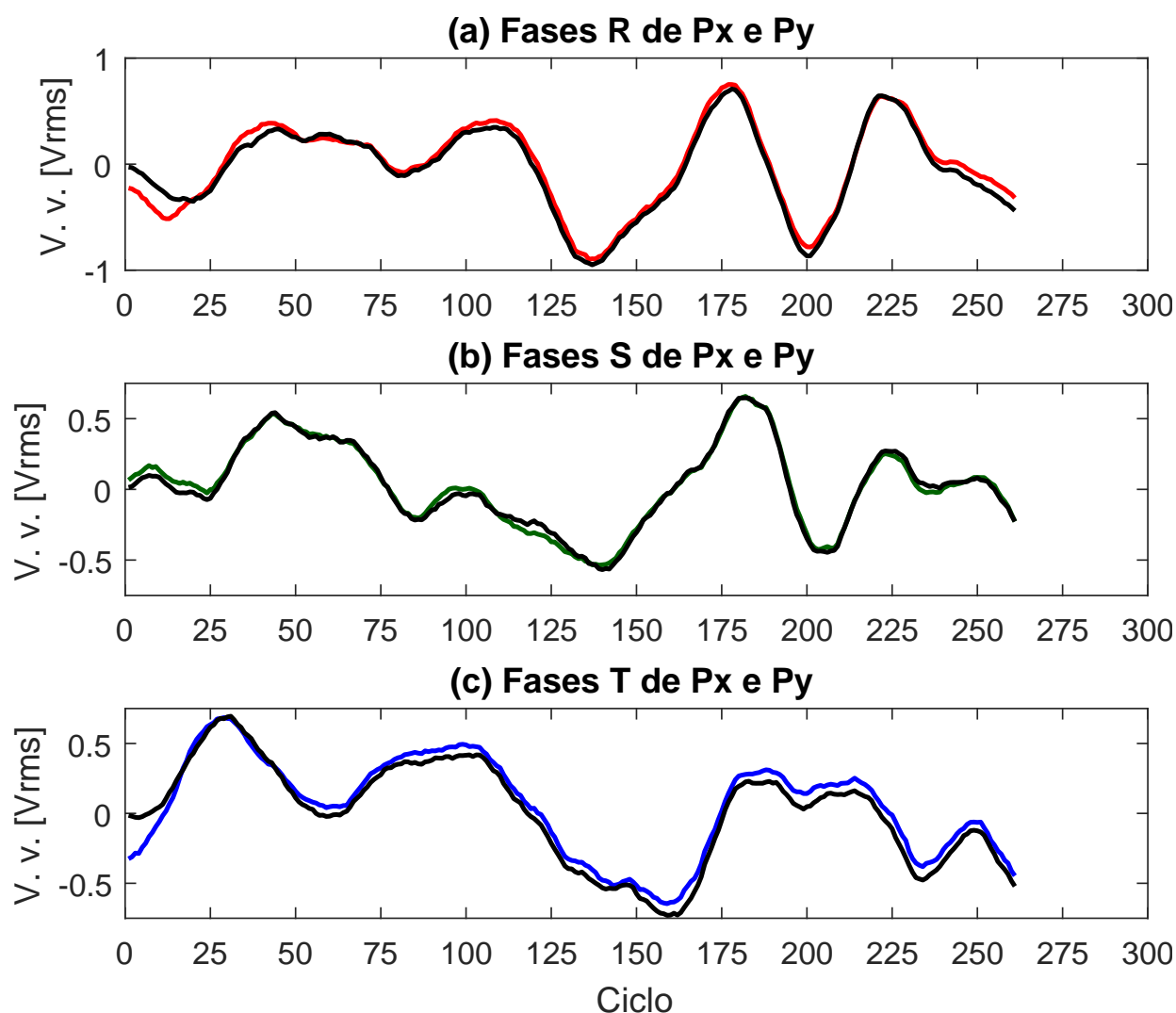


Figura 27 – Fases R, S e T de P_x e P_y , sinais filtrados, após o alinhamento temporal (Rótulo do eixo Y: V. v.: *Voltage variability* ou em português *variabilidade de tensão*).

Fonte: Autoria própria.

Tabela 11 – RmsSync: Acurácias.

#	R	S	T	Resultado	#	R	S	T	Resultado
1	48	48	48	1	4	68	68	68	1
2	74	74	74	1	5	106	106	106	1
3	114	114	114	1	-	-	-	-	-

Fonte: Autoria própria.

3.6 Alguns Resultados Estatísticos da Técnica RmsSync

Com o objetivo de fazer uma análise estatística sobre a técnica RmsSync, foram calculados os valores dos desvios padrão das séries rms para os dados reais e simulados

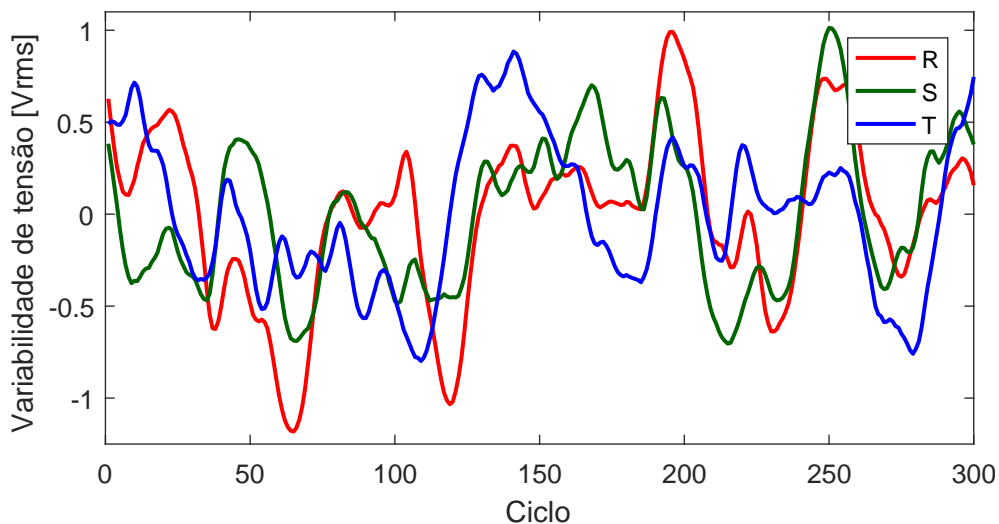


Figura 28 – Valores rms das fases de P_x (sala 1110), sinais filtrados.

Fonte: Autoria própria.

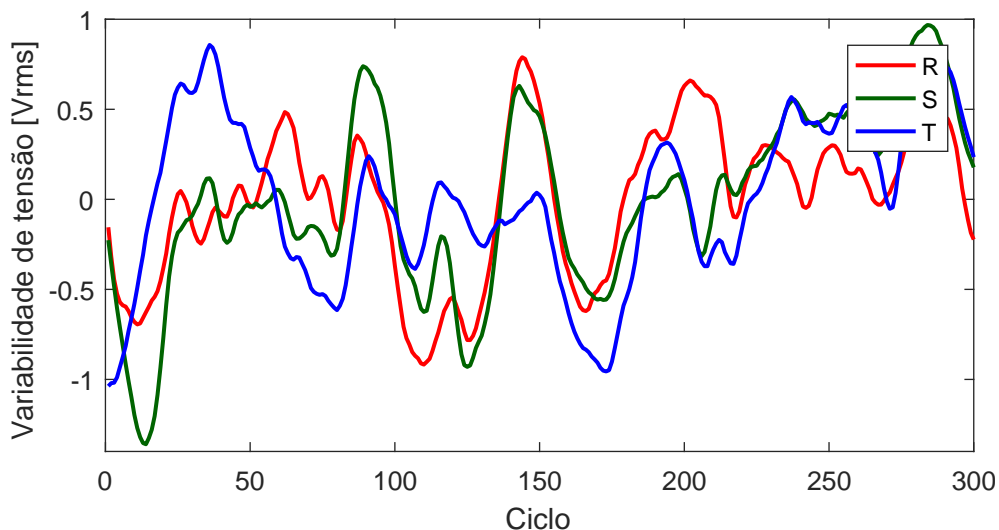


Figura 29 – Valores rms das fases de P_y (sala 2514), sinais filtrados.

Fonte: Autoria própria.

(Tabela 12). Como esperado, o desvio padrão para os valores médios foi zero para os dados simulados e reais. Nas linhas 1 e 2 estão descritos os valores calculados para as medições reais das campanhas 1 e 2, conforme discutido na seção 3.6. Na linha 3 pode-se ver os valores calculados para os dados simulados no PSCADTM, conforme a seção 3.5. E na linha 4 pode-se ver os valores calculados para os dados simulados no MATLAB[®], conforme a seção 3.2.

Após a análise dos dados e figuras, notou-se que as séries de medições (Figura 30 à 32) apresentaram variações temporais mais lentas do que os valores simulados no PSCAD[®](Fig. 19 à 20). Isso pode ser explicado pela estratégia adotada para gerar as variações estocásticas nas magnitudes das potências das cargas elétricas no início dos trabalhos das simulações para estabelecer a excursão de 2 V_{rms} , como pode ser observado

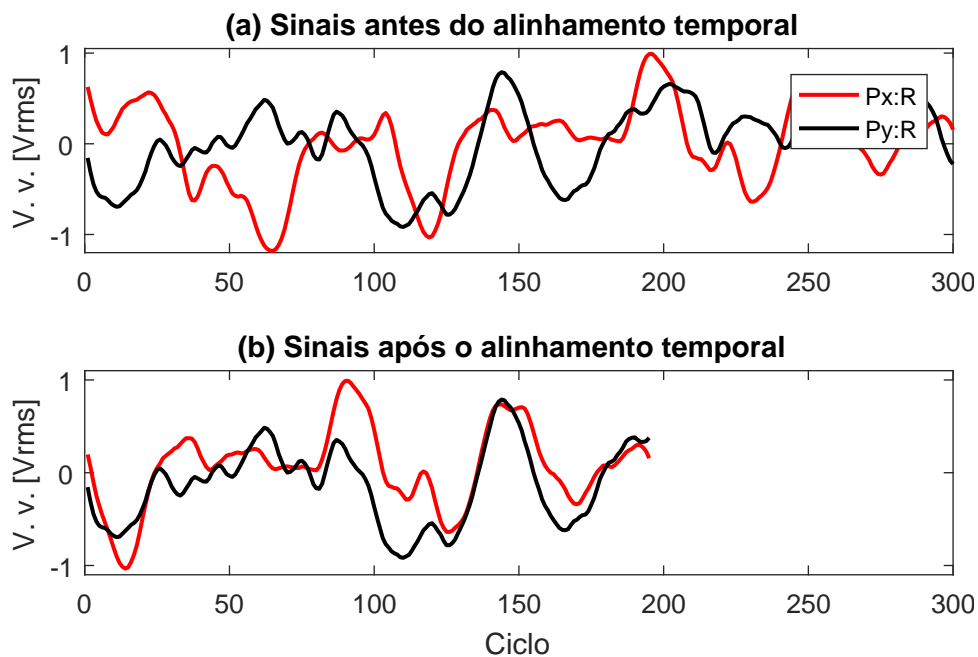


Figura 30 – Fases R de P_x (sala 1110) e P_y (sala 2514), sinais filtrados, antes e após o alinhamento temporal (Rótulo do eixo Y: V. v.: *Voltage variability* ou em português variabilidade de tensão).

Fonte: Autoria própria.

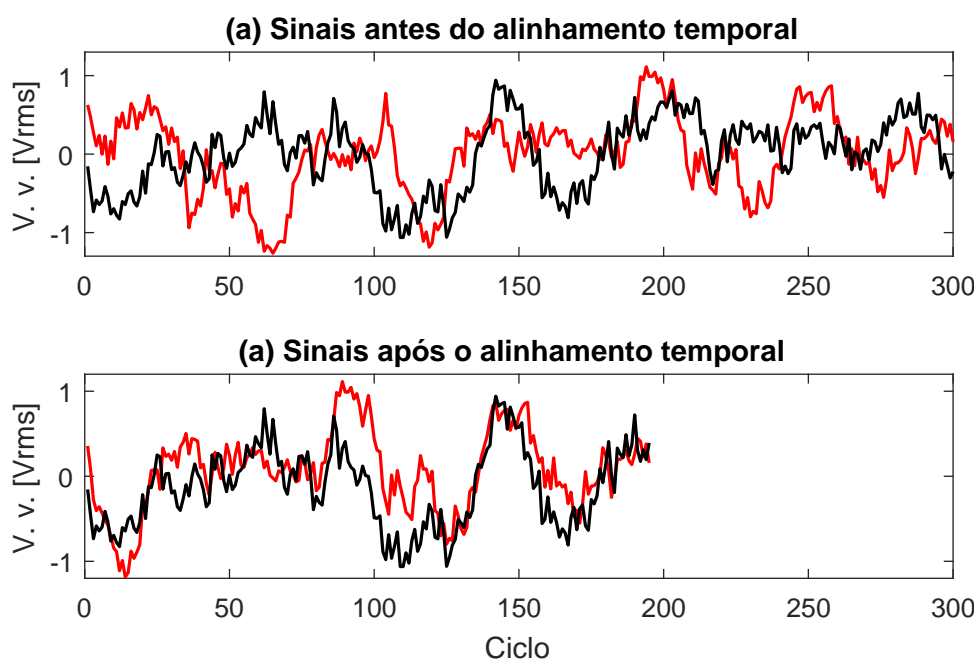


Figura 31 – Fases R de P_x (sala 2514) e P_y (lab 2514), sinais não filtrados, após o alinhamento temporal (Rótulo do eixo Y: V. v.: *Voltage variability* ou em português variabilidade de tensão).

Fonte: Autoria própria.

nos gráficos das simulações. A modelagem poderia ter sido feita de forma a se obter uma variação temporal mais fina e o mais próximo possível dos dados reais, mas a divergência

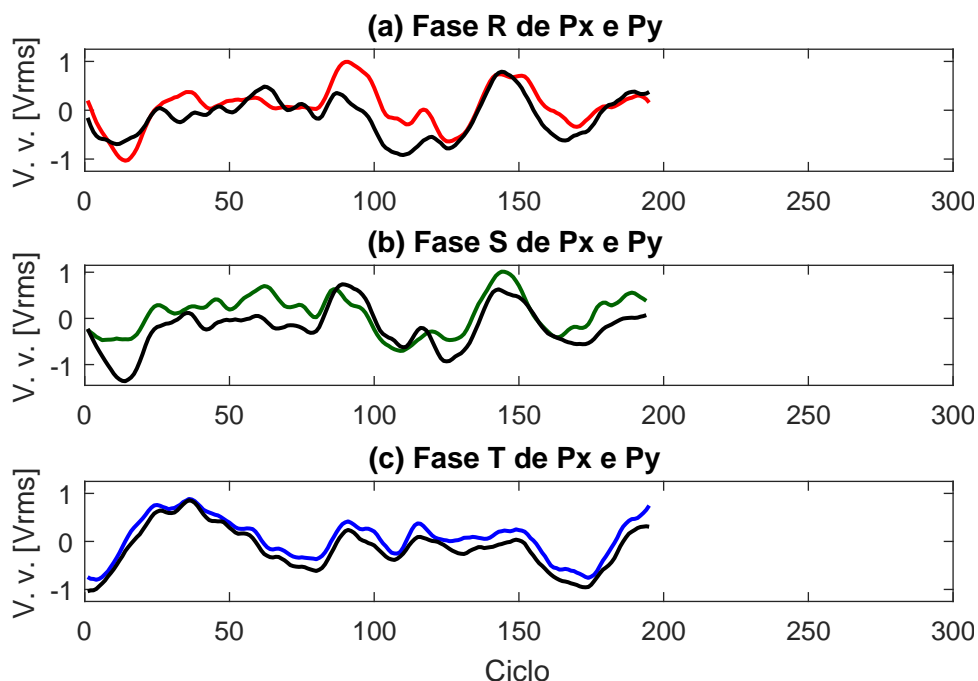


Figura 32 – Sinais das fases de P_x (lab 1110) e P_y (lab 2514), sinais filtrados, após o alinhamento temporal (Rótulo do eixo Y: V. v.: *Voltage variability* ou em português variabilidade de tensão).

Fonte: Autoria própria.

Tabela 12 – Desvio padrão.

σ	Ponto P_x			Ponto P_y		
	R	S	T	R	S	T
1.	0.6215	0.4404	0.5049	0.5586	0.4107	0.4579
2.	0.4953	0.4478	0.4555	0.4498	0.5269	0.4742
3.	0.4611	0.4339	0.4596	0.4619	0.4631	0.4968
4.	0.0449	0.0408	0.0447	0.0158	0.0134	0.0142

Fonte: Autoria própria.

observada só foi percebida após um minucioso trabalho de simulação, medição e avaliação dos dados. Mesmo com esse pequeno problema, a técnica RmsSync foi capaz de estabelecer o alinhamento temporal corretamente para os sinais simulados e as medições utilizando janelas de processamento de 300 ciclos. A acurácia obtida nos testes de alinhamento temporal usando os dados reais foi de 100 %, mesmo resultado obtido nos testes com os dados simulados. Outra observação relevante e obtida nas análises estatísticas foi que o desvio padrão dos dados simulados no PSCADTM estava mais próximo do desvio padrão dos dados reais. Isso pode ser explicado pelo fato do software ser dedicado à simulação de transientes eletromagnéticos de redes elétricas e fornecer mais ferramentas para as simulações necessárias para a validação da técnica RmsSync. A partir desse conhecimento, decidiu-se dedicar mais tempo e esforços às tarefas de simulação utilizando o PSCADTM,

por exemplo, simulações com variações de potências de cargas mais finas para cada ciclo da rede elétrica. Por outro lado, as simulações iniciais realizadas no MATLAB® serviram principalmente para verificar se a função de correlação cruzada atenderia, ou não, aos objetivos e requisitos de correlacionamento de sinais exigidos para a implementação da técnica RmsSync. Um aspecto importante observado nas simulações do MATLAB® foi uma excursão vertical menor nas séries temporais de valores rms do que nos dados das medições, o que pode ser explicado pela variação aleatória aplicada nos sinais de tensão necessários para o cálculo da correlação cruzada, sem a preocupação de aplicar as mesmas variações por ciclo da rede. Assim, não dedicou-se tempo suficientemente aos projetos de simulações do Matlab™, tanto quanto aos projetos do PSCAD™, embora seja uma meta factível.

Os autores estão cientes de que as simulações deveriam idealmente reproduzir uma excursão vertical e variabilidades temporais o mais próximo possível dos padrões observados nos dados reais. Embora os resultados obtidos sejam suficientes e aceitáveis para atender aos requisitos de alinhamento temporal para validação da proposta da RmsSync, pretende-se evoluir e refinar a técnica dedicando mais esforços em simulações e campanhas de medições em uma próxima fase da pesquisa.

3.7 Conclusões do Capítulo

No presente capítulo, foi abordada a técnica RmsSync (*RMS time-alignment synchronization technique*) que pode ser aplicada para estabelecer alinhamento temporal para campanhas de medições não sincronizadas em um contexto de medição distribuída, ou seja, quando vários equipamentos são utilizados ao mesmo tempo sem a utilização de uma referência única para acertos dos seus relógios. A situação é bastante comum em sistemas de medição e pode comprometer a integridade dos dados, bem como impedir que os eventos acontecidos em diferentes pontos da rede elétrica possam ser correlacionados e analisados.

No presente trabalho, está sendo explorada a aplicação da técnica para alinhamento temporal de campanhas de medições de instalações elétricas de baixa tensão, mas, em sistemas de energia de um modo geral, a proposta tem um potencial amplo de aplicação a ser explorado. Em redes de distribuição e transmissão, a técnica RmsSync pode ser aplicada desde que haja variações estocásticas nos perfis de tensão e que sejam suficientes para sensibilizar a função de correlação cruzada. Conforme apontado no capítulo, são necessários mais estudos e testes para saber os demais tipos de redes elétricas onde a técnica RmsSync pode ser aplicada.

Os próximos passos para a evolução da técnica RmsSync compreende principalmente a sua integração aos mecanismos de sincronização do protótipo MIQE e que será

abordado no próximo capítulo, de forma que o ajuste e acerto dos relógios dos diversos medidores possam ser feitos de forma automática. Para que isso seja possível, basta que um dos relógios dos equipamentos medidores seja sincronizado utilizando alguma referência temporal confiável, e que ele sirva de referência para o acerto dos relógios dos demais equipamentos medidores.

4 MIQE: PROTÓTIPO DE UM MEDIDOR DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA (QEE)

Neste capítulo será apresentado e abordado o MIQE, protótipo de um *Medidor de Qualidade da Energia Elétrica*, desenvolvido durante os trabalhos de doutoramento. O protótipo é composto por uma camada de hardware utilizada para ler os sinais de tensão, e/ou corrente de uma rede elétrica desde que os sinais sejam condicionados para a faixa de entrada do protótipo 0-3.3 V, uma camada de software embarcado utilizada para pré-processar os sinais lidos e outra camada de software responsável pela transmissão e armazenamento dos dados em um servidor remoto. Apresentar e descrever todos os artefatos e projetos desenvolvidos para a construção do protótipo, seguindo todas as boas práticas da Engenharia de Software, seria proibitivo para um documento de tese como esse. Dessa forma, serão apresentados e discutidos apenas os artefatos e as provas de conceito mais relevantes, selecionados de forma a proporcionar um entendimento geral da arquitetura e do funcionamento do MIQE. Desde a sua concepção o protótipo tem sido evoluído para validar e suportar medições de eventos/distúrbios de baixa frequência de qualidade da energia elétrica (QEE) em uma configuração distribuída e em condições desafiadoras de uma rede elétrica, mono ou polifásica. Dentre as funcionalidades implementadas e embarcadas no equipamento, cabe destacar a implementação parcial da técnica *RmsSync*. Tal modo de operação foi chamado de *Modo de Operação RmsSync* e será detalhado no capítulo 5 da tese. As operações necessárias para a geração dos vetores rms ciclo a ciclo dos sinais de tensão de uma rede elétrica, uma etapa essencial para a execução do *Modo de Operação RmsSync*, serão apresentadas no final deste capítulo. Conforme mencionado anteriormente, ressalta-se que, na versão atual, o MIQE realizou medições de tensão em redes de energia elétrica trifásicas em condições distribuídas, tendo, com sucesso, reconstituído o sincronismo das medições através da técnica *RmsSync*. A menção à medição de qualidade da energia (QE) é pertinente devido à vocação e potencialidade da aplicação da técnica *RmsSync* neste contexto. A inclusão de mais canais de medição para medições de corrente, uma vez garantido o sincronismo pelas medições de tensão + *RmsSync*, permitirá a realização de um amplo conjunto de medições relacionadas à qualidade da energia elétrica. Tais desdobramentos serão realizados em trabalhos futuros.

Na seção 4.1, será feita uma introdução ao protótipo MIQE. Em 4.2, serão apresentados alguns conceitos e fundamentos necessários para o entendimento do que é chamado **amostragem em condições desafiadoras** nesta tese. Na seção 4.3, abordar-se-ão as provas de conceitos realizadas para selecionar os kits DSPs (*Digital Signal Processor*), ou, em português, kits de processamento de sinais digitais, utilizados no projeto. Também serão detalhadas as estratégias empregadas para implementar as operações de amostragem

nessas condições desafiadoras, visando suportar medições em redes elétricas monofásicas ou polifásicas, além da camada de medição e pré-processamento dos dados. Em 4.4, serão discutidos os resultados obtidos, destacando os testes realizados em bancada com o protótipo, que geraram os vetores de valores rms calculados ciclo a ciclo, pré-requisito para a aplicação da técnica RmsSync. Por fim, na seção 4.5 serão apresentadas as conclusões do capítulo.

4.1 Introdução

Um dos grandes objetivos e motivação para o início deste trabalho de doutoramento foi, e continua sendo, aprofundar os estudos e as pesquisas sobre os eventos e distúrbios de qualidade da energia elétrica (QEE) e o seu monitoramento em um contexto industrial, conforme abordado no capítulo 1 deste documento. Adicionalmente, incluiu-se no escopo o objetivo de construir um protótipo que validasse as operações e fases para a medição, pré-processamento, transmissão, armazenamento e processamento dos dados de QEE de uma campanha de medição. Na fase de concepção do projeto tinha-se em mente construir um equipamento que estivesse alinhado à visão dos chamados medidores inteligentes de energia das *Advanced Metering Infrastructure* (AMI). Outro requisito importante para o projeto/protótipo seria que as operações de medição e monitoramento de uma rede elétrica de uma planta industrial fossem realizadas de forma remota, distribuída e colaborativa.

De forma remota quer dizer que as medições das plantas industriais e o processamento dos sinais necessários para a geração dos relatórios de qualidade da energia podem ser realizados parcialmente dentro das próprias instalações elétricas e completados nos servidores remotos. O termo pré-processamento, ou processamento na borda, se refere ao processamento realizado pelo medidor de energia ainda nas instalações elétricas das plantas industriais e foi necessário para deixar bem claro quando o processamento é executado localmente nas instalações e quando é executado remotamente, ou seja, nas áreas de armazenamento remotas. Um dos benefícios que podem ser evidenciados ao executar o pré-processamento nas próprias instalações elétricas a serem monitoradas, é a diminuição da quantidade de dados a serem trafegados pelos canais de comunicação que são recursos limitados e críticos em plataformas de medição. Na sequência, deve haver a integração da camada de medição com uma infraestrutura de tecnologia da informação (TI) que permita que os dados das medições sejam transmitidos via rede Ethernet e armazenados em servidores remotos, ou na nuvem. Tal abordagem é interessante e se justifica por questões de escala, pois tal configuração contribui para diminuir os custos de operação, já que mais plantas industriais podem ser monitoradas e gerenciadas a partir de uma mesma central de monitoramento compartilhada. Já nas áreas de armazenamentos das campanhas, os dados podem ser acessados e processados para a extração e geração de informações

estratégicas, inclusive relatórios diversos sobre a QEE das instalações elétricas.

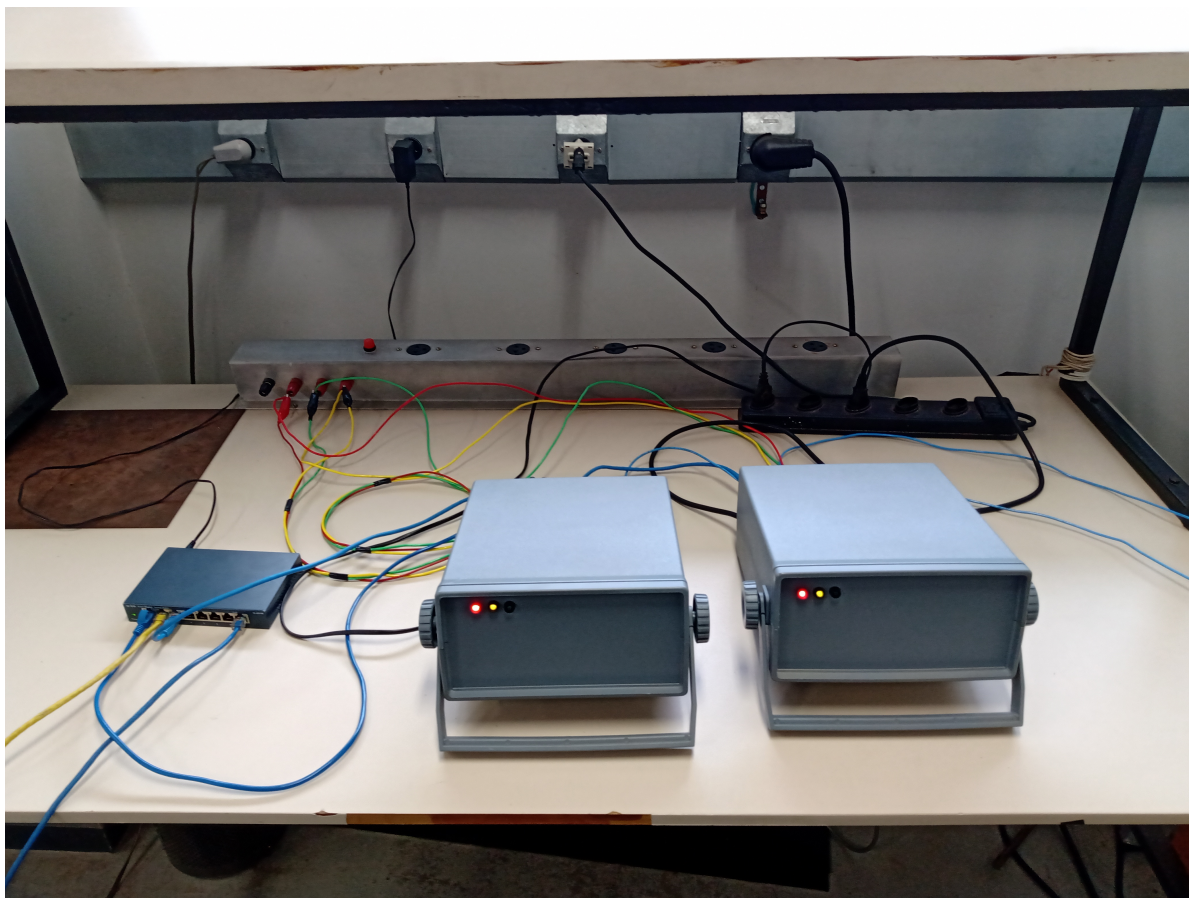


Figura 33 – Duas unidades do protótipo MIQE em bancada

Fonte: Autoria própria

O termo distribuído remete à necessidade de monitoramento de vários pontos de uma rede elétrica ao mesmo tempo, requisito cada vez mais comum e quase mandatório nos equipamentos das AMIs. Já a palavra colaborativa está associada ao conceito da necessidade de funcionamento dos equipamentos medidores em uma configuração de alocação para trabalharem em grupo. Em certas situações e dependendo dos eventos a serem monitorados, pode ser necessário a utilização e emprego de mais de um equipamento medidor para a realização de uma determinada campanha de medição. Cada medidor deverá ser configurado para medir parte da campanha de interesse e os dados deverão ser transmitidos e armazenados nas áreas de armazenamento remotas. Na sequência, serviços próprios podem ser atribuídos para juntarem as parciais e gerarem as campanhas de medições completas. Com tais requisitos atendidos, pode-se gerar os relatórios e extrair as informações que proporcionem uma visão ampla e integrada dos eventos e distúrbios de QEE das instalações elétricas. Uma das contribuições deste trabalho de doutoramento foi a construção do protótipo nomeado MIQE (Medidor Industrial de Qualidade da Energia Elétrica), concebido com o objetivo de proporcionar a realização de medições de QEE de forma remota, distribuída e colaborativa. Na Figura 33, pode-se ver duas unidades do

protótipo MIQE em bancada. Os equipamentos estão conectados a um equipamento de rede Ethernet do tipo switch, no laboratório LAPIS, e esse, por sua vez, está interligado à rede de dados da Escola de Engenharia da UFMG. Esta é uma característica crucial e diferencial do equipamento, utilizar a própria rede de dados das instalações para transmitir as campanhas de medições. Ao ser conectado à rede de dados e receber um endereço IP atribuído dinamicamente pelo servidor DHCP, o equipamento medidor entra em modo de espera, aguardando o início das operações de medição e transmissão de dados para um servidor remoto. Os botões de controle integrados ao kit DSP do protótipo são utilizados para iniciar e interromper as medições.

Na Figura 34, é possível observar um dos protótipos em testes de bancada, com uma vista parcial dos seus componentes internos. O protótipo foi testado inicialmente com o auxílio de um osciloscópio, que possui quatro canais de entrada e um gerador de sinais integrado. Os principais artefatos do projeto foram desenvolvidos seguindo as abordagens do processo de desenvolvimento de software Rational Unified Process (RUP) (SOMMERVILLE, 2016). Ao longo deste capítulo serão feitas referências às implementações de software que sejam suficientes para o entendimento dos modos de operação até então implementados no protótipo. No entanto, cabe destacar que independentemente do modo de operação e funcionamento do equipamento, a operação de amostragem em condições desafiadoras é um requisito importante e mandatório no projeto de novos equipamentos medidores das AMIs. A amostragem em condições desafiadoras é comum a todos os modos de operação do MIQE e, por isso, será o próximo assunto abordado.

4.2 Amostragem em Condições Desafiadoras

O termo “amostragem em condições desafiadoras” em sistemas digitais está associado principalmente aos grandes esforços demandados dos conversores analógicos digitais (ADC ou simplesmente AD), para trabalhar com as altas taxas de amostragem e em situações críticas. Por exemplo, em ambientes industriais normalmente os níveis de interferências eletromagnéticas são elevados, o que é um complicador no projeto de quaisquer que sejam os sistemas eletrônicos. Esta é uma situação bastante comum em sistemas de energia, em especial em aplicações de monitoramento de eventos rápidos de transitórios eletromagnéticos e de QEE. Outro requisito importante se refere ao conceito de amostragem simultânea, termo *simultaneous sample* nos *datasheets*, em que é mandatório que dois ou mais canais ADs sejam amostrados no mesmo intervalo de tempo, ou dentro de um *threshold* de tempo permitido para um determinado tipo de aplicação. Quando o hardware de aquisição de dados é equipado somente com um conversor AD, os canais de entrada devem ser multiplexados, o que traz consigo certo atraso de tempo entre os valores amostrados de cada canal e, dependendo da aplicação, tal atraso não é permitido. Assim, para evitar tal problema é mandatório que os módulos de amostragem dos medidores sejam



Figura 34 – MIQE: visão interna do protótipo

Fonte: Autoria própria

equipados com mais de um módulo ADC com suporte para trabalharem em paralelo.

Na concepção do MIQE, foi estabelecido que o protótipo deveria, prioritariamente, implementar a técnica *RmsSync* apresentada no Capítulo 3 desta tese, além de estar preparado para outras funcionalidades a serem implementadas no futuro. O protótipo também deveria estar em conformidade com a norma brasileira no que diz respeito à medição de eventos e distúrbios de qualidade da energia (PRODIST, 2021). Por exemplo, para a medição do espectro harmônico de uma rede elétrica — uma funcionalidade planejada para futuras evoluções do protótipo —, a norma exige suporte para até o 50th harmônico.

Com base nesses requisitos de sistemas de medição polifásicos, é necessário amostrar os sinais de tensão no modo *simultaneous sample*. Outra abordagem adotada nos testes, foi amostrar os sinais de tensão com, no mínimo, 256 amostras por ciclo da rede elétrica, além de utilizar ADCs com resolução de, pelo menos, 10 *bits*. Esse requisito implica que os ADCs devem operar com taxas de conversão de no mínimo 15.360 amostras por segundo em cada canal, para medições em redes elétricas trifásicas com frequência de 60 Hz.

Adicionalmente, foi estabelecido que o processamento necessário para executar a operação de alinhamento temporal das medições não sincronizadas deveria trabalhar com janelas de, pelo menos, 300 ciclos (5 segundos), o mesmo tempo utilizado nas janelas das simulações apresentadas no Capítulo 3 desta tese. Os vetores contendo as séries temporais dos valores eficazes de tensão, calculados ciclo a ciclo, das redes elétricas deveriam ser gerados e transmitidos de forma contínua via rede Ethernet. Inicialmente, o processamento para o alinhamento temporal das medições não sincronizadas poderia ser realizado de forma *offline* (processamento em *batch*) nos servidores de armazenamento remoto. Essas operações serviriam como uma prova de conceito para o funcionamento integrado das camadas de medição, pré-processamento, comunicação, armazenamento e processamento de dados pelo MIQE.

Com base nessas premissas, foram realizados diversos testes e pesquisas para identificar os hardwares e softwares que possibilitassem tais implementações. Os trabalhos começaram com foco no desenvolvimento dos sistemas embarcados necessários para a medição e amostragem dos sinais de tensão das redes elétricas. Após várias iterações evolutivas durante a fase de projeto, chegou-se ao diagrama de implantação apresentado na Figura 35. O diagrama ilustra a medição em uma rede elétrica monofásica, ou seja, apenas um canal. Para a ilustração de mais de um canal, basta replicar e customizar horizontalmente o diagrama.

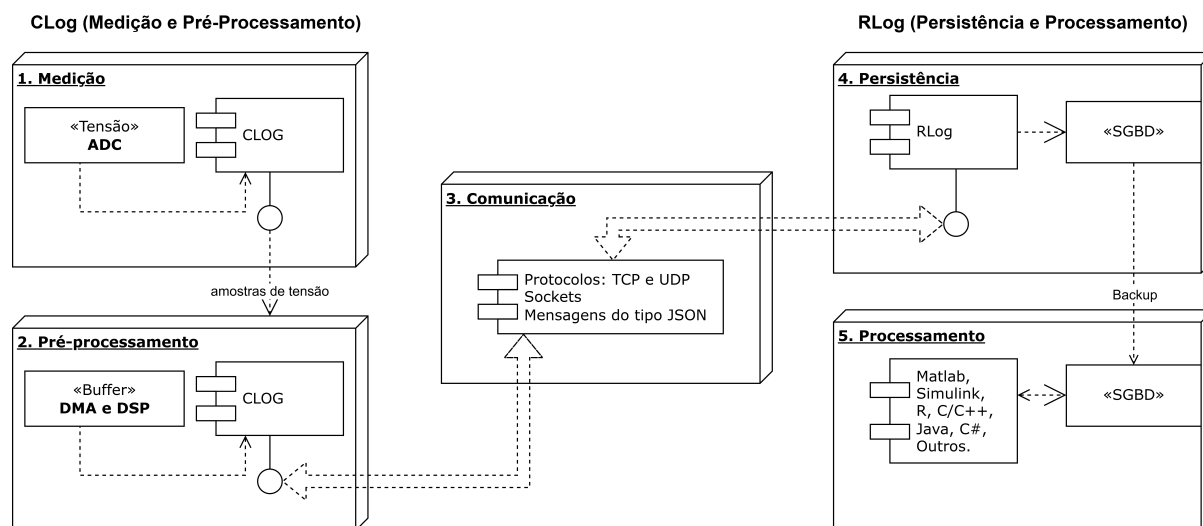


Figura 35 – Diagrama de implantação do protótipo MIQE

Fonte: Autoria própria

No diagrama de implantação pode-se visualizar as principais camadas bem como as tecnologias testadas e adotadas nas implementações, com destaque para as camadas responsáveis pelas operações:

1. **Medição** dos sinais de tensão e/ou corrente da rede elétrica em condições desafiadoras;

2. **Pré-processamento** e encapsulamento das campanhas de medições em mensagens do tipo [JSON \(2021\)](#);
3. **Comunicação** e envio das mensagens para as áreas de armazenamento remotas utilizando os protocolos e serviços da arquitetura TCP/IP;
4. **Persistência** das campanhas de medições nas áreas de armazenamento remotas. A camada de persistência dos dados foi implementada utilizando sistemas gerenciadores de banco de dados (SGBD) para facilitar a integração com outras plataformas de medição e/ou sistemas;
5. **Processamento** dos dados para a extração de informações e geração dos relatórios de interesse sobre a QEE das instalações.

Os medidores de QEE na visão das AMIs devem ter uma arquitetura que facilite o crescimento tanto vertical quanto horizontal para atender o aumento da demanda de pontos de medição das redes elétricas. Como os sistemas elétricos estão ficando mais complexos e há a necessidade de monitorar mais pontos de medição, os projetos devem ser conduzidos com tais premissas no escopo. O protótipo MIQE em sua versão completa, dependendo do número de instalações elétricas a serem monitoradas, pode ser facilmente escalado tanto vertical quanto horizontalmente devido à sua arquitetura modular. Os componentes estão separados pela camada de comunicação e a troca de informações pode ser implementada utilizando as diferentes opções de tecnologias disponíveis. Após a realização de vários testes e provas de conceito, decidiu-se utilizar a biblioteca LwIP ([DUNKELS, 2018](#)), uma versão leve de software programada e customizada para sistemas embarcados e que implementa vários protocolos e serviços da arquitetura TCP/IP, como os protocolos TCP e UDP. Os programas de servidor foram implementados utilizando a tecnologia Java. Já os programas dos medidores foram implementados utilizando as ferramentas [CubeIDE \(2021\)](#) e [CubeMX \(2021\)](#) da empresa STMicroelectronics que facilitam o árduo trabalho de configuração e programação dos diversos kits da família STM32F4 e STM32F7, utilizados no projeto. A linguagem de programação utilizada nas placas STM32F_x é do tipo *c-like*. Os serviços e os programas utilizados para o processamento das campanhas de medições foram implementados utilizando a tecnologia Java e Matlab[®]. Mas nada impede que sejam utilizadas outras soluções, já que, como a persistência dos dados foi implementada em banco de dados relacional, há um facilitador para a integração com outras arquiteturas e plataformas.

4.3 Principais Provas de Conceito

4.3.1 Seleção dos Kits DSP

Para a seleção e escolha de um processador de sinais digitais para o protótipo MIQE, foram testados principalmente kits das empresas Texas Instruments (TEXAS, 2021) e STMicroelectronics (STM32FX, 2021), ambas com boa participação no mercado de sistemas embarcados, segundo o relatório *Embedded software market report size* da empresa MarketsAndMarkts (2023). Também foi testado o kit ESP32 da empresa Espressif (2021), mas este não passou nos testes devido à limitação de possuir apenas dois módulos ADCs. Além disso, para utilizar a comunicação Ethernet via Wi-Fi, um dos módulos precisa ser desativado. Buscou-se kits que, além de boa capacidade de processamento e custo-benefício, oferecessem suporte estável para comunicação Ethernet. Outros requisitos críticos para a aplicação do MIQE era que os kits possuísem módulos ADCs com boa resolução (pelo menos 10 bits) e fossem capazes de realizar amostragem simultânea com pelo menos três ADCs paralelos, necessários para implementar a técnica RmsSync versão trifásica conforme será abordado no próximo capítulo.

No quesito comunicação Ethernet, o kit da Texas Instruments testado, placa TMS570LC43x, depende de bibliotecas de terceiros para funcionar. Durante os testes, apresentou instabilidade na comunicação, razão pela qual foi descartado. Mais pesquisas e testes são necessários para identificar a causa da instabilidade, mas decidiu-se testar outras soluções.

Os kits que atenderam aos requisitos foram os modelos STM32F429ZI e STM32F767ZI da empresa STMicroelectronics. Ambos estão equipados com três módulos ADCs, permitindo a amostragem simultânea de três sinais, e possuem suporte integrado para comunicação Ethernet via interface RJ45. A placa STM32F767ZI se mostrou mais robusta, possuindo maior capacidade de memória *flash* em comparação à STM32F429ZI (2 MB contra 1 MB). Por essas razões, a placa STM32F767ZI foi escolhida para equipar o protótipo MIQE e a versão do protótipo foi nomeada em referência ao kit utilizado. A placa é baseada no núcleo RISC de 32 bits Arm[®] Cortex[®]-M7 de alto desempenho, operando a uma frequência de até 216 MHz, possuem uma unidade de ponto flutuante (FPU), que suporta instruções e tipos de dados de precisão dupla e precisão simples do Arm[®] (STM32FX, 2021).

4.3.2 Camada de Medição e Pré-Processamento

A camada de medição e pré-processamento seja talvez uma das mais críticas do protótipo MIQE, principalmente pelas altas taxas de amostragens demandadas nas etapas de aquisição e discretização dos sinais, dependendo dos tipos de eventos e aplicações.

A título de ilustração, para uma carga trifásica ligada à rede elétrica na configuração *estrela-aterrada*, se for necessário medir todos os sinais de corrente e tensão associados, um equipamento medidor deverá ser capaz de medir pelo menos 9 sinais. Sendo quatro sinais de tensão (3 fases + neutro), quatro sinais de corrente (3 fases + neutro) e um sinal considerando uma possível corrente de fuga no condutor de aterramento. Para realizar as medições dos nove sinais de forma simultânea e no modo *simultaneous sample* seria necessário utilizar um equipamento com pelo menos 9 ADCs paralelos, o que torna o projeto ainda mais desafiador. Considerando uma medição com suporte até o 50^o harmônico, o equipamento medidor deverá operar com taxas de amostragem de pelo menos 6.000 Hz, $50 \times 60 \text{ Hz} = 3.000 \text{ Hz} \times 2$ (Teorema de *Nyquist*) = 6.000 amostras/s em cada canal ADC. O valor da taxa de amostragem utilizada como referência no projeto MIQE foi de 15.360 amostras/s e conforme já abordado na seção 4.2, a amostragem dos sinais deve ser realizada de forma simultânea. O hardware para realizar a aquisição dos dados deve ser equipado com ADCs paralelos para suportar tal modo de operação. As placas STM32F767ZI foram selecionadas para equipar o protótipo MIQE, possuem três ADCs paralelos e podem ser configurados para trabalhar com resoluções ADC de até 12 bits.

Na especificação de requisitos do MIQE foi definido que o equipamento deveria implementar pelo menos os 3 modos de operação para a sua validação e para cumprir o escopo inicial definido no projeto de doutoramento: *i*) alinhamento temporal de medições não sincronizadas através da implementação e aplicação da técnica RmsSync; *ii*) medição do espectro harmônico e *iii*) medição das potências de uma rede elétrica mono ou polifásica. A implementação *i* foi concluída e será apresentada na tese. Com relação às implementações *ii* e *iii*, como elas ainda estavam em fase de testes quando da escrita da tese e por questões de prazo e escopo, elas serão abordadas em possíveis trabalhos futuros do projeto. Cabe destacar, entretanto, que independentemente do modo de operação do protótipo e dos tipos de eventos a serem monitorados, no geral as funcionalidades básicas do equipamento podem ser agrupadas e se resumem às operações de **medição, pré-processamento, transmissão, armazenamento e processamento dos dados** (títulos dos pacotes da Figura 35). Para descrever os blocos, a integração e o funcionamento geral do protótipo, o restante deste capítulo será ilustrado com as operações para a geração das séries temporais de valores rms ciclo a ciclo, que são necessárias para a aplicação da técnica RmsSync abordada no capítulo 3 da tese. Os primeiros testes do MIQE foram realizados em bancada e foi utilizado um gerador de sinais Kkmoon modelo FY6900-60M (Figura 36) e um osciloscópio digital Hantek modelo DSO4254C (Figura 37). Os *scripts* utilizados para o processamento das medições que serão abordadas no capítulo foram programados no Matlab[®].



Figura 36 – Gerador de Sinais Kkmoon modelo FY6900-60M

Fonte: Autoria própria

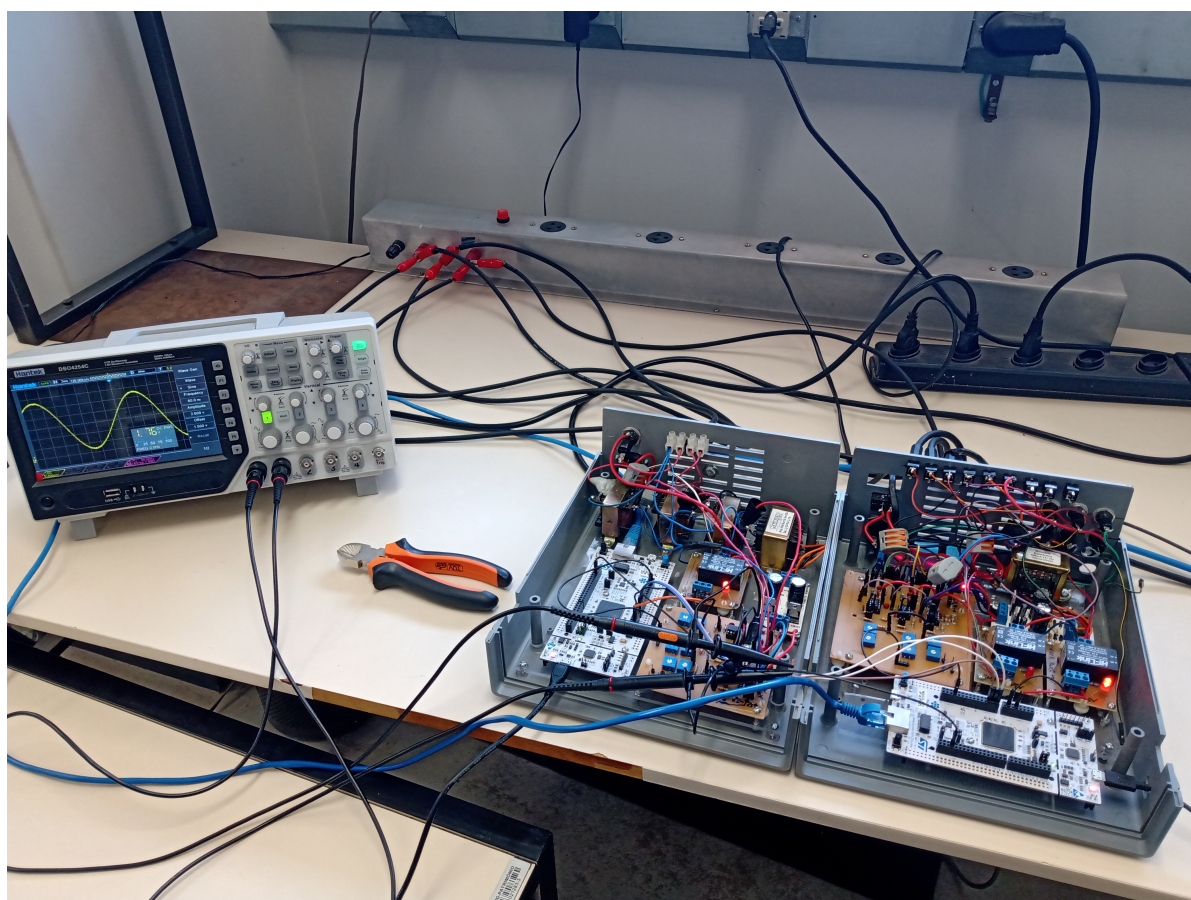


Figura 37 – MIQE: ajuste em bancada com osciloscópio Hantek modelo DSO4254C

Fonte: Autoria própria

4.3.2.1 Módulo de Amostragem

Pode-se ilustrar um sistema digital e de processamento de sinais típico em um contexto de medição de QEE, como o MIQE, fazendo uso de um diagrama de blocos como o da Figura 38. Os sinais de entrada do diagrama podem ser a tensão e/ou a corrente de uma rede elétrica mono ou polifásica, e que normalmente devem passar por um estágio de filtragem analógica para evitar o efeito de *aliasing*. Os dois estágios seguintes compreendem as etapas responsáveis pela amostragem e o processamento digital dos sinais. Na sequência, os dados são transmitidos para as áreas de armazenamento, onde são processados e gerados os relatórios de interesse sobre a QEE das instalações.

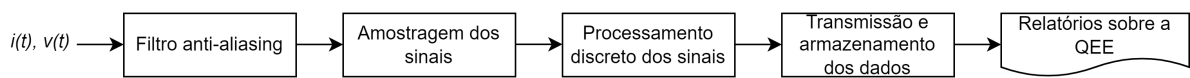


Figura 38 – Etapas das Operações de Medição de QEE

Fonte: Autoria própria

Mesmo sendo uma montagem em forma de protótipo, no MIQE foram testados e montados todos os blocos do diagrama. Os conversores ADC das placas das famílias STM32F4 e STM32F7 (STM32FX, 2021) da empresa STMicroelectronics utilizadas no projeto podem ser configurados com resolução de até 12 bits e têm entradas com excursão dinâmica vertical que podem ser configuradas para trabalhar na faixa de 0 a 3,6 V, dependendo de fontes externas para alimentação dos módulos ADCs. Em condições normais de operação e sem a utilização de fontes externas de alimentação, a faixa de trabalho dos ADCs é de 0 a 3,3 V. Cabe ressaltar nesse ponto a importância da implementação de um filtro passa-baixa (PB) na entrada da camada de amostragem. No MIQE foi implementado um filtro analógico passa-baixa (PB) do tipo RC (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013), com frequência de corte em 7 kHz para manter os sinais dentro dos limites do projeto, banda passante do sinal com frequências variando no espectro de 0 ao 50° harmônico. As calibrações dos modos de operação do medidor utilizaram como referência o nível DC dos sinais em $1,7 V_{cc}$ e tensão de pico de $1,4 V_p$ ($2,8 V_{pp}$). Os valores utilizados na calibração asseguraram que os sinais estivessem dentro da faixa de 0,3 a 3,1 V das entradas dos conversores ADCs, com certa margem de segurança para evitar saturação em caso de ocorrências de eventuais afundamentos e/ou sobretensões.

A linguagem de programação utilizada nos projetos das placas da família STM32F_x é do tipo *c-Like* e possui um sistema de tipos para valores inteiros que derivam do tipo primitivo *byte* (8 bits). Assim, o tipo *half word* da linguagem demanda 2 bytes, o tipo *word* 4 bytes e o tipo *double word* 64 bits (8 bytes). O tipo *float* (formato IEEE754, precisão simples) utilizado na programação dos vetores contendo os valores amostrados demanda 4 bytes. O kit STM32F429ZI possui módulos de memória que são organizados e divididos nos

tipos SRAM1 (*Static Random Access Memory 1*) de 112 kB, SRAM2 de 16 kB e SRAM3 de 64 kB. O kit possui também um módulo de memória que tem ligação direta com o núcleo processador chamado de *Core Coupled Memory* (CCM) de 64 kB, o que totaliza 256 kBytes de memória (STM32FX, 2021). Além disso, possui um espaço de endereçamento de memória *flash*, de 1 MB na placa STM32F429ZI e 2 MB na placa STM32F729ZI, que pode ser estendido e programado para armazenar dados de programas.

No início dos trabalhos com os kits DSPs, foram realizados testes com o objetivo de saber qual a quantidade e tamanho máximo dos vetores com os quais os programas conseguiriam trabalhar para enviar os dados das campanhas de medição para os servidores remotos. Após alguns testes, concluiu-se que a placa STM32F429ZI trabalha bem com até 6 vetores do tipo *float* e de tamanho igual a 5.000 elementos, sem a utilização da memória *flash*. O esquema de programação e endereçamento da memória *flash* das placas STM32F_x, pareceu um tanto quanto complexo e com poucos exemplos nos *datasheets*, até a data dos testes iniciais do protótipo. Por questões de limitação de tempo para a conclusão dos trabalhos, resolveu-se não aprofundar na utilização da memória *flash* nas versões iniciais do MIQE. Em momento oportuno, pretende-se investir mais tempo em provas de conceito sobre a utilização desse tipo de memória para as próximas versões do protótipo. Maior disponibilidade de memória permite trabalhar com vetores de tamanhos maiores para a transmissão das campanhas de medições, o que pode ser benéfico para a evolução dos sistemas de comunicação do projeto.

Para a implementação da técnica RmsSync, procurou-se uma configuração que garantisse pelo menos 256 amostras por ciclo da rede elétrica, o que equivale a utilização de frequência de amostragem de pelo menos 15.360 amostras por segundo, para a amostragem dos sinais de tensão e/ou corrente de uma rede elétrica trifásica. A configuração da frequência de amostragem por si só não é um grande problema para os ADCs das placas STM32F_x. Através do software CubeMX (2021) é possível fazer as configurações básicas dos ADCs, DMAs, periféricos, etc; bem como configurar o modo de disparo das conversões AD, que podem ser realizadas por software ou por hardware. Observa-se um esforço das equipes de engenheiros da empresa STMicroelectronics para evoluir o software CubeMX de forma a facilitar o trabalho de configuração e programação das diversas opções de kits disponíveis. Normalmente, na área de programação de softwares embarcados, as configurações dos kits DSPs geram e fazem uso de muitos arquivos de configuração do tipo xml, o que é um dificultador para a grande maioria dos desenvolvedores, principalmente os iniciantes. Cabe destacar então, a importância de tais ferramentas de apoio, bem como a sua evolução e suporte contínuo para o desenvolvimento de novos projetos de sistemas digitais.

4.3.2.2 Módulo de Pré-Processamento das Medições

Além das configurações, normalmente trabalhosas, a serem realizadas nos ADCs de um protótipo como o MIQE, há outro grande desafio que é trabalhar com o grande número de amostras geradas durante as campanhas de medições. Tal problema é ainda mais crítico com as limitações de recursos, principalmente de memória, e efetuar o processamento dentro das janelas de tempo disponíveis, ou seja, antes do início do próximo ciclo de amostragem, é desafiador. A abordagem e a estratégia implementadas no MIQE para contornar tais problemas podem ser ilustradas no diagrama da Figura 39. Além disso, o projeto priorizou a utilização de hardwares digitais de alto desempenho, com boa capacidade de armazenamento e processamento, presentes nos kits DSPs da família STM32F_x. O diagrama ilustra a configuração de amostragem simultânea em três ADCs paralelos (“CH₁”, “CH₂” e “CH₃”), que podem ser utilizados para medir os sinais de tensão e/ou corrente das fases R, S e T de uma rede elétrica trifásica, por exemplo.

Durante as operações de amostragem dos sinais, um *buffer* de tamanho n é automaticamente preenchido de forma circular e simultânea com as amostras dos três canais de entrada, a cada ciclo de amostragem. As amostras geradas pelos ADCs são automaticamente transmitidas para o *buffer* utilizando canais paralelos com suporte às operações do tipo *Direct Memory Access* (DMA), de alto desempenho e sem interromper o processador. Interrupções são disparadas a cada ciclo de preenchimento do *buffer*, sinalizando o preenchimento de metade e o preenchimento completo da estrutura de dados. O processo de transferência dos dados amostrados para a memória é otimizado pelo uso de barramentos de alta velocidade, chamado na arquitetura das placas da família STM32F_x, de AHB (*Advanced High-Performance Bus*). O *buffer* com capacidade configurável para armazenar um número de n amostras, sendo recomendado usar n múltiplo de 2, para cada canal é dividido em duas partes iguais, denominadas de *buffer x* e *buffer y*. Por se tratar de uma operação de movimentação de dados do tipo DMA, não há consumo de recursos do processador e este pode ser atribuído para a realização de outras tarefas de processamento. Em outras palavras, enquanto uma metade do *buffer* está sendo preenchida com as amostras dos ADCs, pode-se executar o processamento sobre os dados na outra metade da estrutura de dados. Tal estratégia é fundamental para permitir que as operações de amostragem do MIQE possam ser executadas em condições tão críticas e com as altas taxas de amostragem exigidas. Utilizando a geração dos vetores rms ciclo a ciclo do *Modo de Operação RmsSync* como exemplo, enquanto as séries temporais estão sendo geradas para uma parte do *buffer*, os vetores relativos à outra metade podem ser transmitidos e armazenados nas áreas de armazenamento remotas.

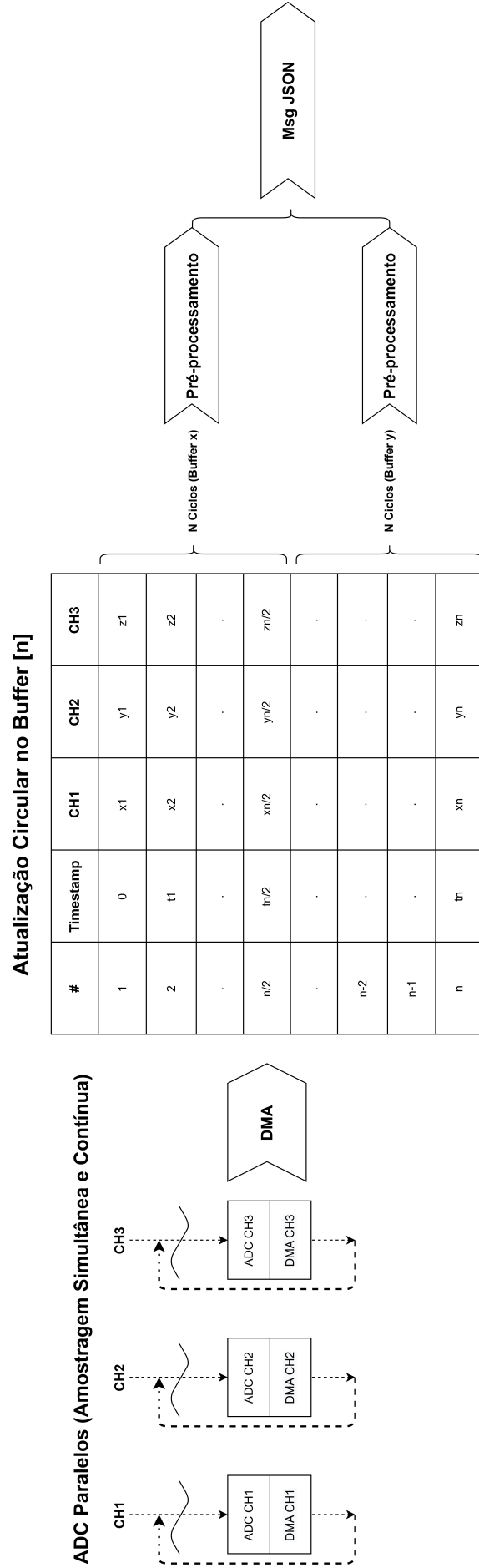


Figura 39 – Amostragem, DMA, Buffer, Pré-processamento e Mensagem do tipo JSON

Fonte: Autoria própria

4.3.3 Camada de Transmissão, Persistência e Processamento dos Dados

O resultado ou a saída da camada de pré-processamento descrita na seção anterior são os vetores contendo as séries temporais de valores rms calculados ciclo a ciclo. De posse de tais dados, o módulo de comunicação do MIQE enviará as campanhas de medições para um servidor remoto utilizando basicamente as primitivas de comunicação que podem ser vistas na Figura 40. O diagrama foi simplificado, mas na realidade um sistema de comunicação demandado em uma plataforma de medição, requer um modelo de troca de mensagens bem mais complexo que o ilustrado. Em sistemas computacionais distribuídos existe um conceito importante que está associado ao tamanho das mensagens, granulosidade, a ser implementado no modelo de troca de mensagens (COULOURIS et al., 2013). Esse é um parâmetro empírico e depende de muitos fatores. No sistema de comunicação do MIQE optou-se por um modelo de troca de mensagens de granulosidade fina, ou seja, para uma campanha de medição completa os medidores geram várias mensagens menores que são enviadas para o servidor central. No servidor central, tais mensagens são recebidas e persistidas conforme o diagrama de sequências da Figura 41.

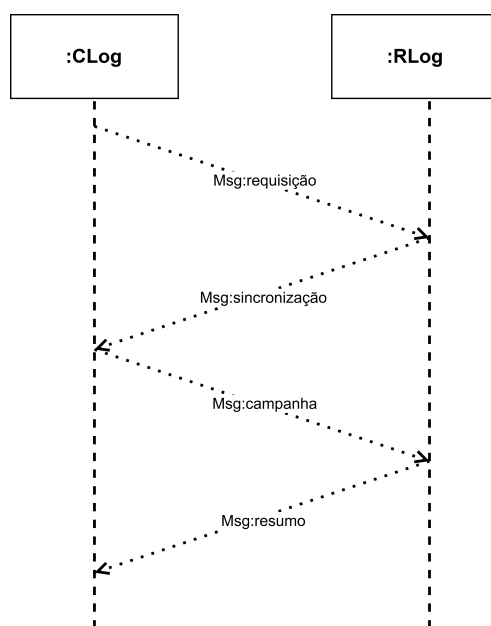


Figura 40 – Primitivas de comunicação do protótipo MIQE

Fonte: Autoria própria

A partir das mensagens persistidas no Sistema Gerenciador de Banco de Dados (SGBD), um serviço da plataforma é atribuído e executado para agregar as mensagens e realizar o processamento conforme o modo de operação do protótipo. No caso da ilustração desse capítulo, o processamento estaria associado à realização do alinhamento temporal das séries temporais utilizando a técnica RmsSync. Devido às limitações dos testes em bancada utilizando o gerador de sinais, o osciloscópio e o próprio protótipo MIQE, o pro-

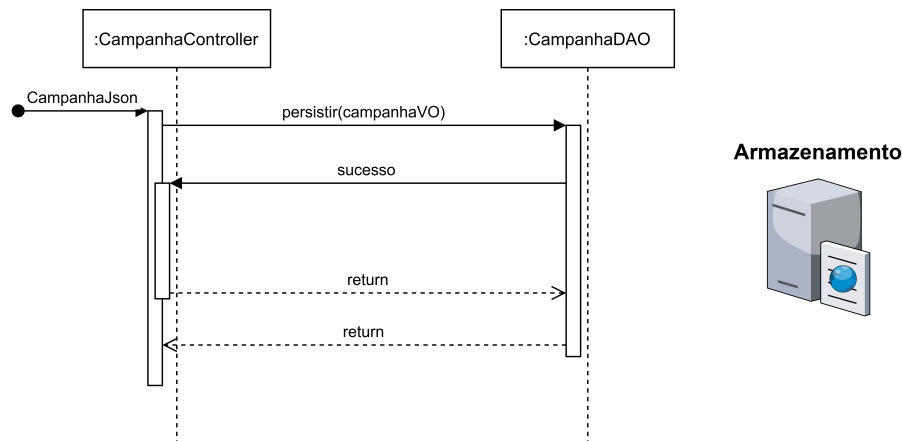


Figura 41 – Persistência de uma campanha de medição

Fonte: Autoria própria

cessamento abordado nesse capítulo compreenderá basicamente as operações para juntar as campanhas de medições no servidor remoto e gerar os gráficos de valores rms calculados ciclo a ciclo. No entanto ressalta-se, que no capítulo 5 serão abordadas campanhas com medições reais na rede elétrica da Escola de Engenharia e que reflete uma situação mais próxima da realidade na utilização da plataforma.

4.4 Primeiros Testes em Bancada

A placa de condicionamento de sinais do MIQE compreende uma etapa que contém um filtro passa-baixa do tipo RC e outro estágio amplificador/condicionador para adequar os sinais de entrada dos canais à faixa de 0-3.3 V, especificação das entradas dos ADCs das placas STM32F32F_x. Para a leitura de tensão da rede elétrica, foram testados alguns tipos de sensores. Na versão atual do protótipo, resolveu-se utilizar transformadores abaixadores de tensão¹, com tensão do secundário no valor de $\pm 1,2$ Vp e tensão de entrada que dependerá do tipo da rede elétrica. Esse sinal, por sua vez, deve ser aplicado na entrada da placa de aquisição de dados para ser condicionado à faixa 0-3.3 V, especificação das entradas dos ADCs das placas STM32F32F_x. O teste que será descrito nesta seção não pode ser chamado de “calibração do MIQE”, porque não há o que falar em calibração de protótipo. Ao contrário, foram realizados testes em que se aplicou diferentes amplitudes e tipos de sinais de tensão de um gerador de sinais do tipo Kkmoon modelo FY6900-60M² à entrada da placa de aquisição de dados, ou simplesmente placa AqD. Para ler os sinais na saída da placa AqD e ao longo dos circuitos eletrônicos, utilizou-se um osciloscópio digital Hantek modelo DSO4254C de quatro canais.

¹ Os sensores de corrente testados foram principalmente do tipo SCT da empresa YHDC, onde a faixa de corrente depende da aplicação.

² Em função da pandemia da então COVID-19 e restrições de circulação na UFMG, os testes foram realizados na casa do doutorando que dispunha de poucos equipamentos para testes.

Na Tabela 13, pode-se ver os valores de tensão referentes a uma bateria de testes do protótipo em bancada. A coluna rotulada de G, representa diferentes valores de tensão contínua (V_{dc}) ajustada no gerador de sinais e que foi aplicada na entrada da placa AqD. A coluna com o título M representa os valores de tensão lidos na saída da placa AqD e antes de serem aplicados nas entradas dos ADCs do kit DSP. Na coluna rotulada de N, pode-se ver os valores numéricos digitais lidos dentro do software embarcado para cada valor de tensão aplicado.

A diferença entre os valores dos sinais de saída e entrada pode ser explicada pelo fato de os circuitos eletrônicos terem sido dimensionados para trabalhar com sinais de entrada com amplitude na faixa de $\pm 1,2 V_p$, com nível DC de $1,7 V_{dc}$. Existem potenciômetros na placa AqD para realizar os ajustes finos dos circuitos amplificadores, de forma a condicionar os sinais para que fiquem dentro da faixa de $0-3,3 V_{dc}$, especificação das entradas dos ADCs das placas STM32F_x.

Para esse teste realizado em bancada, ajustou-se o equipamento para que o valor do ganho fosse unitário. Entretanto, ressalta-se que a placa não foi dimensionada para trabalhar com ganho unitário, o que dificulta o ajuste fino na placa de AqD e pode explicar os desvios nos valores das tensões de saída. Esse teste foi realizado apenas para verificar como a placa AqD se comportava com uma configuração de ganho unitário e recebendo em sua entrada um sinal contínuo dentro da faixa de $0-3,3 V_{dc}$.

Tabela 13 – Ajuste do MIQER (M) utilizando um Gerador de Sinais (G)

Nº	G [V]	M [V]	N	Nº	G [V]	M [V]	N	Nº	G [V]	M [V]	N
1	0,000	0,007	5	13	1,200	1,187	1460	25	2,400	2,374	2938
2	0,100	0,106	116	14	1,300	1,280	1605	26	2,500	2,466	3049
3	0,200	0,201	246	15	1,400	1,386	1718	27	2,600	2,565	3173
4	0,300	0,290	377	16	1,500	1,488	1837	28	2,700	2,652	3289
5	0,400	0,403	489	17	1,600	1,589	1962	29	2,800	2,762	3432
6	0,500	0,494	614	18	1,700	1,684	2078	30	2,900	2,856	3547
7	0,600	0,601	726	19	1,800	1,782	2215	31	3,000	2,965	3670
8	0,700	0,683	865	20	1,900	1,877	2321	32	3,100	3,060	3785
9	0,800	0,799	989	21	2,000	1,971	2458	33	3,200	3,162	3922
10	0,900	0,889	1095	22	2,100	2,072	2569	34	3,300	3,256	4031
11	1,000	0,990	1229	23	2,200	2,177	2690	35	3,400	3,299	4095
12	1,100	1,095	1356	24	2,300	2,266	2805	36	3,500	3,299	4095

Fonte: Autoria própria

No gráfico da Figura 42, pode-se ver as sequências dos valores de tensão da saída do gerador de sinais e da saída da placa AqD do MIQE. Retornando aos valores das posições 35 e 36 da Tabela 13, pode-se ver que o valor digital foi igual a 4095 ($=2^{12}-1$) correspondente à amostragem do valor igual a $3.3 V_{dc}$ e o valor de tensão na saída da

placa de condicionamento de sinais ficou estável em $3.3 V_{dc}$, protegendo a entrada do ADC de uma possível sobretensão, o que poderia danificar o equipamento. Nesse teste, a placa foi configurada com a resolução ADC de 12 bits, o que corresponde ao valor do fator de proporcionalidade $k=0,801 \text{ mV}$ ($3.3 V_{dc}$ da entrada do ADC dividido por $4096=2^{12}$). Pode-se verificar também na tabela 13 que o erro de *offset* do ADC foi igual a $0,007 \text{ V}$ e equivalente ao valor digital $N=5$. Cabe destacar que os ADCs das placas STF32F_x implementam as conversões AD pelo método de aproximações sucessivas, por isso são mais lentos que conversores do tipo *Flash*, por exemplo (TOCCI; WIDMER; MOSS, 2011). Existe um problema verificado e a ser investigado que está relacionado à diferença entre os valores do gerador de sinais e da saída da placa de AQD do MIQE. O leitor mais atento deve ter observado que foi necessário o valor de tensão de $3,4 V_{dc}$ no gerador de sinais para gerar o valor de $3,299 \text{ V}$ na saída da placa de AQD do MIQE, uma diferença de quase $0,1 V_{dc}$ ou 100 mV_{dc} considerado proibitivo para esse tipo de aplicação digital. No entanto, como o objetivo dos testes era principalmente validar a geração dos vetores rms ciclo a ciclo pelo software embarcado, tal problema foi temporariamente ignorado. Mas os autores estão cientes que se deve investir tempo para investigar a causa fundamental do problema no futuro. O projeto e a placa AqD do MIQE deverá passar por manutenções e melhorias evolutivas e espera-se que tal problema seja resolvido nas próximas versões do projeto.

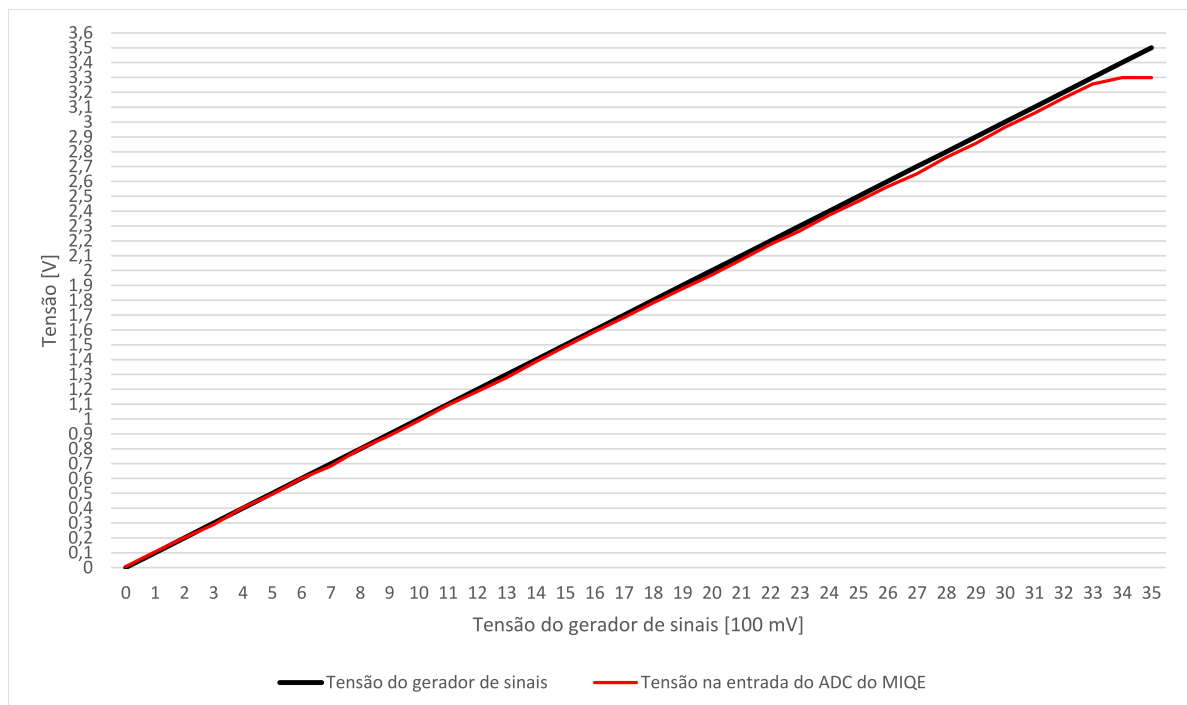
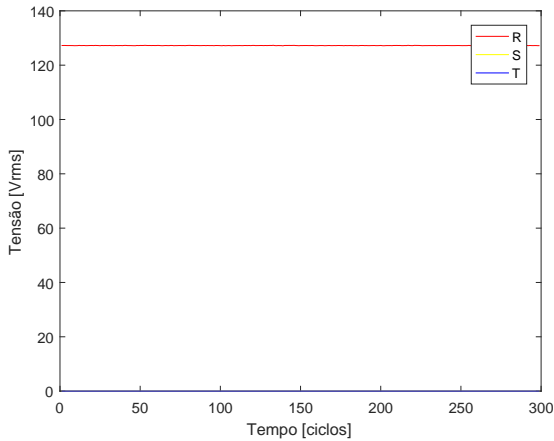


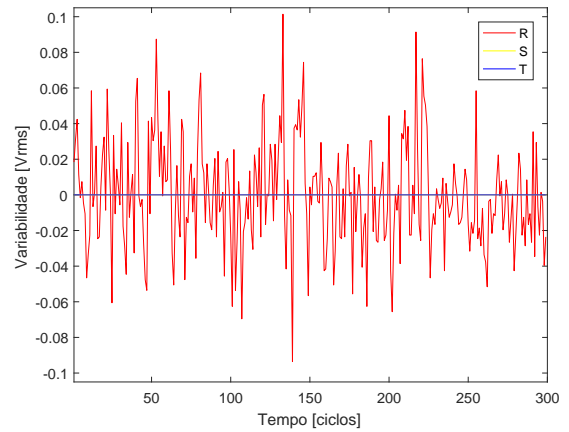
Figura 42 – Curvas de ajuste da placa de amostragem

Fonte: Autoria própria

Em outra bateria de testes, foi configurado um sinal senoidal de 60 Hz no gerador

Figura 43 – Valores rms de P_x

Fonte: Autoria própria

Figura 44 – Variabilidades rms de P_x

Fonte: Autoria própria

de sinais, com nível DC de $1,7 V_{dc}$ e valor de pico igual a $1,3 V_p$ ($2,6 V_{pp}$). A configuração de resolução utilizada no ADC foi de 10 bits³, o que corresponde a um fator de proporcionalidade $k=3,22 \text{ mV}$ (3.3 V da entrada do ADC dividido por $1024=2^{10}$) e a frequência de amostragem calibrada no sistema digital foi de $15.360 \text{ amostras/s}$. Para essa configuração, em que o erro de quantização é igual à metade da resolução k , o erro foi de aproximadamente $1,6 \text{ mV}$. Assumindo que esse sinal estaria associado à medição dos sinais de tensão de uma rede elétrica trifásica BT ($127 V_{rms}$), na Figura 43 pode-se ver a série temporal de valores rms gerada para a fase R do sistema elétrico. No momento dos testes e aplicação do sinal de tensão em cada um dos canais da placa de AQD do MIQE, as demais entradas analógicas dos ADCs foram aterradas para minimizar os efeitos de eventuais fontes de contaminação de ruídos. Na Figura 44, pode-se ver as variações do sinal devido aos erros de quantização do conversor AD tomando como referência o valor de $127 V_{rms}$, ou seja, o sinal da Figura 43 foi subtraído de $127 V_{rms}$ e esse foi o resultado gráfico.

Os valores do sinal de entrada descritos no parágrafo anterior estão associados a um sinal de tensão com valor fase-neutro de $127 V_{rms}$ e com excursão vertical máxima calibrada em bancada para o sistema embarcado de $220 V_p$. Para esse sinal a resolução k correspondente é de aproximadamente 107 mV e o erro de quantização teórico é igual à metade desse valor, aproximadamente $53,5 \text{ mV}$. Pelo gráfico da Figura 44, pode-se fazer uma análise visual e constatar que o erro de quantização está abaixo de 100 mV_{rms} . Lembrando que o sinal senoidal do gerador de sinais foi configurado com amplitude de $2,6 V_{pp}$ e centrado em $1,7 \text{ V}$ (nível DC). A estratégia para o cálculo dos vetores de valores rms ciclo a ciclo foi a mesma descrita no capítulo 3 da tese, ou seja, após o preenchimento de cada metade do *buffer*, x ou y , procura-se pela primeira amostra que marca o início

³ Para trabalhar com frequências de amostragem mais altas, é necessário configurar resoluções mais baixas nos ADCs de forma a atender as limitações de tempo impostas pelas janelas de amostragem e processamento dos sinais.

de um ciclo e efetua-se o cálculo dos valores rms utilizando todas as amostras que fazem parte daquele ciclo. Cabe destacar que foi verificado durante os testes em bancada, que mesmo para um sinal limpo do gerador de sinais, percebeu-se uma pequena diferença no número de amostras utilizadas nos cálculos dos valores rms para cada ciclo dos sinais senoidais. Nos testes com o gerador de sinais a diferença era de uma amostra, no máximo. O sistema embarcado do MIQE foi então reprogramado para considerar sempre o mesmo número de amostras lidas dentro de um determinado ciclo, no cálculo dos valores rms ciclo a ciclo dos sinais. Após a geração e preenchimento dos vetores rms ciclo a ciclo dos sinais, os valores são encapsulados em mensagens que são então enviadas para as áreas de armazenamento dos servidores remotos. Cabe ressaltar, que as operações sobre cada um dos *buffers* devem ser realizadas de forma sincronizada com as transferências dos canais DMA. Após a carga das amostras em cada metade de um *buffer*, *buffer x* por exemplo, deve-se iniciar o pré-processamento para gerar os vetores rms referentes a esta metade da estrutura de dados enquanto a outra metade, *buffer y*, está sendo carregada com os valores amostrados pelos ADCs. Na sequência é realizado o pré-processamento sobre o *Buffer_y*, enquanto o *buffer x* está recebendo as amostras; e reinicia-se o ciclo de forma que a movimentação de dados via DMA e o processador não atinjam um gargalo de processamento. O fator de redução do tamanho dos vetores de números reais a serem transmitidos para cada fase da rede elétrica, e para uma janela de 5 segundos, é da ordem de 76.800 amostras (15.360 amostras/s x 5s) para um vetor de tamanho 300 ciclos, ou seja, uma redução da ordem de 99,6 %. Se for levada em consideração apenas os esforços de comunicação para transmitir os vetores contendo as séries temporais de valores rms, a economia é da ordem de 256 vezes, o que justifica e demonstra a importância do desenho e implementação da camada de pré-processamento implementada e descrita nesta seção.

4.5 Conclusões do Capítulo

No presente capítulo, foi apresentado o MIQE, um protótipo de Medidor Industrial de Qualidade de Energia Elétrica (QEE), concebido com o intuito de ser uma prova de conceito para a construção de uma plataforma de medição de QEE, de acordo com a visão das AMIs, do *framework* das *Smart Grids*. Espera-se que a plataforma possa ser utilizada para fazer medições de forma remota, distribuída e em condições desafiadoras de amostragem, de forma a atender às novas demandas do setor elétrico. Foram apresentadas as estratégias, arquitetura e abordagens utilizadas que permitem que o protótipo possa ser aplicado para realizar medições, pré-processamento, transmissão, armazenamento e processamento das campanhas de medições de forma otimizada no uso de recursos, principalmente de comunicação. Isso é algo valioso e bastante interessante em aplicações de sistemas de energia, tendo em vista a grande quantidade de dados gerados durante as campanhas de medições. O protótipo foi construído utilizando os kits DSPs da família

núcleo STM32F_x. As características importantes para o projeto e as provas de conceito realizadas para a seleção dos kits foram abordadas no capítulo.

Para a validação e testes do protótipo, foram implementadas as operações necessárias para a geração dos vetores contendo as séries temporais de valores rms calculados ciclo a ciclo de uma rede elétrica mono ou polifásica. Os vetores são necessários para a aplicação da técnica RmsSync, abordada no Capítulo 3 da tese, e as etapas das implementações foram apresentadas. No Capítulo 5 da tese, serão apresentados os testes de medição realizados em diferentes pontos da rede elétrica da Escola de Engenharia (EE) da UFMG, onde o protótipo foi utilizado para medir os sinais de tensão de diferentes pontos da rede elétrica. Assim como foram apresentadas as estratégias para gerar as medições não sincronizadas no Capítulo 3, o MIQE foi utilizado em substituição aos osciloscópios. De posse das medições não sincronizadas armazenadas em servidores remotos, foi utilizada a implementação da técnica RmsSync, também abordada no Capítulo 3, para alinhar temporalmente as campanhas, e os resultados serão apresentados no próximo capítulo da tese.

A abordagem de trabalho em rede do protótipo MIQE é interessante, pois permite que várias instalações possam ser monitoradas a partir de uma central de monitoramento compartilhada, trazendo diversos benefícios e vantagens. Dentre eles, pode-se destacar a redução de custos de operação e a necessidade de equipes especializadas em QEE. Além disso, a partir dos dados armazenados nos servidores remotos, é possível desenvolver aplicações específicas para extrair informações de interesse e estratégias para as organizações, seja de caráter técnico sobre os ativos elétricos ou sobre a eficiência energética das empresas. Com os resultados apresentados no capítulo sobre o MIQE, acredita-se que seja possível construir, em BH-MG, uma plataforma de medição de QEE de alto desempenho, atendendo à visão das AMIs. Tal iniciativa pode contribuir para posicionar a UFMG e seus pesquisadores como referências na área de medição de QEE em um contexto brasileiro e mundial. Além disso, uma plataforma de medição de QEE é altamente aplicada e necessária para os diferentes setores da indústria.

5 PROTÓTIPO MIQE E O MODO DE OPERAÇÃO RMSSYNC

Neste capítulo, será apresentado o modo de operação intitulado *Modo de Operação RmsSync* do MIQE. Tal nomenclatura se deve ao fato de que o protótipo é utilizado para medir os valores de tensão e gerar as séries temporais de valores rms dos sinais calculados ciclo a ciclo, de diferentes pontos de uma rede elétrica mono ou polifásica, em condições desafiadoras e em rede. A partir das séries temporais, pode-se aplicar a técnica RmsSync, abordada no capítulo 3, para alinhar temporalmente as medições não sincronizadas. A implementação do *Modo de Operação RmsSync* serve como balizador e referência para a implantação/desenvolvimento de outros modos de operação do protótipo associados à medição de qualidade da energia elétrica (QEE). Isso porque o equipamento executa, de forma integrada e completa, as operações de amostragem em condições desafiadoras, processamento e transmissão dos dados via rede Ethernet para armazenamento e processamento dos relatórios de QEE nas áreas de armazenamento dos servidores remotos. Os testes foram realizados em rede elétrica trifásica de baixa tensão (BT) da Escola de Engenharia (EE) da UFMG, mas, desde que sejam utilizados transdutores e sensores apropriados, acredita-se que o protótipo possa ser customizado e aplicado para fazer medições em redes elétricas de outros portes.

Em uma implementação completa e futura da técnica RmsSync, espera-se que o protótipo seja capaz de amostrar os sinais de tensão de diferentes pontos de uma planta industrial, calcular e sincronizar os relógios dos medidores de forma automática e dentro da própria plataforma. Por hora, na versão atual, as séries temporais de valores rms são geradas e enviadas via rede Ethernet para serem armazenadas na área de armazenamento de um servidor central. Posteriormente, aplica-se a técnica RmsSync programada no MatlabTM, já abordada no capítulo 3, para executar o alinhamento temporal das medições não sincronizadas. Para realizar as medições foram utilizadas duas unidades/medidores do MIQE referenciados no capítulo pelos nomes $MeasX_1$ e $MeasX_2$, ou M_x e M_y , respectivamente.

Na seção 5.1, será feita uma introdução ao capítulo e serão apresentadas as abordagens utilizadas para a realização das campanhas de medições. Em 5.2, será apresentada a estratégia utilizada para implementar o modo de operação intitulado *Modo de Operação RmsSync*. Na seção 5.3, serão abordadas as medições realizadas no laboratório LAPIS da Escola de Engenharia (EE). Nesta etapa, os medidores M_x e M_y foram alocados para medir os sinais de tensão de um mesmo ponto em bancada da rede elétrica. Na seção 5.4, serão relatadas as medições em que o medidor M_y foi deslocado para a sala número 1111, sala nomeada de “Oficina da Escola de Engenharia”, que fica no mesmo piso e ao lado do Laboratório LAPIS. Já na seção 5.5, serão apresentadas as medições realiza-

das com o equipamento M_y alocado no Laboratório de Compatibilidade Eletromagnética (LCE), localizado no segundo andar do prédio EE. Foram realizadas também medições no Laboratório de Eletrônica de Potência (LEP), sala 2216 também localizada na EE, nos testes. Mas devido a problemas detectados na rede de dados da EE e que comprometeram o módulo de comunicação do MIQE, tais medições foram descartadas. Em 5.6, serão apresentadas as conclusões e as propostas para a evolução do protótipo.

5.1 Introdução

Durante a pandemia e o regime especial de trabalho, e mesmo nos meses seguintes à reabertura da universidade, a rede elétrica da UFMG estava com baixa demanda de energia e taxa de utilização das suas instalações e laboratórios. Cargas com potências elétricas mais elevadas como as dos sistemas de ventilação e ar condicionado dos prédios HVAC (*Heating, Ventilation, and Air Conditioning*) e elevadores, ficavam praticamente desligadas e/ou com baixa demanda a maior parte do tempo. Consequentemente, os perfis de tensão da rede elétrica apresentavam baixas variabilidades. Tal cenário foi muito prejudicial para a execução das atividades que compunham o escopo e o cronograma para a validação e testes do MIQE, além de ter sido um desafio extra para a aplicação e testes da técnica RmsSync. As variabilidades estocásticas nos perfis de tensão de uma rede elétrica, são necessárias e mandatórias para a aplicação da técnica RmsSync, conforme abordado anteriormente nesta tese. No entanto, mesmo em condições não favoráveis, foi possível demonstrar a aplicação da técnica RmsSync integrada e embarcada ao MIQE, conforme será descrito ao longo do capítulo.

No capítulo 3 desta tese, foi abordada a metodologia e os passos para a implementação e validação da técnica RmsSync. Inicialmente, a técnica foi testada com dados simulados nos softwares MatlabTM e PSCADTM. Posteriormente, utilizou-se nos testes medições não sincronizadas geradas por osciloscópios digitais. Seguindo essas mesmas abordagens e passos, neste capítulo serão apresentadas campanhas de medições e testes da técnica RmsSync. No entanto, foram utilizadas as unidades M_x e M_y do MIQE para medir e gerar as séries temporais de valores rms calculados ciclo a ciclo, em substituição aos osciloscópios. As campanhas de medições foram versionadas e receberam o padrão de nomes “Campanha_*xyz*”, onde *xyz* é um valor numérico sequencial gerado cronologicamente e associado a cada campanha de medição executada. Os equipamentos M_x e M_y foram alocados alternadamente para medir os sinais de tensão da rede elétrica dos laboratórios 1110 (Laboratório LAPIS), 1111 (Oficina da EE) e 2514 (Laboratório LCE) localizados na Escola de Engenharia (EE) da UFMG. O serviço/programa servidor responsável pela recepção e persistência das campanhas de medições foi hospedado em uma estação de trabalho equipada com um processador do tipo Intel core I7-7500, CPU de 2,70 GHz, 8 GB de RAM e sistema operacional Windows 10 (64 bits e versão 21H2). O

computador/servidor utilizado para hospedar o serviço de recepção dos dados foi mantido no Laboratório LAPIS. Todos os equipamentos, medidores e servidor de dados foram interligados à mesma rede de dados Ethernet que atende a Escola de Engenharia.

5.2 MIQE: Estratégia para a Implementação do *Modo de Operação RmsSync*

A implementação da técnica RmsSync no MIQE foi bastante crítica e demandou mais tempo do que o planejado no cronograma do projeto de doutoramento, tanto do ponto de vista de desenvolvimento quanto de testes. Isso pode ser explicado pelas limitações de tempo das janelas para a execução das operações de amostragem dos sinais, atualização dos *buffers* ADC (ADC->DMA->*buffers*), cálculo e geração das séries temporais de valores rms e transmissão das mensagens para o servidor central. Considerando a medição em uma rede elétrica de frequência igual a 60 Hz e que exija a configuração de frequência de amostragem de pelo menos 256 amostras por ciclo, tamanho dos *buffers* A ou B, descritos no capítulo 3 e de tamanho 2048, o tempo disponível para processar e enviar os vetores rms para o servidor central é muito pequeno, na casa de 8 ciclos. Supondo que sejam encontrados 8 ciclos nos sinais amostrados dos *buffers*, isso equivale a 133,36 ms a cada atualização dos *buffers* A ou B, e esse é o limite de tempo imposto para o processamento dos vetores rms ciclo a ciclo. A situação se torna ainda mais crítica para a execução dos cálculos e processamento em uma rede elétrica trifásica, pois é necessário amostrar de forma simultânea os três canais ADCs e gerar as séries temporais de valores rms ciclo a ciclo. Acrescente a tudo isso, o fato da variabilidade dos perfis de tensão da rede elétrica da UFMG estar muito baixa devido a pouca demanda em função do regime especial de trabalho, mencionado no início do capítulo.

Para trabalhar com as baixas variabilidades da rede elétrica, foi necessário configurar os ADCs do kit DSP para operar com resolução de 12 bits. Uma conversão ADC nas placas STM32F_x, que demandaria 13 ciclos de *clock* do hardware da placa STM32F_x em uma configuração de 10 bits, demanda 15 ciclos na resolução de 12 bits, aumentando ainda mais o tempo das janelas de amostragem para a leitura dos 8 ciclos dos *buffers*. O tamanho maior das janelas de amostragem impõe um limite ainda mais restritivo de tempo para as janelas de processamento. Uma solução para minimizar tal problema seria aumentar o tamanho dos *buffers* de amostras ou diminuir a frequência de amostragem da aplicação. O tamanho dos *buffers* está limitado à quantidade de memória disponível nos kits e esses já estavam operando com *buffers* de tamanho máximo medido e levantado empiricamente em bancada. O valor da frequência de amostragem já tinha sido configurado com o valor mínimo permitido para a medição, conforme justificado no início do parágrafo. Logo, algumas das otimizações possíveis de serem feitas foram realizadas no software embarcado. Por exemplo, trabalhou-se com vetores de tamanho menor para envio e persistência das medições no servidor central. No entanto, tal abordagem aumenta

o número de mensagens e a complexidade dos serviços de comunicação do sistema, granulosidade fina do serviço de troca de mensagens (COOPER; PRAGALE; DIONISE, 2011).

Após o processamento e geração dos vetores rms ciclo a ciclo, há outro desafio computacional frente à limitação de recursos típicos de sistemas embarcados, que é o envio seguro das mensagens para o servidor remoto. Após a realização de testes e provas de conceito voltados ao estudo da granularidade ideal para as mensagens no sistema de comunicação, foi definida, de forma empírica, uma configuração para um modelo de troca de mensagens baseado em granularidade fina, destinada ao envio seguro de vetores do tipo *int*, encapsulados em mensagens JSON com tamanho máximo de 10 elementos. Para enviar um vetor de tamanho igual a 300 ciclos, foi necessário encapsular os valores do vetor em 30 mensagens de tamanho igual a 10 registros do tipo *int*. O serviço de comunicação e troca de mensagens deve assegurar o envio e o armazenamento seguro dos dados, bem como possibilitar a recuperação em caso de erros, das medições realizadas em uma determinada campanha. O serviço de troca de mensagens implementado no MIQE no momento da escrita desta tese, fez uso das implementações dos serviços e protocolos TCP e UDP da biblioteca LwIP, versão 2.1, disponibilizada no *firmware* do CubeMX (2021), versão 6.3.

A abordagem utilizada para testar o modo de operação RmsSync com o MIQE combinou as operações para medição, geração das séries temporais de valores rms calculados ciclo a ciclo, transmissão e persistência das medições na área de armazenamento de um servidor remoto. Posteriormente, realizou-se o alinhamento temporal das medições utilizando a implementação da técnica RmsSync programada no MatlabTM. Foram realizadas várias medições e as que apresentaram algum tipo de problema foram descartadas. Trabalhou-se para selecionar pelo menos três medições em que o processo de medição, geração das séries temporais e alinhamento temporal, fosse executado em sua totalidade. O relato das medições será iniciado na próxima seção com os trabalhos realizados na sala 1110 (Lab. LAPIS) da Escola de Engenharia da UFMG.

5.3 MIQE Modo RmsSync: Medições e Testes na Sala 1110 (Laboratório LAPIS)

As medições para testar o modo de operação RmsSync foram iniciadas em bancada no Laboratório LAPIS, sala 1110 da Escola de Engenharia da UFMG. Utilizou-se as duas unidades M_x e M_y do MIQE, referenciadas alternativamente nas medições por P_x e P_y , para medir os sinais de tensão de um mesmo ponto da rede elétrica trifásica em bancada. Foram realizadas várias medições e muitas foram descartadas por motivos diversos. Alguns dos problemas aconteceram com os próprios protótipos que precisaram passar por muitas manutenções evolutivas.

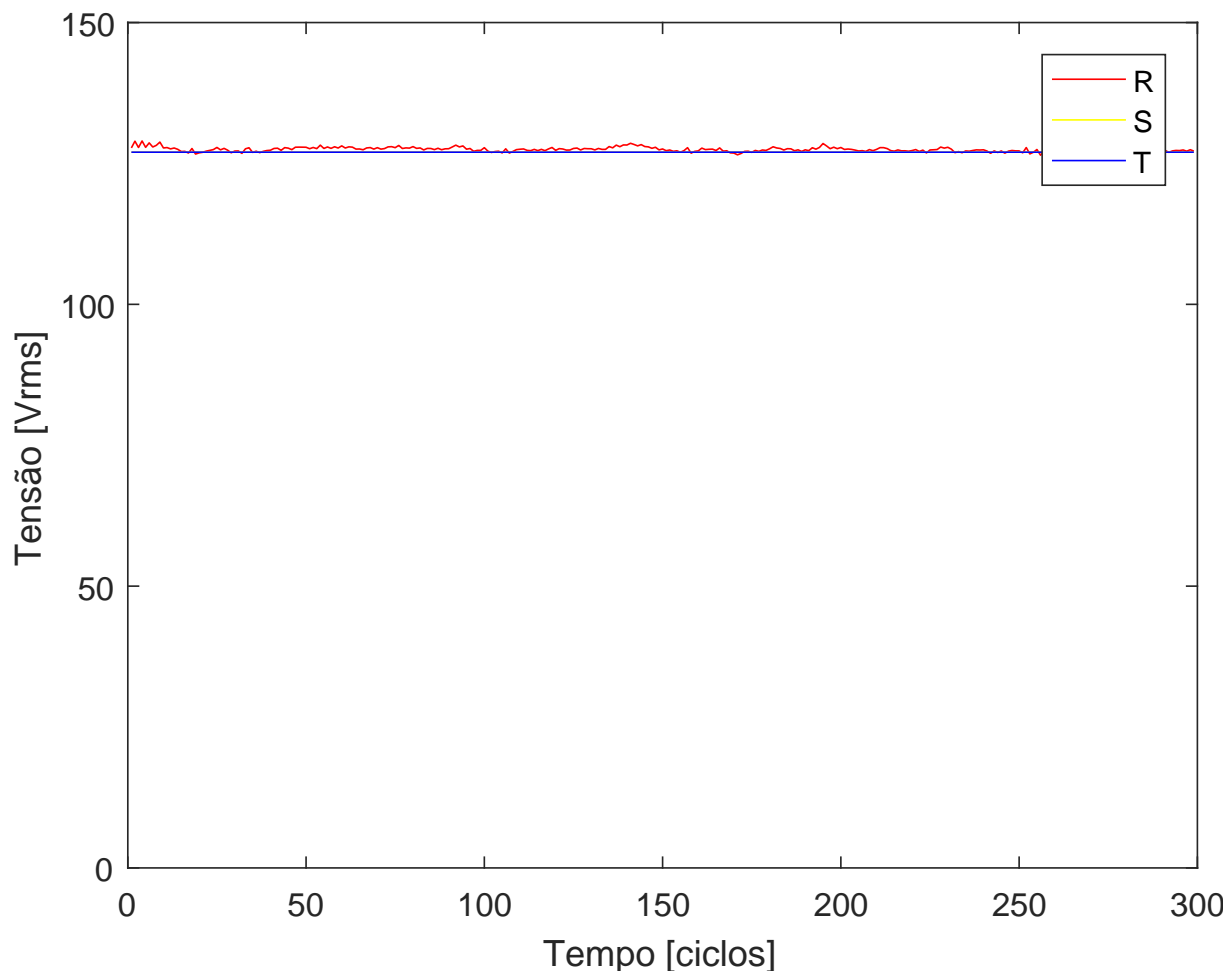
Logo nas primeiras medições, verificou-se que a versão trifásica do protótipo não

estava convergindo para executar o alinhamento temporal corretamente, por isso resolveu-se focar os esforços em uma versão monofásica, mas que envolvesse todas as etapas e operações para a medição e execução do alinhamento temporal utilizando a técnica RmsSync. As duas pontas de provas dos protótipos, M_x/P_x e M_y/P_y (Figura 33), foram colocadas sobre as mesmas fases da rede elétrica e iniciou-se as medições. O objetivo principal deste teste era executar o ciclo completo do *Modo de operação RmsSync*, ou seja, executar as operações de medição, pré-processamento, transmissão e alinhar temporalmente as medições não sincronizadas. Em paralelo e na medida em que não houvesse sucesso nos testes, tentava-se executar manutenções evolutivas no protótipo, de hardware e software, com o objetivo de chegar a uma versão que suportasse a medição e o alinhamento temporal de todos os sinais de uma rede elétrica trifásica e em diferentes pontos.

No gráfico da Figura 45, pode-se ver as séries temporais de valores rms calculados ciclo a ciclo para a fases R de P_x , para a campanha de medição número 102 executada no dia 10/11/2021, uma terça-feira por volta de 15h. Ressalta-se que, durante as medições, os canais da placa de aquisição de dados referentes às fases S e T foram ligadas ao terra, mas, no software, foram atribuídos os valores de $127 V_{rms}$ para as duas fases. Nos gráficos, pode-se ver os sinais de cor azul referentes às fases T de cada ponto. Os sinais referentes às fases S, de cor amarela, foram sobrepostos pelos sinais das fases T.

Nos gráficos das Figuras 46 e 48, pode-se ver os sinais da fase R, medidos por M_x e M_y , mas referenciados em $127 V_{rms}$ para evidenciar as variabilidades verificadas durante as medições. Nos gráficos das Figuras 47 e 49, estão representados os respectivos gráficos dos sinais após a aplicação de um processo de filtragem digital, cujas especificações são as mesmas apresentadas e relatadas no capítulo 3, ou seja, um filtro de média móvel de tamanho 5. No gráfico da Figura 50, pode-se ver os sinais referentes às fases R de P_x e P_y , respectivamente, e dentro de uma janela de 300 ciclos. Já no gráfico da Figura 51, estão representados os sinais alinhados temporalmente após a aplicação da técnica RmsSync. Pelos gráficos, é possível verificar que houve uma boa convergência no alinhamento temporal dos sinais. Em alguns instantes a excursão das variabilidades ficou próximo de $2 V_{rms}$, próximo ao instante de 225 ciclos, e essa dinâmica facilita a aplicação da técnica RmsSync.

A conclusão após a primeira bateria de testes, foi que, embora se tratasse de uma aplicação monofásica do protótipo, todas as principais operações do *Modo de operação RmsSync* puderam ser testadas de forma integrada. Ou seja, a medição envolveu e passou por todas as etapas e principais operações de medição do protótipo, que compreende a amostragem em condições desafiadoras, pré-processamento, transmissão, persistência dos dados e processamento para alinhar temporalmente as medições não sincronizadas. Esse ponto pode ser evidenciado como um importante marco alcançado no projeto.

Figura 45 – Medição de P_x

Fonte: Autoria própria

5.3.1 MIQE Modo RmsSync: Versão Trifásica do Protótipo e Testes na Sala 1110 (Laboratório LAPIS)

Após os testes da versão monofásica do MIQE, realizou-se melhorias no software do sistema embarcado do protótipo e iniciou-se os testes da versão trifásica do projeto. Os testes foram realizados em meados do mês de novembro de 2021, mais precisamente entre os dias 11 e 13/11/2021, e infelizmente os resultados não foram satisfatórios. Nos gráficos das Figuras 52 e 53, pode-se ver os sinais referentes às fases R e S após a execução do alinhamento temporal da campanha de número 464 executada em um mesmo ponto da rede elétrica trifásica em bancada do Laboratório LAPIS.

Ao analisar os gráficos das primeiras campanhas da versão trifásica do MIQE, em especial a campanha de número 464 destacada nos últimos gráficos, pode-se ver que não houve convergência do alinhamento temporal referente às fases R e T, diferente do alinhamento temporal referente às fases S medidas pelos dois equipamentos (Figura 54). Verifica-se também nos gráficos referentes às fases R e T, a presença de valores do tipo

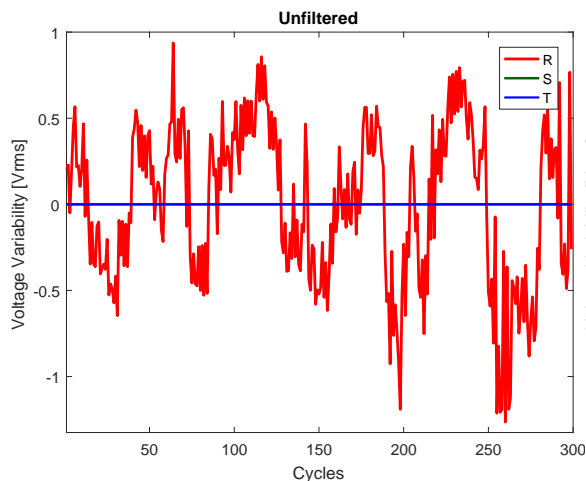


Figura 46 – Medição de P_x

Fonte: Autoria própria

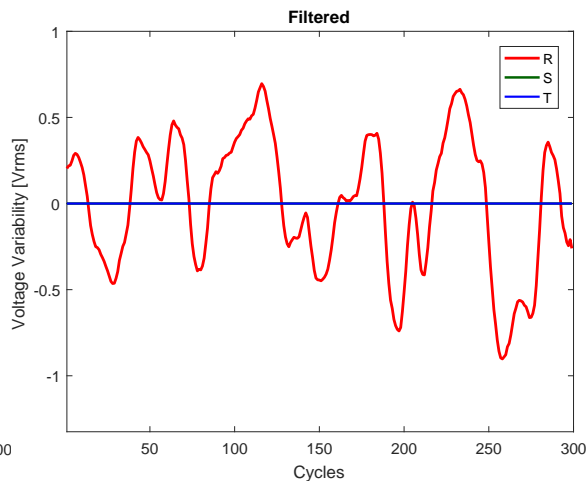


Figura 47 – P_x após filtrar

Fonte: Autoria própria

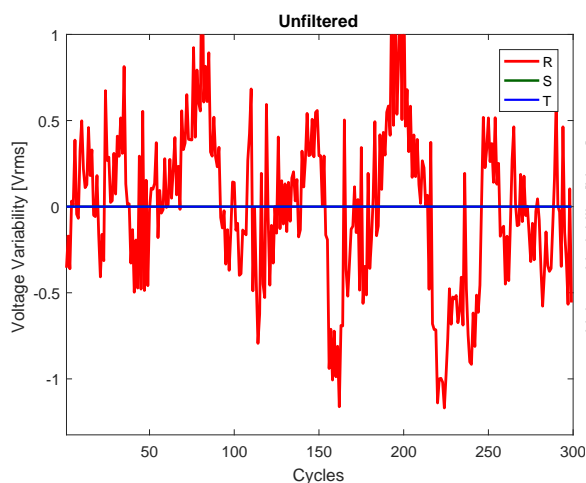


Figura 48 – Medição de P_y

Fonte: Autoria própria

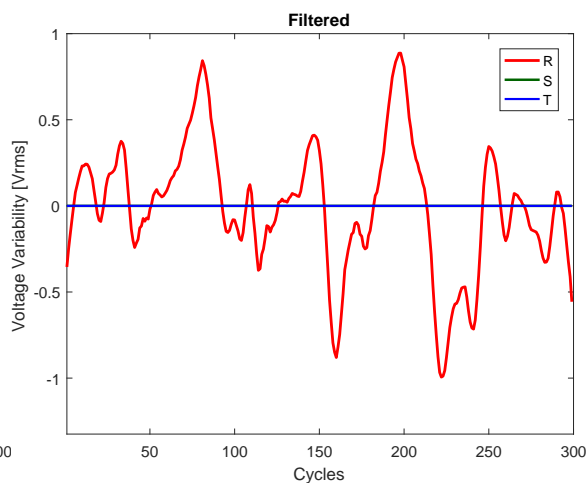


Figura 49 – P_y após filtrar

Fonte: Autoria própria

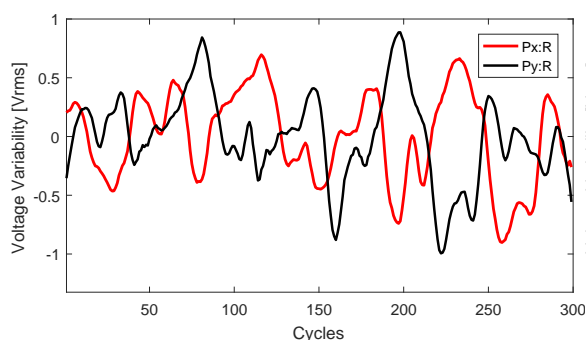


Figura 50 – P_x e P_y , fases R

Fonte: Autoria própria

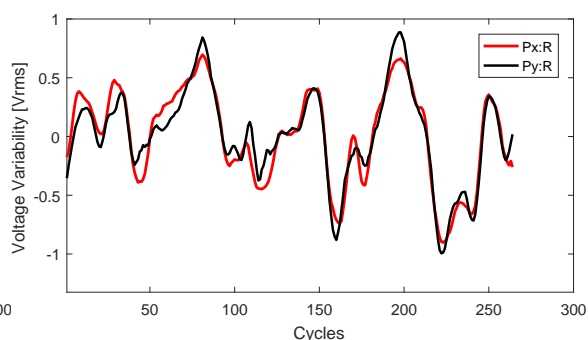


Figura 51 – Sinais alinhados

Fonte: Autoria própria

outliers, o que dificulta bastante as operações de correlação e alinhamento temporal dos sinais. Outra observação é com relação à excursão vertical das variabilidades.

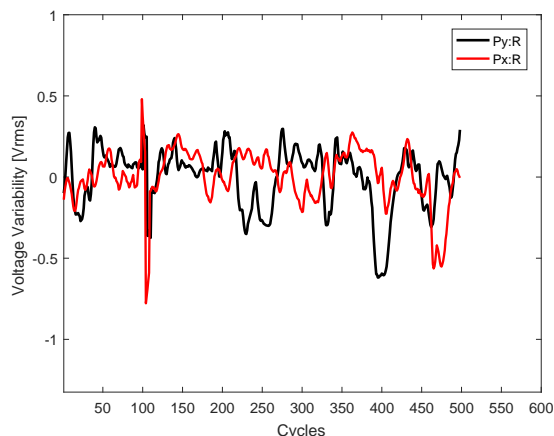


Figura 52 – Campanha 464: Fases R

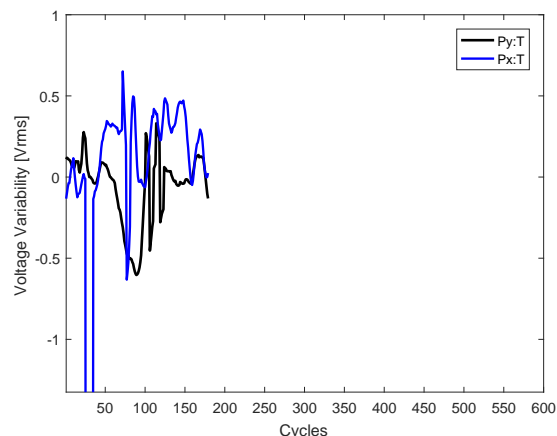
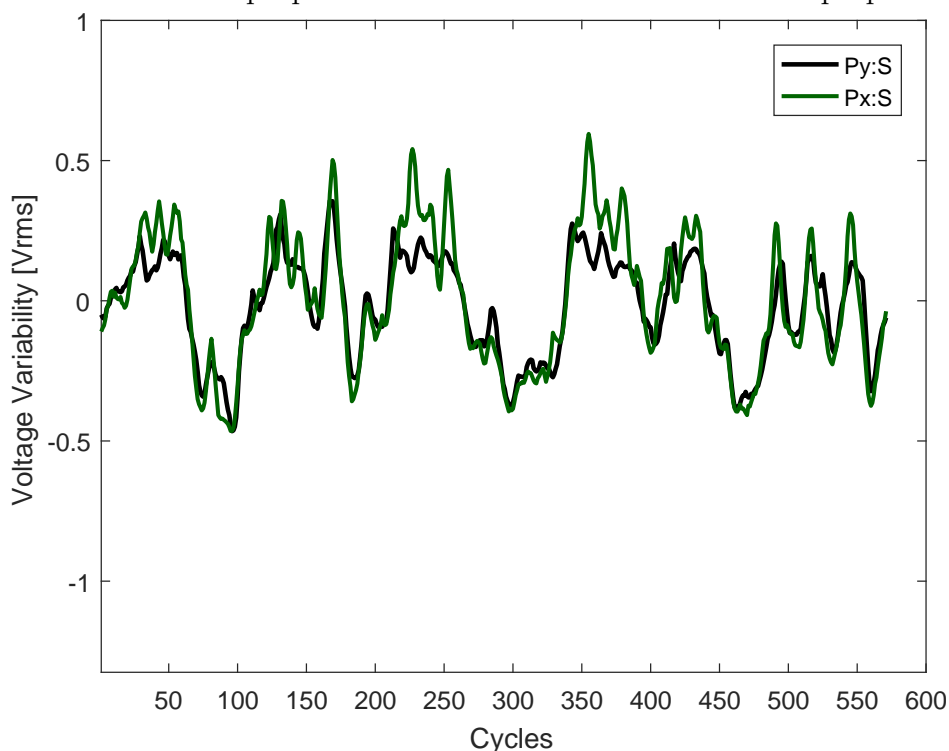


Figura 53 – Campanha 464: Fases T

Fonte: Autoria própria



Fonte: Autoria própria

Figura 54 – Campanha 464: Fase S de P_x e P_y alinhadas

Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado nos gráficos, as variabilidades estavam bem baixas e próximas de $1 V_{rms}$, devido à baixa utilização da rede elétrica em função do regime especial de trabalho durante a pandemia de COVID-19, o que dificulta a aplicação da técnica RmsSync, conforme abordado no capítulo 3 da tese. Nos testes, optou-se por utilizar janelas de medições de 600 ciclos de duração em vez de 300 ciclos. Mesmo assim, as operações de alinhamento temporal da versão trifásica do MIQE não puderam ser executadas com sucesso de forma contínua e repetida.

Devido às dificuldades apresentadas no último parágrafo, os testes do MIQE em

novembro de 2021 precisaram ser interrompidos. Decidiu-se então investir mais tempo na investigação de melhorias e otimizações que pudessem ser implementadas no protótipo para ajudar a contornar o problema e fazer a versão trifásica funcionar. Apesar do insucesso nos testes da versão trifásica, uma descoberta muito significativa foi a constatação de uma instabilidade na rede de dados da Escola de Engenharia, que causava vários erros de comunicação durante as medições, impedindo que as campanhas fossem concluídas corretamente. Decidiu-se então realizar um teste de medição em que os equipamentos medidores, M_x e M_y , fossem conectados diretamente ao servidor utilizando um switch e cabos UTP independentes da rede física da EE. Foi utilizado um cabo UTP de 100 metros de comprimento para posicionar o equipamento M_y ao longo dos diversos pontos de medição nos laboratórios. A constatação final foi que o problema de perda excessiva de pacotes na rede de dados não foi verificado, permitindo que as medições fossem executadas de forma contínua e sem contratempos relacionados a erros de comunicação. Os resultados das campanhas de medição realizadas com essas configurações serão apresentados nas próximas seções.

5.4 MIQE Modo RmsSync: Medições e Testes na Sala 1111 (Oficina da Escola de Engenharia da UFMG)

Os resultados apresentados até a seção 5.3 deste capítulo referem-se às versões trifásicas dos protótipos do MIQE, equipados com kits DSP modelo STM32F429ZI. No entanto, frente às dificuldades apresentadas na seção anterior, em meados de novembro de 2021 resolveu-se investir tempo para fazer um *upgrade* dos protótipos com novas placas do tipo STM32F767ZI, recém-adquiridas naquele momento. Os kits da família F7 têm 2 MB de memória *flash*, assim como os kits da família F4 e ambos possuem 3 módulos ADCs. No entanto, dentre outras vantagens de hardware, o kit STM32F767ZI conta com um núcleo Cortex-M7 de 32 bits rodando até 216 MHz, que oferece maior desempenho em processamento de ponto flutuante (FPU de precisão dupla contra precisão simples), possui memória cache do tipo L1 e execução de algoritmos complexos, como DSP (Processamento Digital de Sinais). O Cortex-M7 inclui um pipeline superscalar, o que melhora a eficiência do processamento. O kit STM32F427ZI utiliza um núcleo Cortex-M4 rodando até 180 MHz, com desempenho inferior ao Cortex-M7 em tarefas intensivas de cálculo (STM32FX, 2021). Desse modo, os resultados apresentados a partir desta seção se referem às medições realizadas com as versões trifásicas dos protótipos, mas equipados com placas do tipo STM32F767ZI.

Nos gráficos das Figuras 55, 56 e 57, pode-se ver os sinais referentes às fases R, S e T da campanha de medição de número 542, realizada no dia 24/12/2021. Nesta campanha de medição, o medidor M_y foi alocado para medir os sinais de tensão de uma bancada trifásica da sala 1111, localizada no mesmo piso e ao lado do Laboratório LAPIS. Pode-se

observar nos gráficos que, mesmo com valores das variabilidades consideradas baixas para aplicação da técnica RmsSync, próximas de $1 V_{rms}$, houve convergência do alinhamento temporal para as três fases da rede elétrica. Repetiu-se os testes pelo menos cinco vezes e pode-se constatar que houve repetibilidade nas medições e execução do alinhamento temporal em todas elas.

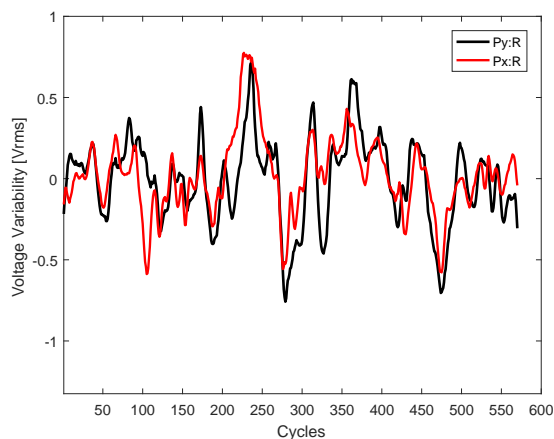


Figura 55 – Campanha 542: Fases R

Fonte: Autoria própria

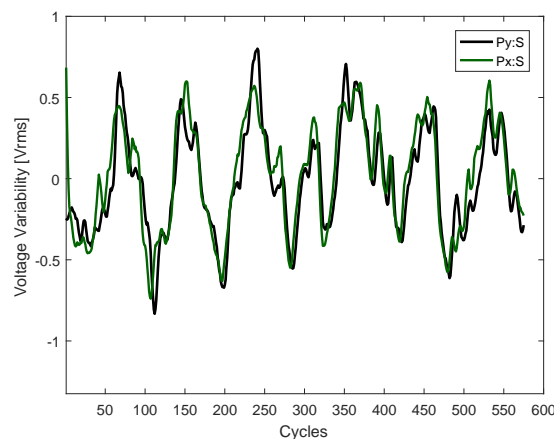


Figura 56 – Campanha 542: Fases S

Fonte: Autoria própria

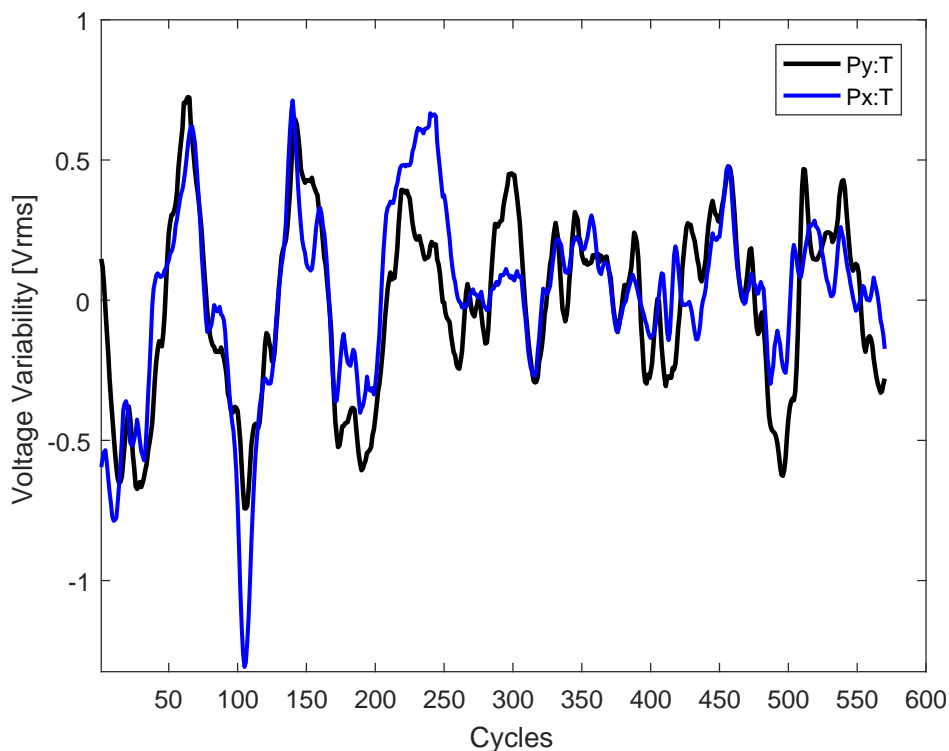


Figura 57 – Campanha 542: Fase T de P_x e P_y após alinhamento temporal

Fonte: Autoria própria

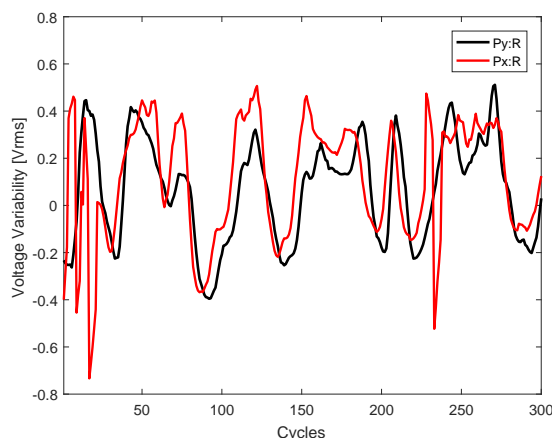
5.5 MIQE Modo RmsSync: Medições e Testes na Sala 2514 (Laboratório de Compatibilidade Eletromagnética, LCE)

Entre os dias 20/12/2021 e 24/12/2021, foram realizadas várias medições com o medidor M_y sendo alocado para medir os sinais de tensão do Laboratório LCE (sala 2514), localizado no segundo piso da Escola de Engenharia. Conforme já abordado no início do capítulo, durante os testes percebeu-se que muitas campanhas de medição precisaram ser interrompidas por problemas de falhas de comunicação e/ou perdas de pacotes na rede de dados, problemas que precisam ser melhor investigados. Devido ao cronograma crítico da fase de testes, optou-se por utilizar um cabo de rede de 100 metros (UTP categoria 5) para interligar o equipamento M_y ao servidor de dados. Outro ponto a ser destacado é que a rede elétrica da bancada do LCE é do tipo bifásica, por isso uma das pontas de prova do equipamento precisou ser aterrada durante os testes.

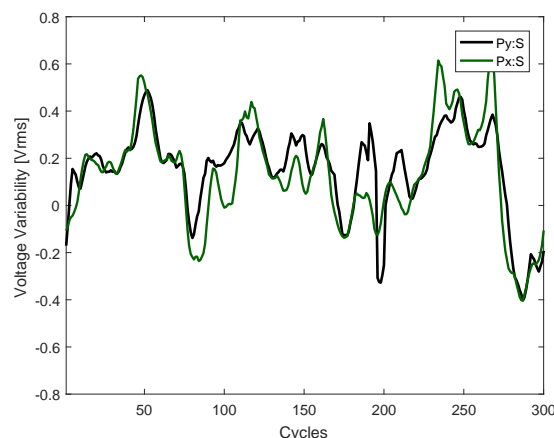
Em condições ideais de funcionamento da rede de dados e rede elétrica, os equipamentos M_x e M_y poderiam ser ligados em qualquer uma das fases disponíveis da rede elétrica para fazer as medições e enviar os dados para o servidor. De posse de tais dados, poder-se-ia aplicar a técnica RmsSync para estabelecer o alinhamento temporal para as medições não sincronizadas. Dentre as medições realizadas, selecionou-se a de número 526 para demonstrar o resultado do processamento de alinhamento temporal. Na Figura 58, pode-se ver os gráficos dos sinais das fases R de P_x e P_y , após o alinhamento temporal. Embora possa ser verificada a presença de alguns valores do tipo *outliers* nos gráficos, pode-se ver claramente a semelhança nos padrões das séries temporais. O resultado do alinhamento temporal referente à fase S pode ser visto na Figura 59. É possível observar nos gráficos que, embora as variabilidades estivessem baixas e próximas de $1 V_{rms}$, as fases puderam ser corretamente correlacionadas e o alinhamento temporal foi estabelecido. Pode-se observar também pelos gráficos, a presença de alguns valores do tipo *outliers*. Como os sinais puderam ser corretamente alinhados, resolveu-se não fazer nenhum tratamento e/ou filtragem nos dados para contornar tal problema.

Mais uma observação a ser feita é que as medições envolvendo o laboratório LCE foram bastante trabalhosas e há uma desconfiança muito grande sobre a confiabilidade da rede de dados da EE. Como não havia indícios claros de que o problema inicialmente estava associado ao cabeamento físico da rede de dados, foram testadas diversas versões do software embarcado do MIQE e executadas várias tentativas de medições. Mas, de forma concreta, a maior parte das medições apresentaram algum tipo de problema e os trabalhos só puderam ser executados de maneira mais estável quando os equipamentos não foram interligados diretamente na rede de dados da EE.

Uma última observação sobre as versões trifásicas dos protótipos se refere aos valores do tipo *outlier* observados durante as medições e nos gráficos, e que gerou valores

Figura 58 – Fases R de P_x alinhadas

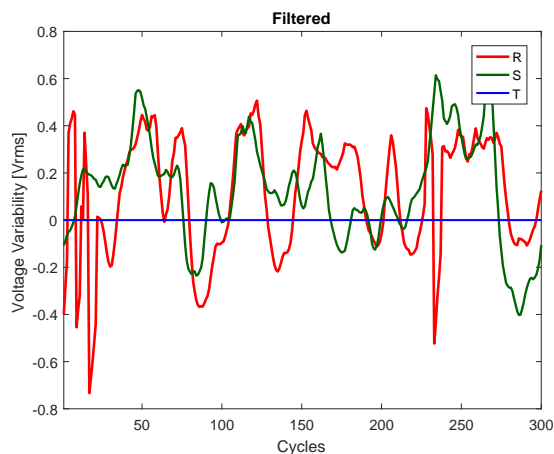
Fonte: Autoria própria

Figura 59 – Fases R de P_y alinhadas

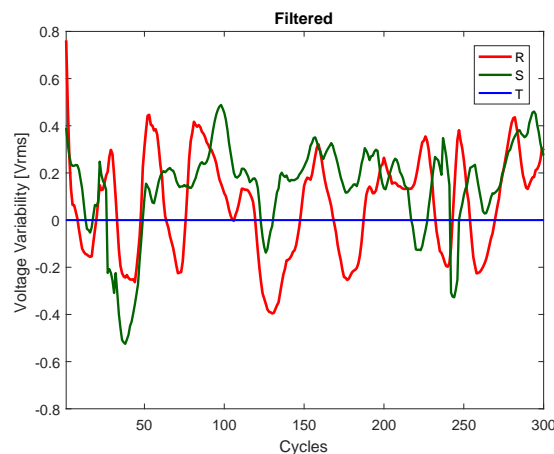
Fonte: Autoria própria

discrepantes nas séries temporais de valores rms. Como exemplo, os gráficos das Figuras 60 e 61 da campanha de número 526 correspondem às séries temporais das fases R e S dos dois pontos P_x e P_y , após o processo de filtragem digital. O alinhamento temporal das fases R e S desses sinais foi apresentado nas Figuras 58 e 59. Observe que os valores referentes à fase R de P_x , equipamento alocado no Laboratório LCE durante as medições, apresentaram valores bem discrepantes em pelo menos 4 posições do gráfico. Observe que os valores referentes ao equipamento P_y não apresentaram o mesmo problema. Em uma investigação superficial nos dois equipamentos, foi descoberto que o problema acontecia sempre em um mesmo canal do protótipo. A versão do software dos dois equipamentos era a mesma, logo, o problema possivelmente está localizado entre a placa de aquisição de dados e o kit DSP. Outra possibilidade é a existência de alguma fonte externa de ruído na rede elétrica que pudesse gerar o problema. Pretende-se, em momento oportuno, investir mais tempo para descobrir a causa do problema. As frentes de trabalho devem se concentrar em substituir o kit DSP e executar manutenções evolutivas na placa de aquisição de dados do protótipo. Mas, mesmo com os problemas apresentados ao longo do capítulo, foi possível concluir com sucesso os testes e a validação do *Modo de Operação RmsSync* no MIQE, nas versões mono e trifásicas.

Para sistemas com amostragem em tempo real, como o MIQE, e em relação aos valores de amostras a serem considerados *outliers*, uma abordagem prática seria monitorar a média e o desvio padrão dos valores em tempo real. Quando um valor se desvia significativamente da média em um determinado número de desvios padrão (geralmente 3 ou mais), ele pode ser classificado como *outlier*. Em um refinamento e evolução do protótipo MIQE, tal abordagem pode ser adotada para classificar e tratar amostras do tipo *outlier* durante a amostragem dos sinais. Embora a versão atual do protótipo não possua essa implementação, o autor está ciente da necessidade e entende que uma frente de trabalho deverá ser aberta para resolver a questão.

Figura 60 – Variabilidades rms de P_x

Fonte: Autoria própria

Figura 61 – Variabilidades rms de P_y

Fonte: Autoria própria

5.6 Conclusões do Capítulo

O presente capítulo abordou a implementação do modo de operação intitulado *Modo de Operação RmsSync* do MIQE. Na implementação, duas unidades do MIQE foram utilizadas para medir os sinais de tensão de diferentes pontos da rede elétrica trifásica da Escola de Engenharia da UFMG e gerar as séries temporais de valores rms calculados ciclo a ciclo dos sinais. Os dados gerados são enviados para um servidor via rede de dados. Posteriormente, aplicou-se a implementação da técnica RmsSync programada no MatlabTM para alinhar temporalmente as medições. Os testes foram realizados com sucesso em versões mono e trifásicas do protótipo.

Para se chegar a uma versão do MIQE que suportasse a implementação do *Modo de Operação RmsSync*, várias manutenções evolutivas de hardware e software precisaram ser realizadas. Existem melhorias já identificadas que podem ser implementadas, principalmente para evitar os valores de *outliers* verificados nas medições. Talvez um projeto completo e integrado para melhorar a blindagem eletromagnética do equipamento seja o caminho. De toda forma, como o escopo do projeto de doutoramento compreendia a construção de um protótipo de um medidor de energia, acredita-se que os resultados alcançados e apresentados atingiram e cumpriram o objetivo de testar uma plataforma para a medição distribuída de energia de acordo com a visão das AMIs. O protótipo foi testado em condições reais, desafiadoras, de medição e amostragem, em rede elétrica trifásica, conforme abordado no capítulo.

6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

Os resultados deste trabalho estão ancorados nas contribuições para implementação da visão estratégica para o desenvolvimento das *Advanced Metering Infrastructure* (AMI) das Smart Grids (SGs). A primeira contribuição a ser destacada foi o desenvolvimento da técnica RmsSync (*RMS time-alignment synchronization technique*). A técnica é aplicada para estabelecer alinhamento temporal de medições não sincronizadas, ou seja, que tenham sido geradas por equipamentos com relógios defasados. A contribuição é bastante relevante e contribui com o desenvolvimento dos novos medidores inteligentes de energia demandados pela *Advanced Metering Infrastructure* (AMI). Tal abordagem traz, entre outras vantagens competitivas, o desenvolvimento de soluções de menor custo de implantação para sincronizar medições em comparação com as soluções disponíveis e utilizadas no mercado. A técnica foi testada e validada com sucesso utilizando dados simulados e medidos na rede elétrica da Escola de Engenharia da UFMG. Além disso, a técnica foi incorporada no protótipo de medição de energia, intitulado MIQE, *Medidor Industrial de Qualidade da Energia*.

Um aspecto de grande destaque do trabalho foi o desenvolvimento do protótipo MIQE. Nas fases iniciais da pesquisa, observou-se um *gap* muito grande em referências consistentes e objetivas que pudessem servir de base para iniciar o trabalho de prototipação de um medidor de energia que estivesse alinhado com a visão das AMIs. O protótipo deveria suportar as operações de medição de energia em condições desafiadoras, em uma configuração distribuída, em rede e de vários pontos de uma rede elétrica ao mesmo tempo.

Como resultado e contribuições deste trabalho, foi proposto, testado e validado um modelo arquitetural robusto e escalável de hardware e software, que pode servir de base/chassi para o desenvolvimento de novos modelos e equipamentos de medição de energia. O protótipo MIQE desenvolvido apresenta uma visão completa e integrada de todas as etapas e operações desde a medição, pré-processamento, transmissão, armazenamento e processamento dos dados. Uma visão geral do modelo arquitetural do MIQE, bem como a sua utilização em medições, foi apresentada.

Um teste completo do MIQE com medições de campo compreendeu a implementação do modo de operação intitulado *Modo de Operação RmsSync*. Duas unidades do protótipo foram utilizadas para medir os sinais de tensão de diferentes pontos da rede elétrica da Escola de Engenharia da UFMG e gerar as séries temporais de valores rms dos sinais, calculados ciclo a ciclo. As medições foram enviadas via rede para um servidor remoto e utilizou-se a técnica RmsSync para alinhar temporalmente as medições.

Foi demonstrado também que a técnica tem uma importante aplicação industrial que é a identificação física e lógica dos condutores/fases de um sistema elétrico polifásico.

Uma contribuição indireta, mas não menos importante, e oriunda do desenvolvimento da técnica RmsSync e do protótipo MIQE, foi demonstrar que os perfis de tensão das redes elétricas definem assinaturas únicas que podem servir de base e têm várias aplicações nas medições voltadas para a análise e operação dos sistemas de energia elétrica. As assinaturas são definidas pelas variabilidades estocásticas provocadas pela dinâmica de acionamento dos diferentes tipos de cargas elétricas ao longo das redes elétricas.

6.2 Propostas de Trabalhos Futuros

A partir das conclusões e resultados apresentados neste trabalho de doutoramento, algumas sugestões de trabalhos futuros podem ser enumeradas prioritariamente e nos seguintes tópicos:

1. Técnica RmsSync:

i. A técnica RmsSync foi abordada no capítulo 3 desta tese e, para a sua aplicação, é necessário calcular e gerar as séries temporais de valores eficazes calculados ciclo a ciclo. Levando-se em consideração o esforço computacional para calcular os valores eficazes dos ciclos, uma frente de trabalho interessante seria testar o alinhamento temporal com vetores de valores eficazes calculados para frações de ciclo, ou seja, gerar vetores rms para $\frac{1}{2}$ ciclo, $\frac{1}{4}$ de ciclo, $\frac{1}{8}$ de ciclo, etc.; e verificar se o alinhamento temporal com a técnica RmsSync pode ser executado com sucesso. Tal abordagem seria bem interessante pois, caso o alinhamento temporal ainda possa ser executado para frações de ciclos, o esforço de computação para calcular e gerar os vetores contendo as séries temporais de valores rms seria pelo bem menor, pelo menos duas vezes em teoria. Tal economia é bem interessante principalmente por se tratar de uma aplicação do sistema embarcado do MIQE que possui hardware limitado.

ii. As assinaturas definidas pelas variabilidades estocásticas dos sinais de tensão dos sistemas elétricos foram verificadas e testadas em redes elétricas de baixa tensão (BT). Uma pesquisa interessante seria estender o estudo sobre as variabilidades e aplicação da técnica RmsSync para estabelecer alinhamento temporal para medições não sincronizadas para outros tipos de redes elétricas, ou seja, redes elétricas de média (MT), alta (AT) e extra-alta tensão (EAT).

iii. Conforme foi apresentado no capítulo 3 da tese, uma aplicação industrial da técnica RmsSync se refere à identificação das sequências de fases, tanto física quanto lógica, em redes elétricas polifásicas. Como o foco e o escopo durante os trabalhos de doutoramento foi a validação e testes da técnica para executar alinhamento temporal de

medições não sincronizadas, é necessário realizar trabalhos e testes para delinear melhor o escopo de tal aplicação.

2. Protótipo MIQE:

iv. Melhorar a blindagem eletromagnética do protótipo MIQE. Conforme pode ser observado nas medições apresentadas no capítulo 5, foram encontrados valores do tipo *outliers* durante as operações de amostragem que precisam ser melhor investigados e solucionados.

v. Executar *upgrades* e manutenções evolutivas no MIQE para testar outras famílias de placas que possuem mais memória e capacidade de processamento, como exemplo as placas da família H7 da empresa ST. Os *kits* DSP da família de placas H7 são evoluções das placas da família F4 e F7, utilizadas na versão atual do protótipo.

vi. Pesquisar uma forma de aplicar a técnica RmsSync em soluções que permitam fazer a sincronização de relógios do MIQE e de equipamentos de uma plataforma de medição de energia de forma automática.

3. Medição de Eventos e Distúrbios de Qualidade da Energia Elétrica (QEE):

viii. Como pode ser observado durante a leitura da tese, a maior parte dos esforços e recursos do projeto de doutoramento foram aplicados para o desenvolvimento da técnica RmsSync e protótipo MIQE. A partir de tais resultados, uma frente de trabalho interessante é o desenvolvimento de outros modos de operação do protótipo que tenham foco no monitoramento de eventos de qualidade da energia elétrica. A geração das séries temporais de valores rms de redes elétricas polifásicas é uma contribuição bem relevante e pode ser estendida para implementar outros modos de operação, visto (uma vez) que existem muitas aplicações na indústria.

Por fim, é importante destacar que os resultados diretos e indiretos deste doutorado estão no sentido de promover a colaboração entre a academia e a indústria brasileira, com o objetivo de desenvolver novos serviços e produtos voltados à medição de energia, com ênfase na qualidade da energia elétrica, meta almejada desde o início deste trabalho.

REFERÊNCIAS

1588, I. *IEEE Standard Profile for Use of IEEE 1588 Precision Time Protocol in Power System Applications*. [S.l.]: IEEE, 2017.

ABNT. *NBR-5410, Electrical installations of buildings - Low voltage*. 2004.

AFTAB, M. A. et al. IEC 61850 based substation automation system: A survey. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier BV, v. 120, p. 106008, sep 2020.

AGUIRRE, L. A. *Introdução a identificação de sistemas - Técnicas lineares e não lineares aplicadas a sistemas: Teoria e Aplicação*. Editora da UFMG, 2015. ISBN 9788542300796. Disponível em: <<https://www.editoraufmg.com.br/pages/obra/444>>.

ARDITO, L. et al. Smart grid technologies in europe: An overview. *Energies*, MDPI AG, v. 6, n. 1, p. 251–281, jan 2013.

ATALIK, T. et al. Multipurpose platform for power system monitoring and analysis with sample grid applications. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 63, n. 3, p. 566–582, mar 2014.

BHATTACHARYYA, S.; COBBE, S. Consequences of poor power quality – an overview. In: *Power Quality*. [S.l.]: InTech, 2011.

BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. *Dispositivos Eletrônicos e Teoria dos Circuitos*. 11ª edição. ed. [S.l.]: Pearson, 2013. (Always learning). ISBN 978-8564574212.

CEMIG. *Fornecimento de Energia Eletrica em Media Tensao Rede de Distribuicao Aerea ou Subterranea*. 5.3. ed. Belo Horizonte, MG, 2017. Disponível em: <http://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Clientes/Paginas/norma_tecnica.aspx>.

CHOI, W. et al. Fast constrained dynamic time warping for similarity measure of time series data. *IEEE Access*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 8, p. 222841–222858, 2020.

COOPER, C. L.; PRAGALE, R. O.; DIONISE, T. J. A systematic approach for medium voltage power factor correction design. In: *2011 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. [S.l.]: IEEE, 2011.

COULOURIS, G. et al. *Sistemas Distribuídos - 5ed: Conceitos e Projeto*. Bookman Editora, 2013. ISBN 9788582600542. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=6WU3AgAAQBAJ>>.

CUBEIDE, S. T. *UM2609 User manual, STM32CubeIDE user guide*. [S.l.], 2021. Disponível em: <<http://www.st.com>>.

CUBEMX, S. T. *UM1718 User manual, STM32CubeMX for STM32 configuration and initialization C code generation*. [S.l.], 2021. Disponível em: <<http://www.st.com>>.

- DABBAGHJAMANESH, M. et al. Guest editorial: Advanced energy internet applications in industrial power and energy systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 18, n. 8, p. 5658–5661, aug 2022.
- DE, S.; DEBNATH, S. Real-time cross-correlation-based technique for detection and classification of power quality disturbances. *IET Generation, Transmission & Distribution*, Institution of Engineering and Technology (IET), v. 12, n. 3, p. 688–695, feb 2018.
- DEVICES, A. *ADE7880, Polyphase Multifunction Energy Metering IC with Harmonic Monitoring*. www.analog.com, 2014. Disponível em: <www.analog.com>.
- DICKERSON, B. *Precision Timing in the Power Industry: How and Why We Use It?* [S.l.], Undated. Disponível em: <<http://arbiter.com/news/technology.php?id=4>>.
- DUGAN, R. C. et al. *Electrical Power Systems Quality*. [S.l.]: Mc Graw-Hill, 2004.
- DUNKELS, A. *Lightweight IP stack (2.1.0)*. [S.l.], 2018. Disponível em: <<http://www.nongnu.org/lwip/>>.
- EDELSON, R. A.; KROLIK, J. H. The discrete correlation function - a new method for analyzing unevenly sampled variability data. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 333, p. 646, oct 1988.
- ELPHICK, S. et al. Large scale proactive power-quality monitoring: An example from australia. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 32, n. 2, p. 881–889, apr 2017.
- ESPRESSIF. *ESP32 Technical Reference Manual*. [S.l.], 2021. Disponível em: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf>.
- FANG, X. et al. Smart grid — the new and improved power grid: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 14, n. 4, p. 944–980, 2012.
- FANG, X. et al. A novel reinforced deep RNN–LSTM algorithm: Energy management forecasting case study. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 18, n. 8, p. 5698–5704, aug 2022.
- FARHANGI, H. The path of the smart grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 8, n. 1, p. 18–28, jan 2010.
- FOLGADO, D. et al. Time alignment measurement for time series. *Pattern Recognition*, Elsevier BV, v. 81, p. 268–279, sep 2018.
- FREITAS, A. F. de et al. Optimum allocation of power quality monitors in electric power systems — a case study. In: *2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*. [S.l.]: IEEE, 2016.
- GIUSTINA, D. D. et al. Synchronization requirements of a power quality measurement system for the distribution grid. In: *2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*. [S.l.]: IEEE, 2014.

GONTIJO, G. A. *Sincronização de Medições de Qualidade da Energia Através de Análise de Séries Temporais de Valor RMS, Trabalho de Conclusão do Curso de engenharia Elétrica da UFMG*. [S.l.], 2013.

GOPSTEIN, A. et al. *NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 4.0*. [S.l.], 2021.

GREER, C. et al. *NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 3.0*. [S.l.], 2014.

GUERRERO, J. M. Guest editorial special issue on power quality in smart grids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 8, n. 1, p. 379–381, jan 2017.

GUNGOR, V. C. et al. A survey on smart grid potential applications and communication requirements. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 9, n. 1, p. 28–42, feb 2013.

HAFIDZ, I. et al. Development of IoT-based portable power quality monitoring on microgrids by enhancing protection features. *IEEE Access*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 11, p. 49481–49492, 2023.

HAJIAN, M.; FOROUD, A. A.; ABDOOS, A. A. New automated power quality recognition system for online/offline monitoring. *Neurocomputing*, Elsevier BV, v. 128, p. 389–406, mar 2014.

HEYDT, G. T. The next generation of power distribution systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 1, n. 3, p. 225–235, dec 2010.

IEC. *IEC60364, Electrical Installations for Buildings*. 2016.

IEEE. *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. Revision of IEEE Std 519-1992*. [S.l.], 2014.

INGRAM, D. M. E.; SCHAUB, P.; CAMPBELL, D. A. Use of precision time protocol to synchronize sampled-value process buses. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 61, n. 5, p. 1173–1180, may 2012.

ISMAGILOVA, E. et al. Smart cities: Advances in research—an information systems perspective. *International Journal of Information Management*, Elsevier BV, v. 47, p. 88–100, aug 2019.

JSON. *JSON (JavaScript Object Notation), ECMA-404 The JSON Data Interchange Standard*. [S.l.], 2021. Disponível em: <<https://www.json.org/json-en.html>>.

JUNQUERA, M. S. et al. Quality evaluation and effect of time synchronization on the digital recovery of intracardiac electrogram. In: IEEE (Ed.). *36th Annual Computers in Cardiology Conference (CinC)*. [S.l.: s.n.], 2009. v. 36, p. 801–804.

KABUGO, J. C. et al. Industry 4.0 based process data analytics platform: A waste-to-energy plant case study. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier BV, v. 115, p. 105508, feb 2020.

- KATARAY, T. et al. Integration of smart grid with renewable energy sources: Opportunities and challenges – a comprehensive review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Elsevier BV, v. 58, p. 103363, aug 2023.
- KHAN, A. Monitoring power for the future. *Power Engineering Journal*, Institution of Engineering and Technology (IET), v. 15, n. 2, p. 81–85, apr 2001.
- MARKETSANDMARKETS. *Embedded Software Market Report Size, Share and Trends 2032*. [S.l.], 2023.
- MATLAB. *Matlab Documentation*. [S.l.], 2018. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/matlab/>>.
- MAZUR, D. C. et al. Time synchronization mechanisms for the industrial marketplace. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 53, n. 1, p. 39–46, jan 2017.
- MINDYKOWSKI, J.; TARASIUK, T. Development of DSP-based instrumentation for power quality monitoring on ships. *Measurement*, Elsevier BV, v. 43, n. 8, p. 1012–1020, oct 2010.
- MINDYKOWSKI, J.; TARASIUK, T. Problems of power quality in the wake of ship technology development. *Ocean Engineering*, Elsevier BV, v. 107, p. 108–117, oct 2015.
- MORALES, E. et al. Digitization and synchronization method for electrocardiogram printouts. In: *2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference*. [S.l.]: IEEE, 2005.
- MORALES-VELAZQUEZ, L. et al. Smart sensor network for power quality monitoring in electrical installations. *Measurement*, Elsevier BV, v. 103, p. 133–142, jun 2017.
- MORELLO, R. et al. A smart power meter to monitor energy flow in smart grids: The role of advanced sensing and IoT in the electric grid of the future. *IEEE Sensors Journal*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 17, n. 23, p. 7828–7837, dec 2017.
- MOUSSA, B.; DEBBABI, M.; ASSI, C. Security assessment of time synchronization mechanisms for the smart grid. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 18, n. 3, p. 1952–1973, 2016.
- NASPI. *Time Synchronization Task Force*. [S.l.], 2017.
- NIST. *NIST framework and roadmap for smart grid interoperability standards, release 1.0*. [S.l.], 2010. Disponível em: <https://www.nist.gov/system/files/documents/public_affairs/releases/smartgrid_interoperability_final.pdf>.
- NIST. *NIST framework and roadmap for smart grid interoperability standards, release 2.0*. [S.l.], 2012. Disponível em: <https://www.nist.gov/system/files/documents/smartgrid/NIST_Framework_Release_2-0_corr.pdf>.
- NUTTALL, A. Minimum rms bandwidth of m time-limited signals with specified code or correlation matrix. *IEEE Transactions on Information Theory*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 14, n. 5, p. 699–707, sep 1968.

- O'DRISCOLL, E.; O'DONNELL, G. E. Industrial power and energy metering – a state-of-the-art review. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier BV, v. 41, p. 53–64, feb 2013.
- OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W.; BUCK, J. R. *Discrete-Time Signal Processing*. 2. ed. [S.l.]: Prentice-Hall, 1999.
- OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A. S.; NAWAB, S. H. *Signals and Systems*. 2. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 1996. ISBN 978-0138147570.
- ORLANDO, M. et al. A smart meter infrastructure for smart grid IoT applications. *IEEE Internet of Things Journal*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 9, n. 14, p. 12529–12541, jul 2022.
- PAL, R. et al. A comprehensive review on IoT-based infrastructure for smart grid applications. *IET Renewable Power Generation*, Institution of Engineering and Technology (IET), v. 15, n. 16, p. 3761–3776, aug 2021.
- PAN, C.-L. et al. ESG and carbon disclosure practices in china: An analysis of PwC china's tech-enabled approach. In: *2022 IEEE Technology And Engineering Management Conference - Asia Pacific (TEMSCON-ASPAC)*. [S.l.]: IEEE, 2022.
- PERERA, S.; SABIN, D. Guest editorial special section on contemporary issues in power quality. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 32, n. 2, p. 811–811, apr 2017.
- PEZESHKI, H.; WOLFS, P. J. Consumer phase identification in a three phase unbalanced LV distribution network. In: *2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*. [S.l.]: IEEE, 2012.
- PIRES, I. A.; SILVA, S. M.; FILHO, B. de J. C. Increasing ride-through capability of control panels using square-wave series voltage compensator. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 51, n. 2, p. 1309–1316, mar 2015.
- PRODIST. *Resolucao Normativa ANEEL no 956/2021*. [S.l.], 2021.
- PRYSMIAN. *Low Voltage Sizing - General Purpose*. [S.l.], 2019. Disponível em: <<https://br.prysmiangroup.com>>.
- PSCAD. *PSCAD/EMTDC Users Guide v4.6*. [S.l.], 2016. Disponível em: <<https://hvdc.ca/knowledge-base/read,article/160/pscad-user-s-guide-v4-6/v:>>>.
- RHUDY, M. Time alignment techniques for experimental sensor data. *International Journal of Computer Science & Engineering Survey*, Academy and Industry Research Collaboration Center (AIRCC), v. 5, n. 2, p. 1–14, apr 2014.
- SALUNKHE, K. A. et al. Implementation and applications of a wide area frequency measurement system synchronized using network time protocol. In: *2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition*. [S.l.]: IEEE, 2014.
- SCHEITERER, R. et al. Synchronization performance of the precision time protocol in industrial automation networks. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 58, n. 6, p. 1849–1857, jun 2009.

- SHAHIDEHPOUR, M. Editorial. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 1, n. 1, p. 1–2, jun 2010.
- SIMAAN, M. Frequency domain alignment of discrete-time signals. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 32, n. 3, p. 656–659, jun 1984.
- SOMMERVILLE, I. *Software Engineering*. Pearson, 2016. (Always learning). ISBN 9780133943030. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=tW4VngEACAAJ>>.
- STM32FX, S. T. *RM0090 Reference manual*. [S.l.], 2021. Disponível em: <<http://www.st.com>>.
- TARASIUK, T.; MINDYKOWSKI, J. An extended interpretation of THD concept in the wake of ship electric power systems research. *Measurement*, Elsevier BV, v. 45, n. 2, p. 207–212, feb 2012.
- TEXAS. *Industry-leading portfolio featuring a broad, scalable selection of programmable DSP devices*. [S.l.], 2021. Disponível em: <<https://www.ti.com/microcontrollers-mcus-processors/processors/digital-signal-processors/overview.html>>.
- TOCCI, R. J.; WIDMER, N. S.; MOSS, G. L. *Sistemas Digitais: Princípios E Aplicações*. [S.l.]: Pearson, 2011.
- VOLKERS, R. E.; FRIZERA, A.; ENCARNACAO, L. Desenvolvimento de um sistema de medição de consumo e qualidade de energia elétrica com interface de acesso via web. In: *Anais do XII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente-SBAI2015*. [S.l.: s.n.], 2015.
- WON, D.-J. et al. Development of power quality monitoring system with central processing scheme. In: *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*. [S.l.]: IEEE, 2002.
- WON, D.-J.; MOON, S.-I. Optimal number and locations of power quality monitors considering system topology. In: *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*. [S.l.]: IEEE, 2008.
- YANG, L. et al. Guest editorial special issue on IoT for power grids. *IEEE Internet of Things Journal*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 10, n. 9, p. 7426–7428, may 2023.
- YI, Z.; LI, H. Environmental, social and governance investing assessment under incomplete information by the power aggregation model on probabilistic linguistic terms. *IEEE Access*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 9, p. 120442–120450, 2021.
- ZHANG, L.; WU, X. On the application of cross correlation function to subsample discrete time delay estimation. *Digital Signal Processing*, Elsevier BV, v. 16, n. 6, p. 682–694, nov 2006.

ZHAO, J. et al. A robust state estimation framework considering measurement correlations and imperfect synchronization. *IEEE Transactions on Power Systems*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 33, n. 4, p. 4604–4613, jul 2018.

A APÊNDICE — INFORMAÇÕES SOBRE O AUTOR E ORIENTADOR

A.1 Autor: Geraldo Pereira de Souza



Geraldo Pereira de Souza possui graduação em Ciência da Computação pela UFOP (1998), mestrado em Ciência da Computação pela UNB (2002), pós graduação em Gestão de Negócios pela Fundação Dom Cabral (2008), graduação em Engenharia de Controle e Automação pela UFOP (2015) e defendeu o doutorado em Engenharia Elétrica pela UFMG (2024). Atualmente é Professor do Instituto de Ciências Exatas e Informática (ICEI) da PUC Minas. Tem experiência em projetos de automação bancária, arrecadação fazendária e sistemas embarcados para medição de energia. Atualmente, seus interesses incluem sistemas distribuídos e de tempo real, medição da qualidade da energia, sistemas embarcados e processamento de sinais.

Informações de Contato

Plataforma Lattes:

- <https://lattes.cnpq.br/0480524300059404>

Linkedin:

- <https://www.linkedin.com/in/geraldo-pereira-de-souza-1351607/>

Emails:

- geraldopereira@ufmg.br e geraldo@mink.com.br

A.2 Orientador: Prof. Dr. Wallace do Couto Boaventura



Wallace do Couto Boaventura possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (1987), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (1990) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (2002), com estágio na University of Toronto (UofT). Atualmente é professor titular da Universidade Federal de Minas Gerais. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Transmissão da Energia Elétrica, Distribuição da Energia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: sistemas de energia, compatibilidade eletromagnética, descargas atmosféricas, alta tensão, aplicações de processamento de sinais e integração de fontes renováveis.

Informações de Contato

Plataforma LATTES:

- <http://lattes.cnpq.br/3671318138854482>

Web pages da UFMG:

- <https://www.ppgee.ufmg.br/>
- <https://dee.ufmg.br/>