

Universidade Federal de Santa Catarina
Centro Tecnológico, de Ciências Exatas e Educação
Departamento de Engenharia de
Controle, Automação e Computação



Augusto Magno da Silva

Automatização de ensaios aplicados a algoritmos de controle de
corrente para inversores trifásicos conectados à rede

Blumenau

2022

Augusto Magno da Silva

**Automatização de ensaios aplicados a algoritmos de
controle de corrente para inversores trifásicos
conectados à rede**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Engenheiro de Controle e Automação.
Orientador: Prof. Dr. Daniel Martins Lima

Universidade Federal de Santa Catarina
Centro Tecnológico, de Ciências Exatas e Educação
Departamento de Engenharia de
Controle, Automação e Computação

Blumenau
2022

Augusto Magno da Silva

Automatização de ensaios aplicados a algoritmos de controle de corrente para inversores trifásicos conectados à rede

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Daniel Martins Lima
Universidade Federal de Santa Catarina
Orientador

Prof. Dr. Tiago Davi Curi Busarello
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Luiz Antônio Maccari Jr
Universidade Federal de Santa Catarina

Blumenau, 28 de fevereiro de 2022

Dedico este trabalho à todos aqueles que, de alguma forma,
contribuíram para com meu desenvolvimento pessoal
e profissional ao longo deste ciclo.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais que sempre forneceram apoio para que eu tivesse condições de continuar a batalha durante todos esses anos. Em especial, agradeço à minha mãe, Mauriza Aparecida da Silva, por todo carinho, ensinamentos e persistência, para que eu jamais desistisse e pudesse chegar ao fim desse ciclo.

Aos meus amigos e colegas que de alguma forma proporcionaram experiências e conhecimentos ao longo dessa jornada. Agradeço aqueles que puderam compartilhar dos melhores momentos e, ainda mais àqueles que me apoiaram nos momentos difíceis.

À todos os professores que sempre se esforçaram para transmitir todo o conhecimento aos alunos e que por vezes foram além para garantir a aprendizagem. Em especial, ao meu orientador Daniel Martins Lima, que prestou apoio durante o desenvolvimento do trabalho e me deu oportunidade de desenvolver estudos com a iniciação científica.

*"O ontem é história, o amanhã é um mistério,
mas o hoje é uma dádiva. É por isso que se chama presente."
(Kung Fu Panda).*

Resumo

Sistemas de geração de energia através de fontes renováveis são amplamente estudados e nos últimos anos os sistemas fotovoltaicos vem ganhando destaque pela sua crescente aderência. Dentre os componentes desse sistema estão os inversores, utilizados para o condicionamento da energia para a inserção correta à rede elétrica. Algoritmos de controle são estudados para que essa energia tenha mais qualidade. Para facilitar o desenvolvimento de algoritmos tem sido aplicado a técnica TDD (Test-Driven Development), que busca facilitar a identificação de erros no desenvolvimento de *softwares*. Este trabalho tem o intuito de desenvolver um *script* capaz de automatizar através do conceito de TDD, procedimentos de ensaio aplicados a algoritmos de controle de corrente de inversores conectados à rede elétrica seguindo normas fornecidas pela Associação de Normas Técnicas Brasileiras (ABNT) para conformidade de sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR). Através do estudo de caso aplicando os testes à um algoritmo de controle, é apresentado o relatório de aprovação de conformidade, mostrando a obtenção do objetivo do trabalho.

Palavras-Chave: 1. TDD. 2. SFCR. 3. Algoritmo de controle. 4. ABNT. 5. Inversor

Conectado à Rede.

Abstract

Generation systems energy through renewable sources are largely studies and in recent years photovoltaic energy systems obtain highlighted their growing adhesion. Among the components of this system are the inverters, used for energy conditioning for the correct insertion into the electrical grid. Control algorithms are studied so that this energy has more quality. To assist in the development of algorithms, the TDD (Test-Driven Development) technique can be used, which seeks to facilitate the identification of errors in software development. This work aims to develop a script capable of automating test procedures applied to current control algorithms following Brazilian technical standards for compliance of grid-connected photovoltaic systems (GCPVS). Through the case study applying the tests to a control algorithm, the compliance approval report is presented, showing the achievement of the objective of the work.

Keywords: 1. TDD. 2. GCPVS. 3. Control Algorithm. 4. ABNT. 5. On-grid Inverter.

Lista de figuras

Figura 1 – Crescimento global acumulado da energia solar [1].	13
Figura 2 – Esquema de sistema fotovoltaico conectado à rede[2].	16
Figura 3 – Estrutura básica de um conversor de potência trifásico [3].	17
Figura 4 – Esquema de funcionalidade de inversores [4].	18
Figura 5 – Sistema com inversor trifásico conectado a rede através do filtro LCL [5].	18
Figura 6 – Diagrama de realimentação do algoritmo PLL considerado [6].	19
Figura 7 – Diagrama elétrico do filtro LCL monofásico [7].	20
Figura 8 – Diagrama de Bode de um Filtro LCL típico.	21
Figura 9 – Comparação entre senoide pura e senoide contaminada com distorções harmônicas.	21
Figura 10 – Triângulo das potências [8].	23
Figura 11 – Defasagem entre sinal de tensão e corrente [8].	24
Figura 12 – Curva do FP em função da potência ativa de saída do inversor [9]. . . .	25
Figura 13 – Limites de compensação de potência reativa [9].	25
Figura 14 – Diagrama básico de ligações para os ensaios [10].	26
Figura 15 – Esquema do ciclo de aplicação do TDD [11].	27
Figura 16 – Fluxograma de aplicação do TDD [12].	27
Figura 17 – Trecho de formatação em linguagem HTML [13].	28
Figura 18 – Resultado exibido na decodificação HTML [13].	28
Figura 19 – Visão geral do subsistema criado.	29
Figura 20 – Visão interna do subsistema criado.	30
Figura 21 – Ajustes de parâmetros para a execução do <i>script</i> desenvolvido.	32
Figura 22 – Campos gerados pela ferramenta <i>power_fftscope()</i>	33
Figura 23 – Calculo da curva do FP.	35
Figura 24 – Conexões do sistema de conversão de potência, sistema de controle e sistema supervisorio.	39
Figura 25 – Diagrama de controle de corrente do inversor.	40
Figura 26 – Atualização dos estados do sistema e modulação PWM.	40
Figura 27 – Visão geral do relatório gerado.	42
Figura 28 – Visão expandida do itens do relatório.	43
Figura 29 – Comparação entre os limites e as medidas para distorções harmônicas para 10% da potência nominal.	44
Figura 30 – Comparação entre os limites e as medidas para distorções harmônicas para 100% da potência nominal.	44

Lista de tabelas

Tabela 1 – Limites de distorção harmônica de corrente [9].	23
Tabela 2 – Curva FP para inversor com potência nominal maior que 3 kW e menor igual a 6kW	35
Tabela 3 – Curva FP para inversor com potência nominal maior que 6kW	35
Tabela 4 – Parâmetros do sistema	41

Lista de Siglas e Abreviaturas

SFCR	<i>Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
TDD	<i>Test Driven Development</i>
HIL	<i>Hardware In The Loop</i>
PLL	<i>Phase-Locked Loop</i>
DSP	<i>Dispositivo de Processamento de Sinal</i>
LCL	<i>Indutivo-Capacitivo-Indutivo</i>
ANEEL	<i>Agência Nacional de Energia Elétrica</i>
THD	<i>Distorção Harmônica Total</i>
FP	<i>Fator de Potência</i>
HTML	<i>HyperText Markup Language</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Sistema fotovoltaico conectado à rede	16
2.1.1	Módulos fotovoltaicos	16
2.1.2	Inversor conectado à rede	16
2.1.2.1	Algoritmo de controle de corrente	18
2.1.2.2	<i>Phase-Locked Loop</i>	19
2.1.2.3	Filtro LCL	19
2.1.2.4	Harmônicas e distorções na forma de onda	21
2.2	Normalização de inversores fotovoltaicos	22
2.2.1	ABNT NBR 16149:2013	22
2.2.1.1	Harmônicos e distorção de forma de onda	22
2.2.1.2	Fator de potência e injeção/demanda de potência reativa	22
2.2.2	ABNT NBR 16150:2013 - Procedimentos de ensaios de conformidade	24
2.3	<i>Test-Driven Development</i> - TDD	26
2.4	<i>HyperText Markup Language</i> - HTML	28
3	METODOLOGIA	29
3.1	Criação do arquivo de simulação para executar os testes	29
3.1.1	Sistema supervisorio	29
3.1.2	Lógica para os procedimentos de ensaios	31
3.1.2.1	Parâmetros padrão para a execução do <i>script</i>	32
3.1.2.2	Harmônicos e distorção de forma de onda	33
3.1.2.3	Fator de potência fixo	34
3.1.2.4	Fator de potência com curva do FP	34
3.1.2.5	Injeção/demanda de potência reativa	36
3.2	Tratamento de dados	37
3.2.1	Harmônicos e distorção de forma de onda	37
3.2.2	Fator de potência fixo	37
3.2.3	Fator de potência com curva do FP	37
3.2.4	Injeção/demanda de potência reativa	38
3.3	Geração do relatório de testes	38
4	ESTUDO DE CASO	39

5	CONCLUSÕES	45
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
	ANEXO A – <i>TEMPLATE</i>	48
	ANEXO B – <i>SCRIPT</i> DESENVOLVIDO	51

1 Introdução

A geração de energia através de painéis fotovoltaicos é uma das fontes renováveis que vem tendo grande aderência em usinas de pequeno e médio porte, como os painéis instalados em residências, indústrias e comércio. A Figura 1 mostra o crescimento global de geração nos últimos anos.

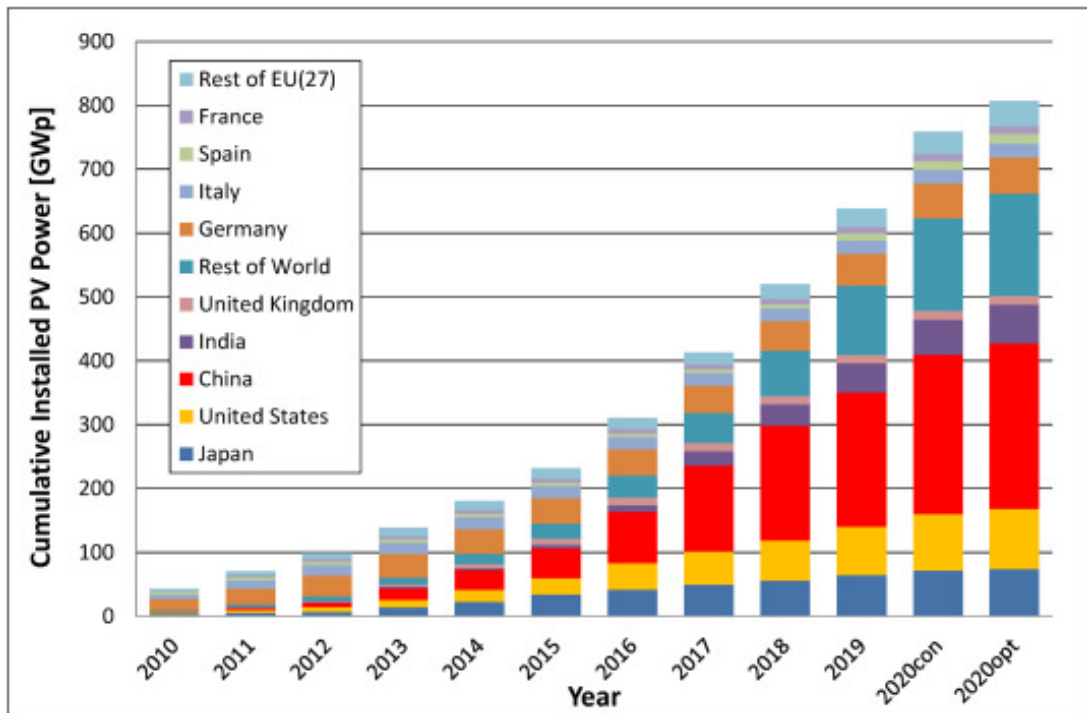


Figura 1 – Crescimento global acumulado da energia solar [1].

Através da energia proveniente do sol, um arranjo de cerca de oito módulos fotovoltaicos pode gerar energia suficiente para uma residência de baixo consumo, sendo que a quantidade de módulos depende da potência consumida. Para que a energia gerada por um sistema fotovoltaico conectado a rede (SFCR) possa ser utilizada, seja para o consumo próprio, seja para inserção à rede de distribuição elétrica, é necessário o emprego de um conversor de potência, neste caso chamado de inversor de frequência. A função do inversor de frequência é atuar na conversão de energia gerada em corrente contínua para corrente alternada [14]. Para isso, são desenvolvidos algoritmos de controle de corrente que atuam no condicionamento da energia. Muitos estudos vem sendo realizados para o desenvolvimento de algoritmos que entreguem a energia de forma mais eficiente, garantindo a proteção de equipamentos ligados à rede utilizando técnicas de sistemas controle para desenvolver algoritmos de controle mais robustos e com a conversão de potência mais eficiente, reduzindo perdas e efeitos empregados pelos componentes eletrônicos utilizados nos inversores. Por exemplo em [15], que propõe um modelo de controle preditivo baseado

em dicotomia (DS-MPC) com uma frequência de chaveamento fixa para inversores conectados à rede, obtendo resultados positivos com a combinação do controle com o Filtro de Kalman estendido. Ou em [16], que propõe um novo controle por modos deslizantes aplicado ao rastreamento de máxima potência de inversores monofásicos conectados à rede, garantindo grande eficiência no aproveitamento de potência.

Para que um inversor seja comercializado e conectado à rede elétrica, este deve atender às normas regentes em cada país. No Brasil, existem laboratórios especializados em ensaios e testes de inversores conforme portaria INMETRO 004/2011 e a portaria 357/2014, garantindo a qualidade mínima de funcionamento do equipamento de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), especificamente as normas ABNT NBR 16149/2013 e 16150/2013. A execução dos ensaios são realizadas de forma manual pelo laboratório contratado. De acordo com [17], a execução dos procedimentos de um modelo de inversor fotovoltaico custa para o fabricante R\$ 15.000 (quinze mil reais), além de gastos com transporte e registro do produto no INMETRO. Visto isso, o desenvolvimento do produto deve ser cauteloso para evitar gastos desnecessários com a necessidade de reexecução dos testes de certificação. Portanto, antes que o produto final seja enviado a um laboratório, é importante a realização de testes iniciais para a validação preliminar do funcionamento do equipamento reduzindo, assim, as chances de falha do equipamento durante a certificação.

Uma metodologia de desenvolvimento bastante conhecida é o TDD (*Test Driven Development*), que pode ser aplicada para simular diversas situações que podem ocorrer durante o desenvolvimento de um algoritmo ou equipamento. O TDD tem por objetivo facilitar a identificação de erros e ajustes no desenvolvimento, sendo bastante relacionado no contexto de soluções de *software* [18, 19]. Desta forma, o TDD pode ser aplicado na implementação de algoritmos de controle para inversores conectados a rede. No artigo [12], foi aplicado a metodologia TDD em algoritmos de controle implementado em software de simulação *hardware in the loop* (HIL) - que entrega respostas muito próximas da real. São fornecidos dados de comparação e análise de diferentes cenários para a obtenção de dados como distorções harmônicas, fator de potência e outras características importantes para a inserção de energia à rede elétrica.

Afim de contribuir para o desenvolvimento de algoritmos de controle de corrente para inversores conectados à rede, o objetivo deste trabalho é desenvolver um algoritmo baseado em TDD para automatizar os ensaios associados à qualidade e características do sinal de corrente gerado na saída do inversor. Sendo que o objetivo específico é desenvolver um *script* de simulação no Matlab R2020a e um subsistema para a aquisição de dados no Simulink para fornecimento de dados que permitam avaliar as condições de funcionamento de algoritmos de controle de corrente de um inversor conectado à rede. O desenvolvimento visa fornecer uma ferramenta para aplicar os passos caracterizados pelo TDD realizando os ensaios e critérios de aprovação das normatizações ABNT 16149:2013 e 16150:2013.

Assim, durante o desenvolvimento do algoritmo de controle, o mesmo pode ser testado seguindo critérios dos testes de certificação até que se garanta uma probabilidade alta do equipamento/software ser aprovado podendo, futuramente, ser comercializado. Ao final da execução pretende-se que um relatório contendo as informações com o veredito de aprovação de cada um dos testes seja apresentado.

O trabalho está dividido em 6 capítulos. No Capítulo 2 são caracterizados os componentes e teorias envolvendo SFCR, além da apresentação dos procedimentos de avaliação e execução de ensaios a serem automatizados. O Capítulo 3 apresenta a metodologia e lógica aplicada para o desenvolvimento do *script* de automatização. Um estudo de caso é descrito no Capítulo 4 de forma a avaliar o funcionamento do trabalho desenvolvido. E, por fim, o Capítulo 5 mostra as considerações finais obtidas com o estudo apresentado.

2 Fundamentação teórica

Este capítulo apresenta a descrição de conceitos teóricos necessários para a realização e implementação deste trabalho.

2.1 Sistema fotovoltaico conectado à rede

Diversos sistemas têm sido desenvolvidos nas últimas décadas para a geração de energia de forma mais sustentável, como por exemplo geradores eólicos, hidrelétricas, biomassa, geotérmica e fotovoltaica. Especificamente, um SFCR converte a energia solar em energia elétrica através de painéis fotovoltaicos. A energia é gerada em corrente contínua e condicionada pelo inversor para que possa ser inserida à rede de distribuição. O esquema básico de um SFCR é apresentado na Figura 2, onde podem ser vistos os componentes básicos que o compõem: painéis solares, inversor, medidor de energia e rede elétrica.

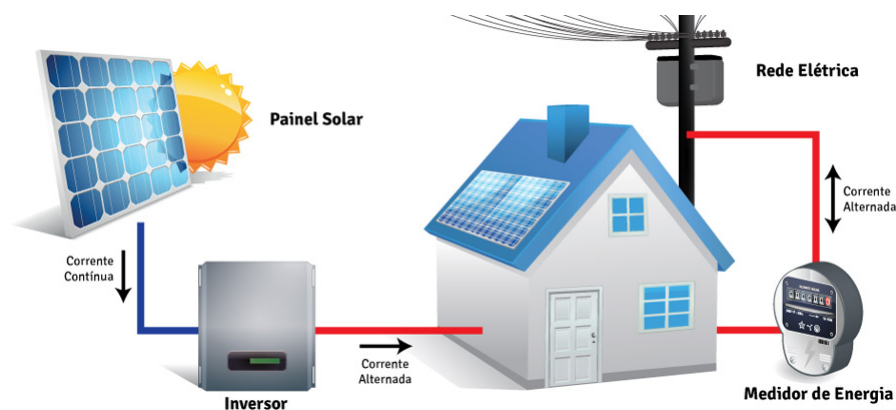


Figura 2 – Esquema de sistema fotovoltaico conectado à rede[2].

2.1.1 Módulos fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos, também conhecidos como painéis solares, possuem elementos que a partir da radiação solar, geram a energia elétrica. Para que isso aconteça este componente possui um arranjo de células fotovoltaicas que, através do fenômeno chamado efeito fotovoltaico, absorve energia dos fótons contidos na radiação luminosa e a transforma em energia elétrica gerada em corrente contínua [20].

2.1.2 Inversor conectado à rede

O objetivo da utilização de um inversor é, entre outros, a conversão de energia, podendo ser estabelecida a conversão de corrente contínua para corrente alternada, adequando a

energia gerada pelos módulos para ser inserida na rede. Com a utilização de componentes eletrônicos constituídos por semicondutores é possível realizar o chaveamento de energia e com técnicas de modulação por largura de pulso (PWM), gerar sinais conforme as características da aplicação [14]. A Figura 3 mostra o esquema básico de um tipo de conversor de potência trifásico caracterizado pelas chaves S_1 , S_2 , S_3 , S_4 , S_5 e S_6 que, sob comando de dispositivos de processamento de sinais permitem o fluxo de corrente ou não. Certas combinações de fechamento das chaves fazem com que a corrente possa fluir em ambos sentidos através das cargas conectadas ao neutro (N), assim é possível que a energia de entrada em corrente contínua (i_s), seja convertida para corrente alternada das três fases i_A , I_B e I_C .

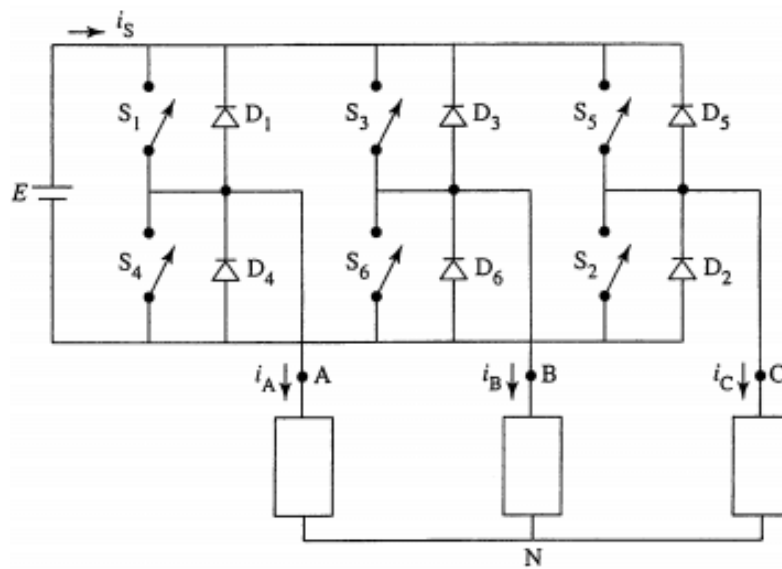


Figura 3 – Estrutura básica de um conversor de potência trifásico [3].

Um inversor conectado à rede geralmente é construído para operar em redes monofásicas ou trifásicas. A Figura 4 ilustra o esquema funcional de inversores solares, que por sua vez, possuem um sistema embarcado de processamento que recebe dados de sensores e os gerencia de forma a controlar diversas características pertinentes à qualidade e segurança no funcionamento do sistema, tais como: controle dos semicondutores chaveadores, gerenciamento de carga, rastreamento do ponto de máxima potência, sincronia com a rede, gerenciamento térmico, proteção anti-ilhamento, entre outras [4].

Este trabalho aborda o estudo do módulo de controle de corrente, que tem a função de ajustar a corrente a ser inserida na rede elétrica de acordo com os requisitos estabelecidos pelas normas brasileiras. Na Figura 5 pode ser observado um esquemático básico das ligações elétricas de um inversor junto com a abordagem de aquisição de dados considerada para o desenvolvimento do algoritmo de controle de corrente estudado em [5]. A tensão de entrada V_{cc} representa a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos, uma vez que essa energia é condicionada para a inserção na rede, processando as informações de corrente do lado do inversor $i_{ca,cb,cc}$, corrente de saída $i_{ga,gb,gc}$, tensão nos capacitores $V_{ca,cb,cc}$ e,

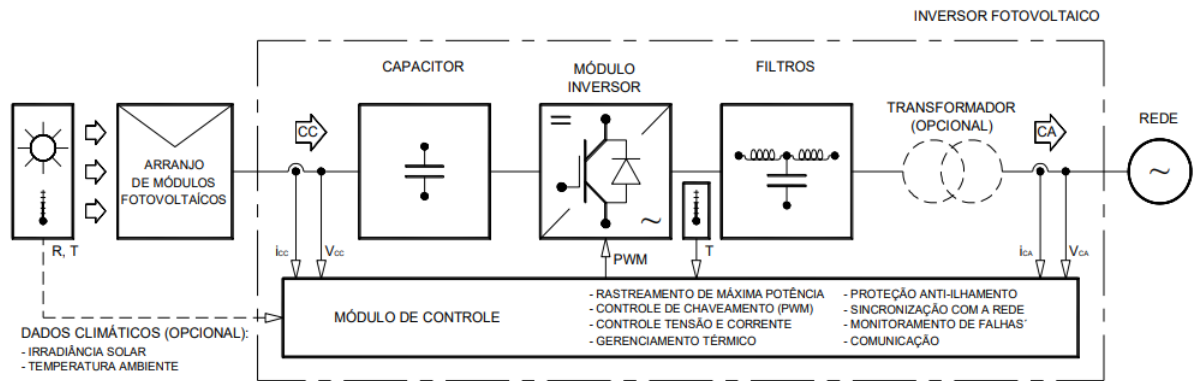


Figura 4 – Esquema de funcionalidade de inversores [4].

segundo informações de referência captadas por sincronizadores de rede com algoritmos Phase-Locked Loop (PLL).

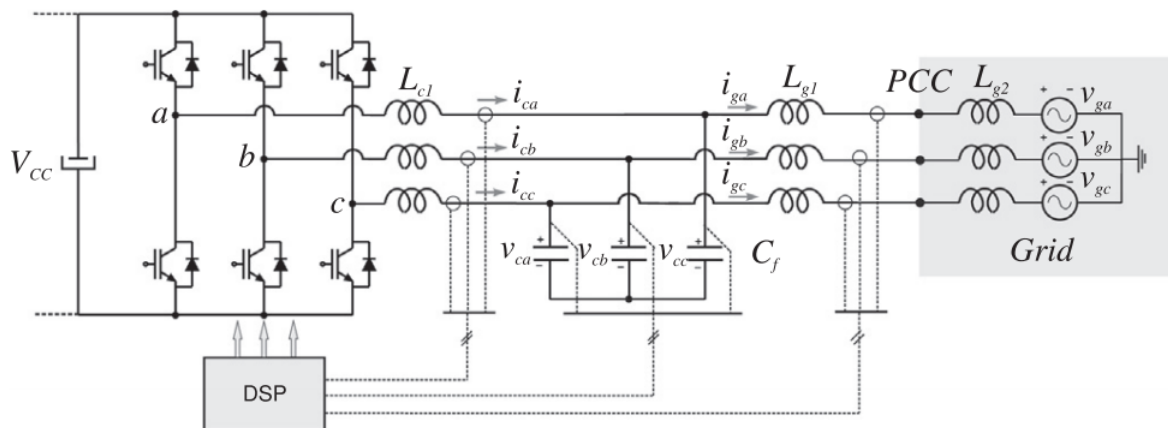


Figura 5 – Sistema com inversor trifásico conectado a rede através do filtro LCL [5].

2.1.2.1 Algoritmo de controle de corrente

Utilizando as leis da física, o conjunto de elementos como capacitor, indutor e resistor podem ser modelados matematicamente e, com equações ordinárias, podem ter sua dinâmica elétrica calculada ao longo de um período de tempo. A modelagem matemática estuda equações que são capazes de representar sistemas dinâmicos que, por sua vez, são bases para o emprego de técnicas capazes de prever e ditar o comportamento dinâmicos de sistemas [21]. Algoritmos de controle são desenvolvidos para atingir certas características em um dado sistema, geralmente chamado de planta. Um sensor é utilizado para identificar o comportamento físico da planta a ser modificado, seja velocidade, força, tensão ou corrente. Com a informação adquirida pelo sensor, um dispositivo de processamento de sinal (DSP) que contenha o algoritmo de controle pode gerar um sinal de um atuador que, por sua vez, modifica o estado da planta. O sinal de entrada é calculado pelo DSP a partir

das equações matemáticas que fazem com que o sinal medido pelo sensor se aproxime de uma função no tempo que caracteriza a dinâmica planejada.

2.1.2.2 *Phase-Locked Loop*

Existe uma grande complexidade no funcionamento do circuito de distribuição de energia que sofre variações na amplitude, frequência e impedância de transmissão, causando incertezas que, conseqüentemente, impactam no desempenho do sistema de controle [22]. Portanto, equipamentos que realizam a interação com a rede precisam se ajustar à essas incertezas para manter o funcionamento correto da rede e também do próprio sistema. Para que a energia gerada pelo SFCR seja inserida de maneira correta à rede, é necessário que os sinais de cada fase estejam sincronizados. Para isso existe uma técnica chamada PLL, que é largamente utilizada para identificar a posição angular de sinais periódicos. O PLL emprega a técnica de realimentação para adaptar a oscilação de um oscilador interno com um sinal periódico externo [22]. Na literatura podem ser encontrados diversas estruturas de PLL, a estrutura considerada neste trabalho é mostrada na Figura 6, onde é utilizado um controlador proporcional-integral-derivativo para manter defasagem entre a posição angular do sinal de entrada e o oscilador interno, fornecendo como saída a posição angular e a frequência do sinal externo empregado.

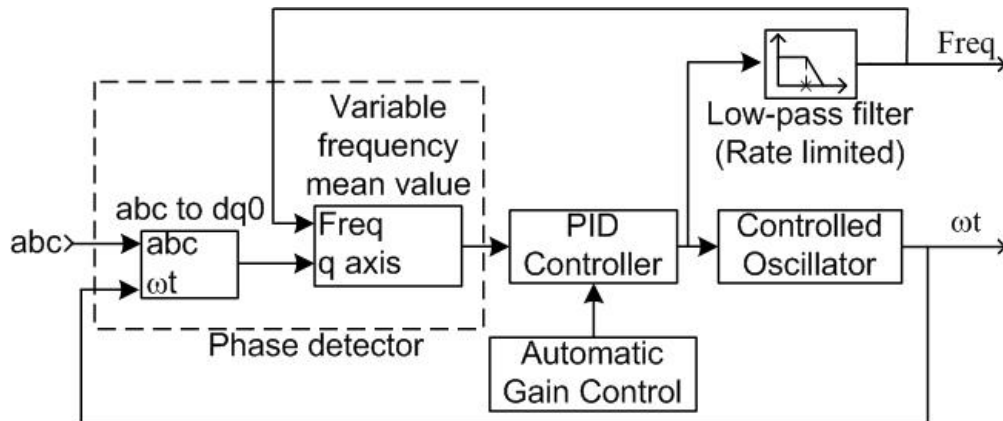


Figura 6 – Diagrama de realimentação do algoritmo PLL considerado [6].

2.1.2.3 Filtro LCL

Os filtros empregados para a filtragem do sinal provindo de inversores podem ser puramente indutivos ou indutivos-capacitivos. O filtro puramente indutivo, devido à sua característica dinâmica, necessita de valores maiores de indutância para atingir a atenuação de altas frequências, por isso, costuma-se utilizar a combinação de indutores seguidos de capacitores, que trás melhor custo-benefício para aplicação [23]. O filtro LCL (indutivo-capacitivo-indutivo) é um tipo de construção de filtro passa-baixas, o que quer dizer que este pode ser utilizado para reduzir o efeito de sinais de altas frequências

indesejados como, por exemplo, as harmônicas causadas pela dinâmica do inversor. A Figura 7 ilustra o diagrama representativo das ligações entre capacitores e indutores que formam o filtro LCL.

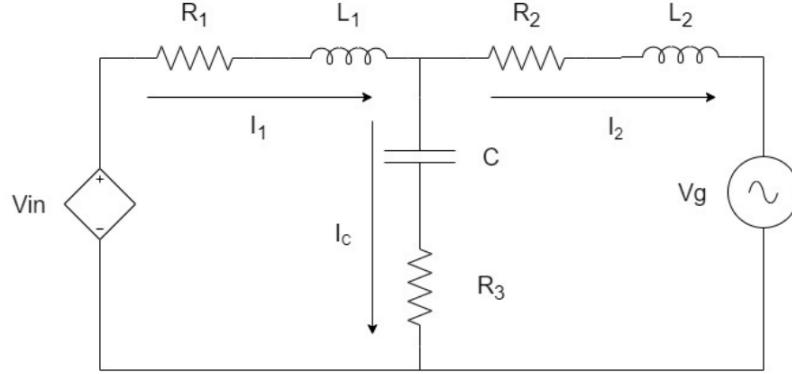


Figura 7 – Diagrama elétrico do filtro LCL monofásico [7].

O filtro LCL é projetado a partir da obtenção do modelo dinâmico, que pode ser obtido aplicando a teoria das leis de Kirchhoff ao circuito da Figura 7, cuja função de transferência é dada por

$$G_{LCL}(s) = \frac{I_2(s)}{V_{in}(s)} = \frac{CR_3s + 1}{[CL_1L_2s^3 + (CL_1(R_2 + R_3) + CL_2(R_1 + R_3))s^2 + L_1 + L_2 + C(R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3)]s + (R_1 + R_2)}. \quad (2.1)$$

O diagrama em frequência do filtro LCL pode ser visto na Figura 8, gerando considerando a função de transferência dada pela equação 2.1 e os parâmetros dados por

$$L_1 = 1mH$$

$$L_2 = 0.3mH$$

$$R_1 = 0$$

$$R_2 = 0$$

$$R_3 = 0$$

$$C = 62\mu F.$$

Conhecido como diagrama de bode, a curva mostrada representa a dinâmica do filtro frente a aplicação de excitações externas de diversas frequências, assim, a partir da definição da frequência de corte os valores de indutância e capacitância são determinados, para isso, existem diversas estratégias como apresentado em [24].

A utilização do Filtro LCL implica em problemas com estabilidades determinadas pelo pico da curva da magnitude visto na Figura 8, o que justifica a necessidade do uso de algoritmos de controle aplicados à inversores.

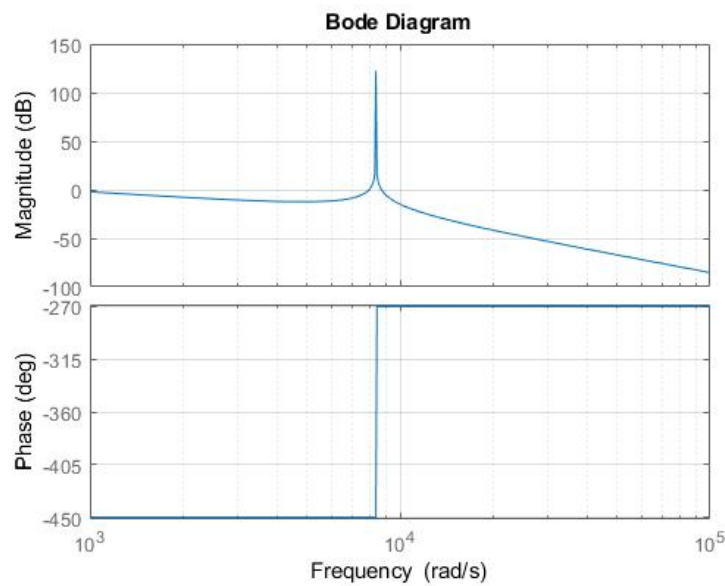


Figura 8 – Diagrama de Bode de um Filtro LCL típico.

2.1.2.4 Harmônicas e distorções na forma de onda

Distorções harmônicas são caracterizadas pela sobreposição de sinais periódicos múltiplos da frequência nominal do sinal trabalhado. A Figura 9 mostra o exemplo de uma onda senoidal pura com frequência de 60 Hz (em vermelho), comparando com uma onda senoidal contaminada com a presença de distorções harmônicas de 3^a, 5^a e 7^a ordem com frequência fundamental de 60 Hz (em azul).

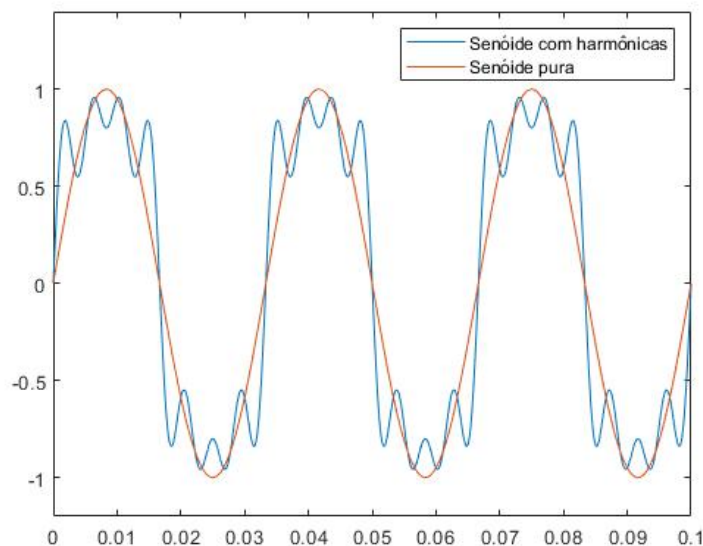


Figura 9 – Comparação entre senoide pura e senoide contaminada com distorções harmônicas.

As harmônicas podem estar presentes pela utilização de elementos eletrônicos não

lineares que acabam por modificar o sinal elétrico de entrada. Essas distorções são prejudiciais a diversos aparelhos elétricos e máquinas industriais, uma vez que podem elevar a corrente de maneira incontrolável levando a instabilidade e/ou causando o desgaste [14]. Desta forma, a rejeição de harmônicas torna-se um importante aspecto para inversores conectados à rede.

2.2 Normatização de inversores fotovoltaicos

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) desenvolvem as normas a serem cumpridas para manter a qualidade mínima de funcionamento de inversores conectados à rede. Esta seção apresenta as normas que regem a aprovação dos ensaios relacionados às características e qualidade da conversão de potência. A norma ABNT NBR 16149:2013 estabelece os valores limites para que cada um dos ensaios realizados de acordo com o documento ABNT NBR 16150:2013 sejam aprovados.

2.2.1 ABNT NBR 16149:2013

A norma ABNT NBR 16149/2013: Sistemas fotovoltaicos (FV) - Características de conexão com a rede elétrica de distribuição [9] apresenta as características e recomendações para a interface entre sistemas fotovoltaicos conectados paralelamente à rede de distribuição para inserção de energia. A norma descreve 8 itens sobre as características e limitações sobre os critérios de aprovação dos ensaios. Os itens seguintes descrevem apenas os limites e características impostas pela norma que foram considerados no desenvolvimento deste trabalho, ou seja, os itens que a norma especifica sobre qualidade do sinal de corrente, sendo eles: Harmônicos e distorção de forma de onda, Fator de potência e injeção/demanda de potência reativa.

2.2.1.1 Harmônicos e distorção de forma de onda

Harmônicos e distorções de forma de onda são causados por componentes não lineares que podem inserir formas de onda senoidais sobrepostas ao sinal de frequência fundamental da rede [14]. A norma apresenta a Tabela 1, estabelecendo porcentagens relativas a cada uma das harmônicas individuais entre 2^a e 33^a, sendo que a distorção harmônica total (THD) deve ser inferior a 5%.

2.2.1.2 Fator de potência e injeção/demanda de potência reativa

O fator de potência (FP) está relacionado ao quadrante de funcionamento do circuito, podendo ele ser indutivo ou capacitivo. O controle da corrente pode deslocar a corrente

Tabela 1 – Limites de distorção harmônica de corrente [9].

Harmônicas ímpares	Limites de distorção
3° a 9°	<4,0%
11° a 15°	<2,0%
17° a 21°	<1,5%
23° a 33°	<0,6%
Harmônicas pares	Limites de distorção
2° a 8°	<1,0%
10° a 32°	<0,5%

em relação à tensão, portanto este ensaio foi considerado e simulado no trabalho. A potência ativa (P) é definida como a energia dissipada por elementos resistivos de um circuito, já a potência reativa (Q) é a energia armazenada pelos componentes capacitivos e indutivos que não realiza trabalho e são relacionadas com a potência aparente (S) [25], assim como mostra a Figura 10.

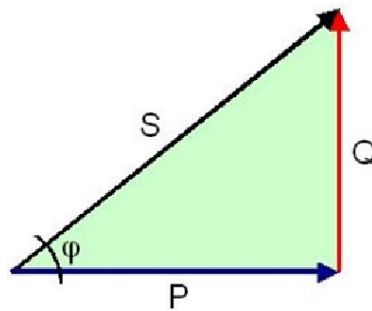


Figura 10 – Triângulo das potências [8].

As potências aparente, ativa e reativa são relacionadas pela equação

$$S^2 = P^2 + Q^2. \quad (2.2)$$

O cálculo das potências depende da defasagem angular (ϕ) entre o sinal de corrente (I) e o sinal de tensão (V) dada pela Figura 11.

sendo o sinal de tensão e corrente dados pelas equações

$$V(t) = V_m \cdot \sin(t) \quad (2.3)$$

$$I(t) = I_m \cdot \sin(t) \quad (2.4)$$

sendo V_m e I_m as amplitudes dos sinais. A potência aparente pode ser calculada por

$$|S| = V(t) \cdot I(t), \quad (2.5)$$

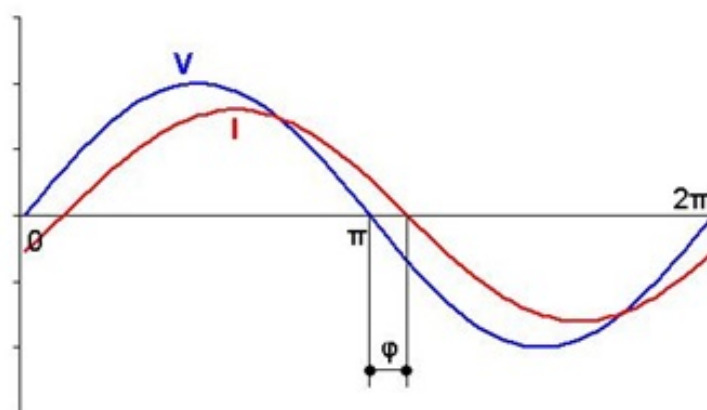


Figura 11 – Defasagem entre sinal de tensão e corrente [8].

com isso o fator de potência é dado por

$$FP = \cos(\phi). \quad (2.6)$$

A norma estabelece que o fator de potência dos equipamentos devem ser ajustados de fábrica em 1, sendo que para sistema com potência nominal menor ou igual a 3 kW, os limites de trabalho deve estar dentro da faixa de 0,98 indutivo e 0,98 capacitivo.

Sistemas com potência nominal maior que 3 kW e menor ou igual a 6 kW, também devem ser ajustados de fábrica com FP igual a 1, respeitando a tolerância de 0,98 indutivo e 0,98 capacitivo e, ainda, apresentar como opcional, a operação de acordo com a Figura 12, sendo o FP ajustável de 0,95 indutivo e 0,95 capacitivo. Os pontos A, B e C são valores padrões de fator de potência definidos pela norma para execução dos ensaios. O equipamento de ensaio deve possuir o recurso para adequação do fator de potência de acordo com a curva fornecida pela concessionária por meio de ajuste dos pontos A, B e C [9].

Sistemas com potência maior que 6 kW podem operar com duas possibilidades: (i) com FP ajustado de fábrica em 1, podendo trabalhar entre 0,98 indutivo até 0,98 capacitivo. O inversor também deve ser capaz de operar de acordo com a curva da Figura 12 e com FP ajustável de 0,90 indutivo até 0,90 capacitivo; ou (ii) realizando o controle de potência reativa (Var), de acordo com os limites mostrados na Figura 13.

2.2.2 ABNT NBR 16150:2013 - Procedimentos de ensaios de conformidade

Para a padronização da certificação de conformidade de inversores conectados à rede no Brasil, a norma ABNT NBR 16149/2013: Sistemas fotovoltaicos (FV) - Características de conexão com a rede elétrica de distribuição - Procedimento de ensaio de conformidade [10] descreve os equipamentos e procedimentos a serem seguidos para execução de ensaios,

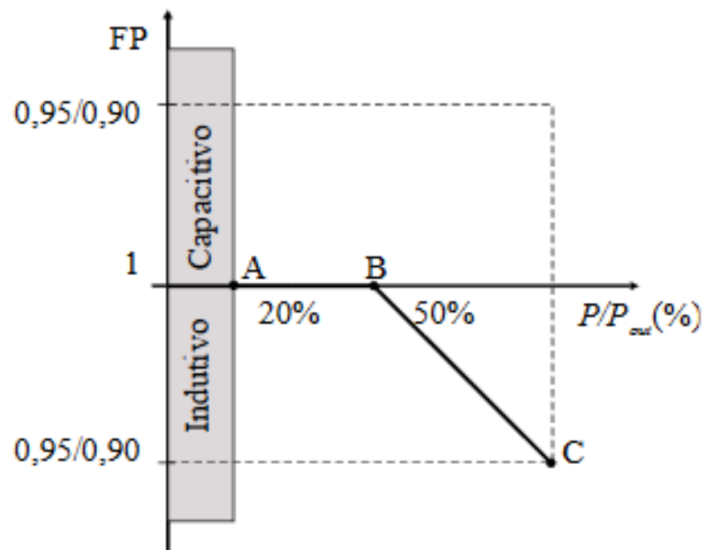


Figura 12 – Curva do FP em função da potência ativa de saída do inversor [9].

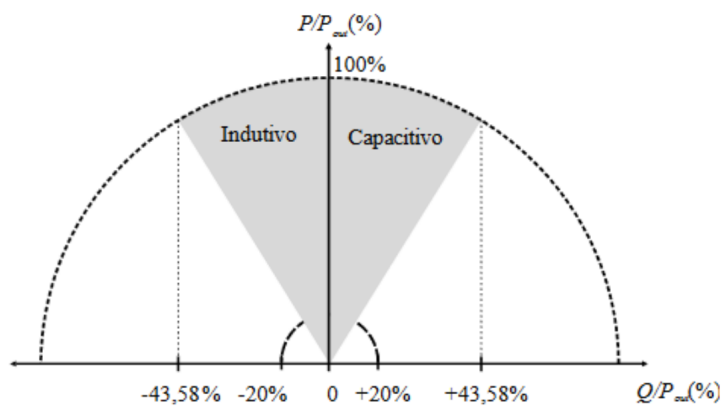


Figura 13 – Limites de compensação de potência reativa [9].

realização de medições e critérios de aprovação. Estão contidos no documento um total de 14 procedimentos de ensaio, sendo eles:

1. Cintilação;
2. Injeção de componente c.c.;
3. Harmônicos e distorção de forma de onda;
4. Fator de potência;
5. Injeção/demanda de potência reativa;
6. Variação de tensão;
7. Variação de frequência;
8. Controle de potência ativa em sobrefrequência;

9. Reconexão;
10. Religamento automático fora de fase;
11. Limitação de potência ativa;
12. Comando de potência reativa;
13. Desconexão e reconexão do sistema fotovoltaico da rede;
14. Requisitos de suportabilidade a subtensões decorrentes de faltas na rede;

O circuito base para a conexão do inversor aos equipamentos de medição pra a realização dos procedimentos é visto na Figura 14.

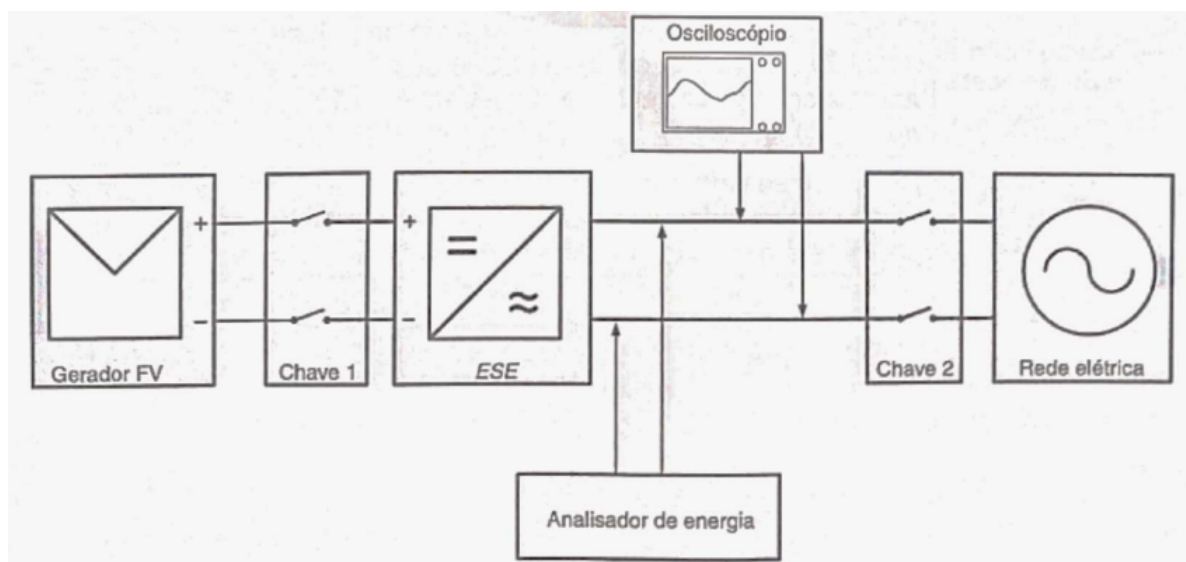


Figura 14 – Diagrama básico de ligações para os ensaios [10].

A maioria dos ensaios exige que o equipamento implemente proteção para rede, usuários e equipe de manutenção da concessionária de fornecimento de energia local, sendo necessário a existência de recursos a serem realizados pelo sistema embarcado do inversor que identifiquem situações anormais da rede. Visto isso, apenas os procedimentos necessários para avaliar a qualidade da energia fornecida pelo inversor foram consideradas no trabalho, ou seja, os ensaios em que algoritmos de controle de corrente são aplicáveis. Portanto, os procedimentos de ensaios implementados foram: 3. Harmônicos e distorção de forma de onda ; 4. Fator de potência e; 5. Injeção/demanda de potência reativa, que estão relacionados com a qualidade fornecida pelo algoritmo de controle de corrente.

2.3 *Test-Driven Development* - TDD

Existe uma metodologia de desenvolvimento bastante aplicada chamada de *Test Driven Development*. O TDD é uma ferramenta metodológica aplicada ao desenvolvimento

de produtos, projetos ou processos. O objetivo da técnica é facilitar a identificação de erros, tornando o desenvolvimento mais eficiente. Segundo [26, 27], a metodologia segue um ciclo contínuo de pequenas etapas repetidas até que o desenvolvimento seja concluído, assim como visto na Figura 15. Portanto, a hipótese do trabalho é aplicar a técnica TDD no desenvolvimento de algoritmos de controle de corrente.

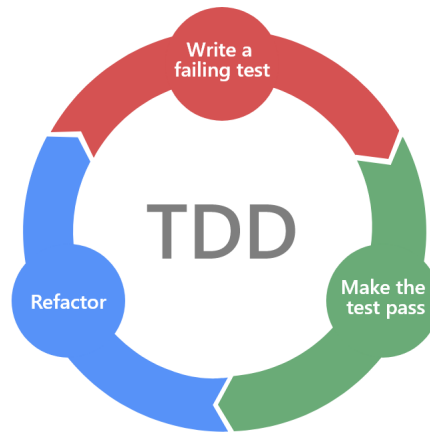


Figura 15 – Esquema do ciclo de aplicação do TDD [11].

O esquema básico para a aplicação do TDD é mostrado no fluxograma da Figura 16. Inicia-se com a criação de um teste, usado para validar o funcionamento de uma unidade do produto ou software em desenvolvimento. Feito a implementação da unidade, a mesma é verificada pelo teste, se a unidade é reprovada, é realizada a refatoração da mesma para a reaplicação do teste, até que se obtenha resultado positivo. Obtendo resultado positivo e verificado que não há necessidade de novos recursos, o processo é finalizado. Porém, se ainda existem novos recursos a serem implementados, um novo teste é criado reconhecendo o ciclo, que é repetido até que todos os recursos sejam implementados.

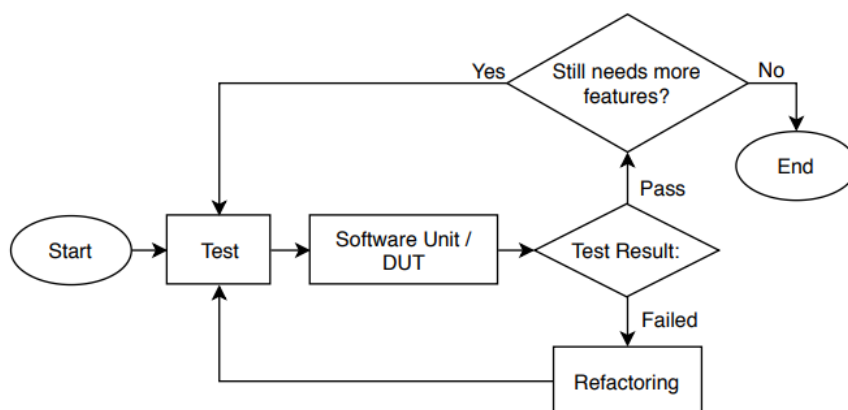


Figura 16 – Fluxograma de aplicação do TDD [12].

Apesar de ser muito utilizada no desenvolvimento de software, adaptações tem surgido para a aplicações em diversos campos como, por exemplo, na área de eletrônica de potência, como será discutido neste trabalho.

2.4 *HyperText Markup Language* - HTML

HyperText Markup Language (HTML) é uma linguagem de marcação de texto amplamente utilizada por páginas de navegação na *internet*. A linguagem utiliza codificações padrões separadas por *tags* de abertura e fechamento que limitam e apresentam um dado com uma característica definida [28]. O conteúdo entre as *tags* é codificado e exibido de acordo com as configurações empregadas pelo *software* de interpretação, comumente navegadores de *internet*.

Um exemplo simples da geração do HTML é ilustrado pela Figura 17. Ao abrir um arquivo salvo como uma extensão *.htm* com o navegador, a janela é visualizada como mostra a Figura 18.

```
<!DOCTYPE html>
<html>
<body>
  <p style="color:red">This is a paragraph.</p>
  <p style="color:blue">This is another paragraph.</p>
</body>
</html>
```

Figura 17 – Trecho de formatação em linguagem HTML [13].

This is a paragraph.
This is another paragraph.

Figura 18 – Resultado exibido na decodificação HTML [13].

Devido à facilidade de utilização da linguagem HTML e ao fato de ser um tipo de arquivo que pode ser aberto em qualquer navegador de *internet*, o HTML foi escolhido para a geração de relatórios legíveis e que facilitem a interpretação dos dados gerados com a execução dos testes. A implementação do HTML foi feita com a inserção dos dados através do *script* em MATLAB, assim como pode ser visto no Anexo B.

3 Metodologia

Este capítulo aborda os ensaios aplicados à simulação de algoritmos de controle e desenvolvidos de maneira automática de acordo com a normatização ABNT NBR 16150:2013. Além disso, são apresentados a lógica e/ou funções do MATLAB para a aplicação em *software*, seguindo a base teórica vista no capítulo anterior.

3.1 Criação do arquivo de simulação para executar os testes

3.1.1 Sistema supervisorio

Para a aquisição de dados foi criado um subsistema no *Simulink* nomeado como *Sistema Supervisorio* visto na Figura 19, que possui 6 portas que fornecem para o diagrama de controle do usuário a referência a ser seguida pela saída do sistema, as tensões da rede trifásica e a tensão de entrada para o inversor.

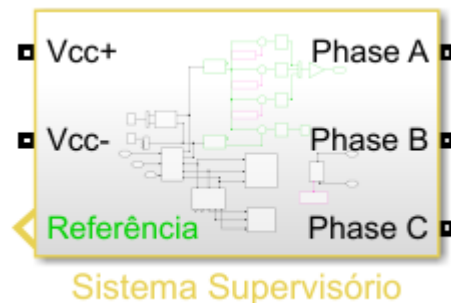


Figura 19 – Visão geral do subsistema criado.

Internamente o sistema supervisorio contém um diagrama de blocos que realiza a conversão de dados da simulação para variáveis e, também, converte os dados de variáveis para a geração da referência a ser aplicada ao sistema de controle. Além disso, o sistema supervisorio fornece a tensão que simula a geração de energia por um gerador fotovoltaico com a ferramenta *Controlled Voltage Source*, fornecidas pelas portas *Vcc+* e *Vcc-* e as entradas para a conexão da saída do inversor com a rede elétrica, simulada pelo bloco *Three-Phase Grid*, fornecidas pelas portas *PhaseA*, *PhaseB* e *PhaseC*. A visão interna do subsistema criado é ilustrada pela Figura 20.

O bloco *scope* é utilizado algumas vezes para receber e armazenar as informações da simulação em uma estrutura de dados ou simplesmente em variáveis do tipo *array*. O sinal de corrente da fase A do circuito é registrado por um bloco *scope* como uma estrutura de

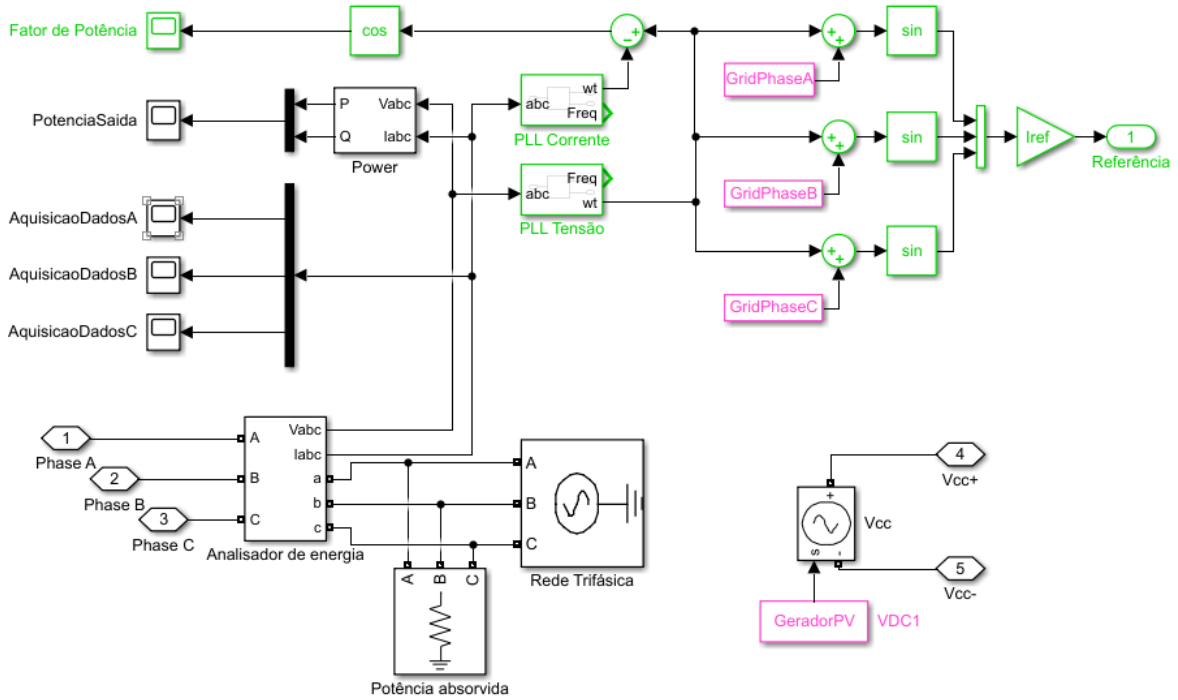


Figura 20 – Visão interna do subsistema criado.

dados chamada $AquisicaoDados_A$. Os sinais de potência ativa e reativa são armazenados como uma variável do tipo *array* como $PotenciaSaida$, para isso, o bloco *Power (3ph, Instantaneous)* recebe como entrada o sinal de tensão e corrente das três fases do circuito e aplica as equações 3.1 e 3.2 para calcular, respectivamente, potência ativa (P) e potência reativa (Q) instantâneas

$$P = I_a V_a + I_b V_b + I_c V_c, \quad (3.1)$$

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} [(V_b - V_c)I_a + (V_c - V_a)I_b + (V_a - V_b)I_c], \quad (3.2)$$

sendo $I_{a,b,c}$ e $V_{a,b,c}$, respectivamente, as correntes e as tensões instantâneas das fases A, B e C.

O bloco PLL fornece em sua saída a frequência e posição angular da fase A do sinal de corrente ou tensão conectados a sua entrada [6]. Segundo [25] o fator de potência pode ser obtido aplicando o cosseno à defasagem (ϕ) entre a posição angular do sinal de tensão θ_V e corrente θ_I , ou seja, $FP = \cos(\theta_V - \theta_I)$. O ângulo ϕ é obtido comparando a posição angular gerada pelo bloco PLL da tensão e corrente, assim, utilizando o bloco *cosseno*, o fator de potência é armazenado pela variável FP .

Três sinais são gerados na saída *Referência* do sistema supervisorio. A referência do diagrama de controle para cada uma das fases A, B e C ($Ref_{I_{A,B,C}}$) são obtidas com as equações

$$Ref_{I_A} = I_{ref} \sin(\theta_{V_A} + GridPhaseA), \quad (3.3)$$

$$Ref_{I_B} = I_{ref} \sin(\theta_{V_B} + GridPhaseB), \quad (3.4)$$

$$Ref_{I_C} = I_{ref} \sin(\theta_{V_C} + GridPhaseC), \quad (3.5)$$

sendo $\theta_{V_{A,B,C}}$ a posição angular do sinal de tensão das fases A, B e C, I_{ref} a amplitude do sinal de referência de corrente e $GridPhase(A, B, C)$ a defasagem de referência entre as fases A, B e C, definidos durante a execução do *script* criado.

3.1.2 Lógica para os procedimentos de ensaios

Geralmente para a execução de diagramas de blocos de sistemas de controle no *Simulink* são utilizados *scripts* no MATLAB que geram as variáveis necessárias do sistema como: variáveis de entrada, ganhos do controlador e características gerais do sistema. Visto isso, foram reservadas variáveis para a inserção de informações sobre os arquivos de simulação assim como mostrado na Figura 21, que contém o início do código onde o usuário deve realizar as alterações conforme as condições de simulação, sendo *ScriptName* o caminho e nome do arquivo de geração de dados para a execução do arquivo de simulação em *Simulink*, o qual deve ser definido o caminho através da variável *SimName*. Além disso, o usuário deve definir as variáveis: *FreqNominal* com a frequência nominal (f_n) da rede, *PotenciaNominal* com a potência nominal (P_n) do inversor, *FrequenciaAmostragem* com a frequência de amostragem (f_s) considerada pelo algoritmo de controle, *GridVoltage* a amplitude máxima do sinal de tensão (V_m) da rede.

Já a variável *StopTime* define o tempo de execução de cada nível do ensaio, assim deve ser considerado o tempo necessário para que a saída do sistema controlado atinja o regime estacionário. O tempo definido em segundos determina a duração total da execução do *script* desenvolvido no trabalho. Segundo a norma [10], o tempo máximo permitido para que a estabilização aconteça, é de 5 minutos.

A seleção dos ensaios a serem realizados é feita com as variáveis: *EnsaioHarmonica*, *EnsaioFPfixo*, *EnsaioFPcurva* e *EnsaioPotenciaReativa*, para os ensaios Harmônicos e distorção de forma de onda, Fator de potência fixo, Fator de potência com curva do FP e Injeção/demanda de potência reativa, respectivamente. Para selecionar o valor deve ser definido pelo usuário com *true* se o ensaio deve ser considerado ou para *false* se o ensaio não deve ser executado.

Uma vez que o gerador fotovoltaico é simulado como uma fonte de corrente contínua da biblioteca do *Simscape* - que não possui ajuste na potência fornecida - a variação de potência aplicada aos ensaios acontece com o ajuste da amplitude do sinal de referência do algoritmo de controle. E, considerando a definição de potência aparente (S) dada por


```

%% Configuração padrão para os ensaios

    %Parâmetros Inversor
FreqNominal = 60;
FrequenciaAmostragem = 20e3;
PotenciaNominal = 6e3;
GridVoltage = 220;

    %Caminho do arquivo de geração de dados
ScriptName = 'initSimMPCSS_versao2';

    %Caminho do arquivo de simulação
SimName = 'DQ_inverter3ph_Switch_lima_sat';

    % Parâmetros de Ensaio
StopTime = 0.15;
EnsaioHarmonicass = true;
EnsaioFPfixo = true;
EnsaioFPcurva = true;
EnsaioPotenciaReativa = true;

```

Figura 21 – Ajustes de parâmetros para a execução do *script* desenvolvido.

$$S = \frac{1}{\sqrt{3}} V_{RMS} I_{RMS} \quad (3.6)$$

sendo V_{RMS} e I_{RMS} a tensão e corrente eficaz de linha, respectivamente. Portanto, fixando o valor de tensão pode-se ajustar a potência aparente fornecida variando a corrente de referência (I_{ref}).

3.1.2.1 Parâmetros padrão para a execução do *script*

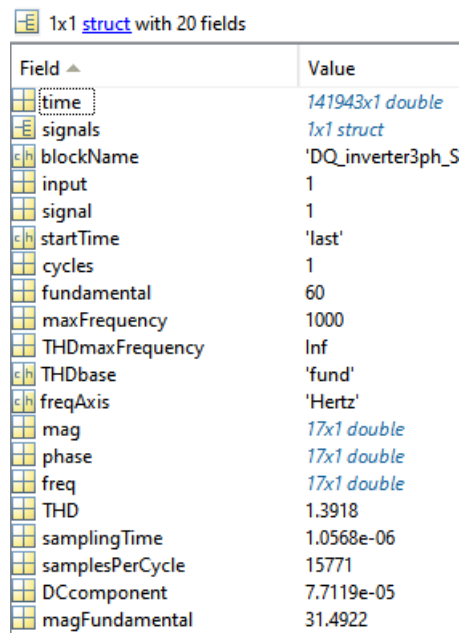
Como caracterizado pela Seção 2.2.2 algumas etapas dos procedimentos de ensaios são exatamente iguais, portanto, além das variáveis citadas na seção anterior, algumas variáveis foram definidas como padrão no início do algoritmo. Todos os ensaios são repetidos pelo menos 6 vezes, onde em cada é definida a potência de saída de execução. Criou-se a variável *PotenciaEnsaio*, que é definida como um vetor com valores equivalentes à porcentagem em relação a potência de saída, sendo elas 10%, 20%, 30%, 50%, 75% e 100%, assim, os blocos de código de execução de cada um dos ensaios executam os procedimentos de acordo com cada uma das potências. Outro parâmetro de execução comum entre os ensaios é a definição da amplitude do sinal de referência I_{ref} , calculado com a equação

$$I_{ref} = \frac{2P_n}{GridVoltage\sqrt{3}} PotenciaEnsaio. \quad (3.7)$$

Para cada um dos seis níveis de cada ensaio, o arquivo de geração de dados e o arquivo de simulação do diagrama de controle são executados.

3.1.2.2 Harmônicos e distorção de forma de onda

Após a definição da amplitude da referência de corrente, nível de potência e defasagem entre os fasores o *script* de dados e a simulação fornecidos pelo o usuário são executados respectivamente. No final de cada simulação, com os dados armazenados através do sistema supervisorio, é aplicada a função *power_fftscope()* à estrutura de dados de corrente *AquisicaoDadosA*, a estrutura é transformada em uma nova relação de dados que são usados para caracterizar o espectro de Fourier do último ciclo do sinal, uma vez que a norma não determina o número de ciclos a serem analisados. Os campos definidos pela função são vistos na Figura 22.



Field	Value
time	141943x1 double
signals	1x1 struct
blockName	'DQ_inverter3ph_S'
input	1
signal	1
startTime	'last'
cycles	1
fundamental	60
maxFrequency	1000
THDmaxFrequency	Inf
THDbase	'fund'
freqAxis	'Hertz'
mag	17x1 double
phase	17x1 double
freq	17x1 double
THD	1.3918
samplingTime	1.0568e-06
samplesPerCycle	15771
DCcomponent	7.7119e-05
magFundamental	31.4922

Figura 22 – Campos gerados pela ferramenta *power_fftscope()*

O campo *maxFrequency* é definido como padrão para abranger o intervalo de frequência entre 1 e 1000Hz. Uma vez que o procedimento necessita da análise das harmônicas individuais entre 2ª e 33ª contidas no sinal, como visto na Seção 2.2.1.1, o campo *maxFrequency* tem de ser modificado para 33 vezes o valor da frequência nominal definida pelo usuário, mais 1, ou seja, $maxFrequency = 33 * f_n + 1$, garantindo que as magnitudes das frequências múltiplas do sinal sejam calculadas. Com isso, os campos *mag*, *phase* e *freq*, que registram as magnitudes, fases e frequências de cada uma das harmônicas individuais, respectivamente, passam a conter 34 valores, referentes às frequências múltiplas em relação a frequência fundamental. Cada amplitude de harmônica é convertida para um percentual em relação ao sinal de frequência fundamental, aplicando a equação

$$X_n(\%) = 100 \frac{X_n}{X_1}, \quad (3.8)$$

onde X_n é o valor eficaz da corrente na frequência de ordem n e X_1 é o valor eficaz da corrente na frequência fundamental. Além disso, a distorção harmônica total (THD) é calculada aplicando a equação

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} X_n^2}}{X_1}. \quad (3.9)$$

3.1.2.3 Fator de potência fixo

Para a execução do ensaio de fator de potência fixo são configurados a amplitude do sinal de referência de corrente conforme a Equação 3.7 e aplicado a cada uma das fases consideradas no sistema de controle. Para os 6 ensaios de fator de potência $FP = 0.98$ capacitivo, as defasagens de ajuste de referência são ajustadas com

$$GridPhaseA = 0 + \phi, \quad (3.10)$$

$$GridPhaseB = -\frac{2\pi}{3} + \phi, \quad (3.11)$$

$$GridPhaseC = -\frac{4\pi}{3} + \phi. \quad (3.12)$$

definindo $\phi = \arccos(0.98)$. Para o fator de potência $FP = 0.98$ indutivo as defasagens de ajuste de referência são modificadas aplicando as equações 3.10, 3.11 e 3.12, alterando o ângulo entre tensão e corrente para $\phi = -\arccos(0.98)$. Por último, aplicando as mesmas equações, para os ensaios de fator de potência resistivo ($FP = 1$), define-se $\phi = \arccos(1)$.

3.1.2.4 Fator de potência com curva do FP

A implementação do fator de potência seguindo a curva do FP mostrada pela Figura 12. Para a geração dos valores da curva, considerou-se a equação da reta

$$y - y_0 = m(x - x_0) \quad (3.13)$$

aplicada para determinar o fator de potência a ser considerada ao atingir 75% da potência nominal. Para inversores de potência nominal maior que 3 kW e menor igual a 6kW, após a verificação da potência do inversor a ser ensaiado e sabendo que para os ponto B e C as potências são de 50% e 100% da nominal, com $FP = 1$ e $FP = 0.95$, os valores para as medidas contidos na Figura 23, são $Y_{BC} = -0.05$ e $X_{BC} = 0.5$, aplicando a Equação 3.13,

a inclinação fica $m = -0.1$, com isso, são calculados os valores vistos na Tabela 2 para a curva de FP para esta faixa de potência. Na segunda etapa, verifica-se se a potência do inversor é maior que 6 kW e, se for verdadeiro e sabendo que para os ponto B e C as potências são de 50% e 100% da nominal, com $FP = 1$ e $FP = 0.9$, os valores para as medidas contidos na Figura 23, são $Y_{BC} = -0.1$ e $X_{BC} = 0.5$, aplicando a Equação 3.13, a inclinação fica $m = -0.2$, com isso, são calculados os valores vistos na Tabela 3 para a curva de FP para esta faixa de potência, considerando-os para execução dos ensaios.

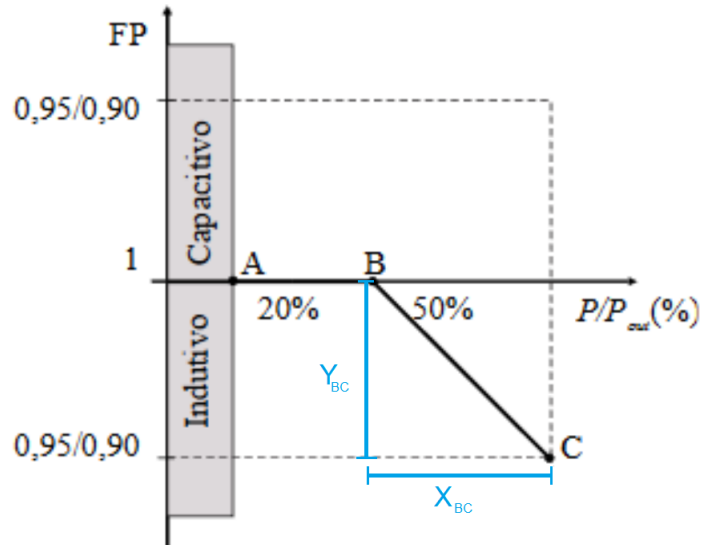


Figura 23 – Cálculo da curva do FP.

Tabela 2 – Curva FP para inversor com potência nominal maior que 3 kW e menor igual a 6kW

$P/P_{out}(\%)$	FP
10 a 50%	1
75%	0.975
100%	0.95

Tabela 3 – Curva FP para inversor com potência nominal maior que 6kW

$P/P_{out}(\%)$	FP
10 a 50%	1
75%	0.95
100%	0.9

A amplitude da corrente de referência é calculada com as equações

$$\phi = \arccos (FP), \tag{3.14}$$

$$P = PotenciaNominal * PotenciaEnsaio, \tag{3.15}$$

$$S = \frac{P}{\cos(\phi)}, \quad (3.16)$$

$$I_{ref} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{S}{GridVoltage * 1.04} \quad (3.17)$$

e as defasagens de ajuste de referência são modificadas aplicando as equações 3.10, 3.11 e 3.12 de acordo com o fator de potência definido pelas tabelas 2 e 3.

3.1.2.5 Injeção/demanda de potência reativa

Como visto na Seção 2.2.2, a norma define que sejam executados 3 tipos de ensaio: 1) injeção de potência reativa - inserindo potência reativa com valor de 48,43% da potência nominal de ensaio ; 2) demanda de potência reativa - absorvendo potência reativa com valor de 48,43% da potência nominal de ensaio e; 3) potência reativa nula. Para a implementação dos procedimentos 1) e 2), primeiramente é calculada a potência aparente a ser fornecida na saída do inversor. Para isso, utilizou-se as seguintes equações

$$P = PotenciaNominal * PotenciaEnsaio, \quad (3.18)$$

$$Q = 0.4843P, \quad (3.19)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (3.20)$$

As defasagens de referência foram calculadas aplicando as equações 3.10, 3.11 e 3.12, sendo que para o procedimento 1)

$$\phi = \arccos\left(\frac{P}{S}\right). \quad (3.21)$$

e para o procedimento 2)

$$\phi = -\arccos\left(\frac{P}{S}\right). \quad (3.22)$$

Já a amplitude de corrente de referência (I_{ref}) é obtida com

$$I_{ref} = \frac{2S}{GridVoltage\sqrt{3}} PotenciaEnsaio. \quad (3.23)$$

Para o procedimento 3), aplica-se a Equação 3.23, considerando $S = P$, assim, considerando a Equação 3.21, as defasagens de referência não são alteradas, uma vez que ($\phi = 0$).

3.2 Tratamento de dados

Ao fim da execução de cada nível de potência definido para cada tipo de ensaio, os dados são registrados em matrizes para exibição dos detalhes do resultado e para a verificação com os limites estabelecidos na norma ABNT NBR 16149:2013. Esta seção apresenta a lógica de programação empregada para verificar os resultados de forma a providenciar condições para a apresentação da conformidade do algoritmo.

3.2.1 Harmônicos e distorção de forma de onda

Para determinar a aprovação dos ensaios realizados com relação as distorções harmônicas do sinal de corrente fornecido à rede, os valores calculados empregando a Equação 3.8 são comparados com o vetor *LimiteDistorcao* que contém os valores limites da porcentagem da amplitude de harmônicas individuais com frequência múltipla de 2^a a 33^a em relação a magnitude do sinal de frequência fundamental. Além disso, é verificado se a *THD*(%) obtida com a Equação 3.9 em cada um dos seis níveis de potência deste ensaio é inferior ao limite de 5% estabelecidos pela norma. O resultado destas duas verificações fornece o resultado de aprovação de cada um dos seis níveis, registrado por um dos sete campos do vetor *ResultadosHarmonicas*. E, caso o teste seja reprovado em algum dos níveis, o resultado geral é alterado modificado para 'Reprovado', o que indica que o algoritmo de controle não está em conformidade com as normas.

3.2.2 Fator de potência fixo

Uma vez que os parâmetros da simulação são gerados pelo *script* criado e os dados de fator de potência são coletados pela ferramenta *scope*, simplesmente basta comparar o FP fornecido com o registrado. Se o FP calculado ao fim da simulação estiver dentro dos limites de $\pm 2.5\%$, ou seja, $FP = (1 \pm 0.025) \cos(\phi)$, considerando o ângulo ϕ calculado conforme a Subseção 3.1.2.3, o resultado é salvo pela variável *ResultadoFPfixo* como 'Aprovado' e, caso contrário, computa-se 'Reprovado'.

3.2.3 Fator de potência com curva do FP

Para determinar a aprovação dos ensaios de fator de potência com Curva do FP, os valores fornecidos pela Tabela 2 e 3 são comprados com o valor do FP registrado pelo *scope*. Se o FP calculado ao fim da simulação estiver dentro dos limites de $\pm 2.5\%$, ou seja, $FP = (1 \pm 0.025) \cos(\phi)$, considerando o ângulo ϕ calculado conforme a Subseção 3.1.2.4, o resultado é computado como 'Aprovado' pela variável *ResultadoFPcurva* e, caso contrário, computa-se 'Reprovado'.

3.2.4 Injeção/demanda de potência reativa

A verificação de conformidade com a norma para os ensaios de potência reativa é realizado fazendo a comparação entre a potência reativa calculada através da Equação 3.19 e a potência medida pela ferramenta *scope*. O resultado é registrado pela variável *ResultadoPotencia*, a comparação determina 'Aprovado' se o valor da potência reativa medido estiver entre $\pm 2.5\%$ o valor da potência ativa medida.

3.3 Geração do relatório de testes

Uma vez que os resultados foram gerados de acordo com os critérios de aprovação da norma, é de interesse que estes sejam apresentados ao usuário e, para isso, a geração do relatório emprega a função de manipulação de arquivos no ambiente MATLAB, assim foi possível criar e escrever em um arquivo externo contendo detalhes dos testes e resultado de conformidade do algoritmo testado. O arquivo gerado é criado com extensão *.htm* que pode ser aberto em qualquer navegador de *internet*. Um modelo de arquivo contendo configurações foi criado conforme Anexo A, essas configurações definem os elementos visuais a serem exibidos, além da estrutura do documento, sendo baseada no código disponível em [29]. Após a execução dos testes, as variáveis com os resultados são convertidas para texto e em seguida escritas com as *tags* necessárias para formatação em HTML.

Os dados do relatório são compostos pelos valores de comparação definidos pelas normas e os valores medidos ao fim da execução de cada ensaio. Assim os mesmos são exibidos em tabelas e imagens de maneira a facilitar a análise do usuário.

4 Estudo de caso

O código do *script* criado é apresentado no Anexo B. Para avaliar o funcionamento do *script* criado foi implementada a simulação do sistema de controle estudado em [30], considerando a diferença de que foi implementado considerando apenas a harmônica fundamental e aplicando a transformação de Park. O sistema emprega a técnica de controle preditivo sem restrições através do modelo baseado em espaço de estados. Seguindo o esquema de conexão visto na Figura 14, o diagrama de blocos apresentado pela Figura 24 mostra as conexões para a utilização do sistema supervisorio. Onde são vistos o bloco do conversor de potência e o filtro LCL formado pelos capacitores, indutores e resistores.

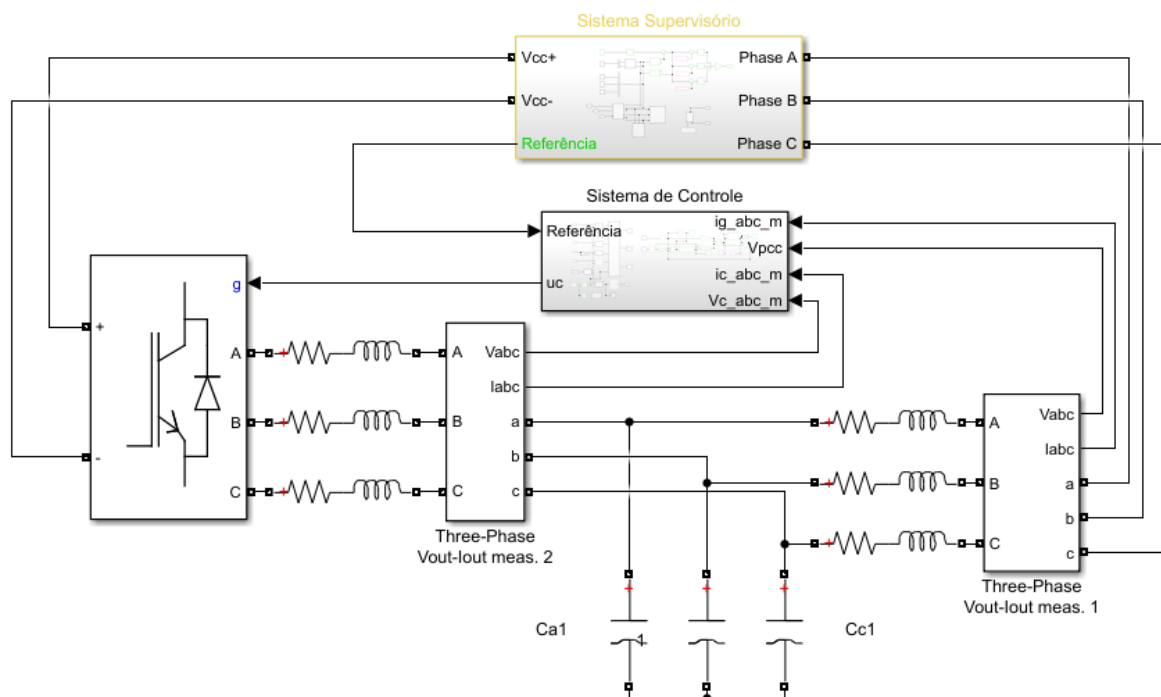


Figura 24 – Conexões do sistema de conversão de potência, sistema de controle e sistema supervisorio.

O sistema de controle coleta as informações medidas e fornece a ação de controle aplicado ao conversor de potência. Além disso, recebe os sinais de referência para cada uma das fases, fornecidos pelo sistema supervisorio. O diagrama de controle empregado para seguimento de referência é visto na Figura 25, onde o sinal de controle uv é modulado pelo bloco *PWM Generator* junto às informações de atualização dos estados exibido pela Figura 26, sendo que a entrada de comandos para o funcionamento do inversor é gerado pela conversão do sinal de controle da por uc .

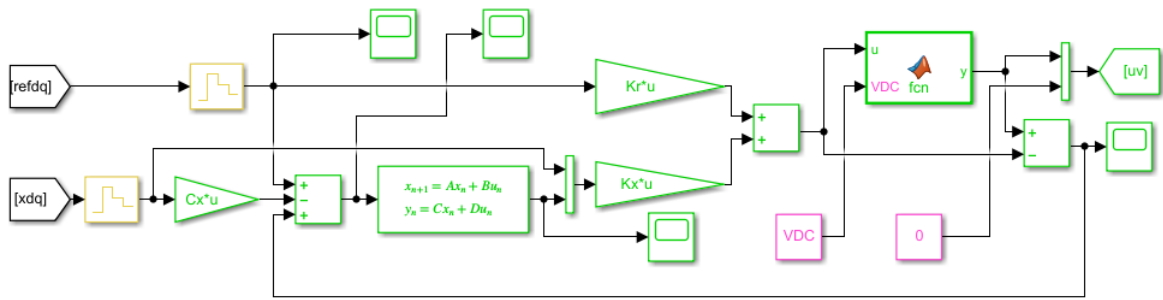


Figura 25 – Diagrama de controle de corrente do inversor.

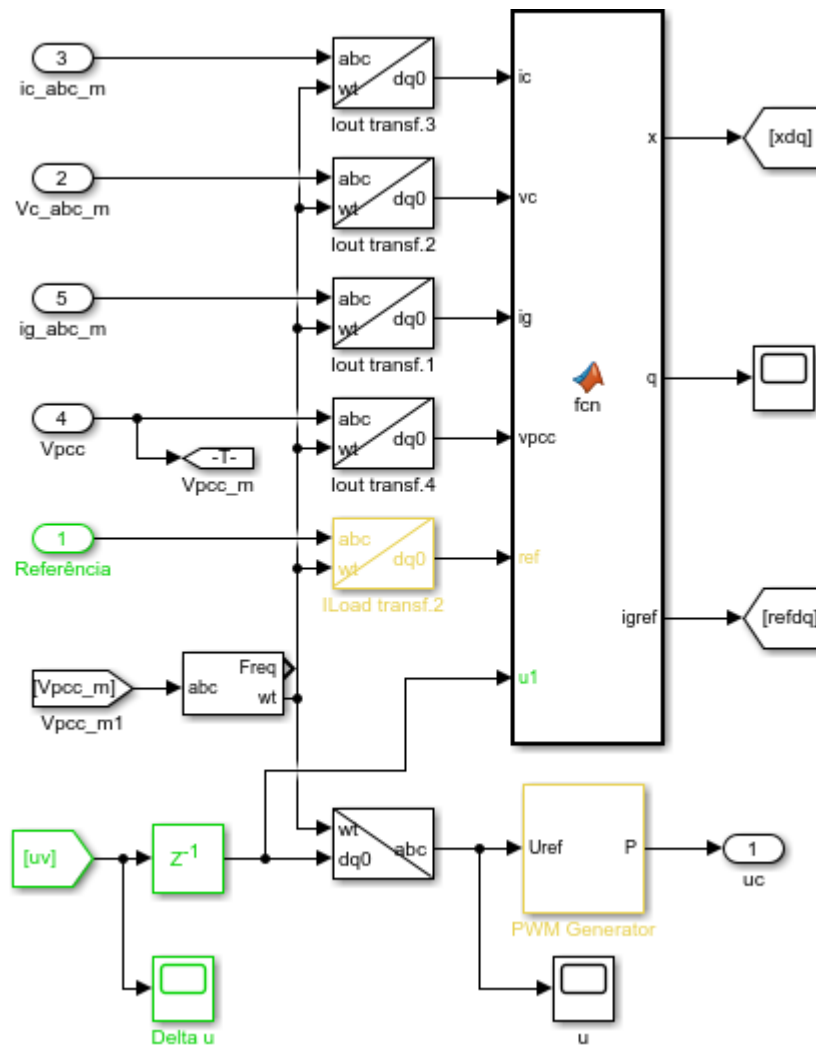


Figura 26 – Atualização dos estados do sistema e modulação PWM.

Os parâmetros para a sintonia do sistema de controle preditivo são:

- Horizonte de predição $N_y = 20$;
- Horizonte de controle $N_u = 5$;
- Peso do sinal de controle $\lambda = 750$;

- Peso do erro $\delta = [50, 50, 75, 75]$.

Os parâmetros empregados para a configuração do circuito da Figura 24 são exibidos na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros do sistema

Tensão de Entrada (V_{cc})	420 [V]
Amplitude da rede ($PhaseA, B$ e C)	220 [V]
Frequência da rede	60 [Hz]
Frequência de amostragem	20000 [Hz]
L_c	1 [mH]
r_c	0 [$m\Omega$]
C	62 [μ F]
L_{g1}	0.3 [mH]
r_{g1}	0 [Ω]
L_{g2}	0 [μ H]
r_{g2}	0 [$m\Omega$]

Os ganhos calculados a partir da técnica de controle preditivo baseado em espaço de estados são K_x e K_r :

$$\mathbf{K}_x = \begin{bmatrix} -3.2651 & 0.0263 \\ -0.2411 & -0.0489 \\ -1.0617 & -0.0233 \\ -0.0263 & -3.2651 \\ 0.0489 & -0.2411 \\ 0.0233 & -1.0617 \\ -0.1582 & 0.0008 \\ -0.0008 & -0.1582 \\ 0.3075 & 0.0391 \\ -0.0391 & 0.3075 \end{bmatrix}^T \quad (4.1)$$

$$\mathbf{K}_r = \begin{bmatrix} 4.3049 & -0.5696 \\ 0.5696 & 4.3049 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Após o termino da execução do *script*, o arquivo gerado em HTML é aberto no navegador de *internet* padrão do computador. A visão geral do relatório gerado pode ser visto na Figura 27. O relatório exhibe informações sobre o algoritmo de controle e do inversor inseridas manualmente pelo usuário. Logo abaixo os ensaios executados são listados juntamente com o resultado de conformidade indicado à frente.



Figura 27 – Visão geral do relatório gerado.

Para exibição de detalhes do valores registrados basta que o usuário clique sobre um dos ensaios. Com isso, são exibidas tabelas e gráficos que fornecem a comparação entre os valores limites estabelecidos pela norma e os valores registrados com a execução dos ensaios, a janela com os resultados dos testes são vistas na Figura 28.

O resultado dos ensaios realizados indicam que o algoritmo de controle atende parcialmente aos requisitos de conformidade de acordo com os valores apresentados nas normas. No entanto, as distorções harmônicas de ordem 2, 4, 8, 10 e 22 obtiveram magnitude além dos limites estabelecidos como pode ser visto na Figura 29. Nota-se que para a execução dos testes com o algoritmo estudado, as distorções harmônicas individuais são reduzidas conforme o aumento da porcentagem da potência de saída configurada, isso pode ser visualizado na Figura 30, que apresenta o ensaio de harmônicas com a potência máxima na saída do inversor.

Tanto a injeção como a demanda de potência reativa foram registradas com valores fora do limite aceitável assim como visto na Figura 28. Portanto, como esse algoritmo de controle não satisfaz todos os testes avaliados, é necessário refazer sua sintonia de forma iterativa, seguindo o modelo TDD, até que as condições dos testes sejam atendidas. Com os resultados dos testes iniciais, é possível identificar melhor em que aspecto o controlador falha, o que pode ser utilizado para guiar melhor a sintonia do mesmo, agilizando esta etapa. Ressalta-se também que o custo para a sintonia do sistema de controle num ambiente próprio de simulação é muito inferior e rápido se comparado com a realização



Figura 28 – Visão expandida do itens do relatório.

dos testes em um laboratório de certificação, ainda mais com a necessidade de repetição deste processo.

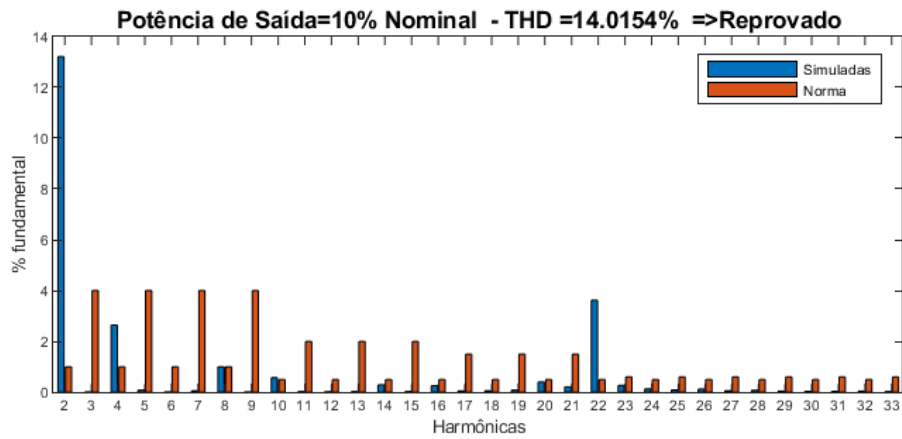


Figura 29 – Comparação entre os limites e as medidas para distorções harmônicas para 10% da potência nominal.

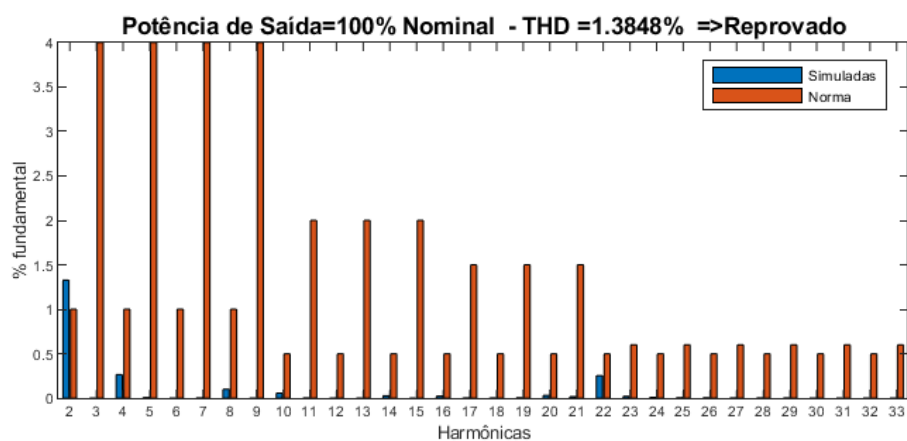


Figura 30 – Comparação entre os limites e as medidas para distorções harmônicas para 100% da potência nominal.

5 Conclusões

O trabalho apresentado considerou o desenvolvimento de um *script* em ambiente MATLAB e um diagrama de blocos no Simulink, para executar de maneira automática os procedimentos de ensaios contidos na norma ABNT NBR 16150:2013 com relação às características e qualidade do sinal de corrente gerado na saída de um inversor. Sendo o inversor simulado utilizado a ferramenta *Simscape* e controlado por sistema de controle apresentado no estudo de caso. Além disso, o trabalho seguiu com o intuito a geração de relatório do resultado de conformidade seguindo os requisitos e limitações impostas na norma ABNT NBR 16149:2013.

Os objetivos apresentados foram alcançados com a apresentação e funcionamento correto dos dados, sendo possível aplicar de maneira prática os conceitos de TDD, facilitando o desenvolvimento de algoritmos de controle.

A ferramenta criada limitou-se a algoritmos de controle aplicados a inversores trifásicos e sugere como trabalhos futuros o desenvolvimento de lógica para execução de testes também em sistemas com inversores monofásicos. Além disso, propõe-se que sejam implementados futuramente simuladores de geração fotovoltaica com maior fidelidade ao real, para que os resultados possam ser considerados com maior confiança.

Um ponto que também pode ser estudado futuramente, é a implementação do bloco *Power (3ph, Instantaneous)* uma vez que, o mesmo fornece o cálculo de potência correto para sistemas trifásicos equilibrados, o que não acontece com a existência de harmônicas. Portanto é importante verificar a existência de técnicas para o cálculo exato de potência apesar da presença de distorções harmônicas.

Referências Bibliográficas

- 1 JÄGER-WALDAU, A. Snapshot of photovoltaics—february 2020. *Energies*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 13, n. 4, p. 930, 2020. 8, 13
- 2 SHOP, E. S. *Tipos de sistema (On Grid e Off Grid)*. Online; acesso: 14 de fevereiro de 2022. Disponível em: <<https://www.energiasolarshop.com.br/post/tipos-de-sistema-on-grid-e-off-grid>>. 8, 16
- 3 AHMED, A. *Eletrônica de potência*. [S.l.]: São Paulo: Prentice Hall, 2000. 8, 17
- 4 PERIN, A. L. Análise da influência de diferentes estratégias de arrefecimento no desempenho e durabilidade de inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. 2016. 8, 17, 18
- 5 JR, L. A. M. et al. Robust pole location with experimental validation for three-phase grid-connected converters. *Control Engineering Practice*, Elsevier, v. 59, p. 16–26, 2017. 8, 17, 18
- 6 MATHWORKS. *PLL (3ph)*. Online; acesso: 14 de fevereiro de 2022. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/pll3ph.html#responsive_offcanvas>. 8, 19, 30
- 7 DEPIZZOL, B. et al. Simulação e controle de sistema para integração de painéis fotovoltaicos na rede elétrica. Blumenau, SC, 2021. 8, 20
- 8 ELETRICISTA, P. *Correção do Fator de Potência: Uso do Banco de Capacitores*. Online; acesso: 25 de fevereiro de 2022. Disponível em: <<https://www.portaleletricista.com.br/correcao-do-fator-de-potencia/>>. 8, 23, 24
- 9 ABNT NBR 16149. Sistemas fotovoltaicos (fv) - características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição. 2013. 8, 9, 22, 23, 24, 25
- 10 ABNT NBR 16150. Sistemas fotovoltaicos (fv) - características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição-procedimento de ensaio de conformidade. 2013. 8, 24, 26, 31
- 11 BLOGGER, T. do. *PODCAST: Teste unitário, automatizado e TDD*. Online; acesso: 14 de fevereiro de 2022. Disponível em: <<https://www.rcelebrone.com/2021/03/podcast-teste-unitario-automatizado-tdd.html>>. 8, 27
- 12 MAGNAGO, H. et al. A test driven design approach to benchmark current controllers for grid-tied inverters. In: IEEE. *2019 20th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*. [S.l.], 2019. p. 1–8. 8, 14, 27
- 13 TUTORIALS, W. S. O. W. *Tryit*. Online; acesso: 14 de fevereiro de 2022. Disponível em: <https://www.w3schools.com/tags/tryit.asp?filename=tryhtml_font_color_css>. 8, 28
- 14 HART, D. W. *Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos*. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2016. 13, 17, 22

- 15 LIAO, H.; ZHANG, X.; MA, Z. Robust dichotomy solution-based model predictive control for the grid-connected inverters with disturbance observer. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, v. 5, n. 2, p. 81–89, 2021. 13
- 16 CORTAJARENA, J. A. et al. Sliding mode control of grid-tied single-phase inverter in a photovoltaic mppt application. *Solar Energy*, Elsevier, v. 155, p. 793–804, 2017. 14
- 17 USP, I. *Ensaio de inversores para sistemas conectados à rede*. Online; acesso: 14 de fevereiro de 2022. Disponível em: <<http://lsf.iee.usp.br/?q=pt-br/ensaio-de-inversores-para-sistemas-conectados-%C3%A0-rede>>. 14
- 18 HACKENBERG, G.; MUND, J. Cyber-physical manufacturing system development: A test-driven design method and exploratory case study. 2016. 14
- 19 FUCCI, D. et al. A dissection of the test-driven development process: Does it really matter to test-first or to test-last? *IEEE Transactions on Software Engineering*, IEEE, v. 43, n. 7, p. 597–614, 2016. 14
- 20 ZILLES, R. et al. *Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica*. [S.l.]: Oficina de textos, 2016. 16
- 21 FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; EMAMI-NAEINI, A. *Sistemas de controle para engenharia*. [S.l.]: Bookman Editora, 2013. 18
- 22 TEODORESCU, R.; LISERRE, M.; RODRIGUEZ, P. *Grid converters for photovoltaic and wind power systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. 19
- 23 RUAN, X. et al. *Control techniques for LCL-type grid-connected inverters*. [S.l.]: Springer, 2018. 19
- 24 BLAABJERG, F. *Control of Power Electronic Converters and Systems: Volume 2*. [S.l.]: Academic Press, 2018. v. 2. 20
- 25 ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. *Fundamentos de circuitos elétricos*. [S.l.]: AMGH Editora, 2013. 23, 30
- 26 JEFFRIES, R.; MELNIK, G. Guest editors' introduction: Tdd—the art of fearless programming. *Ieee Software*, IEEE, v. 24, n. 3, p. 24–30, 2007. 27
- 27 BECK, K. *Test-driven development: by example*. [S.l.]: Addison-Wesley Professional, 2003. 27
- 28 SILVA, M. S. *Criando sites com HTML: sites de alta qualidade com HTML e CSS*. [S.l.]: Novatec Editora, 2008. 28
- 29 B, J. *TestReportTemplate*. Online; acesso: 14 de fevereiro de 2022. Disponível em: <<https://github.com/bnaj/TestReportTemplate>>. 38
- 30 JR, L. M. et al. Robust model predictive controller applied to three-phase grid-connected lcl filters. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, Springer, v. 31, n. 2, p. 447–460, 2020. 39

ANEXO A – *Template*

```
<!DOCTYPE html>
<html>
<title>Relatório de Testes</title>

<head>
<!-- Skrypt show table-->
  <script>
function hide(event) {
  var tableNode = undefined;
  var currentNode = event.target;

  while(tableNode == undefined) {
    if(currentNode.nodeName == 'TABLE') {
      tableNode = currentNode;
    } else {
      currentNode = currentNode.parentNode;
    }
  }
  if(tableNode.classList.contains("bodyHidden")) {
    tableNode.classList.remove("bodyHidden");
  } else {
    tableNode.classList.add("bodyHidden");
  }
}
</script>
  <!-- Skrypt show table end-->
<style>
article {
  float: left;
  padding: 20px;
  width:800px;
  background-color: #f1f1f1;
  height: auto; /* only for demonstration, should be removed */
float:center;
}

```

```
    body {
margin: 0;
font-size: 5px;
font-family: Arial, Helvetica, sans-serif;
}
/* Style table */
#testResoultTables {
<!--font-family: "Times New Roman", Times, serif;-->
border-collapse: collapse;
margin: 10px ;
overflow-x:auto;
min-width: 800px;
margin-left: 0;
margin-right: auto;
font-size: 15px;
font-family: Arial, Helvetica, sans-serif;
}

#testResoultTables td, #testResoultTables th {
    border: 1px solid #ddd;
    padding: 4px ;
}

#testResoultTables tr:nth-child(even){background-color: #f2f2f2;}

#testResoultTables tr:hover {background-color: #6dc59d;}

#testResoultTables th {
    padding-top: 12px;
    padding-bottom: 12px;
    text-align: center;
    background-color: #D3D3D3;
    color: black;
}

    caption {
font-family: "Trebuchet MS", Arial, Helvetica, sans-serif;
font-size: 25px;
width: 800px;
float: left;
```

```
padding-top: 12px;
padding-bottom: 12px;
text-align: left;
background-color: black;
color: white;
}
```

```
.content {
padding: 0 18px;
display: none;
overflow: hidden;
}
```

```
table.bodyHidden tr:nth-child(odd),
table.bodyHidden tr:nth-child(even) {
display: none;
}
```

```
table.bodyHidden th {
display: none;
}
```

```
table.bodyHidden tr:first-child {
display: block;
}
```

```
</style>
```

```
</head>
```

```
<article>
```

```
<h2 align="center"><font size="7">Relatório de Testes</font></h2>
```

```
<div style=font-size:15px>Relatório de procedimentos de ensaios
automatizados em conformidade com as normatizações ABNT NBR 16149:2013a
e ABNT NBR 16150:2013b.</div>
```

```
<div style="overflow: hidden;
background-color: black;">
```

```
<div style=" width: auto; height: 5px; display: inline-block;">
```

```
</div></div><br><br><br><br>
```

ANEXO B – *Script* Desenvolvido

Contents

- Ensaio de algoritmo de controle seguindo procedimentos ABNT 16150
- Configuração padrão para os ensaios
- Procedimento de ensaios
- Tratamento de dados
- Geração do relatório de testes

Ensaio de algoritmo de controle seguindo procedimentos ABNT 16150

É necessário remover/comentar o comando 'clear' do script de geração de dados. Para execução dos testes execute o algoritmo sem perturbações

```
tic
clc
clear
close all
warning('off','all')
```

Configuração padrão para os ensaios

```
%Parâmetros Inversor
FreqNominal = 60;
FrequenciaAmostragem = 20e3;
PotenciaNominal = 6e3;
GridVoltage = 220;

%Caminho do arquivo de geração de dados
ScriptName = 'initSimMPCSS_versao2';

%Caminho do arquivo de simulação
SimName = 'DQ_inverter3ph_Switch_lima_sat_supervisoriochange';

% Parâmetros de Ensaio
StopTime = 0.15;
EnsaioHarmonicas = true;
EnsaioFPfixo = true;
EnsaioFPcurva = true;
EnsaioPotenciaReativa = true;
```

Procedimento de ensaios

```
PotenciaEnsaio = [ .1, .2, .3, .5, .75, 1];
PeriodoAmostragem = 1/FrequenciaAmostragem;
PotAbsorvida = PotenciaNominal*1.1;
GeradorPV = 420;

% Harmônicos e distorção de forma de onda
if EnsaioHarmonicas
    DadosHarmonicasA = zeros(33,6);
    DadosHarmonicasB = zeros(33,6);
    DadosHarmonicasC = zeros(33,6);
    ThdCalcA = zeros(1,6);
    ThdCalcB = zeros(1,6);
    ThdCalcC = zeros(1,6);

    for count=1:6
        clc
        % disp(strcat('Executando nível 0', string(count), ': Harmônicos e distorção de forma de onda'));
        TensaoEnsaio = GridVoltage/sqrt(2);
        Iref = sqrt(2)*PotenciaEnsaio(count)*PotenciaNominal/(sqrt(3)*TensaoEnsaio);
        GridPhaseA = 0;
        GridPhaseB = -2*pi/3;
        GridPhaseC = -4*pi/3;
        % Início simulação externa
        run(ScriptName);
        sim(SimName);

        % Modificação da struct do Scope
        AquisicaoDadosA=power_fftscope(AquisicaoDadosA);
        AquisicaoDadosA.maxFrequency=FreqNominal*33+1;
        AquisicaoDadosA=power_fftscope(AquisicaoDadosA);
        % Cálculo distorção harmônica total percentual
        for i=3:1:34
            ThdCalcA(1,count) = ThdCalcA(1,count) + AquisicaoDadosA.mag(i)^2;
        end
        ThdCalcA(1,count) = 100*sqrt(ThdCalcA(1,count))/AquisicaoDadosA.mag(2);
        DadosHarmonicasA(:, count) = 100*AquisicaoDadosA.mag(2:end)/AquisicaoDadosA.mag(2);
    end
end

% Fator de potência Fixo
FatorPotencia = zeros(6,6); %registra os valores de fator de potência
TesteFP = false(4,6);

if EnsaioFPfixo
```

```

%1) Fator de potência para 0.98 capacitivo
for count=1:6
    clc
    disp(strcat('Executando nível 0', string(count), ': Fator de potência fixo para 0.98 capacitivo'));
    TensaoEnsaio = GridVoltage/sqrt(2);
    Iref = sqrt(2)*PotenciaEnsaio(count)*PotenciaNominal/(sqrt(3)*TensaoEnsaio);
    phi = acos(0.98);
    GridPhaseA = 0+phi;
    GridPhaseB = -2*pi/3+phi;
    GridPhaseC = -4*pi/3+phi;
    % Início simulação externa
    run(SCRIPTNAME)
    sim(SimName)
    FatorPotencia(1,count)= mean(FP(end-333:end,2));
    if FatorPotencia(1,count)<cos(phi)-0.025 || ...
        FatorPotencia(1,count)>cos(phi)+0.025
        TesteFP(1,count) = true;
    end
end

%2) Fator de potência para 0.98 indutivo
for count=1:6
    clc
    disp(strcat('Executando nível 0', string(count), ': Fator de potência fixo para 0.98 indutivo'));
    TensaoEnsaio = GridVoltage/sqrt(2);
    Iref = sqrt(2)*PotenciaEnsaio(count)*PotenciaNominal/(sqrt(3)*TensaoEnsaio);
    phi = -acos(0.98);
    GridPhaseA = 0+phi;
    GridPhaseB = -2*pi/3+phi;
    GridPhaseC = -4*pi/3+phi;
    % Início simulação externa
    run(SCRIPTNAME)
    sim(SimName)
    FatorPotencia(2,count)= mean(FP(end-333:end,2));
    if FatorPotencia(2,count)<cos(phi)*0.975 || ...
        FatorPotencia(2,count)>cos(phi)*1.025
        TesteFP(2,count) = true;
    end
end

%3) Fator de potência para 1
for count=1:6
    clc
    disp(strcat('Executando nível 0', string(count), ': Fator de potência fixo igual a 1.0'));
    TensaoEnsaio = GridVoltage/sqrt(2);
    Iref = sqrt(2)*PotenciaEnsaio(count)*PotenciaNominal/(sqrt(3)*TensaoEnsaio);
    phi = 0;
    GridPhaseA = 0+phi;
    GridPhaseB = -2*pi/3+phi;
    GridPhaseC = -4*pi/3+phi;
    % Início simulação externa
    run(SCRIPTNAME)
    sim(SimName)
    FatorPotencia(3,count)= mean(FP(end-333:end,2));
    if FatorPotencia(3,count)<cos(phi)-0.025 || ...
        FatorPotencia(3,count)>cos(phi)+0.025
        TesteFP(3,count) = true;
    end
end

end

% Fator de potência com Curva do FP
if EnsaioFPcurva
    if PotenciaNominal>3e3 && PotenciaNominal<=6e3
        curvaFP = [1 1 1 1 0.975 0.95];
        for count=1:6
            clc
            disp(strcat('Executando nível 0', string(count), ': Fator de potência com Curva do FP'));
            phi = acos(curvaFP(count)); %defasagem V&I
            P = PotenciaNominal*PotenciaEnsaio(count); %potencia ativa
            S = P/cos(phi); %potencia aparente
            TensaoEnsaio = 1.04*GridVoltage/sqrt(2);
            Iref = sqrt(2)*S/(sqrt(3)*TensaoEnsaio); %apltitude da corrente
            GridPhaseA = 0+phi;
            GridPhaseB = (-2*pi/3)+phi;
            GridPhaseC = (-4*pi/3)+phi;
            % Início simulação externa
            run(SCRIPTNAME)
            sim(SimName)
            FatorPotencia(4,count)= mean(FP(end-333:end,2));
            if FatorPotencia(4,count)<curvaFP(count)*0.975 || ...
                FatorPotencia(4,count)>curvaFP(count)*1.025
                TesteFP(4,count) = true;
            end
        end
    elseif PotenciaNominal>6e3
        curvaFP = [1 1 1 1 0.95 0.9];
        for count=1:6
            clc
            disp(strcat('Executando nível 0', string(count), ': Fator de potência com Curva do FP'));

```

```

        phi = acos(curvaFP(count)); %defasagem V&I
        P = PotenciaNominal*PotenciaEnsaio(count); %potencia ativa
        S = P/cos(phi); %potencia aparente
        TensaoEnsaio = 1.04*GridVoltage/sqrt(2);
        Iref = sqrt(2)*S/(sqrt(3)*TensaoEnsaio); %amplitude da corrente
        GridPhaseA = 0+phi;
        GridPhaseB = (-2*pi/3)+phi;
        GridPhaseC = (-4*pi/3)+phi;
        % Início simulação externa
        run(ScriptName)
        sim(SimName)
        FatorPotencia(4,count)= mean(FP(end-333:end,2));
        if FatorPotencia(4,count)<curvaFP(count)*0.975 || ...
            FatorPotencia(4,count)>curvaFP(count)*1.025
            TesteFP(4,count) = true;
        end
    end
end
end

% Injeção/ demanda reativa
%4) Fornecer 48,43% de potência reativa
if EnsaioPotenciaReativa
    PotenciaMedida = zeros(6,6);
    TestePotencia=false(3,6);
    corte = 30*fix((1/FreqNominal)/PeriodoAmostragem);
    for count=1:6
        clc
        disp(strcat('Executando nível 0', string(count),': Injeção de potência reativa'));

        P = PotenciaNominal*PotenciaEnsaio(count); %potencia ativa
        Q = 0.4843*P; %potencia reativa
        S = sqrt(P^2+Q^2); %potencia aparente
        TensaoEnsaio = GridVoltage/sqrt(2);
        Iref = sqrt(2)*S/(sqrt(3)*TensaoEnsaio); %amplitude da corrente
        phi = acos(P/S); %defasagem V&I
        GridPhaseA = 0-phi;
        GridPhaseB = (-2*pi/3)-phi;
        GridPhaseC = (-4*pi/3)-phi;
        % Início simulação externa
        run(ScriptName)
        sim(SimName)

        PotenciaMedida(1,count) = PotenciaSaida(end,2);
        PotenciaMedida(2,count) = PotenciaSaida(end,3);
        if abs(PotenciaMedida(2,count))<0.975*PotenciaMedida(1,count)||...
            abs(PotenciaMedida(2,count))>1.025*PotenciaMedida(1,count)
            TestePotencia(1,count) = true;
        end
    end
end

%5) Demandar 48,43% de potência reativa
for count=1:6
    clc
    disp(strcat('Executando nível 0', string(count),': Demanda de potência reativa'));

    P = PotenciaNominal*PotenciaEnsaio(count); %potencia ativa
    Q = 0.4843*P; %potencia reativa
    S = sqrt(P^2+Q^2); %potencia aparente
    TensaoEnsaio = GridVoltage/sqrt(2);
    Iref = sqrt(2)*S/(sqrt(3)*TensaoEnsaio); %amplitude da corrente
    phi = acos(P/S); %defasagem V&I
    GridPhaseA = 0+phi;
    GridPhaseB = (-2*pi/3)+phi;
    GridPhaseC = (-4*pi/3)+phi;
    % Início simulação externa
    run(ScriptName)
    sim(SimName)

    PotenciaMedida(3,count) = PotenciaSaida(end,2);
    PotenciaMedida(4,count) = PotenciaSaida(end,3);
    if abs(PotenciaMedida(4,count))<0.975*PotenciaMedida(3,count)||...
        abs(PotenciaMedida(4,count))>1.025*PotenciaMedida(3,count)
        TestePotencia(2,count) = true;
    end
end

%5) Potência reativa nula
for count=1:6
    clc
    disp(strcat('Executando nível 0', string(count),': Potência reativa nula'));

    P = PotenciaNominal*PotenciaEnsaio(count); %potencia ativa
    Q = 0*P; %potencia reativa
    S = sqrt(P^2+Q^2); %potencia aparente
    TensaoEnsaio = GridVoltage/sqrt(2);
    Iref = sqrt(2)*S/(sqrt(3)*TensaoEnsaio); %amplitude da corrente
    phi = acos(P/S); %defasagem V&I
    GridPhaseA = 0+phi;
    GridPhaseB = (-2*pi/3)+phi;
    GridPhaseC = (-4*pi/3)+phi;
    % Início simulação externa

```

```

run(ScriptName)
sim(SimName)
PotenciaMedida(5,count) = PotenciaSaida(end,2);
PotenciaMedida(6,count) = PotenciaSaida(end,3);
if PotenciaMedida(6,count)<-0.025*PotenciaMedida(5,count)|| ...
    PotenciaMedida(6,count)>0.025*PotenciaMedida(5,count)
    TestePotencia(3,count) = true;
end
end
end
end

```

Tratamento de dados

```

% Verificação de Resultados para ensaios harmônicos
if EnsaioHarmonicas
    % valores da porcentagem de harmônicas individuais aceitáveis
    LimiteDistorcao = [1;4;1;4;1;4;1;4;0.5;2;0.5;2;0.5;2;0.5;1.5;...
        0.5;1.5;0.5;1.5;0.5;0.6;0.5;0.6;0.5;0.6;0.5;0.6;0.5;0.6;0.5;0.6;0.5;0.6];

    TesteHarmonicas = false(1,6);
    ResultadoHarmonicas = [" " " " " " " " "Aprovado"];
    for i=1:6
        for j=1:32
            if DadosHarmonicas(j,i)>LimiteDistorcao(j)
                TesteHarmonicas(1,i) = true;
            end
        end
        if TesteHarmonicas(1,i) || ThdCalcA(1,i)>5
            ResultadoHarmonicas(1,i) = "Reprovado";
            ResultadoHarmonicas(1,7) = "Reprovado";
        else
            ResultadoHarmonicas(1,i) = "Aprovado";
        end
    end
end

% Verificação de Resultados para Fator de potência fixo
ResultadoFPfixo=["Aprovado" "Aprovado" "Aprovado" "Aprovado"];
if EnsaioFPfixo
    for i=1:3
        for count=1:6
            if TesteFP(i,count)
                ResultadoFPfixo(i) = "Reprovado";
                ResultadoFPfixo(4) = "Reprovado";
            end
        end
    end
end

% Verificação de Resultados para Fator de potência com curva do FP
ResultadoFPcurva="Aprovado";
if EnsaioFPcurva
    if PotenciaNominal>3e3
        for count=1:6
            if TesteFP(4,count)
                ResultadoFPcurva="Reprovado";
                break;
            end
        end
    end
end

% Verificação de Resultados para Injeção/demanada de potência reativa
if EnsaioPotenciaReativa
    ResultadoPotencia=["Aprovado" "Aprovado" "Aprovado" "Aprovado"];
    for i=1:3
        for count=1:6
            if TestePotencia(i,count)
                ResultadoPotencia(i)="Reprovado";
                break;
            end
        end
    end
end
end

```

Geração do relatório de testes

```

fid = fopen('template.htm');
F = fread(fid, '*char');
fid = fopen('EnsaioInversores.htm','w+');
fprintf(fid, F);

%exibe parametros do inversor
fprintf(fid, '<div><span style=font-size:15px>\n');
fprintf(fid, '<table style="background-color: #DEDEDE;"> \n');
fprintf(fid, '<tr><th colspan="2"><font size="5"><B>Parâmetros do Ensaio</B></font></th></tr>\n');
fprintf(fid, strcat('<tr><td>Potência Nominal: </td> <td>', string(PotenciaNominal/1000), ' kW</td></tr>\n'));
fprintf(fid, strcat('<tr><td>Frequência Nominal: </td> <td>', string(FreqNominal), ' Hz</td></tr>\n'));
fprintf(fid, strcat('<tr><td>Frequência de Amostragem: </td> <td>', string(FrequenciaAmostragem/1000), ' kHz</td></tr>\n'));

```

```

fprintf(fid,'</table>\n </span></div><br> <br><br> <br>');

fprintf(fid,'<div style="font-size:30px; "><B > Resultados </B> <font size="3">(clique para exibir os detalhes)</font></div>');

% harmônicas - html %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if EnsaioHarmonicas

    if ResultadoHarmonicas(1,7) == "Aprovado"
        temp = '#00FF00';
    else
        temp = 'red';
    end
    fprintf(fid,' <table id="testResoulTables" class="bodyHidden"><caption onclick="hide(event)"><a name="test number 1"><a>Ensaio:');
    fprintf(fid, strcat(' Harmônicos e Distorção de Forma de Onda => <B> <font color="',temp,'"> , ...
        ResultadoHarmonicas(1,7), '</font></B></caption>\n'));

    % geração da imagem com as harmônicas individuais
    for count=1:6

        Exibe=[DadosHarmonicasA(2:end,count)';LimiteDistorcao(1:end)'];
        fig = figure('visible','off','Position', [10 10 500 200]);
        bar(2:33,Exibe);
        set(gca,'FontSize',5);
        xlabel('Harmônicas','FontSize',6);
        ylabel('% fundamental','FontSize',6);
        legend('Simuladas','Norma','FontSize',5);
        Titulo = strcat('Potência de Saída = ',string(PotenciaEnsaio(count)), '% Nominal - THD = ',...
            string(ThdCalcA(1,count)), '% =>', ResultadoHarmonicas(1,count));
        title(Titulo,'FontSize',8);
        xticks(2:33);
        temp = strcat('Harmonicas', string(PotenciaEnsaio(count)), '.png');
        saveas(fig, temp)

        fprintf(fid, strcat('<tr><th><center></center></th></tr>\n'));

    end

    fprintf(fid,'</table>\n\n');

end

% Fator de potência fixo - html %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if EnsaioFPfixo
    if ResultadoFPfixo(1) == "Aprovado"
        temp = '#00FF00';
    else
        temp = 'red';
    end
    fprintf(fid, strcat(' <table id="testResoulTables" class="bodyHidden"><caption onclick="hide(event)"><a name="test number 2"><a>,...
        'Ensaio: Fator de Potência fixo => <B> <font color="',temp,'"> ,ResultadoFPfixo(1), '</font></B></caption>\n'));
    fprintf(fid, strcat('<tr><th><table border="1" width="467" style="font-size:20px align="center"><tr><th colspan="7" align="center">,...
        '<B>Fator de potência = 0.98 capacitivo (tolerância &#xB1 0.025)</B></th></tr>\n'));
    fprintf(fid, strcat('<tr align="center"> <td>Potência de Ensaio</td> <td>10&#37</td> <td>20&#37</td> <td>30&#37</td> <td>50&#37</td>,...
        '<td>75&#37</td><td>100&#37</td></font></tr>\n'));
    fprintf(fid, strcat('<tr align="center"><td>FP</td> <td>',num2str(FatorPotencia(1,1),...
        '%.4f'), '</td> <td>',num2str(FatorPotencia(1,2), '%.4f'), '</td> <td>',num2str(FatorPotencia(1,3),...
        '%.4f'), '</td> <td>',num2str(FatorPotencia(1,4), '%.4f'), '</td> <td>',num2str(FatorPotencia(1,5),...
        '%.4f'), '</td> <td>',num2str(FatorPotencia(1,6), '%.4f'), '</td></tr></table></th> </tr>\n'));

    fprintf(fid, strcat('<tr><th><table border="1" width="467" style="font-size:20px align="center">,...
        '<tr><td colspan="7" align="center"><B>Fator de Potência = 0.98 indutivo (tolerância &#xB1 0.025)</B></td></tr>\n'));
    fprintf(fid, strcat('<tr align="center"> <td>Potência de Ensaio</td> <td>10&#37</td> <td>20&#37</td> <td>30&#37</td> <td>50&#37</td> , ...
        '<td>75&#37</td><td>100&#37</td></font></tr>\n'));
    fprintf(fid, strcat('<tr align="center"><td>FP</td> <td>',num2str(FatorPotencia(2,1), '%.4f'), '</td> <td>',...
        num2str(FatorPotencia(2,2), '%.4f'), '</td> <td>',num2str(FatorPotencia(2,3), '%.4f'), '</td> <td>',num2str(FatorPotencia(2,4),...
        '%.4f'), '</td> <td>',num2str(FatorPotencia(2,5), '%.4f'), '</td> <td>',num2str(FatorPotencia(2,6), '%.4f'), '</td></tr></table></th> , ...
        '</tr>\n'));

    fprintf(fid, strcat('<tr><th><table border="1" width="467" style="font-size:20px align="center"><tr><td colspan="7" align="center">,...
        '<B>Fator de Potência = 1.00', '(tolerância &#xB1 0.025)</B></td></tr>\n'));
    fprintf(fid, strcat('<tr align="center"> <td>Potência de Ensaio</td> <td>10&#37</td> <td>20&#37</td> <td>30&#37</td> <td>50&#37</td> , ...
        '<td>75&#37</td><td>100&#37</td></font></tr>\n'));
    fprintf(fid, strcat('<tr align="center"><td>FP</td> <td>',num2str(FatorPotencia(3,1), '%.4f'), '</td> <td>',num2str(FatorPotencia(3,2), '%.4f'),...
        '</td> <td>',num2str(FatorPotencia(3,3), '%.4f'), '</td> <td>',num2str(FatorPotencia(3,4), '%.4f'), '</td> <td>',num2str(FatorPotencia(3,5),...
        '%.4f'), '</td> <td>', num2str(FatorPotencia(3,6), '%.4f'), '</td></tr></table></th></tr>\n'));
    fprintf(fid,'</table>\n\n');

end

% Fator de potência com curva do FP - html %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% testes para sistemas com potência nominal > 3 kW
if EnsaioFPcurva
    if PotenciaNominal > 3e3
        if ResultadoFPcurva == "Aprovado"
            temp = '#00FF00';
        else
            temp = 'red';
        end
    end
end

```



```

fprintf(fid, strcat(' <table id="testResoultTables" class="bodyHidden"><caption onclick="hide(event)">...',...
    '<a name="test number 3"></a>Ensaio: Fator de Potência com Curva do FP => <B> <font color="',temp,'>',...
    'ResultadoPFfixo(2), </font></B></caption>\n'));

fprintf(fid, strcat(' <tr><th><table border="1" width="467" style=font-size:20px align="center"><tr><th colspan="7" align="center">...',...
    '<B>Fator de Potência Indutivo (tolerância &#x1 0.025)</B></th></tr>\n'));
fprintf(fid, strcat(' <tr align="center"> <td>Potência de Ensaio</td> <td>10&#37</td> <td>20&#37</td> <td>30&#37</td> <td>40&#37</td> <td>50&#37</td> <td>75&#37</td></tr></table>\n'));
fprintf(fid, strcat(' <tr align="center"><td>Curva FP</td> <td>', num2str(curvaFP(1), '%.4f'), '</td> <td>', num2str(curvaFP(2), '%.4f'), ...
    '</td><td>', num2str(curvaFP(3), '%.4f'), '</td><td>', num2str(curvaFP(4), '%.4f'), '</td><td>', num2str(curvaFP(5), '%.4f'), '</td><td>', ...
    num2str(curvaFP(6), '%.4f'), '</td> </tr>\n'));
fprintf(fid, strcat(' <tr align="center"><td>FP</td> <td>', num2str(FatorPotencia(4,1), '%.4f'), '</td> <td>', num2str(FatorPotencia(4,2), ...
    '%.4f'), '</td><td>', num2str(FatorPotencia(4,3), '%.4f'), '</td><td>', num2str(FatorPotencia(4,4), '%.4f'), '</td><td>', ...
    num2str(FatorPotencia(4,5), '%.4f'), '</td><td>', num2str(FatorPotencia(4,6), '%.4f'), '</td></tr></table></th> </tr>\n'));
fprintf(fid, '</table>\n\n');
end
end

% Injeção/ demanda reativa - html %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if EnsaioPotenciaReativa
    if ResultadoPotencia(1)== "Aprovado" && ResultadoPotencia(2)== "Aprovado" && ResultadoPotencia(3)== "Aprovado"
        temp = '#00FF00';
    else
        temp = 'red';
        ResultadoPotencia(4)= "Reprovado";
    end
end

fprintf(fid, strcat(' <table id="testResoultTables" class="bodyHidden"><caption onclick="hide(event)"><a name="test number 4"></a>Ensaio:',...
    'Injeção/Demanda de Potência Reativa =>', ' <B> <font color="',temp,'>',ResultadoPotencia(3), </font></B></caption>\n'));

fprintf(fid, strcat(' <tr><th><table border="1" width="500" style=font-size:20px align="center"><tr><th colspan="7" align="center">...',...
    '<B>Injeção de Potência Reativa (48.43&#37 P &#xB1 2.5 &#37)</B></th></tr>\n'));
fprintf(fid, strcat(' <tr align="center"> <td>Potência de Ensaio</td> <td>10&#37</td> <td>20&#37</td> <td>30&#37</td> <td>40&#37</td> <td>50&#37</td> <td>75&#37</td></tr></table>\n'));
fprintf(fid, strcat(' <tr align="center"> <td>Q(esperado)</td> <td>+', num2str(PotenciaMedida(1,1)*0.4843, '%.1f'), '</td> <td>+', ...
    num2str(PotenciaMedida(1,2)*0.4843, '%.1f'), '</td><td>+', num2str(PotenciaMedida(1,3)*0.4843, '%.1f'), '</td><td>+', ...
    num2str(PotenciaMedida(1,4)*0.4843, '%.1f'), '</td><td>+', num2str(PotenciaMedida(1,5)*0.4843, '%.1f'), ...
    '</td><td>+', num2str(PotenciaMedida(1,6)*0.4843, '%.1f'), '</td></tr>\n'));
fprintf(fid, strcat(' <tr align="center"><td>Q(medido)</td> <td>+', num2str(PotenciaMedida(2,1), '%.1f'), '</td> <td>+', num2str(PotenciaMedida(2,2), ...
    '%.1f'), '</td><td>+', num2str(PotenciaMedida(2,3), '%.1f'), '</td><td>+', num2str(PotenciaMedida(2,4), '%.1f'), '</td><td>+', ...
    num2str(PotenciaMedida(2,5), '%.1f'), '</td><td>+', num2str(PotenciaMedida(2,6), '%.1f'), '</td></tr></table></th> </tr>\n'));

fprintf(fid, strcat(' <tr><th><table border="1" width="500" style=font-size:20px align="center"><tr><th colspan="7" align="center"><B>Demanda de',...
    ' Potência Reativa (48.43&#37 P &#xB1 2.5 &#37)</B></th></tr>\n'));
fprintf(fid, strcat(' <tr align="center"> <td>Potência de Ensaio</td> <td>10&#37</td> <td>20&#37</td> <td>30&#37</td> <td>40&#37</td> <td>50&#37</td> <td>75&#37</td></tr></table>\n'));
fprintf(fid, strcat(' <tr align="center"> <td>Q(esperado)</td> <td>+', num2str(PotenciaMedida(3,1)*0.4843, '%.1f'), '</td> <td>+', ...
    num2str(PotenciaMedida(3,2)*0.4843, '%.1f'), '</td><td>+', num2str(PotenciaMedida(3,3)*0.4843, '%.1f'), '</td><td>+', ...
    num2str(PotenciaMedida(3,4)*0.4843, '%.1f'), '</td><td>+', num2str(PotenciaMedida(3,5)*0.4843, '%.1f'), '</td><td>+', ...
    num2str(PotenciaMedida(3,6)*0.4843, '%.1f'), '</td></tr>\n'));
fprintf(fid, strcat(' <tr align="center"><td>Q(medido)</td> <td>+', num2str(PotenciaMedida(4,1), '%.1f'), '</td> <td>', num2str(PotenciaMedida(4,2), '%.1f'), ...
    '</td><td>', num2str(PotenciaMedida(4,3), '%.1f'), '</td><td>', num2str(PotenciaMedida(4,4), '%.1f'), '</td><td>', num2str(PotenciaMedida(4,5), '%.1f'), ...
    '</td><td>', num2str(PotenciaMedida(4,6), '%.1f'), '</td></tr></table></th> </tr>\n'));

fprintf(fid, strcat(' <tr><th><table border="1" width="500" style=font-size:20px align="center"><tr><th colspan="7" align="center">...',...
    '<B>Potência Reativa Nula (0&#37 P &#xB1 2.5 &#37)</B></th></tr>\n'));
fprintf(fid, strcat(' <tr align="center"> <td>Potência de Ensaio</td> <td>10&#37</td> <td>20&#37</td> <td>30&#37</td> <td>40&#37</td> <td>50&#37</td> <td>75&#37</td> <td>100&#37</td></tr></table>\n'));
fprintf(fid, strcat(' <tr align="center"> <td>Q(esperado)</td> <td>', num2str(0, '%.1f'), '</td> <td>', num2str(0, '%.1f'), '</td><td>', num2str(0, '%.1f'), ...
    '</td><td>', num2str(0, '%.1f'), '</td><td>', num2str(0, '%.1f'), '</td><td>', num2str(0, '%.1f'), '</td></tr>\n'));
fprintf(fid, strcat(' <tr align="center"><td>Q(medido)</td> <td>', num2str(PotenciaMedida(6,1), '%.1f'), '</td> <td>', num2str(PotenciaMedida(6,2), ...
    '%.1f'), '</td><td>', num2str(PotenciaMedida(6,3), '%.1f'), '</td><td>', num2str(PotenciaMedida(6,4), '%.1f'), '</td><td>', num2str(PotenciaMedida(6,5), ...
    '%.1f'), '</td><td>', num2str(PotenciaMedida(6,6), '%.1f'), '</td></tr></table></th> </tr>\n'));

fprintf(fid, '</table>');
end

fprintf(fid, '</article>\n</html>');
fclose(fid);
winopen(fullfile('EnsaioInversores.htm'));
toc

```