

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

BRUNO HENZ MOSSMANN

ENSAIO DE CONTROLADORES DE ALTO DESEMPENHO PARA SISTEMAS

UPS:

Interface de acionamento de cargas lineares e não lineares por computador

Porto Alegre

2014

BRUNO HENZ MOSSMANN

ENSAIO DE CONTROLADORES DE ALTO DESEMPENHO PARA SISTEMAS

UPS:

Interface de acionamento de cargas lineares e não lineares por computador

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luís Fernando Alves Pereira

Porto Alegre

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos Alexandre Netto

Vice-Reitor: Rui Vicente Oppermann

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Vice-Diretora: Carla Schwengber Ten Caten

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Coordenador: Roberto Petry Homrich

Vice Coordenador: Ramon Carlos Poisl

Henz Mossmann, Bruno

Ensaio de controladores de alto desempenho para sistemas UPS: Interface de acionamento de cargas lineares e não lineares por computador / Bruno Henz Mossmann. -- 2014.

77 f.

Orientador: Luís Fernando Alves Pereira.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Elétrica, Porto Alegre, BR-RS, 2014.

1. Fontes ininterruptas de energia. 2. Armazenamento de energia. 3. Nobreak. 4. Controlador ressonante. 5. Uninterruptible power supply. I. Alves Pereira, Luís Fernando, orient. II. Título.

BRUNO HENZ MOSSMANN

ENSAIO DE CONTROLADORES DE ALTO DESEMPENHO PARA SISTEMAS

UPS:

Interface de acionamento de cargas lineares e não lineares por computador

Este trabalho foi analisado e julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina “Projeto de Diplomação” do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Banca Examinadora

Orientador: Prof. Dr. Luís Fernando Alves Pereira

Coordenador: Prof. Dr. Roberto Petry Homrich

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

**Prof. Dr Luís Fernando Alves Pereira – UFRGS
Doutor pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Brasil**

**Prof. Dr Jeferson Vieira Flores – UFRGS
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil**

**Prof. Dr Fausto Bastos Líbano – UFRGS
Doutor pela Universidade Politécnica de Madri, Espanha**

Dedico este trabalho aos meus pais, Pedro e Sibila, ao meu irmão, Bernardo, e à minha noiva Marcela, pelo apoio incansável e compreensão nos momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

De modo especial aos meus pais, Pedro Antonio Mossmann e Sibila Henz Mossmann, por todo o apoio e amor incondicionais dedicados durante toda a minha vida. Ao meu irmão, Bernardo Henz Mossmann, por estar sempre presente e disposto a ajudar. E também à minha noiva, Marcela Duarte de Sousa, pelo amor e dedicação e compreensão nas vésperas de provas e trabalhos.

Aos Professores da Escola de Engenharia desta Universidade, em especial aos integrantes do Departamento de Engenharia Elétrica, pelo trabalho e dedicação em contribuir no aprendizado de seus alunos.

Ao Prof. Dr. Luís Fernando Alves Pereira, pela orientação, disponibilidade e auxílio neste trabalho.

Ao Engenheiro Charles Lorenzini, pelo apoio na realização deste projeto.

À CAPES e à Brunel University, pela oportunidade de estudar no Reino Unido durante a graduação e ter inspirado em parte o tema deste trabalho.

À Banda Marcial Roque Gonzáles e seus componentes, pelos finais de semana de ensaios e apresentações que foram importantes para aliviar a tensão da rotina do curso e pela compreensão nos momentos de ausência.

Aos meus familiares e pessoas especiais que sempre estiveram presentes e participaram desta conquista.

Finalmente, aos colegas e amigos, pelo auxílio e apoio nas tarefas desenvolvidas durante o curso, pelo companheirismo nesta jornada e, principalmente, pela compreensão e paciência.

RESUMO

Este trabalho aborda os requisitos de desempenho de fontes ininterruptas de energia (do inglês *Uninterruptible Power Supply - UPS*) de acordo com normas e padrões internacionais como o CSA 813.1 e a norma IEC 62040. O projeto busca analisar as características de regime permanente e resposta transitória de controladores de alto desempenho projetados para sistemas *UPS* e concluir se estes controladores cumprem os requisitos estabelecidos nas normas aplicáveis. Um protótipo de *UPS* com potência nominal de 3,5 kVA é submetido aos testes previstos nas normas para avaliar o desempenho do sistema de controle de saída do inversor. Inicialmente, projeta-se um sistema de cargas lineares e não lineares acionável por computador que permite realizar adequadamente os ensaios previstos nas referidas normas. As cargas são dimensionadas conforme as especificações e acionadas através do sistema implementado utilizando a interface de prototipação para sistemas de controle dSpace DS1104. Para possibilitar uma análise mais detalhada dos resultados, os controladores ressonante e repetitivo, assim como sua atuação em paralelo, são estudados e descritos previamente a serem submetidos aos testes. São realizadas simulações computacionais do sistema, através do *software* MATLAB/Simulink e da aplicação PSIM, para possibilitar a comparação dos resultados. Por fim, o protótipo operando com o controlador ressonante é submetido aos testes para caracterização da sua resposta em regime permanente, operando a vazio e com carga plena, para análise da regulação de tensão e frequência, distorção harmônica total e razão das componentes harmônicas em relação à componente fundamental. As características da resposta dinâmica do controlador ressonante são verificadas a partir da inserção de degraus de carga linear e não linear para determinar se a resposta satisfaz os critérios estabelecidos nas normas. O sistema proposto para o acionamento das cargas mostra-se funcional, atendendo aos requisitos e proporcionando praticidade e segurança durante os ensaios. O controlador ensaiado recebe a classificação de acordo com a norma IEC 62040-3.

Palavras-chave: Fontes ininterruptas de energia. Controlador ressonante. Controlador repetitivo. Controlador paralelo ressonante-repetitivo. Nobreak. Energia alternativa. Fontes renováveis.

ABSTRACT

This work covers the performance requirements of uninterruptible power supplies according to international standards, such as CSA 813.1 and IEC 62040. The project aims to analyse the steady state characteristics and transient response of high performance controllers designed for UPS systems and conclude if these controllers fulfil the requirements expressed in the relevant standards. A UPS prototype with a nominal power ratio equal to 3.5 kVA is put under the standard tests to evaluate the performance of its output control system. Firstly, a PC controllable system of linear and non-linear loads is designed to allow performing the tests safely and correctly in accordance with the referred standards. The loads are designed within the specifications and actuated using an interface implemented on the prototyping board dSpace DS1104. To enable a detailed analysis of results, resonant and repetitive controllers, as well as their parallel implementation, are covered and described before the tests. Computational simulations of the systems are performed using the *software* MATLAB/Simulink and the tool PSIM, in order to compare the results. Then, the actual prototype running with the resonant controller is tested to evaluate its steady state response with no load and full load and analyse its voltage and frequency regulation and the Total Harmonic Distortion, as well as the ratio of each harmonic component to the fundamental. The dynamic response characteristics of the resonant controller are verified through the application of linear and non-linear step loads to determine if the response meets the standards. The proposed actuation system for the loads is fully functional and complies with the desired device, providing ease of use and safety during the tests. The controller tested is classified according to standard IEC 62040-3.

Key words: Uninterruptible power supply. Resonant controller. Repetitive controller. Resonant-repetitive controller (Parallel). Renewable energy sources. Energy storage.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Classificação das topologias de UPS	17
Figura 2 Topologia standby ou passivo	18
Figura 3 Topologia ferro ressonante.....	18
Figura 4 Topologia interativo de simples conversão.....	19
Figura 5 Topologia online de dupla conversão	20
Figura 6 Topologia conversão delta	20
Figura 7 Capacidade de armazenamento global instalada de acordo com dados de 2010	21
Figura 8 Características das diferentes tecnologias de armazenamento de energia	22
Figura 9 Distribuição da matriz energética brasileira.....	23
Figura 10 Diagrama de Bode do controlador ressonante com frequência $\omega r = 377 \text{ rad/s}$ ou 60 Hz	26
Figura 11 Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada.....	26
Figura 12 Diagrama de blocos do controlador repetitivo	28
Figura 13 Diagrama de blocos do sistema de controle repetitivo com filtro passa baixas.....	29
Figura 14 Influência da frequência de corte do filtro na resposta do controlador vista pelo Diagrama de Bode	30
Figura 15 Diagrama de blocos do controlador paralelo ressonante-repetitivo.....	31
Figura 16 Diagrama de blocos do controlador utilizando filtros complementares.....	32
Figura 17 Circuito simplificado do inversor de saída do UPS com uma carga arbitrária YO ..	32
Figura 18 Perfil de tolerância da tensão de saída da UPS de acordo com o IEEE Std 944 para qualquer aplicação de carga até a nominal	37
Figura 19 Curva para classificação de desempenho dinâmico 1 (exigido para cargas críticas sensíveis) de acordo com a norma IEC 62040-3	39
Figura 20 Curva para classificação de desempenho dinâmico 2 (aceitável para a maioria das cargas críticas) de acordo com a norma IEC 62040-3.....	39
Figura 21 Curva para classificação de desempenho dinâmico 3 (para cargas de uso geral em TI) de acordo com a norma IEC 62040-3	40
Figura 22 Forma de tensão não senoidal típica e representação das variáveis envolvidas	41
Figura 23 Carga não linear de referência.....	46
Figura 24 Protótipo de UPS com potência nominal de 3500 VA.....	48
Figura 25 Circuito de comando para o acionamento das cargas	49
Figura 26 Circuito de força para acionamento das cargas.....	50

Figura 27 Módulo de relés para interface de acionamento via computador.....	51
Figura 28 Diagrama no Simulink compilado para gerar o programa do controlador e acionamento via a dSpace.....	52
Figura 29 Lógica do bloco de acionamento da Figura 28	52
Figura 30 Interface do usuário implementado na ferramenta ControlDesk da plataforma dSpace	53
Figura 31 Quadro de comando das cargas.....	54
Figura 32 Banco de resistores fixos (a esquerda) e ajustáveis (a direita) para composição das cargas.....	55
Figura 33 Diagrama implementado no Simulink para as simulações	56
Figura 34 Circuito implementado na aplicação PSIM para as simulações	56
Figura 35 Formas de tensão e corrente de simulação a vazio	57
Figura 36 Dados experimentais do ensaio a vazio	57
Figura 37 Forma de onda de corrente e tensão no ensaio a vazio	58
Figura 38 Formas de tensão e corrente de simulação com carga linear plena.....	58
Figura 39 Ensaio experimental com carga plena linear.....	59
Figura 40 Forma de onda de corrente e tensão no ensaio de carga linear plena	59
Figura 41 Formas de tensão e corrente de simulação com carga não linear plena.....	60
Figura 42 Ensaio experimental com carga não linear plena.....	60
Figura 43 Formas de onda de tensão e corrente no ensaio com carga não linear plena	61
Figura 44 Potência e Fator de potência na simulação com carga linear.....	61
Figura 45 Valores de THD para simulação com carga linear.....	62
Figura 46 Potência e fator de potência para simulação com carga não linear.....	62
Figura 47 Valores de THD para simulação com carga não linear.....	63
Figura 48 Simulação de um degrau aditivo de carga linear correspondente a 80% da potência ativa nominal	65
Figura 49 Forma experimental de um degrau aditivo de 80% da carga linear nominal.....	65
Figura 50 Detalhe da variação do valor RMS da tensão e corrente no momento de inserção do degrau de carga.....	66
Figura 51 Simulação de um degrau subtrativo de carga linear correspondente a 80% da potência ativa nominal	66
Figura 52 Resposta experimental a um degrau subtrativo de 80% da carga linear.....	67
Figura 53 Detalhe da variação do valor RMS da tensão e corrente no momento de remoção do degrau de carga.....	67

Figura 54 Simulação de um degrau aditivo de carga não linear correspondente a 75% da potência nominal	68
Figura 55 Resposta experimental do ensaio de inserção de degrau de 75% da carga não linear	68
Figura 56 Detalhe da variação do valor RMS da tensão e corrente na inserção do degrau de carga não linear.....	69
Figura 57 Simulação de um degrau subtrativo de carga não linear correspondente a 75% da potência nominal	70
Figura 58 Resposta experimental para a remoção de 75% da carga não linear.....	70
Figura 59 Detalhe da variação do valor RMS da tensão e corrente na remoção do degrau de carga não linear.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Comparação das características de controladores considerando um sistema de avaliação de 10 pontos.....	24
Tabela 2 Níveis de tensão admissíveis por componente harmônica em redes de baixa tensão - IEC 61000-2-2	42
Tabela 3 Valores de parâmetros e componentes do protótipo.....	44
Tabela 4 Valores dos parâmetros para o controlador ressonante	44
Tabela 5 Descrição dos contadores e suas funções	50
Tabela 6 Valores de regulação de tensão e frequência observados nas simulações e ensaios ..	63
Tabela 7 Valores de distorção harmônica observados nas simulações e ensaios.....	63
Tabela 8 Valores experimentais das componentes harmônicas em relação à fundamental em cada ensaio.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

FIT – Feed-in tariff

FLC – Feed forward learning controller

IGBT – Insulated-gate bipolar transistor

PID – Proporcional, Integral e Derivativo

PWM – Pulse Width Modulation

TI – Tecnologia da Informação

THD – Total harmonic distortion

UPS – Uninterruptible power supply

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	15
2.2	TOPOLOGIAS DOS SISTEMAS <i>UPS</i>	16
2.3	TÓPICOS SOBRE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	21
2.4	SISTEMA DE CONTROLE DO <i>UPS</i>	23
2.4.1	Controlador ressonante	25
2.4.2	Controle repetitivo	28
2.4.3	Controlador paralelo ressonante-repetitivo	30
2.4.4	Aplicação dos controladores ao <i>UPS</i>	32
2.5	NORMAS APLICÁVEIS A <i>UPS</i>	33
2.5.1	Normas Brasileiras	34
2.5.2	Normas internacionais	35
3	SIMULAÇÕES E ENSAIOS	43
3.1	DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO	43
3.2	PARAMETRIZAÇÃO DOS CONTROLADORES	44
3.3	DIMENSIONAMENTO DAS CARGAS	45
3.3.1	Carga linear.....	45
3.3.2	Carga não linear.....	45
3.4	IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA.....	48
3.4.1	Dimensionamento do circuito de acionamento	48
3.4.2	Interface computacional	51
3.4.3	Montagem do quadro de comando e cargas	53
3.5	ENSAIOS, SIMULAÇÕES E CLASSIFICAÇÃO DO <i>UPS</i>	55
4	CONCLUSÃO	72
	REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

Com a crescente busca por fontes alternativas e renováveis de energia e a tendência de pequenos sistemas de mini e micro geração serem interligados à rede de distribuição, possibilitando a implementação de mecanismos como *feed-in tariff*, torna-se necessário aumentar a confiabilidade e qualidade da energia suprida por estes sistemas. A característica intrínseca das fontes renováveis de energia serem intermitentes faz com que seja necessária a utilização de sistemas que possibilitem atender a estes requisitos de confiabilidade e qualidade de energia, como sistemas de armazenamento. Além de dispositivos de proteção para sistemas de tecnologia da informação, as fontes ininterruptas de energia, conhecidas como *UPS* ou *nobreaks*, são dispositivos projetados para fornecer tensão e corrente elétrica com alta qualidade e confiabilidade a partir de um dispositivo de armazenamento de energia durante falhas no fornecimento de energia elétrica. Este trabalho pretende analisar as normas aplicáveis aos *UPS*, implementando o sistema de cargas lineares e não lineares necessário e os testes previstos para avaliação de desempenho dos controladores utilizados em um protótipo de uma *UPS* comercial.

Inicialmente, faz-se uma revisão teórica abordando as aplicações de sistemas *UPS*, seu funcionamento, as possíveis topologias, assim como a topologia do protótipo submetido aos testes. Os controladores ressonante, repetitivo e paralelo ressonante-repetitivo são estudados e analisados para comparação de desempenho através dos testes.

Normas e padrões aplicáveis aos sistemas *UPS* são estudadas e um sistema de referência acionável por computador é implementado de acordo com as prescrições. O dimensionamento das cargas é feito de acordo com o que estabelece as normas para o protótipo a ser submetido aos testes, com potência nominal aparente de 3,5 kVA e fator de potência nominal 0,7. O desempenho do sistema ensaiado com o controlador ressonante é avaliado em regime permanente e regime transitório, de acordo com os requisitos estabelecidos nas normas aplicáveis. O sistema deve atender às condições de regulação estática da tensão de saída, desempenho dinâmico para variações de carga e distorção harmônica total e por componente.

Para possibilitar a comparação dos resultados obtidos, são realizadas simulações no *software* MATLAB/Simulink, utilizando a aplicação PSIM.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com a ascensão da tecnologia da informação e dos sistemas digitais, tornou-se necessário implementar dispositivos capazes de fornecer energia elétrica com a confiabilidade adequada a estes equipamentos, seja garantindo a qualidade da energia proveniente da rede de distribuição pública de energia elétrica, seja durante faltas na fonte primária de energia. Esta tornou-se a principal aplicação de sistemas *UPS*, capazes de fornecer energia controlada enquanto a fonte primária de energia estiver dentro de determinados limites de operação e servir como fonte de alimentação de *backup* durante faltas na alimentação primária por alguns minutos ou até mesmo por muitas horas [1].

Além da tecnologia da informação, a crescente utilização de fontes de energia alternativas e renováveis desperta a necessidade de métodos de armazenamento de energia similares a um sistema *UPS*. Fontes de energia renováveis tem por característica natural sua intermitência: a força do vento, a intensidade solar ou a força das ondas do mar não são constantes no decorrer do dia [2]. Com a tendência de pontos de mini e micro geração serem interligados à rede pública de energia elétrica, utilizando o modelo chamado *feed-in tariff (FIT)*, sistemas de armazenamento podem garantir a disponibilidade desta energia quando a energia gerada instantaneamente não é capaz de suprir a demanda da rede [3].

Sistemas de armazenamento de energia atuais utilizam diversas maneiras de conversão da energia elétrica em outra forma de energia armazenável, como energia cinética, potencial ou química, por exemplo. Além das baterias, comuns aos nobreaks residenciais, sistemas de maior porte utilizam *flywheels*, reservatórios de água elevados, células combustíveis, ar comprimido, energia térmica, energia magnética em supercondutores, ultracapacitores, etc. [4] [5]. A capacidade instalada global de armazenamento é de aproximadamente 135 GW, o que representa somente 3% da capacidade de geração de energia elétrica [6] [7]. Isto deve-se principalmente ao elevado custo destes sistemas de armazenamento.

Um estudo do Banco BCG publicado em 2011 [8] mostra a crescente expansão do mercado de armazenamento de energia, apontando oportunidades de investimento na área. Esta expansão deve-se especialmente à inclusão das fontes renováveis nos sistemas de energia elétrica. A expansão das redes de transmissão permitindo a interligação elétrica entre regiões facilita a troca de energia entre fontes em uma tentativa de aproveitar instantaneamente a

energia gerada, porém o banco considera as tecnologias de armazenamento de energia a chave para tornar possível a utilização de fontes renováveis de energia elétrica em grande escala ao redor do mundo.

Dependendo da tecnologia de armazenamento de energia, as características elétricas variam, porém o sistema *UPS* deve garantir a confiabilidade e qualidade da energia na sua saída. Apesar de estudos defenderem a utilização de alimentação por corrente contínua em residências e construções, apresentando vantagens em relação à tradicional instalação por corrente alternada e conversão para CC de acordo com a necessidade de cada equipamento terminal, ainda não há tendência de se adotar este padrão [9] [10]. A conexão com a rede pública de distribuição CA exige o atendimento de requisitos de desempenho e sincronismo, entretanto, atualmente não conta com normas ou padrões específicos, cabendo às empresas responsáveis pela distribuição estabelecer os critérios e exigências para este tipo de conexão [11]. Portanto, os *UPS* devem fazer a conversão de tensão do sistema de armazenamento de energia, geralmente CC para CA, mantendo as características elétricas desejadas, usualmente as mesmas características nominais da fonte primária de energia, com qualidade e confiabilidade.

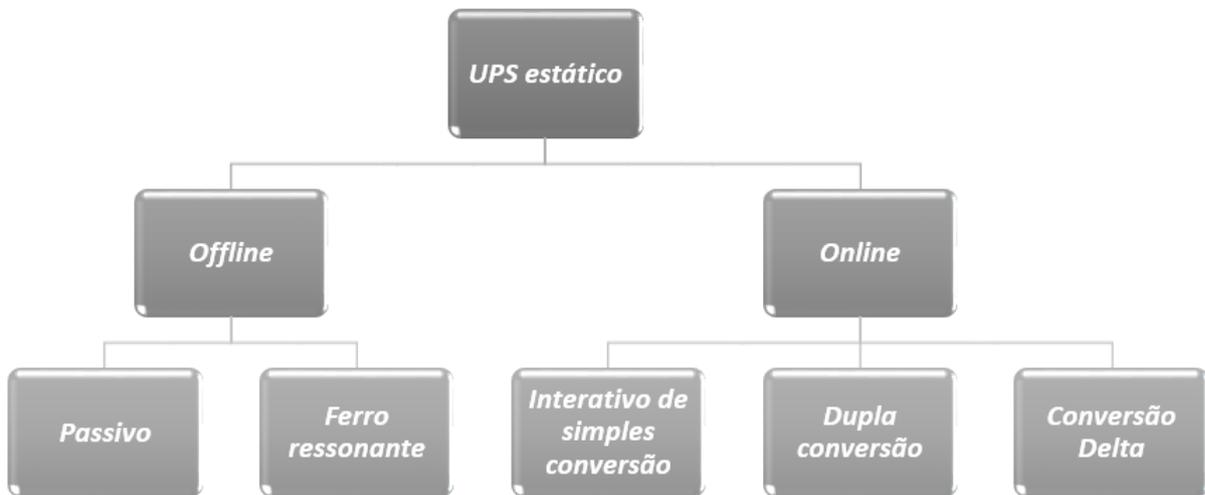
Equipamentos *UPS* estão sujeitos às exigências estabelecidas nas normas internacionais IEC 62040 e IEEE Std 944. No Brasil, a norma ABNT NBR 15014 aplicável aos *UPS* limita-se a tratar da terminologia empregada e apresentar as principais topologias dos chamados nobreaks. Já a NBR 15204 aplica-se apenas a nobreaks com potência nominal de até 3 kVA. De acordo com estas normas, o sistema de controle da *UPS* deve atuar de modo a atender aos requisitos de estabilidade, qualidade e confiabilidade ao buscar uma saída senoidal com frequência e valor *RMS* equivalentes à fonte primária de energia, baixa distorção harmônica e com rejeição a perturbações. Neste trabalho, busca-se avaliar se estas características são obtidas com a utilização do controlador ressonante que será detalhado a seguir e comparado aos controladores repetitivo e paralelo ressonante-repetitivo.

2.2 TOPOLOGIAS DOS SISTEMAS *UPS*

Existem diversas topologias de *UPS*, que se diferenciam basicamente pela sua interação com a fonte primária de energia. Enquanto algumas topologias fornecem isolação da carga em relação à rede, sendo alimentadas diretamente pelo *UPS*, outras alimentam a carga somente em caso de falha da fonte primária de energia. Estas topologias podem ser classificadas como *online* e *offline* e subdivididas conforme a Figura 1. Além dos *UPS* estáticos, existem *UPS* que

utilizam elementos rotativos, como motores e geradores, para desempenhar a função do inversor e retificador. Com a evolução da eletrônica de potência, este tipo de *UPS* passou a ser menos utilizado [5] [12].

Figura 1 Classificação das topologias de *UPS*



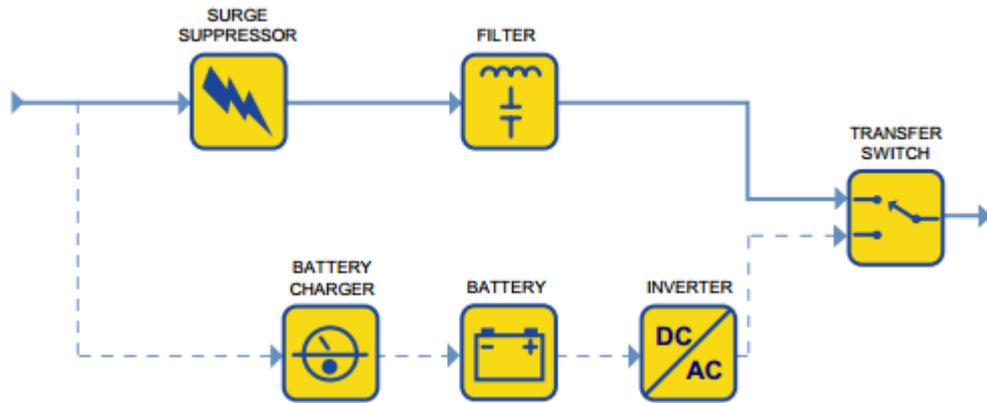
Fonte: [5]

Offline:

Standby ou passivo – O inversor é conectado à carga somente em caso de falta. O chaveamento demora em torno de $\frac{1}{4}$ de ciclo, sendo suficiente para a maioria das aplicações. Apesar do baixo custo, sua aplicação é limitada a potências inferiores a 2 kVA, devido ao seu fraco desempenho com cargas não lineares, ausência de regulação de tensão e isolamento entre a carga e a fonte primária [5]. A Figura 2 apresenta a configuração típica deste tipo de *UPS*.

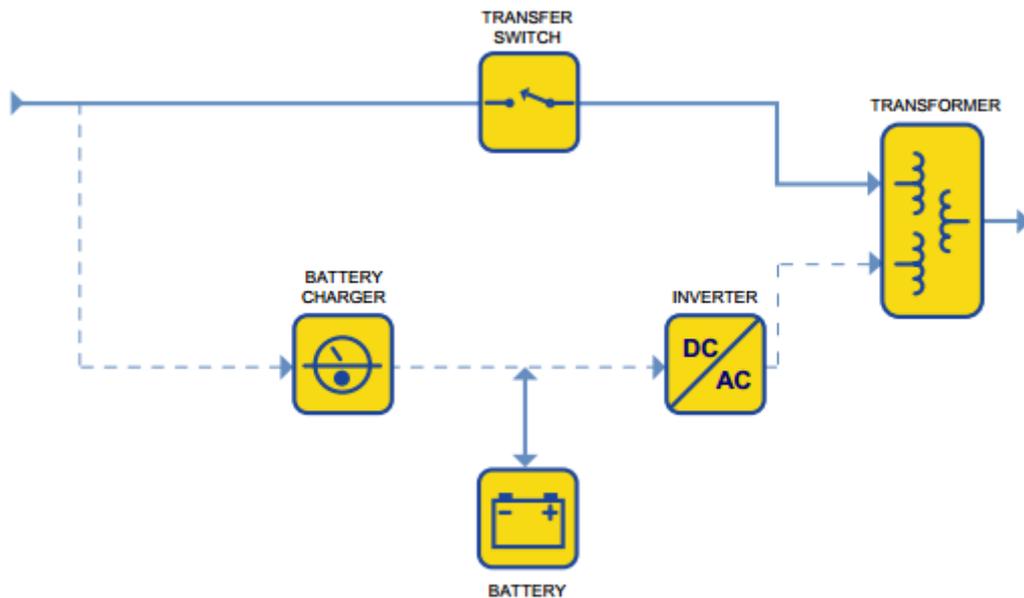
Ferro ressonante – Utiliza um transformador ferro-ressonante com um circuito tanque, capaz de manter a regulação da tensão de saída, prover isolamento da carga e atuar filtrando ruídos da rede e a ação de harmônicas. No momento do chaveamento, o transformador é capaz de manter a alimentação da carga por até $\frac{1}{2}$ ciclo de rede, através de seu circuito tanque. Sua desvantagem é a elevada perda de energia devido a efeitos de perda por histerese no núcleo do transformador, assim como sua intolerância a variações de frequência [13] [5]. A Figura 3 mostra um exemplo desta topologia.

Figura 2 Topologia standby ou passivo



Fonte: [13]

Figura 3 Topologia ferro ressonante



Fonte: [13]

Online:

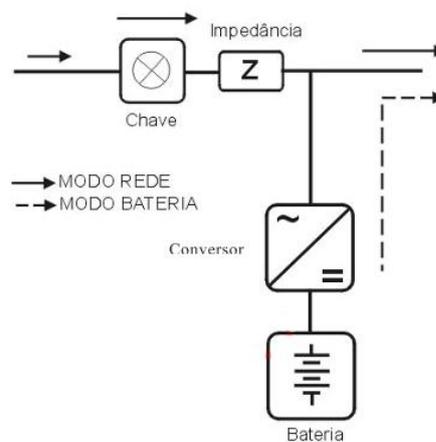
Interativo de simples conversão – Seu funcionamento é similar ao dos *UPS offline*, porém no nobreak interativo convencional o inversor não está completamente *offline* quando operando em modo rede, mas conectado à saída do *UPS* e operando em reverso enquanto a rede primária apresenta características satisfatórias, carregando a bateria. Em caso de falha na rede primária, a bateria fornece energia à carga conectada. A Figura 4 apresenta uma configuração

típica desta topologia. O tempo de chaveamento é inferior ao dos sistemas *offline*. É a topologia mais utilizada para potências entre 500 VA e 5 kVA, devido ao baixo custo e alta eficiência. [5] [14]

Dupla conversão – Nesta topologia, conforme pode-se observar na Figura 5, a carga é sempre alimentada através do inversor, operando em um sistema de dupla conversão, ou seja, o retificador converte a energia de CA para CC, carregando a bateria e alimentando o inversor, que converte novamente de CC para CA. Quando ocorre uma falha na fonte primária de energia, a bateria e o inversor mantêm a continuidade da energia para a carga. É a topologia mais comum para *UPS* de potência nominal maior que 10 kVA. Não apresenta tempo de transição do modo rede para o modo bateria, possui boa regulação de tensão e frequência de saída, com grande tolerância a variações na entrada, porém apresenta alta *THD* na entrada e baixo fator de potência devido à retificação e perda de energia na dupla conversão. [5] [13]

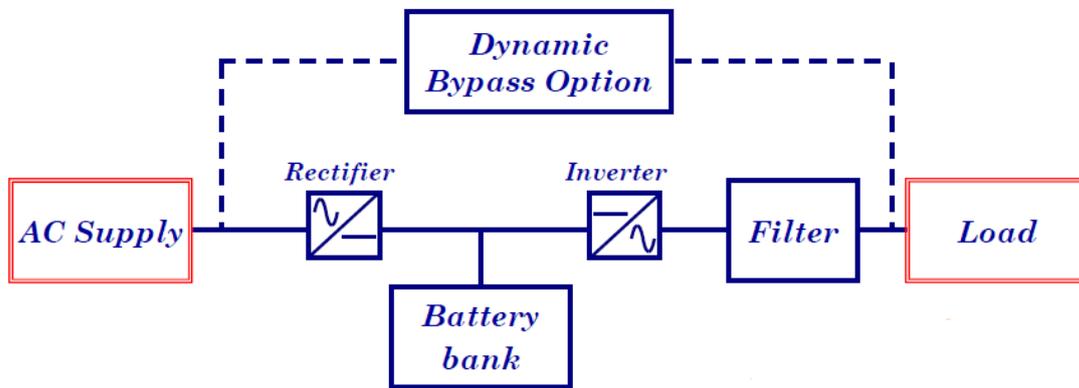
Conversão Delta – Topologia desenvolvida recentemente, buscando solucionar as desvantagens encontradas nas outras topologias de *UPS*. O termo Delta remete à variação e se deve ao fato desta topologia compensar a diferença entre entrada e saída para obter a saída desejada. A Figura 6 ilustra este tipo de *UPS*. Disponível em potências nominais entre 5 kVA e 2 MVA, em caso de falha na fonte primária opera de maneira idêntica ao *UPS* de dupla conversão. Minimiza a *THD* inserida pela retificação, oferece controle do fator de potência e aumenta a eficiência, utilizando energia diretamente da entrada durante a operação no modo rede. Esta tecnologia é protegida por patentes, portanto não está disponível em uma grande gama de fabricantes. [5] [15] [13]

Figura 4 Topologia interativo de simples conversão



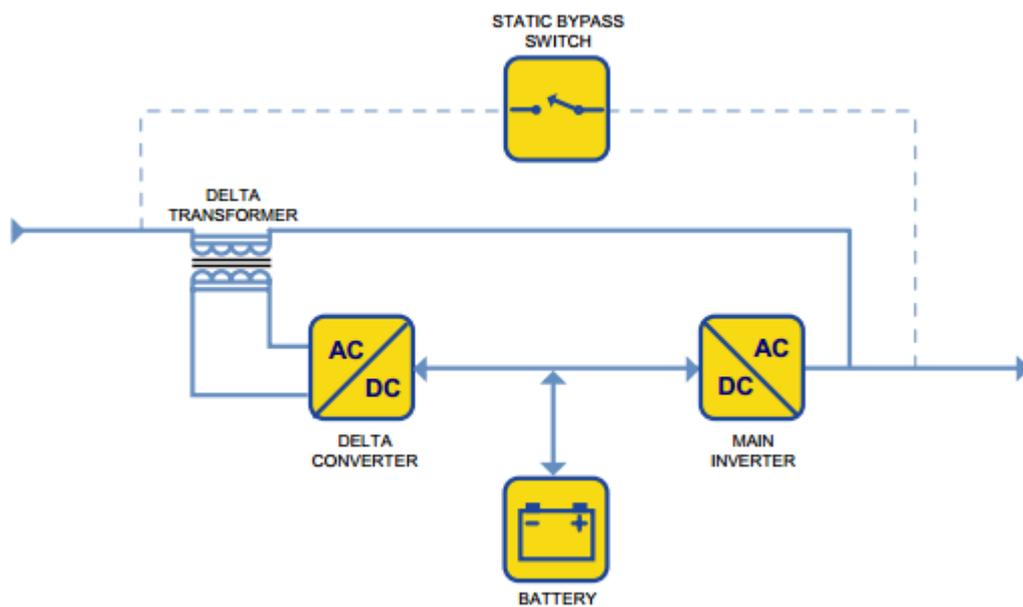
Fonte: [14]

Figura 5 Topologia online de dupla conversão



Fonte: [5]

Figura 6 Topologia conversão delta



Fonte: [13]

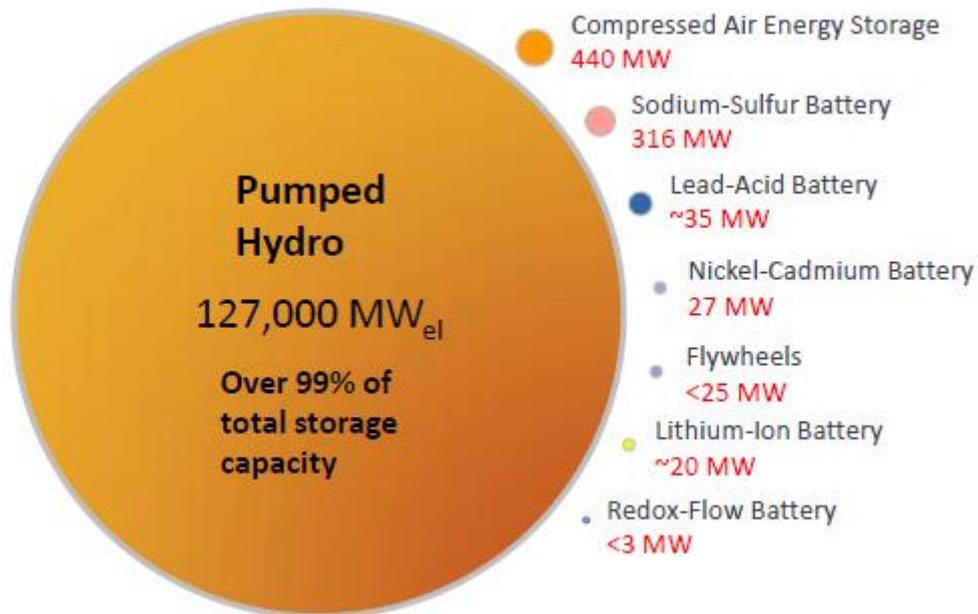
O protótipo utilizado durante os testes neste trabalho utiliza a topologia de dupla conversão, com potência nominal de 3,5 kVA e fator de potência nominal 0,7, podendo suprir 2450 W de potência ativa na saída. Estes são os valores considerados para implementação dos testes previstos nas normas consultadas.

2.3 TÓPICOS SOBRE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Os sistemas de armazenamento de energia se baseiam na utilização de outras formas de energia, seja ela química, cinética, potencial, etc., para armazenar energia que posteriormente será convertida em eletricidade. Esta energia armazenada pode ser usada principalmente no suprimento de picos de demanda de eletricidade; no balanceamento de energia e flutuações de demanda; como forma de adiar a expansão da estrutura da rede de transmissão; e na conexão de fontes renováveis com a rede elétrica. Ainda, sistemas de armazenamento de energia são a base dos sistemas *UPS* e do desenvolvimento de veículos elétricos. [16]

Devido a sua importância na busca pela utilização de energias renováveis, sistemas de armazenamento estão em crescente expansão, porém o custo destes sistemas ainda é alto quando comparado ao custo de uma usina de gás natural, que pode prestar serviços similares, por exemplo [8]. A Figura 7 mostra um gráfico da capacidade de armazenamento global instalada para energia elétrica. Esta capacidade representa apenas 3% da capacidade de geração de energia elétrica no mundo e mais de 99% do sistema é baseado em reservatórios elevados de água [7].

Figura 7 Capacidade de armazenamento global instalada de acordo com dados de 2010



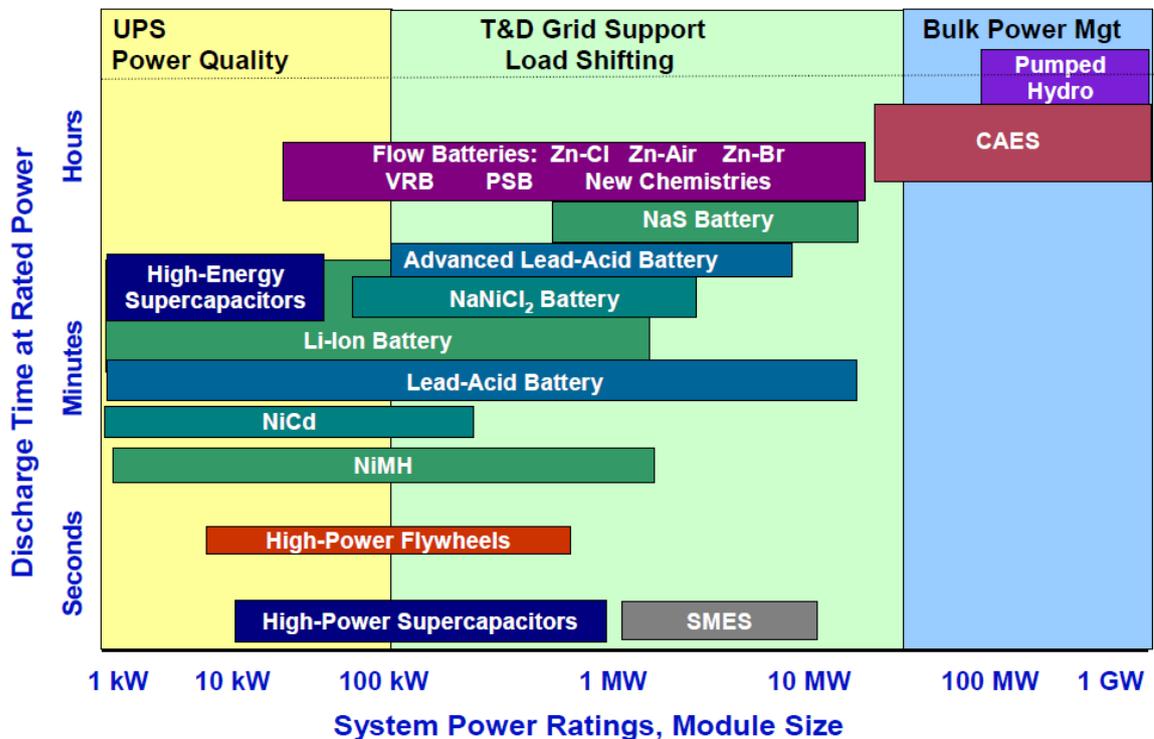
Fonte: [6]

A Figura 8 demonstra a diversidade de sistemas de armazenamento e sua principal utilização, baseado no tempo de descarga e potência nominal. Entre as principais tecnologias utilizadas, pode-se destacar reservatórios hidráulicos, ar comprimido (*Compressed air energy*

storage, CAES), baterias recarregáveis (NiCa, NaS, NiMH, Li-ion, etc.), energia térmica, células de hidrogênio, flywheels, supercapacitores, células combustível e energia magnética em materiais supercondutores (*Superconducting magnetic energy storage, SMES*).

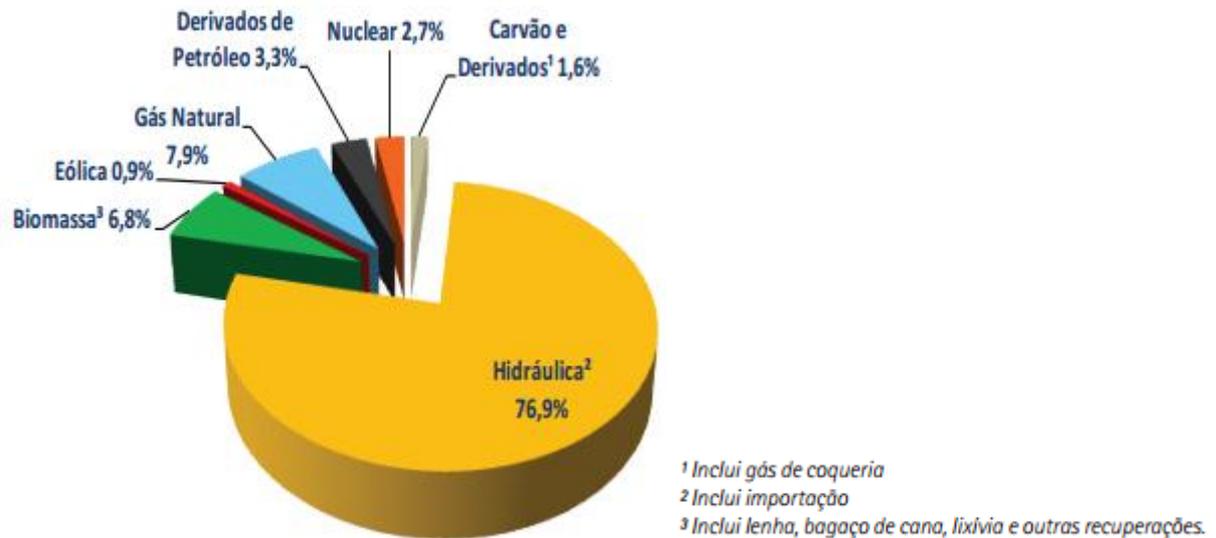
Analisando a matriz energética brasileira apresentada na Figura 9, nota-se que mais de 70% da energia elétrica depende das hidrelétricas, enquanto as demais energias alternativas renováveis representam uma parcela inferior a 8% do total. Com a crise energética que o Brasil tem enfrentado em 2014 a partir da redução drástica no nível dos reservatórios e previsão de aumentos significativos nas tarifas de energia elétrica [17] [18], fica clara a dependência da energia das hidrelétricas no país e a necessidade de investimento em outras fontes de energia, com consequente investimento em sistemas de armazenamento de energia. O sistema energético de um país reflete diretamente na sua economia e é ponto crucial para atrair investimentos. Recentemente, por exemplo, a Alcoa, líder mundial em engenharia e produção de metais leves, anunciou que a unidade brasileira tem o maior gasto com energia de todas as suas unidades ao redor do mundo e analisou abandonar sua atividade no Brasil [17] [18].

Figura 8 Características das diferentes tecnologias de armazenamento de energia



Fonte: [6]

Figura 9 Distribuição da matriz energética brasileira



Fonte: [19]

Cada um dos métodos de armazenamento de energia apresentados deve ter sua energia convertida em eletricidade atendendo requisitos de qualidade e confiabilidade conforme a aplicação a que se destina. Apesar de não haver uma norma ou padrão internacional para o teste de equipamentos para armazenamento de energia e integração destes equipamentos com a rede elétrica, normas e padrões encontram-se em desenvolvimento [11] [20]. O padrão IEEE “P2030.3 - *Standard for Test Procedures for Electric Energy Storage Equipment and Systems for Electric Power Systems Applications*” está em desenvolvimento juntamente com o Protocolo “PNNL-22010 – *Protocol for Uniformly Measuring and Expressing the Performance of Energy Storage Systems*” e buscam atender à necessidade de uma norma internacional voltada para os equipamentos de armazenamento de energia. É neste ponto que este tópico encontra-se com o escopo deste trabalho, devido à semelhança entre os sistemas de controle e requisitos de desempenho necessários aos *UPS* e aos equipamentos de armazenamento de energia para que possam ser conectados à rede pública de distribuição.

2.4 SISTEMA DE CONTROLE DO *UPS*

Os clássicos controladores Proporcional, Integral e Derivativo, conhecidos como PID, ainda são os mais utilizados na indústria, devido a sua simplicidade e baixo custo, sendo responsáveis por mais de 90% dos sistemas de controle de malha fechada encontrados na indústria [21]. Entretanto, outros métodos de controle se mostraram mais atrativos para

aplicação em sistemas *UPS*. Por exemplo, uma versão modificada do controlador PID, utilizando uma malha de controle interna PD, responsável pela resposta dinâmica, e outra malha externa PI, responsável pela regulação estática, foi desenvolvida para este tipo de aplicação, apresentando bom comportamento em regime permanente, mas incapaz de rejeitar distorções harmônicas e com baixo desempenho transitório [24].

Com o objetivo de aprimorar estes resultados, outros métodos de controle para sistemas *UPS* foram estudados e desenvolvidos. Exemplos de métodos de controle para *UPS* monofásico podem ser classificados em [22]:

- 1) Controladores baseados em modelo com *feedback* instantâneo – controladores *deadbeat* e *multi-loop* (cascata);
- 2) Controladores *feedforward* – controladores repetitivos e de aprendizado iterativo;
- 3) Controladores não lineares – controladores de modos deslizantes, controladores adaptativos e controladores baseados em redes neurais artificiais.

Dependendo do tipo de implementação (analógica ou digital), requisitos de desempenho e simplicidade, há um método de controle mais adequado, como ilustrado na Tabela 1 através de um sistema de avaliação crescente de 10 pontos, onde 10 corresponde a “Muito satisfatório” [22]. Neste trabalho, o controlador ressonante é ensaiado e comparado a resultados computacionais.

Tabela 1 Comparação das características de controladores considerando um sistema de avaliação de 10 pontos

Característica Controlador	Desempenho em regime permanente	Desempenho dinâmico	Facilidade de aplicação	Construção mais usual	Número mínimo de sensores
Cascata	8	8	5	Analógico	2
Controlador <i>feedforward</i> com aprendizado (FLC)	10	3	5	Digital	1
FLC combinado com um controlador rápido	10	6-10	3-5	Digital	1
Controlador de modos deslizantes	6	8	3-5	Analógico ou Digital	1
Redes Neurais	10	10	2	Analógico ou Digital	2

Fonte: [22]

2.4.1 Controlador ressonante

O controlador proporcional-ressonante (PR) pode ser obtido através do princípio do modelo interno, publicado em 1976 por Francis e Wonham, que estabelece que, considerando um sistema estável em malha fechada, se os modos da referência e da perturbação estão presentes na malha fechada de controle, é assegurado seguimento de referência e rejeição de perturbações com erro nulo. Portanto, para um sinal de referência periódico que pode ser decomposto em componentes senoidais (harmônicas), o controlador deve ter um par de polos no eixo imaginário para cada uma das frequências das harmônicas que se deseja seguir ou rejeitar. Assim, para seguir um sinal senoidal de frequência ω_r , o sistema deve conter em sua função de transferência de malha aberta o componente mostrado em (2.1) [12] [23].

$$C_{PR}(s) = \frac{1}{s^2 + \omega_r^2} \quad (2.1)$$

O controlador PR substitui o controlador PI em aplicações que utilizam sinais senoidais, pois o controlador PI é incapaz de seguir referências senoidais com erro nulo em regime permanente e apresenta baixa rejeição a perturbações de natureza periódica. O ganho proporcional do controlador PR é ajustado da mesma maneira que para o controlador PI, portanto, por simplicidade e sem perda de generalidade na análise do controlador, considera-se somente a parte ressonante. Analisando o diagrama de Bode mostrado na Figura 10, pode-se notar a característica de ganho infinito na frequência ω_r do controlador ressonante. Devido ao ganho infinito inserido na frequência fundamental, assegurada a estabilidade do sistema em malha fechada, o controlador PR é capaz de alcançar o seguimento assintótico de referências senoidais com erro nulo em regime permanente e na rejeição de perturbações com esta frequência.

Supondo o sistema estável em malha fechada, ou seja, com todos os polos contidos no semiplano esquerdo aberto do plano complexo, o Teorema do Valor Final, exposto na equação (2.2) é válido [24]. Considerando o sistema de controle em malha fechada da Figura 11, onde $C(s)$ representa o controlador, $G(s)$ o processo, $R(s)$ o sinal de referência, $E(s)$ o erro de seguimento, $D(s)$ a perturbação e $Y(s)$ o sinal de saída, pode-se obter as funções de transferência apresentadas em (2.3), (2.4) e (2.5).

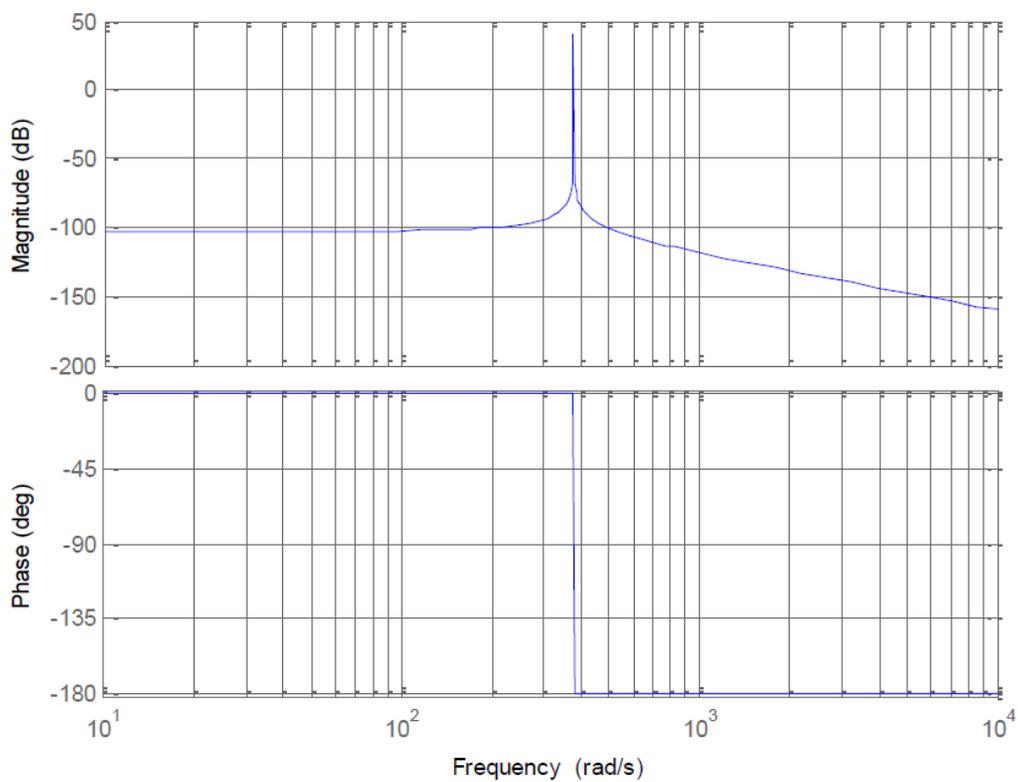
$$E(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s E(s) \quad (2.2)$$

$$T_R(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} = \frac{1}{\frac{1}{C(s)G(s)} + 1} \quad (2.3)$$

$$T_D(s) = \frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G(s)}{1 + C(s)G(s)} \quad (2.4)$$

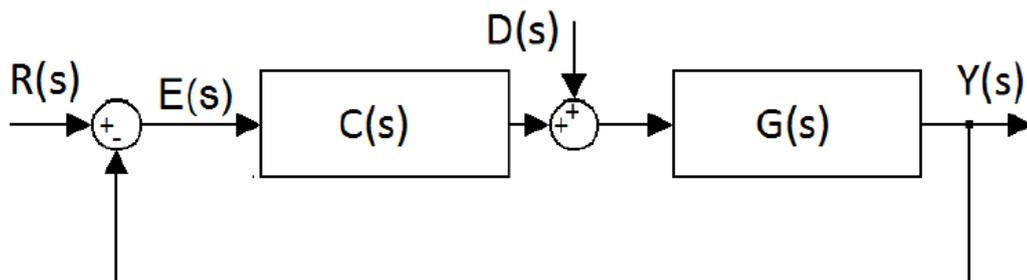
$$E(s) = \frac{G(s)}{1 + C(s)G(s)} R(s) \quad (2.5)$$

Figura 10 Diagrama de Bode do controlador ressonante com frequência $\omega_r = 377$ rad/s ou 60 Hz



Fonte: Diagrama de Bode gerado pelo autor no *software* MATLAB

Figura 11 Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada



Fonte: [12]

Através destas funções, pode-se demonstrar o comportamento do sistema para o controlador ressonante descrito matematicamente em (2.1) e um sinal senoidal com frequência $\pm j\omega_0$. Os resultados estão resumidos nas equações (2.6), (2.7) e (2.8), onde $|C_{PR}(j\omega_0)G(j\omega_0)| \rightarrow \infty$.

$$|T_R(j\omega_0)| = \left| \frac{C_{PR}(j\omega_0)G(j\omega_0)}{1 + C_{PR}(j\omega_0)G(j\omega_0)} \right| \rightarrow 1 \quad (2.6)$$

$$|T_D(j\omega_0)| = \left| \frac{G(j\omega_0)}{1 + C_{PR}(j\omega_0)G(j\omega_0)} \right| \rightarrow 0 \quad (2.7)$$

$$E(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{G(s)}{1 + C_{PR}(s)G(s)} R(s) = 0 \quad (2.8)$$

O erro nulo em regime permanente é demonstrado pelo valor de $|T_R(j\omega_0)| \rightarrow 1$, indicando que o sinal de referência nesta frequência será replicado na saída do sistema. Já o valor de $|T_D(j\omega_0)| \rightarrow 0$ significa que a contribuição da perturbação na saída do sistema é nula, comprovando a rejeição a perturbações. O Teorema do Valor Final aplicado em $E(\infty) = 0$ confirma o erro nulo na saída em regime permanente.

Para tornar o sistema estável, insere-se dois zeros no semiplano esquerdo do plano complexo devido aos dois polos imaginários. A equação (2.9) mostra a função de transferência do controlador ressonante resultante.

$$C_{PR}(s) = \frac{\delta_2 s^2 + \delta_1 s + \delta_0}{s^2 + \omega_r^2} \quad (2.9)$$

Uma limitação do controlador ressonante prontamente notada é sua aplicação em sinais com conteúdo harmônico extenso, pois necessita-se muitos modos, ou seja, muitos elementos como o apresentado em (2.1), cada um dimensionado para alocar o modo ressonante em uma frequência específica, tornando sua implementação pouco prática. Uma alternativa é inserir os modos considerando apenas as harmônicas com maior contribuição no sinal, porém esta estratégia resulta em um erro de seguimento devido às harmônicas não compensadas [28]. Para sinais periódicos genéricos, que podem ser representados em uma série de Fourier com infinitas harmônicas, os controladores repetitivos apresentam vantagens em relação aos controladores ressonantes, como será abordado a seguir.

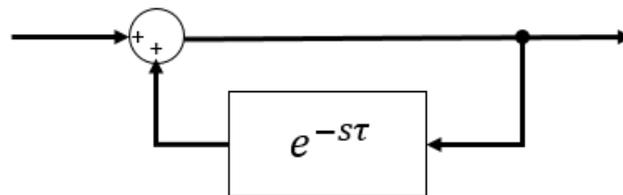
2.4.2 Controle repetitivo

Assim como o controlador ressonante, o controlador repetitivo baseia-se no princípio do modelo interno e foi desenvolvido com o objetivo de seguir ou rejeitar sinais periódicos arbitrários com erro nulo em regime permanente. Foi proposto em 1981 pelos cientistas japoneses Inoue, Iwai e Nakano em um congresso da IFAC (*International Federation of Automatic Control*) em Kyoto, como um método de controle de precisão para a fonte de alimentação magnética de um sincrotron de prótons, considerando a periodicidade do sinal de referência. O conceito básico é fazer com que o sistema “aprenda” a seguir a referência realimentando o sinal de erro no controlador a cada período [25] [12].

Pelo princípio do modelo interno, para ser capaz de seguir qualquer sinal periódico de período τ , o controlador precisa conter o modo do sistema capaz de gerar qualquer um destes sinais. Pode-se provar, através de expansão em Série de Fourier, que o sistema com esta característica deve apresentar polos em $\frac{2n\pi j}{\tau}$, onde n é um número inteiro e j representa a variável complexa $\sqrt{-1}$. A realização mínima deste sistema é a equação mostrada em (2.10). A Figura 12 mostra o diagrama de blocos que resulta na equação mostrada em (2.10).

$$C_{RC} = \frac{1}{e^{\tau s} - 1} \quad (2.10)$$

Figura 12 Diagrama de blocos do controlador repetitivo



Fonte: [26]

Substituindo $s = j\omega$ e utilizando a identidade de Euler mostrada em (2.11) na equação (2.10), obtém-se

$$e^{jx} = \cos(x) + j\text{sen}(x) \quad (2.11)$$

$$C_{RC}(j\omega) = \frac{1}{\cos(\omega\tau) + j\text{sen}(\omega\tau) - 1} \quad (2.12)$$

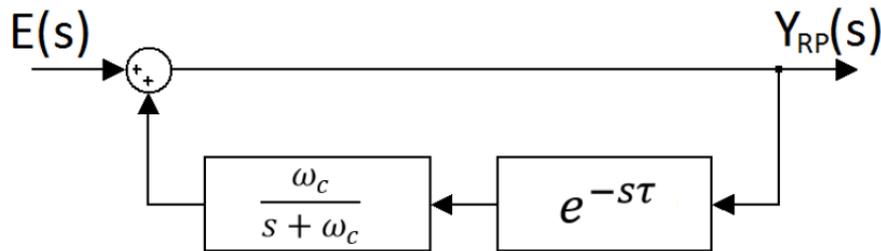
A partir de (2.12) fica clara a localização dos polos em $\omega = \frac{2n\pi}{\tau}$, para $n = 1, 2, 3, \dots$, sabendo que $\cos(2n\pi) = 1$ e $\text{sen}(2n\pi) = 0$, fazendo com que o denominador da equação resulte em zero e o controlador apresente amplitude infinita nestas frequências. Assumindo o sistema estável em malha fechada, obtém-se erro de seguimento nulo em regime permanente e rejeição de quaisquer distúrbios com período fundamental τ , independente do conteúdo harmônico associado.

A estabilidade do controlador é impraticável devido aos infinitos polos inseridos no eixo imaginário, o que exige a inserção de infinitos zeros no semiplano esquerdo do plano s para possibilitar sua estabilidade. Uma alternativa para solucionar este problema é a inclusão de um filtro passa baixas em série com o elemento de atraso $e^{-s\tau}$ [31], porém resulta na perda do modo interno exato do controlador e limita sua efetividade em aplicações de alta frequência.

A equação do filtro passa baixas de primeira ordem a ser inserido no sistema é apresentada em (2.13). A Figura 13 mostra o diagrama de blocos do controlador resultante.

$$Q(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (2.13)$$

Figura 13 Diagrama de blocos do sistema de controle repetitivo com filtro passa baixas

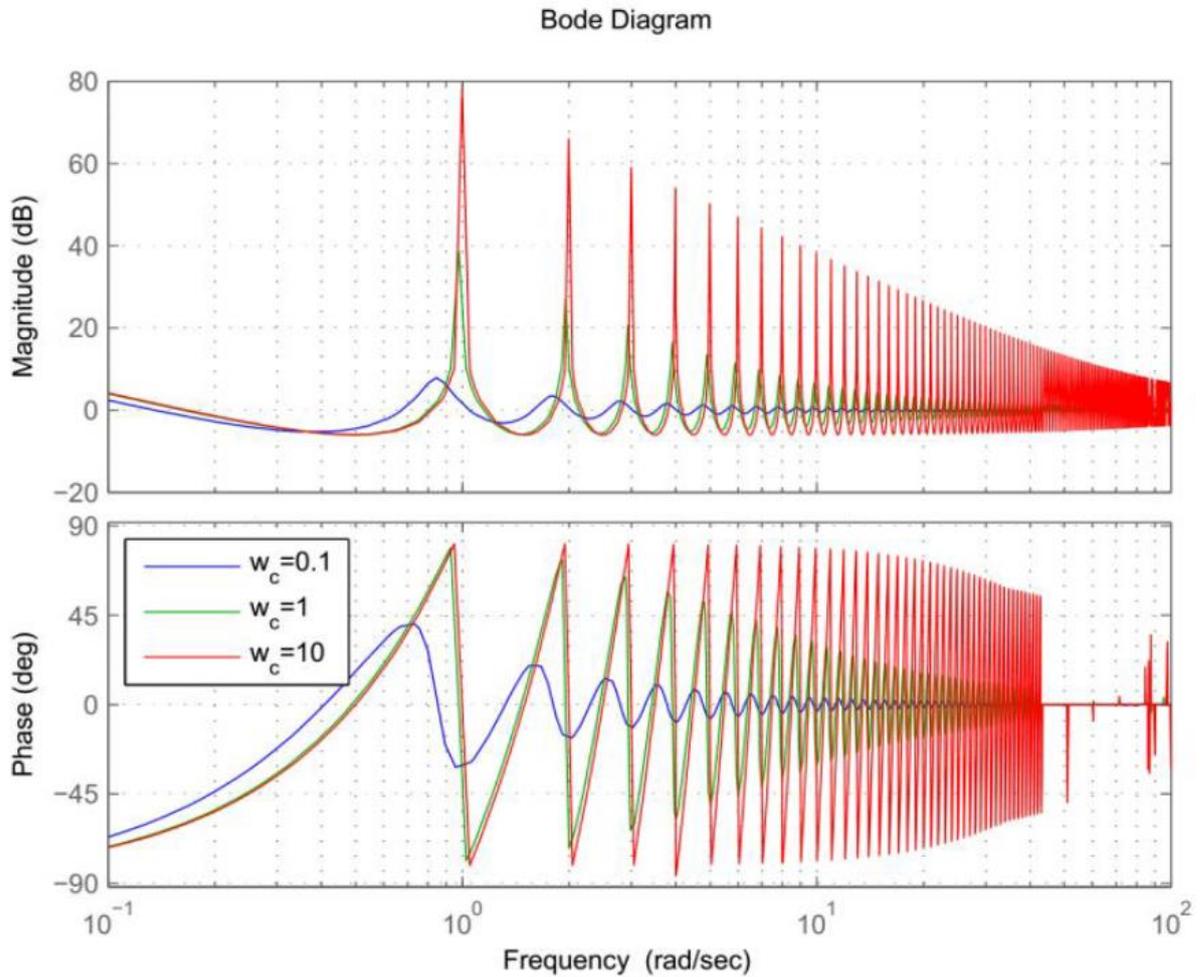


Fonte: [12]

A função de transferência do controlador com o filtro é mostrada na equação (2.14). A inserção do filtro traz a estabilidade necessária ao controlador, porém a amplitude do sinal de controle passa a ter valor finito para frequências mais altas, limitando sua capacidade de atuação em sinais com conteúdo harmônico de frequência elevada. O seu desempenho é dependente, agora, da frequência de corte do filtro [27]. Estas características podem ser observadas no Diagrama de Bode do controlador com filtro, apresentado na Figura 14.

$$C_{RC}(s) = \frac{1}{1 - \frac{\omega_c}{s + \omega_c} e^{-s\tau}} \quad (2.14)$$

Figura 14 Influência da frequência de corte do filtro na resposta do controlador vista pelo Diagrama de Bode



Fonte: [27]

A frequência de corte do filtro passa baixas influencia tanto no erro de seguimento em regime permanente quanto na velocidade de resposta do sistema. Uma frequência de corte menor afasta os polos do eixo imaginário, resultando em mais rapidez e maior erro em regime permanente. Aumentando a frequência de corte, os polos se aproximam do eixo imaginário, o sistema torna-se mais lento, porém o erro de seguimento em regime diminui. Portanto, a escolha correta da frequência de corte do filtro é importante para cumprir os requisitos de desempenho do controlador.

2.4.3 Controlador paralelo ressonante-repetitivo

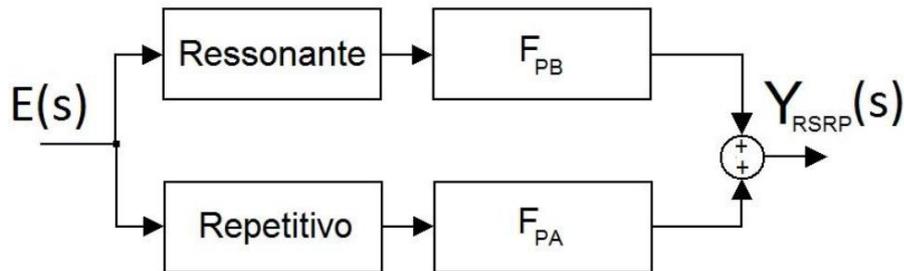
O controlador paralelo ressonante-repetitivo foi proposto com o objetivo de associar o bom desempenho em transitórios e resposta rápida do controlador ressonante com a capacidade de rejeição de perturbações com extenso conteúdo harmônico proporcionada pelo controlador repetitivo. Na topologia associativa destes controladores, o desempenho dinâmico e o

seguimento com erro nulo em regime de sinais de referência ficam a cargo do controlador ressonante, enquanto que a rejeição de distúrbios causados pelas harmônicas resultantes da presença de cargas não lineares na rede, por exemplo, fica a cargo do controlador repetitivo [12].

Para evitar a interferência de um controlador na ação do outro, foi proposta a utilização de filtros, limitando a atuação do controlador ressonante à frequência fundamental e do controlador repetitivo às frequências múltiplas da fundamental. Por simplicidade, faz-se com que os filtros sejam complementares, como proposto na equação (2.14) [33], abrangendo toda a gama de frequências de atuação do controlador. A Figura 15 mostra o diagrama de blocos desta configuração do controlador paralelo ressonante-repetitivo.

$$F_{PB}(s) + F_{PA}(s) = 1 \quad (2.15)$$

Figura 15 Diagrama de blocos do controlador paralelo ressonante-repetitivo



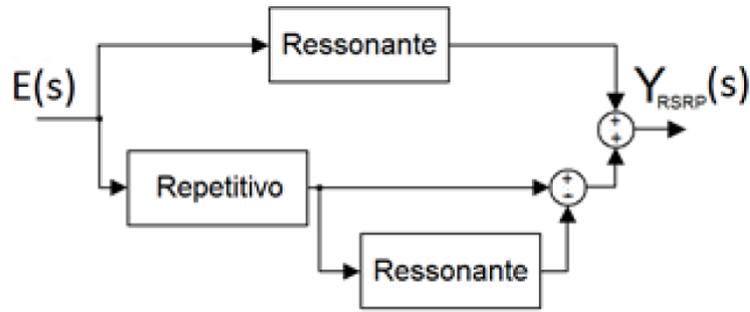
Fonte: [12]

Nota-se, a partir do diagrama de Bode apresentado anteriormente na Figura 10, que o controlador ressonante possui característica de filtro passa baixas. Portanto, assume-se o próprio controlador ressonante como sendo o filtro passa baixas, devendo-se somente calcular o filtro passa altas conforme a equação (2.15).

$$F_{PA}(s) = 1 - C_{PR}(s) \quad (2.16)$$

Assim, o diagrama de blocos do controlador pode ser redesenhado como mostra a Figura 16.

Figura 16 Diagrama de blocos do controlador utilizando filtros complementares

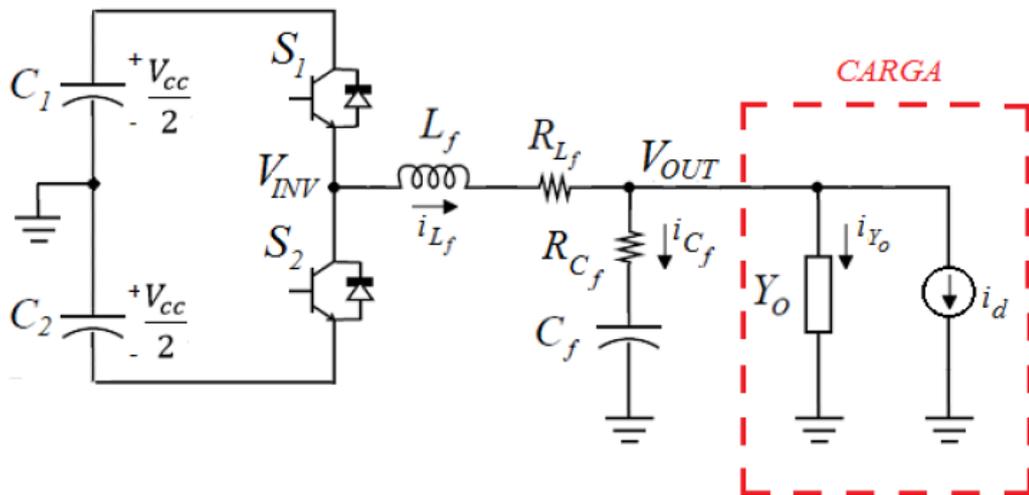


Fonte: [12]

2.4.4 Aplicação dos controladores ao UPS

Descritos os controladores, deve-se considerar a forma com que o sinal de controle atua no UPS. Para tanto, torna-se necessário entender o funcionamento dos circuitos elétricos que deseja-se controlar no sistema. A Figura 17 apresenta o circuito elétrico simplificado do inversor de saída do UPS, com uma carga arbitrária.

Figura 17 Circuito simplificado do inversor de saída do UPS com uma carga arbitrária Y_o



Fonte: [29]

Deseja-se controlar a saída do inversor do UPS. Na Figura 17, o sistema de armazenamento de energia é representado apenas pelos capacitores C_1 e C_2 . O inversor é implementado na topologia de meia ponte seguido de um filtro LC passa baixas de segunda ordem. O sinal de controle é modulado utilizando PWM (do inglês *Pulse Width Modulation*) e

aplicado aos transistores *IGBT* (do inglês *Insulated Gate Bipolar Transistor*) S_1 e S_2 , controlando o chaveamento destes transistores. Sabendo que a frequência de chaveamento é muito superior à frequência do sinal de controle e do sistema, pode-se considerar a ação de chaveamento como um ganho K_{PWM} que multiplica o sinal de controle $u(t)$, ou seja, $V_{INV}(t) = K_{PWM}u(t)$.

A carga considerada na Figura 17 representa o efeito da carga linear no sistema através da admitância Y_o , para a qual corrente e tensão estão em fase, e da carga não linear através da fonte de corrente i_d , equivalente aos distúrbios de corrente provocados pelas harmônicas geradas por esta carga [29].

2.5 NORMAS APLICÁVEIS A UPS

Com a finalidade de definir os requisitos que devem ser cumpridos com o controle da saída do *UPS*, normas nacionais e internacionais são estudadas e suas principais exigências de desempenho apresentadas nesta seção.

As normas brasileiras que tratam do assunto, elaboradas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), são: a NBR 15014, que limita-se a abordar as topologias e a terminologia adotada para tratar dos chamados nobreaks [14]; e a NBR 15204, que aborda as características necessárias aos nobreaks com potência nominal até 3 kVA [34]. O objetivo deste trabalho é ensaiar o protótipo com potência nominal de 3,5 kVA, portanto não há norma brasileira aplicável neste caso. Entretanto, os requisitos estabelecidos na NBR 15204 são apresentados para fins de comparação com as normas internacionais.

O *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) publicou em 1986 o padrão Std 944 que aborda as práticas recomendadas para aplicação e teste de *UPS* utilizados para manutenção em estações de geração de energia, como usinas nucleares [35]. Os requisitos de desempenho exigidos para a saída do *UPS* são apresentados e considerados durante os testes.

A norma internacional mais abrangente e utilizada como referência para diversas outras normas e testes destinados aos *UPS* foi elaborada pela *International Electrotechnical Commission* e estabelecida originalmente em 1999. A IEC 62040-3 determina testes para avaliar a resposta dinâmica e estática dos *UPS* e classifica-los de acordo com os resultados, além de estabelecer requisitos mínimos a serem cumpridos. Esta norma é tomada como base para os testes desempenhados neste trabalho.

Outros padrões e referências de desempenho dos *UPS* podem ser citadas, como o método de testes CSA C813.1.01, elaborado pela *Canadian Standards Association (CSA)*, que apresenta um método para o teste e medida das características elétricas do *UPS*, assim como exigências de eficiência e desempenho. Este padrão é apontado juntamente com a norma IEC 62040-3 como as principais referências para determinação do desempenho de sistemas *UPS*, segundo a Energy Star [29]. Normas da *National Electrical Manufacturers Association (NEMA)* e *Electric Power Research Institute (EPRI) – California Energy Commission (CEC)* apresentam testes baseados na norma IEC 62040-3.

A Energy Star publicou em 2012 os critérios e testes necessários para os fabricantes obterem a certificação de seus *UPS* com o selo da companhia [36]. A exemplo das outras certificações da Energy Star, os testes focam na análise da eficiência energética dos *UPS*, sem especificação de requisitos de desempenho. Os procedimentos são baseados inteiramente na norma IEC 62040-3 para sistemas *UPS* de CA.

2.5.1 Normas Brasileiras

A NBR 15204 fixa as características mínimas exigíveis de segurança e desempenho para os nobreaks monofásicos com tensão nominal até 250 V e potência nominal até 3 kVA destinados a aplicações na área de tecnologia da informação (TI). A norma estabelece que os equipamentos que atendem aos requisitos definidos não podem ser utilizados para alimentação de outras cargas críticas, como elementos eletromédicos ou que utilizem motores como principal fonte de consumo.

Exigências construtivas e requisitos de segurança são apresentados em detalhes. Os testes e requisitos de desempenho não são enfatizados e estão resumidos abaixo:

A regulação de tensão de saída, calculada através das equações (2.17) e (2.18), deve estar limitada por $\pm 6\%$ da tensão nominal para uma tensão mínima de entrada de 55% para tensão nominal inferior a 150 V e para tensão mínima de entrada de 40% nas demais tensões. O teste deve ser realizado com 30% e 90% da carga nominal do nobreak para os limites mínimo e máximo de tensão de entrada.

$$\%_{sup} = \frac{V_{max} - V_{nom}}{V_{nom}} \times 100 \quad (2.17)$$

$$\%_{inf} = \frac{V_{min} - V_{nom}}{V_{nom}} \times 100 \quad (2.18)$$

O tempo de resposta de estabilização é de no máximo 6 semiciclos da rede, contados a partir do zero da senóide. O teste deve ser realizado com 50% da carga resistiva nominal, limitada a 300 W, para um degrau de tensão de entrada aplicado no zero da senóide, do valor nominal ao limite superior. Repete-se o procedimento para um degrau da tensão de entrada entre o valor nominal e o limite inferior.

O pico de tensão ao ligar o nobreak deve ser inferior à máxima tensão de saída especificada, ensaiado com 50% da carga resistiva nominal, limitada a 300W, com a tensão de entrada máxima aplicada ao nobreak no momento da ligação.

Para ser considerado um nobreak com saída senoidal, o limite da *THD* é de 5% para topologias online e de 10% para as demais topologias. O ensaio deve ser realizado com 100% da carga linear resistiva nas condições mais desfavoráveis de tensão de rede e de bateria. A carga linear resistiva total considerada é o produto da potência nominal declarada, em VA, pelo fator de potência nominal, que deve ser superior a 0,7.

É interessante destacar que a norma brasileira utiliza como bibliografia a norma IEC 60686 de 1980, que trata de fontes CA estabilizadas, apesar da existência da norma IEC 62040 na época da elaboração da norma pela ABNT. Esta constatação pode caracterizar os *UPS* regulamentados no Brasil como estabilizadores de tensão com baterias, não atendendo às características mais rigorosas de desempenho exigidas pelas normas internacionais aplicáveis aos *UPS*.

2.5.2 Normas internacionais

Segundo a Energy Star na época da elaboração do seu programa de certificação de *UPS*, as normas internacionais aplicáveis a *UPS* de tensão CA mais importantes são a CSA813.1 e a IEC 62040, esta última adotada como referência principal para elaboração dos testes deste trabalho [29].

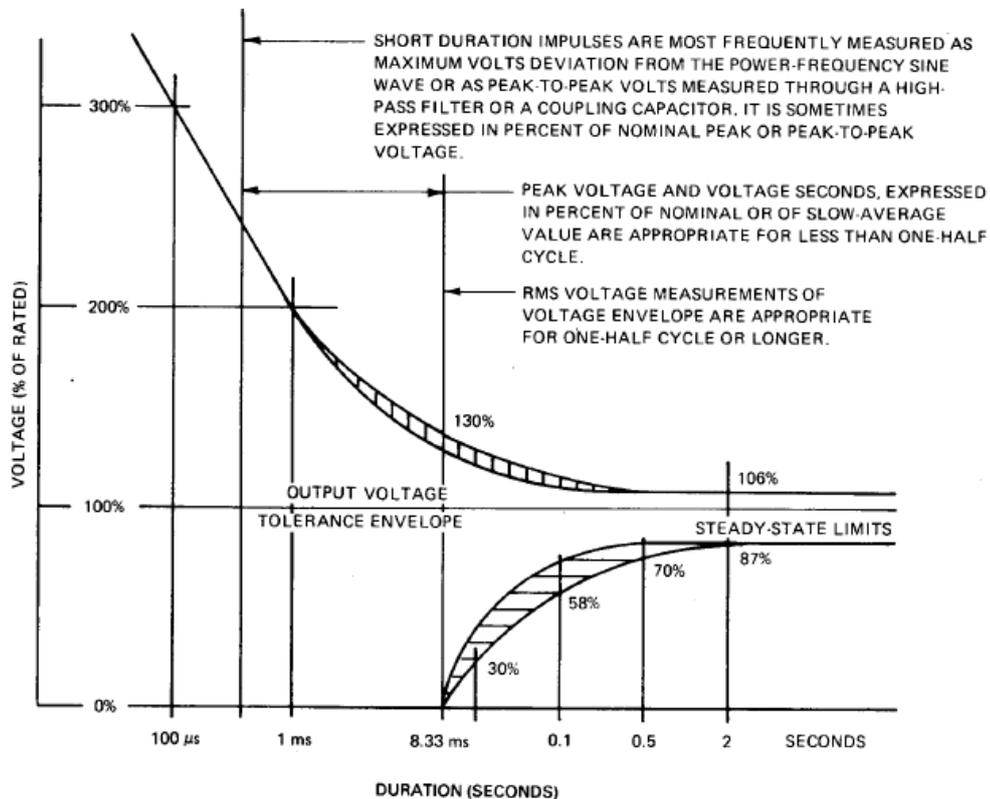
A norma canadense CSA813.1 faz referência à IEC 62040-3 e basicamente limita-se a servir como guia de aplicação dos testes previstos nesta norma, estabelecendo requisitos de eficiência similares aos adotados pelo programa de certificação da Energy Star. Quanto ao

desempenho e qualidade do sinal de saída, apenas determina que a *THD* deve se manter inferior a 8% do valor da componente fundamental, até e incluindo a 13ª harmônica [30].

O padrão ANSI/IEEE Std 944 de 1986 fixa os requisitos de sistemas *UPS* que mantêm continuidade e qualidade do fornecimento de energia às cargas críticas de estações de geração de energia elétrica, como instrumentos vitais de medida e controle. Este padrão não é aplicável a *UPS* domésticos ou comerciais, porém é interessante analisar as características de desempenho estabelecidas. É importante notar que este padrão foi elaborado antes da grande ascensão dos equipamentos de TI ou busca por fontes renováveis de energia. O documento estabelece que o fator de crista para qualquer forma de onda de corrente deve ser inferior a 2. A forma de onda da tensão de saída deve manter-se em $\pm 2\%$ da tensão nominal e com frequência em $\pm 0,5\%$ da frequência nominal, tendo forma senoidal com *THD* inferior a 5% e nenhuma componente harmônica excedendo 3% do valor *RMS* da componente fundamental [31].

Para o comportamento dinâmico, o Std 944 estabelece que para degraus de aplicação ou remoção da carga em qualquer incremento até a carga plena com fator de potência mínimo de 0,8 atrasado, a tensão de saída deve manter-se nos limites internos do perfil de tolerância de tensão mostrado na Figura 18. Em caso de curto-circuito, o inversor deve ser capaz de operar com 150% da corrente nominal por 10s. Além disso, o inversor deve ser capaz de suprir 125% da carga nominal por no mínimo 1h com regulação da tensão de saída de $\pm 5\%$.

Figura 18 Perfil de tolerância da tensão de saída da UPS de acordo com o IEEE Std 944 para qualquer aplicação de carga até a nominal



Fonte: [31]

A norma IEC 62040-3 fixa o método de especificação de desempenho do *UPS* e os requisitos dos testes para equipamentos trifásicos ou monofásicos CA com tensão até 1000 V, estacionários ou não. Além de definir a terminologia utilizada, a norma estabelece requisitos mínimos de eficiência e desempenho para os *UPS* [4].

O *UPS* que atende às especificações da IEC deve ser capaz de permanecer em modo de operação de rede enquanto a fonte primária de energia apresentar características como: variação da tensão nominal *RMS* de $\pm 10\%$; variação da frequência nominal de $\pm 2\%$; caso trifásico, desequilíbrio entre fases de até 5%; *THD* inferior a 8% com nível máximo de cada componente em relação à fundamental estabelecido conforme norma IEC 61000-2-2. Fora destas condições, o *UPS* deve ser capaz de fornecer energia às cargas com qualidade através do seu sistema de armazenamento de energia.

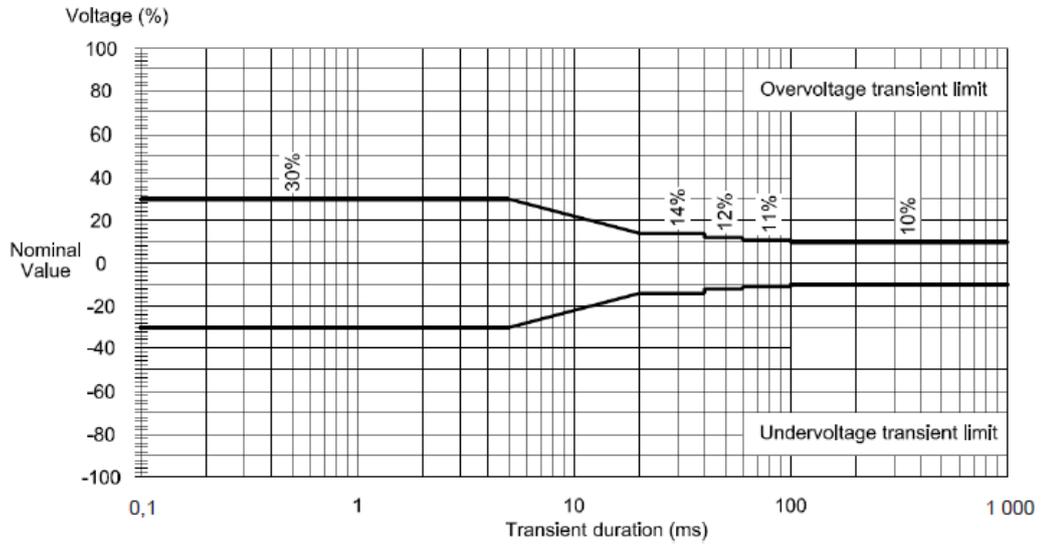
Os *UPS* são classificados de acordo com esta norma com um código de 8 dígitos do tipo AAABBCCC, conforme as características de desempenho apresentadas. Os primeiros 3 dígitos indicam a dependência do *UPS* em relação à entrada da rede. Os dígitos BB seguintes indicam

a característica de formato da onda de saída do equipamento. Já os dígitos CCC indicam a característica de desempenho transitório do equipamento em relação a curvas de referência. Mais detalhes sobre esta classificação serão apresentados durante a elaboração dos testes preditos pela norma.

A norma estabelece diversos testes de rotina e por amostragem para avaliar a eficiência, características e funcionamento do sistema. Com o objetivo de verificar o desempenho do sistema de controle do *UPS*, somente os testes relevantes de desempenho são apresentados. Utilizando uma carga linear de referência, deve-se ensaiar o equipamento operando a vazio e com carga plena, mensurando a tensão de saída e componentes harmônicas em regime permanente para avaliar a regulação de tensão do vazio à carga plena. A componente DC média medida em 10 s da tensão de saída deve ser inferior a 0,1% do valor *RMS*.

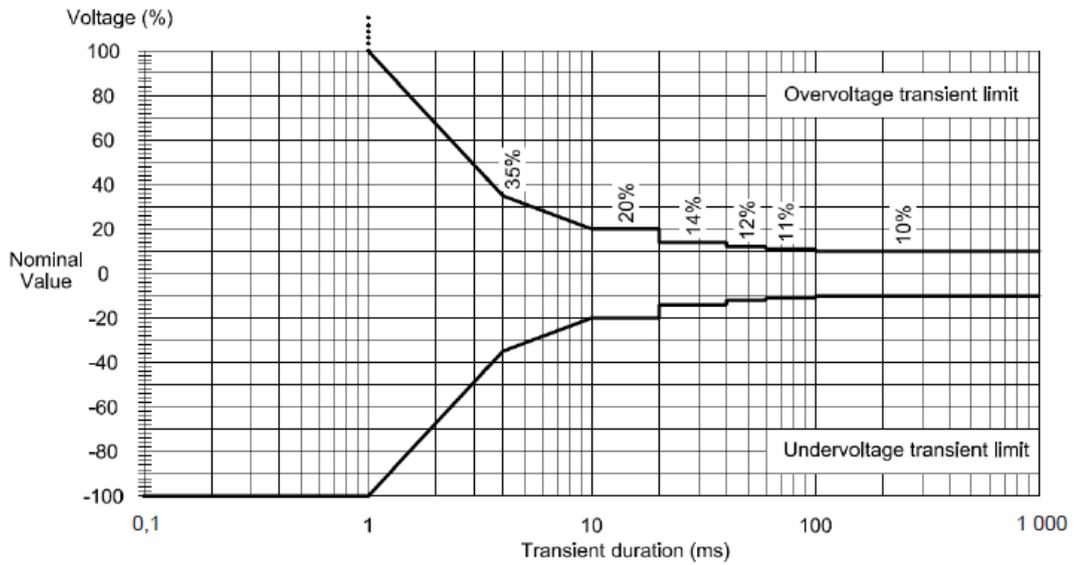
O desempenho dinâmico com carga linear é avaliado por meio do teste de degraus de carga. Com o *UPS* operando a vazio em modo rede, aplica-se um degrau de carga resistiva referente a 20% da potência ativa nominal, seguida de outro degrau com mais 80% da carga ativa nominal. A aplicação deve ocorrer quando a senóide estiver no valor de pico e a forma de onda de saída deve ser armazenada para computar o perfil de desempenho transitório. Após, desliga-se a carga referente a 80% do total, mantendo somente 20% da carga na saída. As medidas são novamente realizadas no momento do desligamento para avaliação do perfil de desempenho transitório. O perfil de resposta transitória apresentado nos testes deve estar contido em um dos perfis mostrados nas Figuras Figura 19, Figura 20 e Figura 21. Este resultado é utilizado na classificação do *UPS* indicada nos três últimos dígitos do código citado anteriormente.

Figura 19 Curva para classificação de desempenho dinâmico 1 (exigido para cargas críticas sensíveis) de acordo com a norma IEC 62040-3



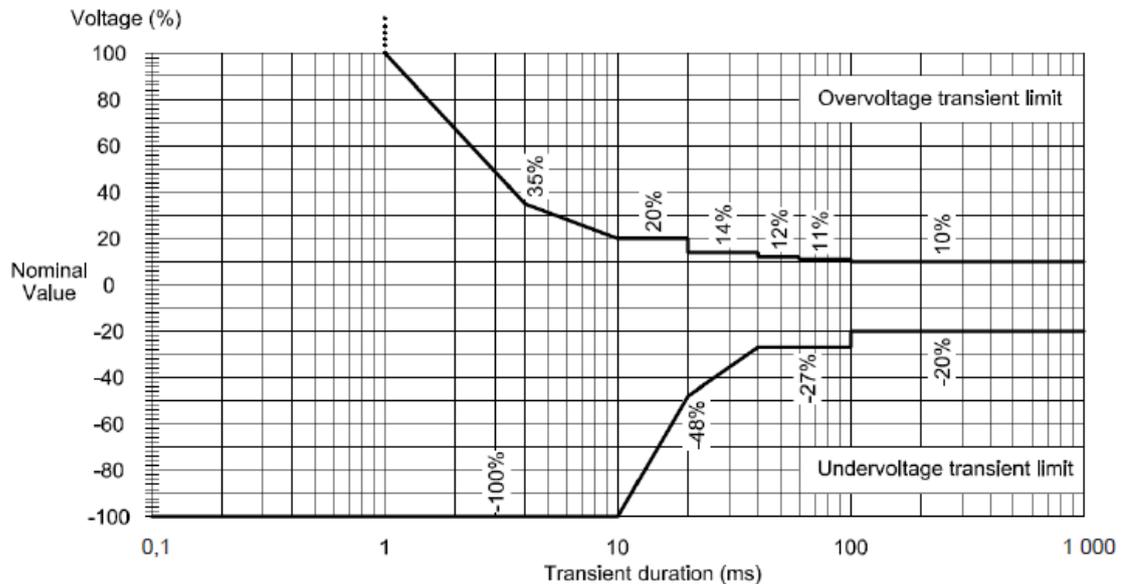
Fonte: [4]

Figura 20 Curva para classificação de desempenho dinâmico 2 (aceitável para a maioria das cargas críticas) de acordo com a norma IEC 62040-3



Fonte: [4]

Figura 21 Curva para classificação de desempenho dinâmico 3 (para cargas de uso geral em TI) de acordo com a norma IEC 62040-3



Fonte: [4]

Para os testes com cargas não lineares, é necessário o dimensionamento de uma carga de referência conforme indicado no Anexo E da referida norma. O teste de carga plena é realizado com a potência aparente nominal do equipamento, medindo a forma de onda da tensão de saída e seu conteúdo harmônico em regime permanente. O desempenho dinâmico é avaliado por meio da aplicação de degraus de carga, de acordo com a potência nominal do equipamento submetido aos testes.

Para *UPS* com potência nominal inferior a 4 kVA e operando a vazio, aplica-se como uma carga base a carga não linear referente a 25% da potência aparente nominal. Quando atingido o regime permanente, a carga de 75% restante é aplicada no valor de pico da tensão de saída. Neste instante, mede-se o desvio transitório da forma de onda. Após, desconecta-se a carga referente aos 75% da nominal no instante de pico da tensão de saída, repetindo a medida do perfil de resposta transitória.

Com *UPS* de maior potência, o procedimento é realizado utilizando como carga base 33% da carga referente à potência aparente nominal e aplicando degraus adicionais de 33% no instante de pico da tensão de saída. A cada degrau de carga, deve-se medir o desvio transitório da tensão de saída. Após, desconecta-se os degraus de carga no instante de pico da tensão, repetindo a medida do perfil de resposta transitória a cada degrau. Os perfis de resposta transitória obtidos nos testes com carga não linear também devem estar contidos em um dos

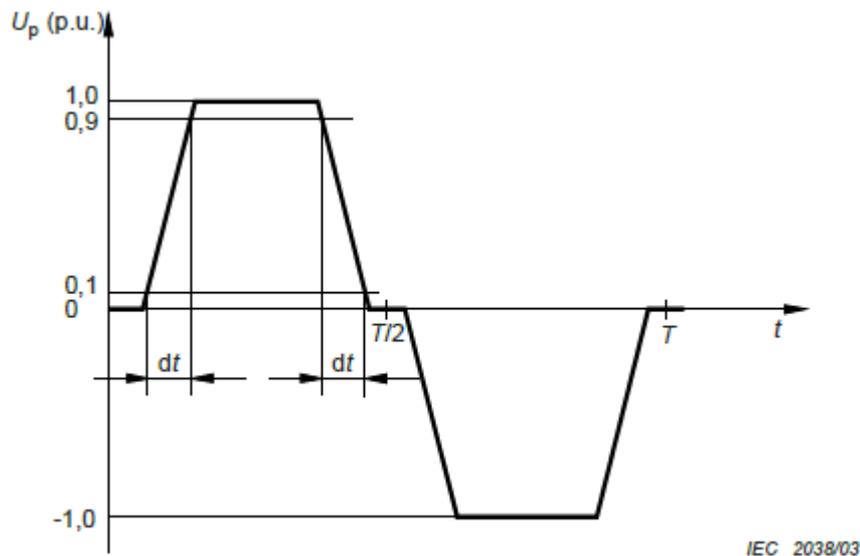
perfis mostrados nas Figuras Figura 19, Figura 20 e Figura 21. Este resultado é utilizado na classificação do *UPS* indicada nos três últimos dígitos do código citado anteriormente.

Fica ainda estabelecido que para que um *UPS* seja classificado como tendo saída senoidal, deve atender aos requisitos da norma IEC 61000-2-2, apresentando *THD* inferior a 8% e distorção harmônica individual por componente dentro dos limites estabelecidos, conforme Tabela 2. Caso a saída da *UPS* seja não senoidal, deve atender aos requisitos de valor de pico da tensão de saída inferior ao valor de pico da tensão senoidal nominal correspondente e taxa de subida/descida inferior a $10 \frac{V}{\mu s}$. Estes requisitos são ilustrados nas equações (2.19) e (2.20) e na Figura 22 abaixo, que mostra uma forma de onda típica de tensão não senoidal.

$$U_{pico} \leq \sqrt{2} \times U_{nominal} \quad (2.19)$$

$$\frac{dU}{dt} \leq 10 V/\mu s \quad (2.20)$$

Figura 22 Forma de tensão não senoidal típica e representação das variáveis envolvidas



Fonte: [4]

A configuração de ensaios realizados neste trabalho se baseia principalmente nesta última norma, passando pelo dimensionamento das cargas e projeto do sistema de acionamento controlável via computador. O *UPS* submetido aos testes é então avaliado conforme os critérios definidos pela norma e classificado de acordo com o código previsto.

Tabela 2 Níveis de tensão admissíveis por componente harmônica em redes de baixa tensão - IEC 61000-2-2

Harmônicas ímpares não múltiplas de 3		Harmônicas ímpares múltiplas de 3		Harmônicas pares	
Ordem da Harmônica [n]	Tensão da componente [%]	Ordem da Harmônica [n]	Tensão da componente [%]	Ordem da Harmônica [n]	Tensão da componente [%]
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
$17 \leq n \leq 49$	$2,27 \times \frac{17}{n} - 0,27$	$21 \leq n \leq 45$	0,2	$10 \leq n \leq 50$	$0,25 \times \frac{10}{n} + 0,25$
Observação: assume-se que todos os valores de harmônicas nesta tabela não ocorrem simultaneamente.					

Fonte: [4]

3 SIMULAÇÕES E ENSAIOS

A partir das orientações fixadas nas normas consultadas, os ensaios de interesse para avaliação do desempenho do sistema de controle do *UPS* são implementados. O acionamento das cargas é projetado para que seja controlado através do computador, utilizando a plataforma dSpace em conjunto com os *softwares* MATLAB/Simulink. As cargas utilizadas são dimensionadas de acordo com as especificações das normas e seu acionamento simulado através do MATLAB em conjunto com a aplicação PSim, para avaliar a capacidade necessária e outros aspectos relevantes ao sistema de acionamento. Os ensaios são realizados para o controlador ressonante e os resultados comparados entre si e com os padrões estabelecidos nas normas. Finalmente, o *UPS* recebe o código de classificação conforme a norma IEC 62040-3, para o desempenho demonstrado com o controlador ressonante.

3.1 DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO

A fim de dimensionar as cargas para os ensaios, é necessário conhecer os valores nominais de operação do protótipo a submetido aos testes. Estes parâmetros são mostrados na Tabela 3. O protótipo simula um *UPS* de 3,5 kVA com topologia online de dupla conversão, onde um inversor monofásico alimentado através de um barramento CC converte a energia de CC para CA e é controlado com o objetivo de fornecer as características da onda de tensão senoidal desejada na saída. O inversor tem a topologia de meia ponte e o sinal de controle é aplicado por uma modulação *PWM* no chaveamento dos transistores *IGBT*.

O barramento CC fornece energia ao inversor e é alimentado por um retificador trifásico e um filtro capacitivo. O inversor é seguido de um filtro passa baixas LC de segunda ordem, cuja saída deve ser o sinal senoidal desejado. O fator de potência nominal de saída é 0,7, resultando em uma potência ativa total de 2,45 kW.

Tabela 3 Valores de parâmetros e componentes do protótipo

Parâmetro	Valor
Tensão de saída <i>RMS</i>	127 V
Frequência da onda de saída	60 Hz
Tensão do barramento CC	530 V
Capacitância do barramento CC	6600 μF
Frequência do chaveamento dos <i>IGBT</i>	21600 Hz
Indutância do filtro	1 mH
Resistência do indutor do filtro	15 m Ω
Capacitância do filtro	300 μF

Fonte: Características do equipamento implementado no laboratório

3.2 PARAMETRIZAÇÃO DOS CONTROLADORES

O desempenho do sistema de controle depende dos parâmetros utilizados em sua sintonia. Basicamente, os controladores são caracterizados através de uma série de ganhos e da frequência de corte dos filtros utilizados. O objetivo deste trabalho não é determinar estes valores, mas proporcionar uma maneira de avaliar o desempenho de controladores existentes. Para os testes, são utilizados os valores apresentados em [12] para o controlador ressonante, conforme reproduzido na Tabela 4.

Tabela 4 Valores dos parâmetros para o controlador ressonante

Parâmetro	Valor
K1	-15,0758
K2	-22,9721
K3	1327377,9842
K4	14861,2776

Fonte: [12]

3.3 DIMENSIONAMENTO DAS CARGAS

Em concordância com a norma IEC 62040-3, deve-se realizar os testes com cargas de referência, tanto lineares quanto não lineares. A carga linear se trata de uma carga puramente resistiva, dimensionada para corresponder à potência ativa nominal do *UPS*, ou seja, deve demandar 2,45 kW. Esta carga é dividida em cargas intermediárias, possibilitando a implementação dos testes de degrau de carga. A carga não-linear, por sua vez, deve demandar a potência aparente total do equipamento e é dimensionada de acordo com o Anexo E da norma. Esta carga também é dividida em valores intermediários para o teste de degrau de carga.

3.3.1 Carga linear

Conhecendo as características de potência aparente e fator de potência nominais do *UPS*, deve-se dimensionar a carga linear resistiva para os ensaios propostos. Assim, calcula-se o valor da resistência necessária para dissipar 2,45 kW de potência ativa, mostrado abaixo:

$$R_{100\%} = 6,58 \Omega$$

No ensaio de degrau de carga, é necessário acionar degraus de 20% e 80% da carga linear. Por simplicidade, pode-se atingir este objetivo acionando o resistor correspondente aos 20% da carga base e, então, associando outros 4 resistores de mesmo valor em paralelo a este primeiro, obtendo a carga total. Outra vantagem é a distribuição da potência dissipada em mais componentes, facilitando o resfriamento do conjunto de cargas. O valor de cada resistor a ser associado é mostrado abaixo:

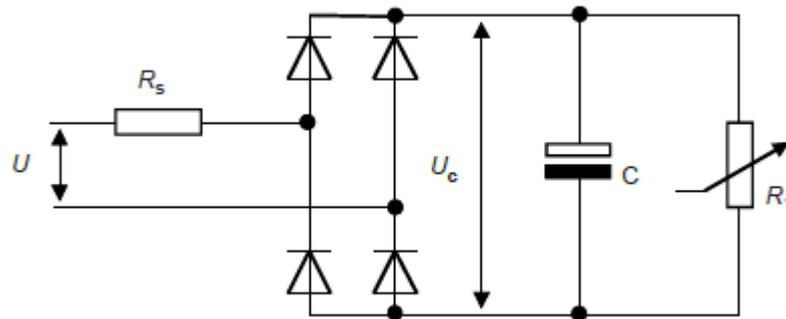
$$R_{20\%} = 32,92 \Omega$$

$$R_{80\%} = 8,23 \Omega$$

3.3.2 Carga não linear

Os ensaios com carga não linear devem considerar a potência aparente nominal do *UPS*. As orientações para o dimensionamento desta carga são abordadas no Anexo E da norma IEC 62040-3. A Figura 23 reproduz o sistema de carga não linear proposto, indicando as variáveis e valores de interesse.

Figura 23 Carga não linear de referência



Fonte: [4]

A carga é composta por um retificador em ponte de diodos de onda completa com cargas resistivas e capacitivas associadas em sua saída. A implementação física do sistema pode consistir de múltiplos circuitos em paralelo. O resistor R_s representa a resistência da rede e pode ser conectado antes ou depois do retificador.

Este circuito deve estar inicialmente conectado à rede de distribuição CA com tensão nominal correspondente à tensão de saída do *UPS* submetido aos testes. O resistor R_1 deve ser ajustado para obter a potência aparente nominal de saída do *UPS*. As definições abaixo devem ser seguidas para identificar os elementos da Figura 23 e prosseguir com seu dimensionamento:

U = tensão nominal *RMS* de saída do *UPS*

f = frequência nominal de saída do *UPS*, em *Hz*

U_c = tensão de saída do retificador

S = potência aparente aplicada à carga não linear de referência, com fator de potência 0,7

R_1 = resistência de carga, ajustada para dissipar 66% da potência S da carga

R_s = resistor série ajustado para dissipar 4% da potência S da carga, simulando uma queda de tensão de 4% nos cabos de alimentação

C = capacitância dimensionada para uma oscilação de tensão pico a pico máxima de 5% da tensão U_c , correspondendo a uma constante de tempo $R_1 \times C = \frac{7,5}{f}$

Empiricamente, o valor de U_c é estimado pela equação (3.1) [4]. Este valor é utilizado no dimensionamento dos componentes, conforme equações (3.2), (3.3) e (3.4).

$$U_c = \sqrt{2} \times 0,92 \times 0,96 \times 0,975 \times U = 1,22 \times U \quad (3.1)$$

$$R_s = 0,04 \times \frac{U^2}{S} \pm 10\% \quad (3.2)$$

$$R_1 = \frac{U_c^2}{0,66 \times S} \quad (3.3)$$

$$C = \frac{7,5}{f \times R_1} + 0\% \sim 25\% \quad (3.4)$$

Para o teste de desempenho dinâmico através do ensaio de degrau de carga, deve-se dividir esta carga em degraus de 25% e 75% para *UPS* com potência nominal aparente inferior a 4 kVA. Utilizando os parâmetros nominais do *UPS* ensaiado, obtém-se:

$$R_s = 0,184 \, \Omega \pm 0,018 \, \Omega$$

$$R_1 = 10,39 \, \Omega$$

$$C = 12,03 \, mF \sim 15,04 \, mF$$

Considerando o teste de degrau de carga, estes valores se dividem em:

$$R_{s_{25\%}} = 0,737 \, \Omega \pm 0,074$$

$$R_{1_{25\%}} = 41,57 \, \Omega$$

$$C_{25\%} = 3 \, mF \sim 3,76 \, mF$$

$$R_{s_{75\%}} = 0,246 \, \Omega \pm 0,025 \, \Omega$$

$$R_{1_{75\%}} = 13,86 \, \Omega$$

$$C_{75\%} = 9,02 \, mF \sim 11,28 \, mF$$

Caso o *UPS* ensaiado possua potência nominal superior a 4 kVA, deve-se redimensionar os degraus de carga para obter três degraus equivalentes a $\frac{1}{3}$ da carga nominal.

3.4 IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA

Após o dimensionamento das cargas, deve-se implementar os mecanismos para realização dos ensaios propostos. Para tanto, deve-se projetar o diagrama de comando dos circuitos, os materiais a serem utilizados e confeccionar os circuitos necessários, além da utilização dos *softwares* e interfaces computacionais.

A Figura 24 mostra uma foto do protótipo de *UPS* utilizado durante os testes.

Figura 24 Protótipo de *UPS* com potência nominal de 3500 VA



Fonte: Imagem real do protótipo.

3.4.1 Dimensionamento do circuito de acionamento

O acionamento das cargas, bem como a comutação entre rede primária e *UPS*, é feito através de contatores. Estes devem ser dimensionados para suportar a demanda de energia das cargas durante os ensaios. O circuito de acionamento, bloqueio e proteção dos contatores deve ser projetado para garantir o funcionamento e segurança do sistema. Além do acionamento, a conexão da carga não linear à rede primária de energia exige cuidados devido a corrente elevada de *inrush* dos capacitores presentes no circuito, tornando necessária uma topologia capaz de limitar esta corrente de partida quando a rede não puder suprir este pico de corrente.

O diagrama de comando projetado para acionar as cargas é apresentado na Figura 25. Os contatores K1 a K4 fazem parte do acionamento da carga não linear, enquanto os contatores K5 e K6 acionam a carga linear. As chaves S1 a S5 são relés comandados através da interface dSpace de tempo real. É importante notar o cuidado de dispor os contatos de bloqueio entre os contatores que não devem entrar em operação simultaneamente.

A chave S1 seleciona a carga linear ou não linear conforme o ensaio a ser executado. No ensaio com carga não linear, inicialmente o contator K1 conecta 25% da carga não linear à rede primária, para servir como carga base ao *UPS*, conectado à carga através do contator K2. Com o acionamento de K2, a *UPS* assume 25% da carga não linear e K3 é acionado conectando os 75% restantes da carga não linear à rede primária, para posteriormente ser aplicado ao *UPS* através do contator K4. O acionamento de K4 conecta 100% da carga não linear ao *UPS*.

No ensaio de carga linear, a chave S2 aciona o contator K5 conectando a carga base ao *UPS*, correspondente a 20% da potência ativa nominal. Com K5 em operação, habilita-se o acionamento do contator K6. Após, os 80% restantes da carga são aplicados ao *UPS* através do contator K6, acionado com a chave S5. Os degraus de ambas as cargas podem ser retirados na ordem inversa à de aplicação, para cumprir os testes especificados na norma. A Tabela 5 abaixo resume o dimensionamento de cada contator presente no circuito.

Figura 25 Circuito de comando para o acionamento das cargas

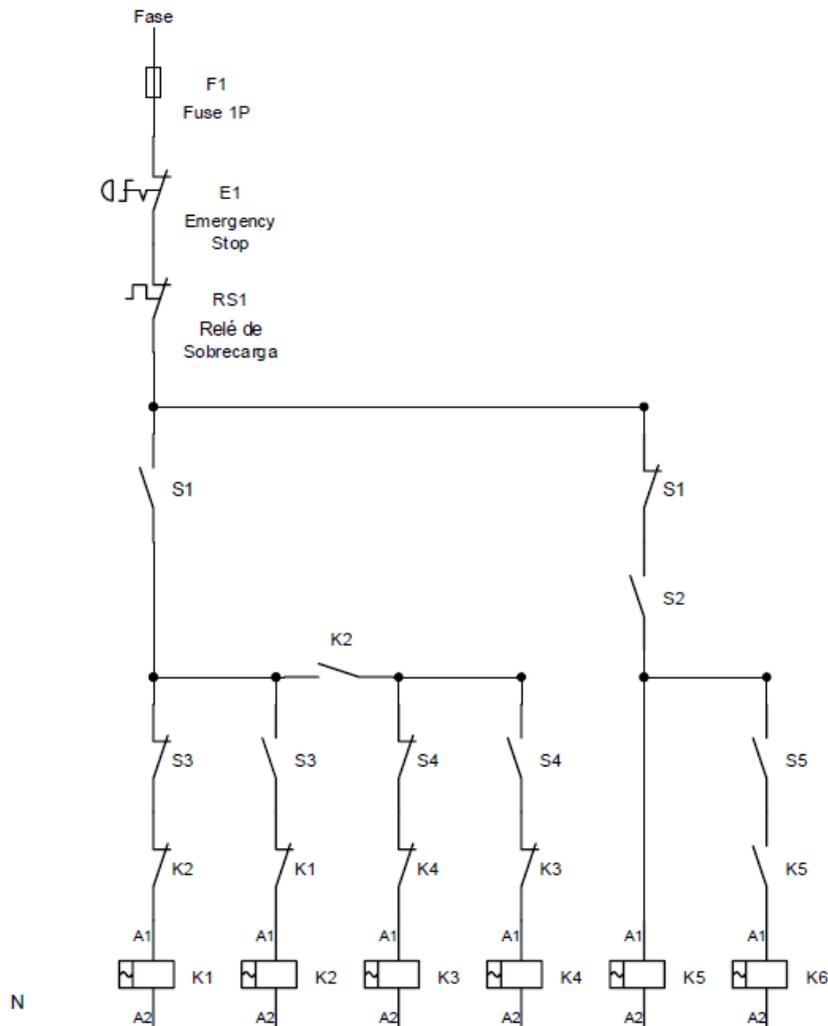
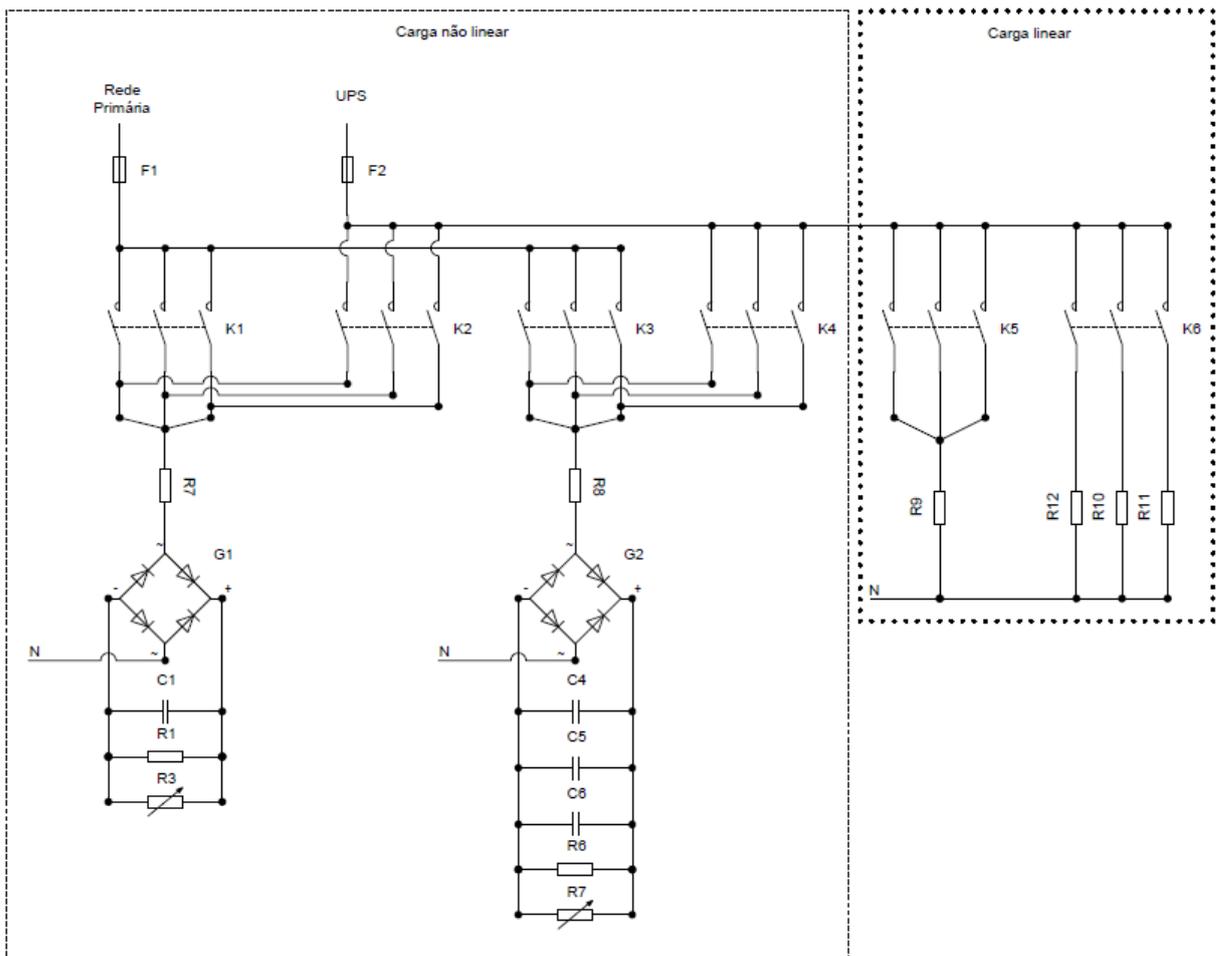


Tabela 5 Descrição dos contatores e suas funções

Contator	Corrente em regime permanente	Acionamento
K1	6,89 A	25% da carga não linear à rede primária
K2	6,89 A	25% da carga não linear ao UPS
K3	20,67 A	75% da carga não linear à rede primária
K4	20,67 A	75% da carga não linear ao UPS
K5	3,86 A	20% da carga linear ao UPS
K6	15,43 A	80% da carga linear ao UPS

O circuito de força acionado pelos contatores é mostrado na Figura 26, para ambas cargas linear e não linear. É importante notar a conexão das cargas por cada contator, conforme descrito anteriormente.

Figura 26 Circuito de força para acionamento das cargas



Fonte: Diagrama gerado pelo autor.

3.4.2 Interface computacional

Os relés S1 a S5 mostrados no diagrama de comando são controlados através do computador para proporcionar praticidade e maior segurança ao acionamento. Para garantir o isolamento elétrico entre o circuito de comando e o controle da *UPS*, opta-se por utilizar a placa de relés mostrada na Figura 27. Os relés são acionados através de opto acopladores e alimentados por fonte própria independente.

Figura 27 Módulo de relés para interface de acionamento via computador

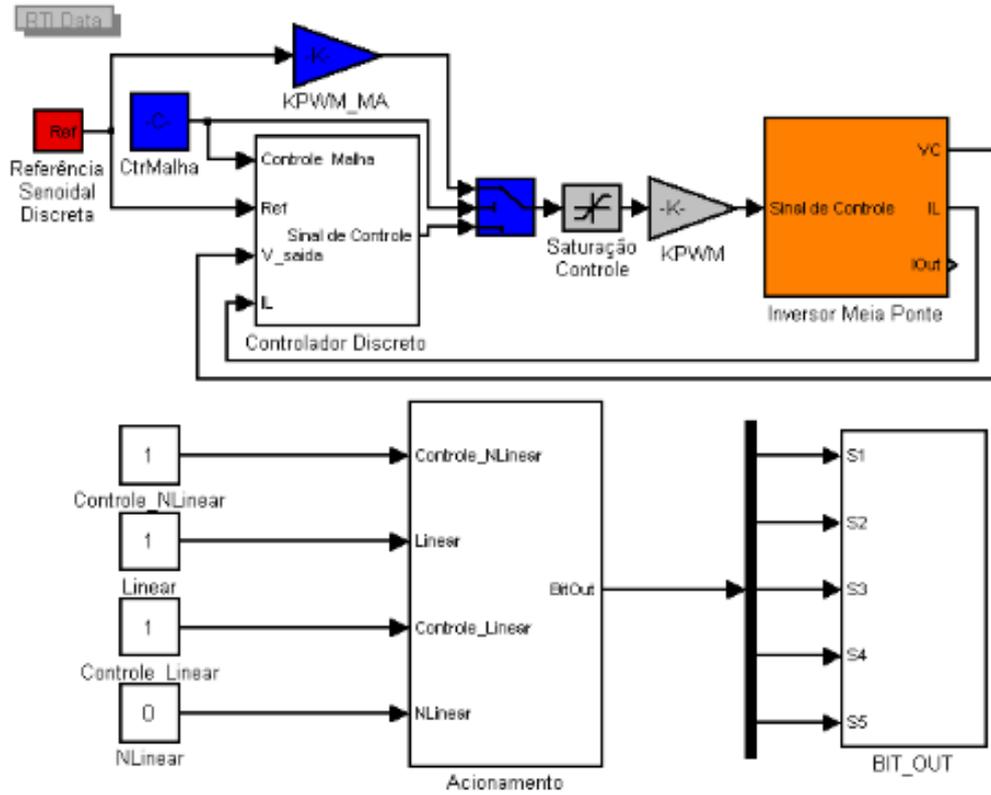


Fonte: Imagem real do equipamento utilizado.

Utilizando as saídas digitais Bit I/O disponíveis na plataforma dSpace, compatíveis com o circuito de acionamento do módulo de relés, implementa-se o acionamento por computador. A lógica de acionamento e o sistema de controle do *UPS* em tempo real são implementados em conjunto no *software* Simulink, conforme Figura 28 e Figura 29 e compilados para obter o programa que controla a placa dSpace. O *software* ControlDesk, que acompanha a plataforma dSpace, é utilizado para criação da interface de usuário do acionamento, mostrada na Figura 30.

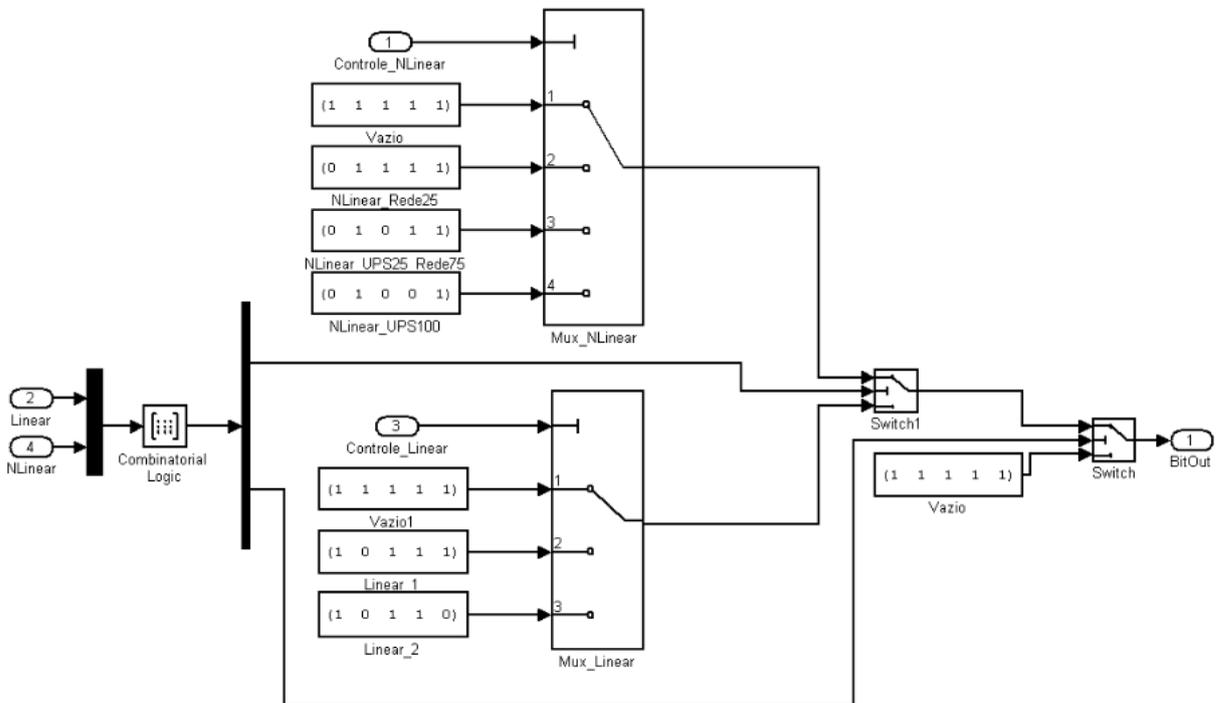
A partir da interface de usuário criada, pode-se optar pelo ensaio da carga linear ou não linear através dos botões de seleção. O acionamento das cargas é realizado na ordem prevista na norma, de forma aditiva ou subtrativa, ao clicar nas setas para aumentar ou reduzir o valor mostrado nos blocos correspondentes. Há ainda um botão de seleção para optar entre controle em malha aberta ou malha fechada e um bloco que permite alterar o valor de tensão eficaz de referência para a saída do *UPS*. O bloco maior mostrado na Figura 30 é responsável pelas configurações da operação em tempo real da plataforma dSpace.

Figura 28 Diagrama no Simulink compilado para gerar o programa do controlador e acionamento via a dSpace



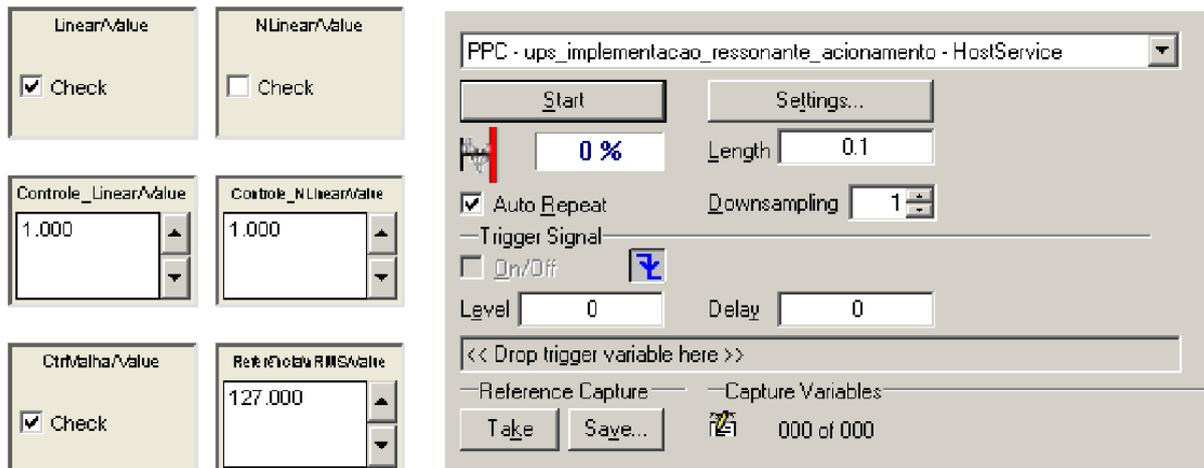
Fonte: Imagem gerada pelo autor no software MATLAB/Simulink.

Figura 29 Lógica do bloco de acionamento da Figura 28



Fonte: Imagem gerada pelo autor no software MATLAB/Simulink.

Figura 30 Interface do usuário implementado na ferramenta ControlDesk da plataforma dSpace



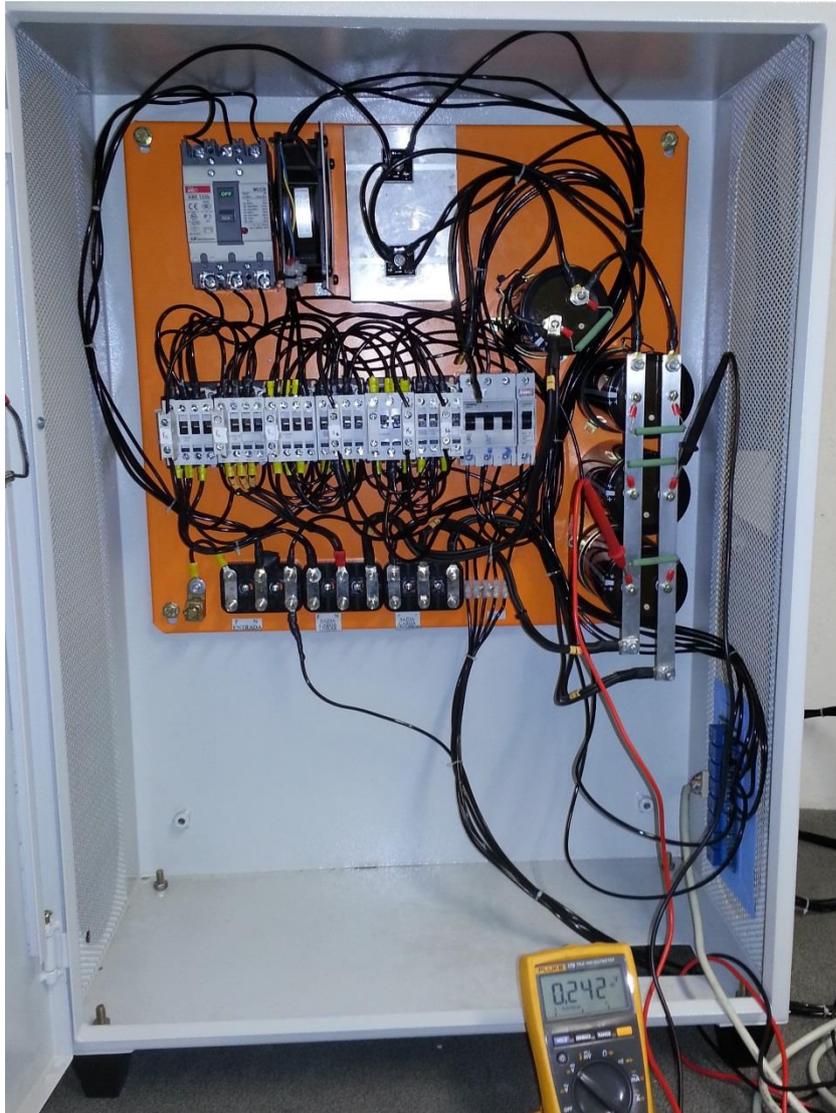
Fonte: Imagem gerada pelo autor no *software* ControlDesk.

A lógica do bloco Acionamento da Figura 28 é mostrada na Figura 29. Este bloco utiliza a situação dos botões da interface de usuário do Control Desk para determinar os valores de liga e desliga de cada uma das portas Bit I/O da dSpace conforme o ensaio que o usuário pretende executar. O acionamento do módulo de relés ocorre com lógica invertida, ou seja, cada relé liga com nível lógico baixo. Faz-se ainda uma verificação adicional para evitar a seleção de ambas cargas linear e não linear simultaneamente, desligando as cargas caso isto ocorra.

3.4.3 Montagem do quadro de comando e cargas

Após dimensionados os componentes necessários e terminado o projeto do circuito, faz-se a montagem do quadro de comando dos ensaios. Utiliza-se proteção independente através de disjuntores separados para a rede primária, o UPS e o circuito de comando dos contadores, além de *coolers* para resfriamento das pontes retificadoras e cargas resistivas. A forma final do quadro de comando montado é mostrado na Figura 31. Pode-se ver na figura a disposição dos componentes. Além dos contadores e disjuntores, o módulo de relés e os capacitores e pontes retificadoras da carga não linear ficam acondicionados no interior do quadro de comando.

Figura 31 Quadro de comando das cargas



Fonte: Imagem real do sistema implementado.

As cargas resistivas são alocadas externamente junto ao quadro de comando, assim como os *coolers* para seu resfriamento. Um resistor ajustável entre $1\ \Omega$ e $100\ \Omega$ capaz de dissipar 1000W é conectado a cada uma das cargas lineares e não lineares para proporcionar o ajuste adequado. A Figura 32 mostra o quadro de resistores fixos e ajustáveis montado no laboratório.

Figura 32 Banco de resistores fixos (a esquerda) e ajustáveis (a direita) para composição das cargas



Fonte: Imagem real dos equipamentos.

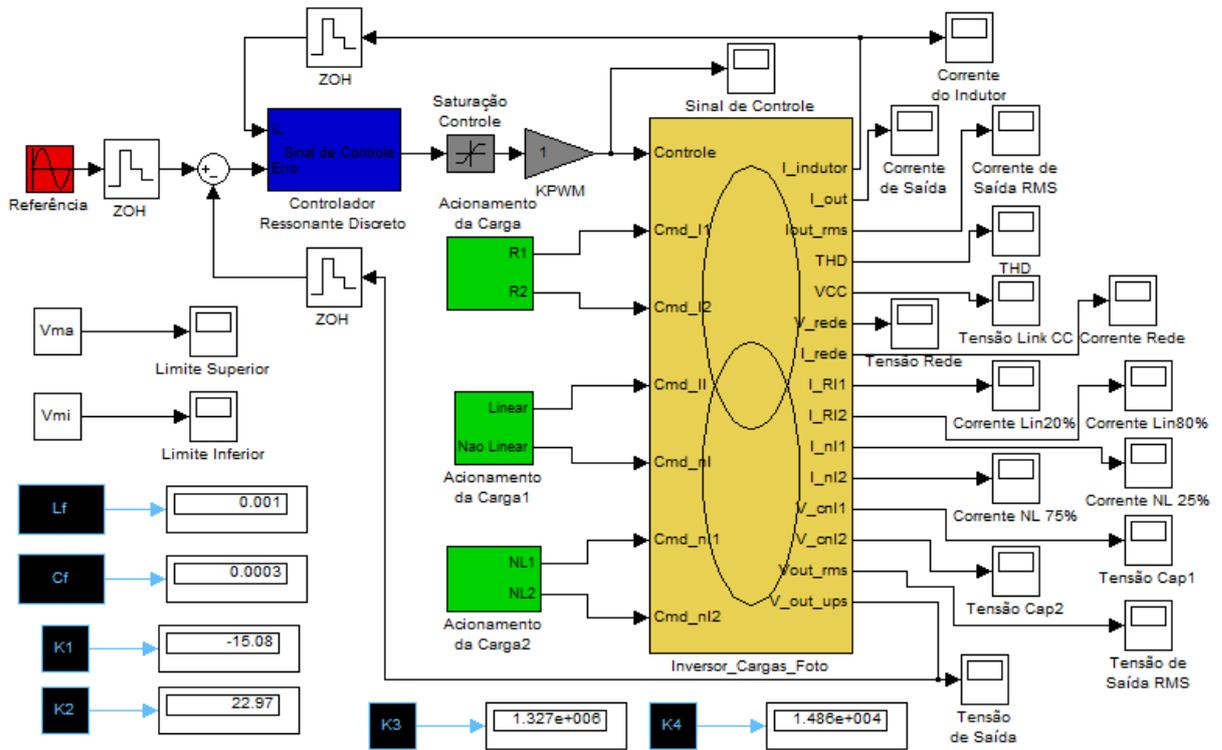
3.5 ENSAIOS, SIMULAÇÕES E CLASSIFICAÇÃO DO UPS

Concluída a implementação da estrutura necessária para realização dos ensaios, procede-se aos experimentos previstos nas normas. Os ensaios são realizados para o controlador ressonante e comparados aos resultados obtidos nas simulações com a aplicação PSIM em conjunto com o Simulink.

O Simulink engloba o sistema de controle ressonante implementado no bloco azul e blocos cinza da Figura 33 com a senóide de referência em vermelho e o sistema do inversor, acionamento e cargas elaborado no PSim, mostrado na Figura 34. A integração entre os *softwares* é feita pelo bloco SimCoupler, em amarelo. Os blocos em verde determinam o tempo e o acionamento das cargas.

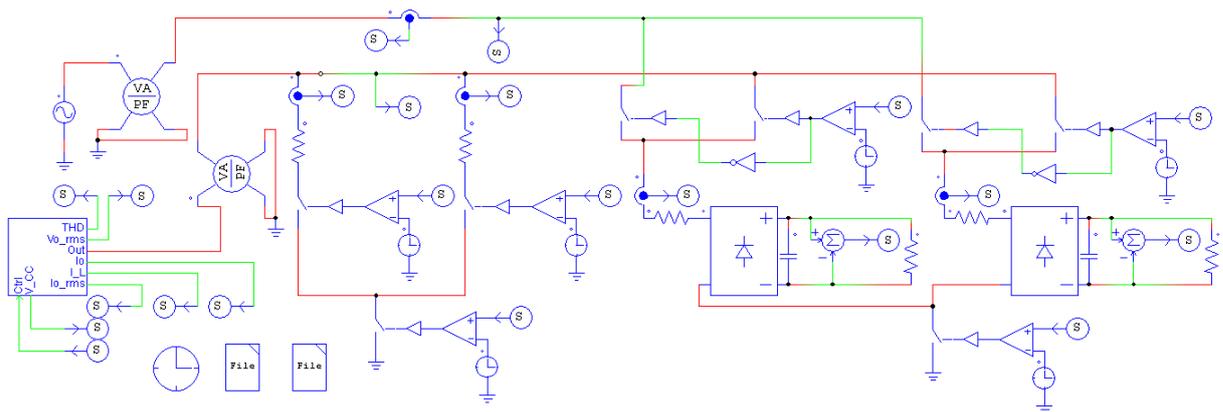
Para obter maior fidelidade entre os resultados de simulação e ensaios em laboratório, os valores e especificações típicos contidas nos *datasheets* dos equipamentos são considerados no diagrama criado no PSim.

Figura 33 Diagrama implementado no Simulink para as simulações



Fonte: Diagrama implementado pelo autor.

Figura 34 Circuito implementado na aplicação PSIM para as simulações

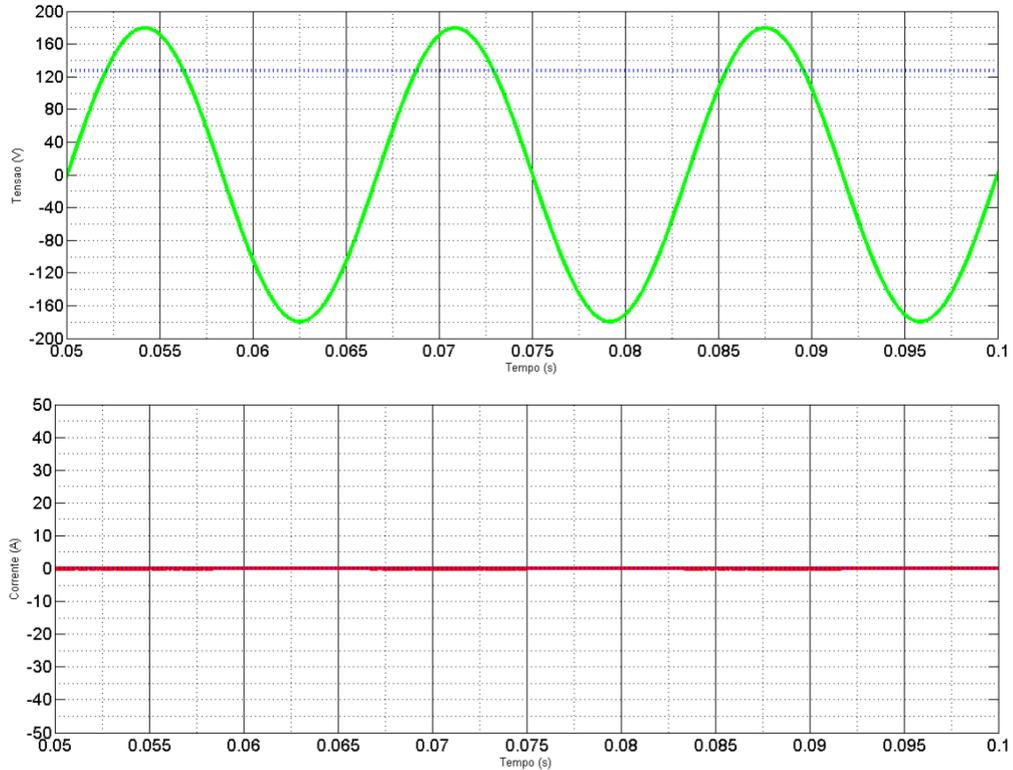


Fonte: Circuito implementado pelo autor no software PSIM.

Inicialmente, executa-se o ensaio e simulação de regime permanente do UPS operando em vazio. A Figura 35 mostra as formas de onda de corrente e tensão resultantes da simulação. A Figura 36 mostra os dados experimentais de formas de onda, distorção harmônica da tensão

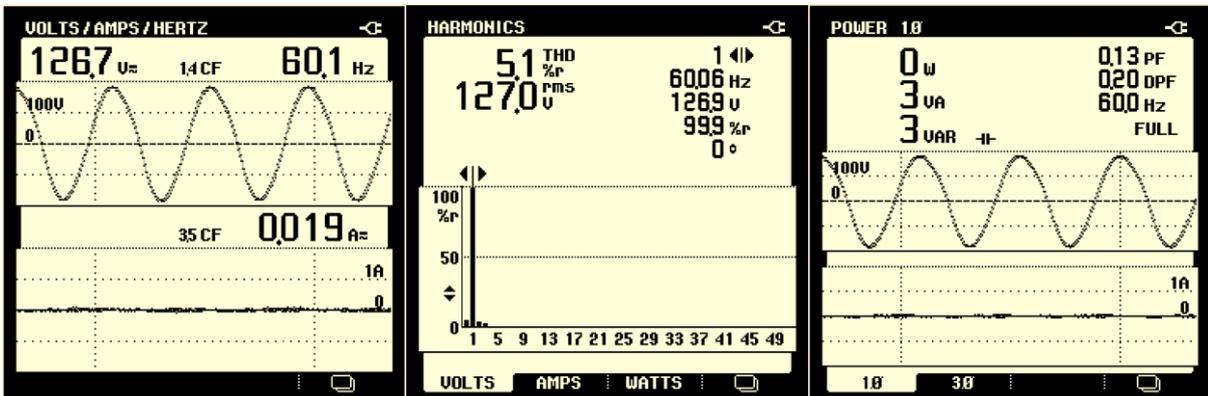
de saída e potência demandada. A Figura 37 mostra as medidas das formas de onda de tensão e corrente observadas experimentalmente.

Figura 35 Formas de tensão e corrente de simulação a vazio



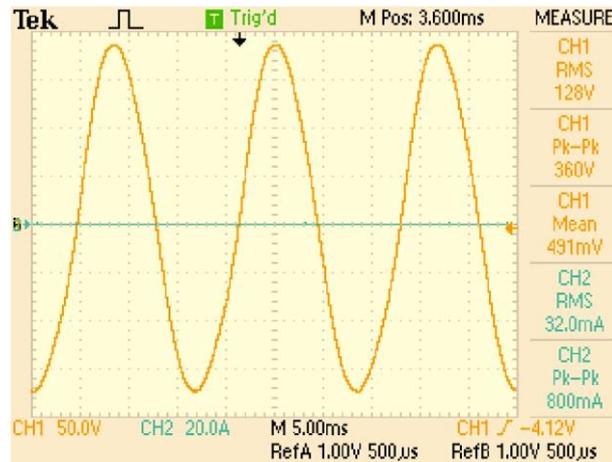
Fonte: Imagens geradas pelo autor utilizando o *software* MATLAB/Simulink.

Figura 36 Dados experimentais do ensaio a vazio



Fonte: Dados obtidos pelo autor através do instrumento Fluke 43B Single-Phase Power Quality Analyser.

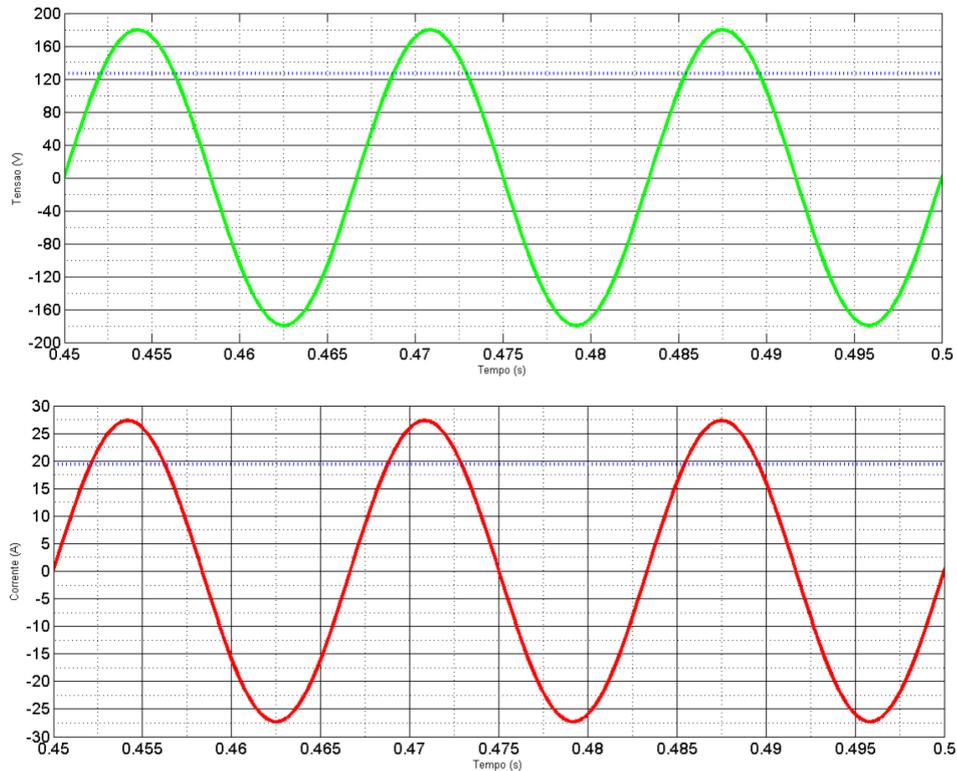
Figura 37 Forma de onda de corrente e tensão no ensaio a vazio



Fonte: Dados obtidos pelo autor através do osciloscópio digital Tektronix TDS2024C.

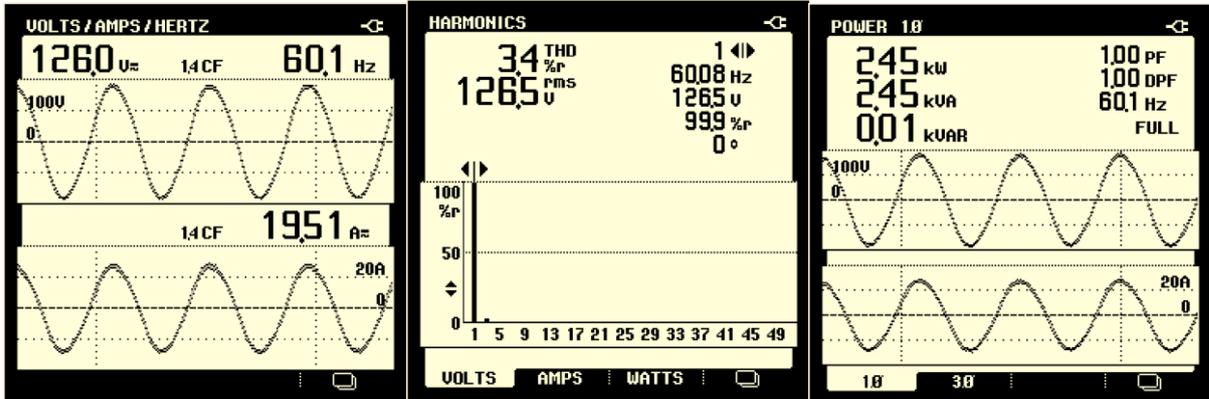
O desempenho em regime permanente do *UPS* alimentando 100% da carga linear é analisado a seguir. A Figura 38 mostra as formas de onda e tensão da simulação. A Figura 39 mostra os dados de forma de onda, distorção harmônica na saída e potência demandada no ensaio. A Figura 40 mostra as medidas de forma de onda observadas experimentalmente.

Figura 38 Formas de tensão e corrente de simulação com carga linear plena



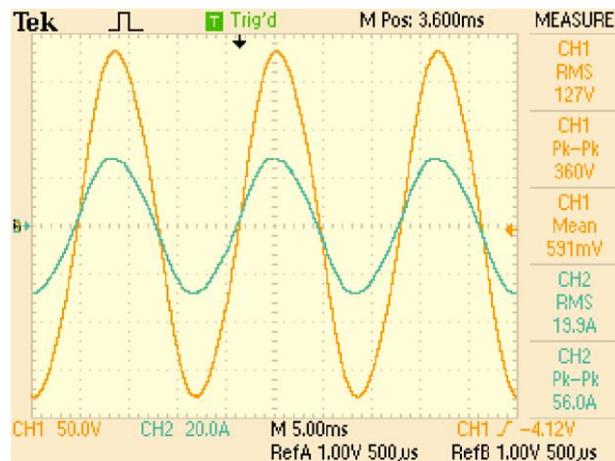
Fonte: Imagens geradas pelo autor utilizando o *software* MATLAB/Simulink.

Figura 39 Ensaio experimental com carga plena linear



Fonte: Dados obtidos pelo autor através do instrumento Fluke 43B Single-Phase Power Quality Analyser.

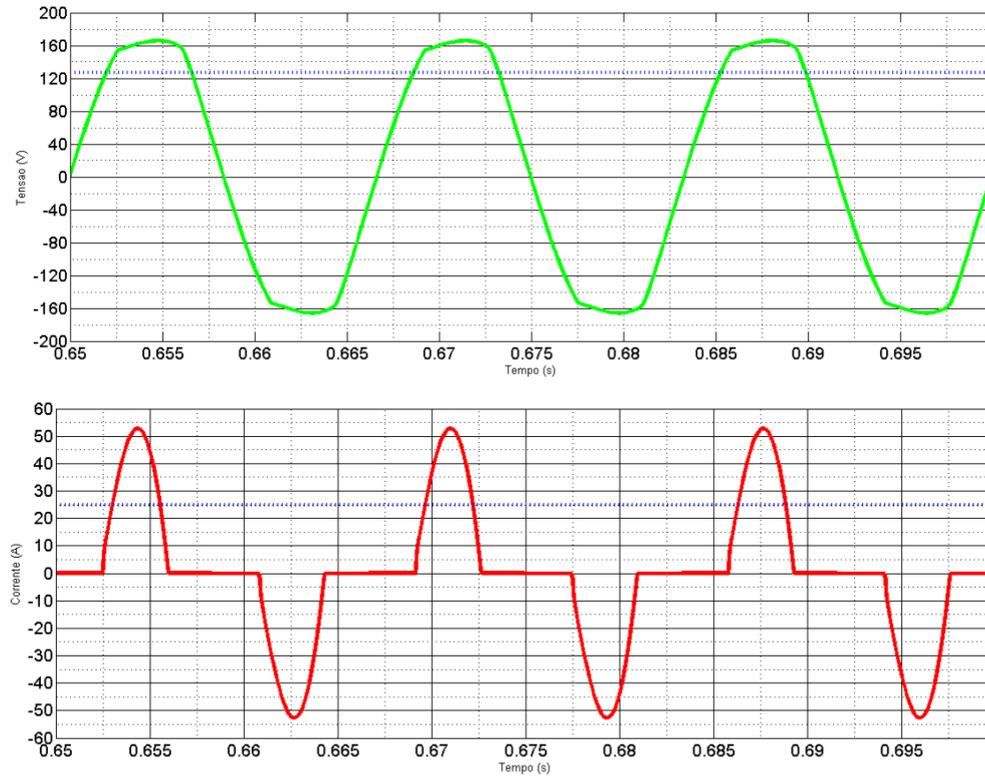
Figura 40 Forma de onda de corrente e tensão no ensaio de carga linear plena



Fonte: Dados obtidos pelo autor através do osciloscópio digital Tektronix TDS2024C.

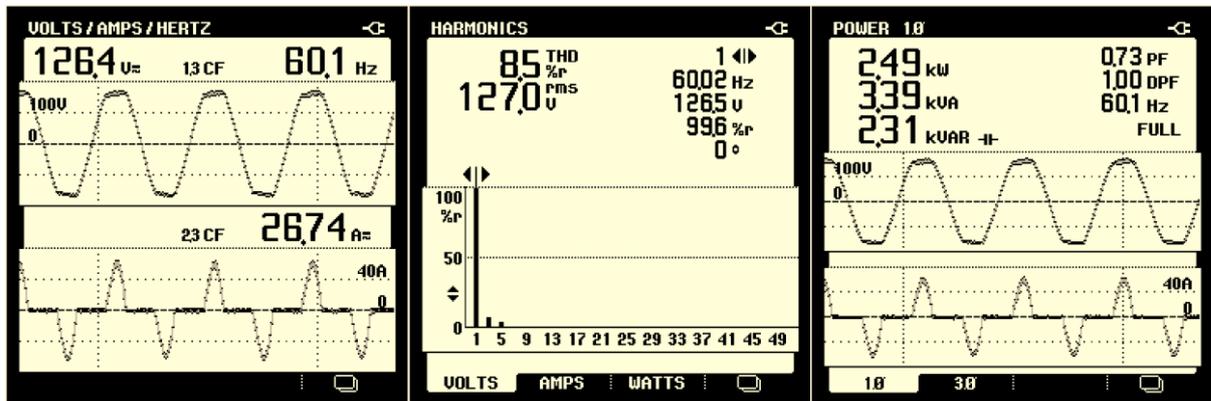
A seguir, analisa-se o desempenho em regime permanente do *UPS* alimentando 100% da carga não linear. A Figura 41 mostra as formas de onda e tensão resultantes na simulação. A Figura 42 mostra os dados de forma de onda, distorção harmônica na tensão de saída e potência demandada no ensaio experimental. A Figura 43 mostra as medidas de forma de onda observadas experimentalmente.

Figura 41 Formas de tensão e corrente de simulação com carga não linear plena



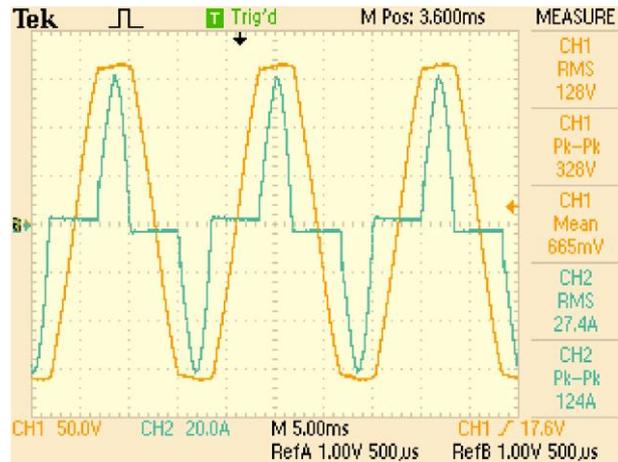
Fonte: Imagens geradas pelo autor utilizando o *software* MATLAB/Simulink.

Figura 42 Ensaio experimental com carga não linear plena



Fonte: Dados obtidos pelo autor através do instrumento Fluke 43B Single-Phase Power Quality Analyser.

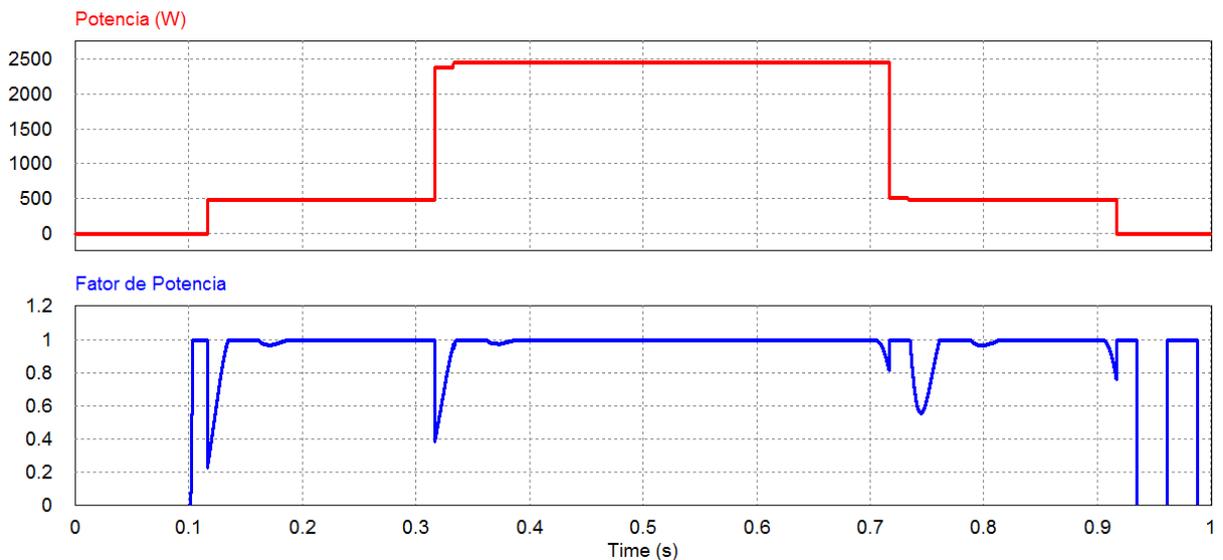
Figura 43 Formas de onda de tensão e corrente no ensaio com carga não linear plena



Fonte: Dados obtidos pelo autor através do osciloscópio digital Tektronix TDS2024C.

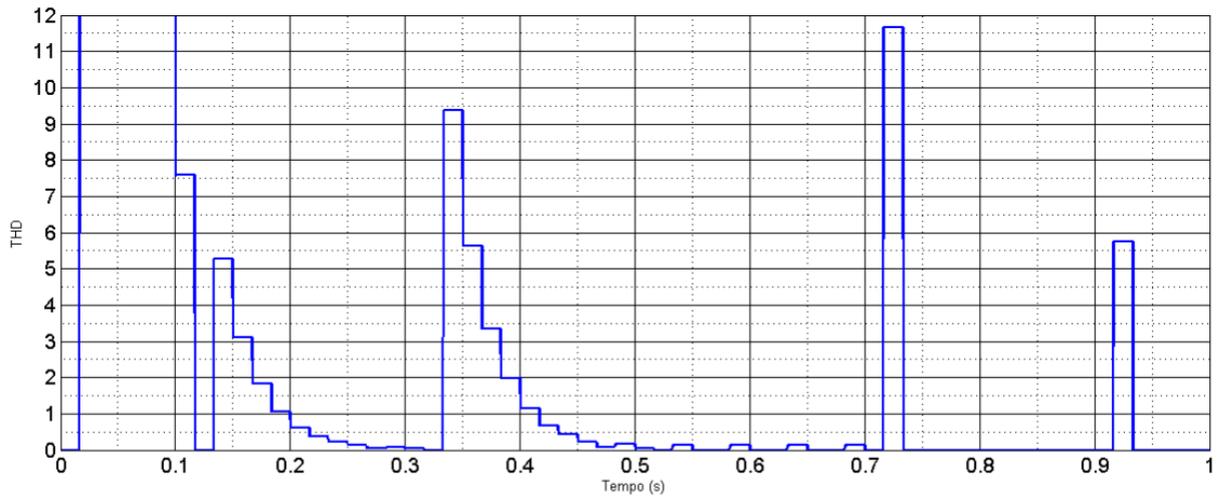
As Figuras Figura 44 e Figura 45 apresentam os gráficos da potência, fator de potência e THD para a carga linear. As Figuras Figura 46 e Figura 47 apresentam os gráficos da potência, fator de potência e THD para os ensaios com carga não linear. A regulação de tensão observada em cada simulação e ensaio é resumida na Tabela 6 abaixo. Os valores de THD observados em cada simulação e ensaio são resumidos na Tabela 7. A Tabela 8 apresenta as razões entre componente harmônica e componente fundamental observadas em cada ensaio experimental.

Figura 44 Potência e Fator de potência na simulação com carga linear



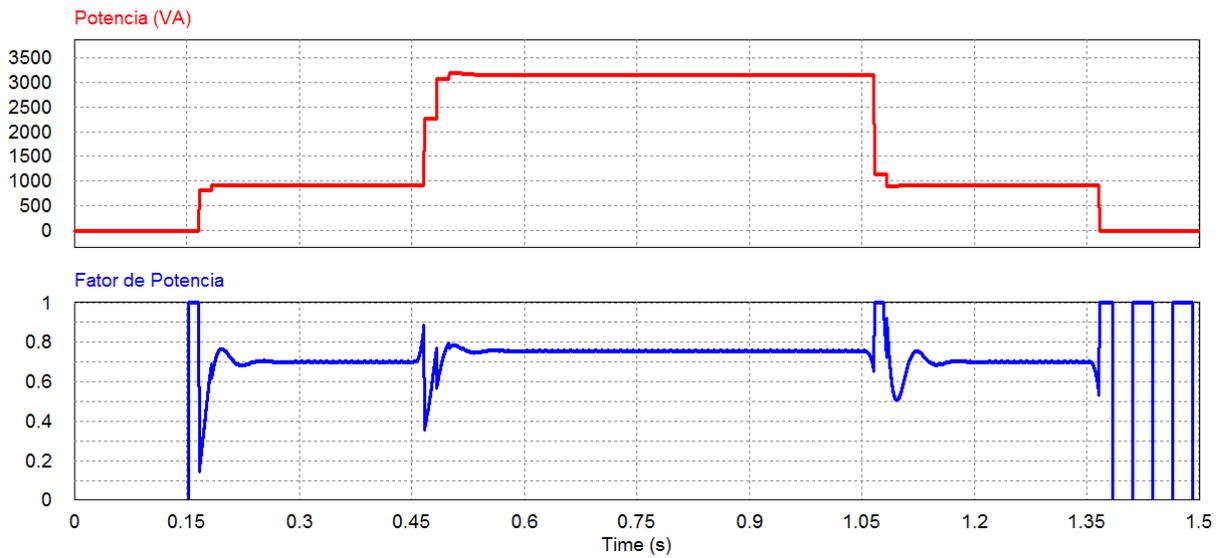
Fonte: Imagens geradas pelo autor utilizando o software PSim.

Figura 45 Valores de THD para simulação com carga linear



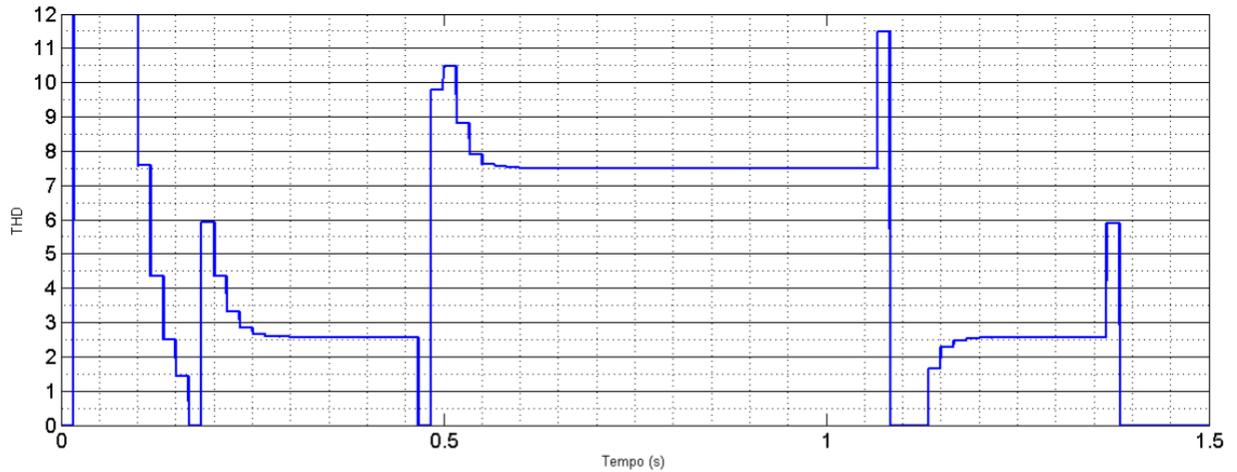
Fonte: Imagem gerada pelo autor utilizando o *software* PSim.

Figura 46 Potência e fator de potência para simulação com carga não linear



Fonte: Imagens geradas pelo autor utilizando o *software* PSim.

Figura 47 Valores de THD para simulação com carga não linear



Fonte: Imagem gerada pelo autor utilizando o *software* PSim.

Tabela 6 Valores de regulação de tensão e frequência observados nas simulações e ensaios

	Simulação		Prática	
	Tensão	Frequência	Tensão	Frequência
Vazio	0%	0,04%	0%	0,1%
Linear	0%	-0,2%	-0,39%	0,13%
Não Linear	0,31%	-0,2%	0%	0,03%

Fonte: Dados obtidos em simulação e com o instrumento Fluke 43B.

Tabela 7 Valores de distorção harmônica observados nas simulações e ensaios

	Simulação	Prática
Vazio	0%	5,1%
Linear	0,14%	3,3%
Não Linear	7,5%	8,5%

Fonte: Dados obtidos em simulação e com o instrumento Fluke 43B.

Tabela 8 Valores experimentais das componentes harmônicas em relação à fundamental em cada ensaio

Ordem da Harmônica	Vazio	Linear	Não Linear
2	3,86%	0,7%	0,87%
3	3,23%	3,24%	7,67%
4	0,39%	0,08%	0,16%
5	0,55%	0,4%	3,4%
6	0%	0%	0,08%
7	0%	0,08%	0,24%
8	0%	0%	0%
9	0%	0,08%	1,03%
11	-	-	0,32%
13	-	-	0,32%
15	-	-	0,24%
17	-	-	0,08%
19	-	-	0,16%

Todos os valores para harmônicas de ordem maior são inferiores a 0,1%.

Fonte: Dados obtidos pelo autor através do instrumento Fluke 43B Single-Phase Power Quality Analyser.

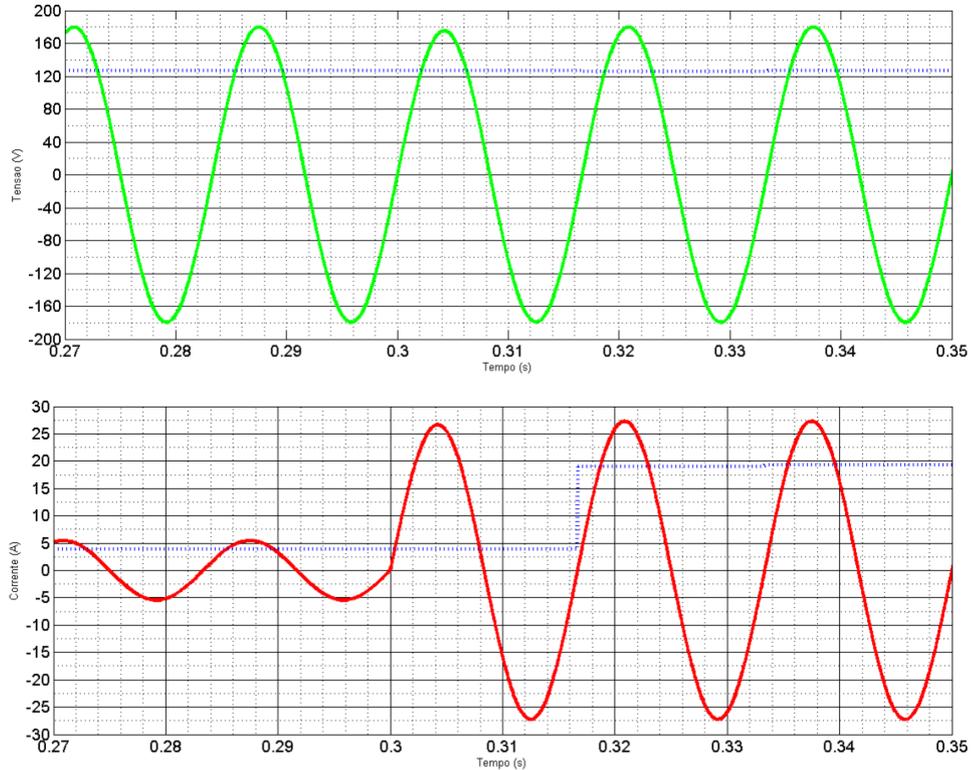
Analisando e comparando os resultados experimentais e de simulação, nota-se grande semelhança entre os dados. A maior diferença observada é da *THD* no ensaio a vazio, devido à distorção inserida pela segunda harmônica no ensaio experimental, quando não há corrente circulando nas cargas e o link CC do inversor não está fornecendo energia. As demais diferenças observadas devem-se principalmente às não idealidades dos componentes reais não consideradas na simulação.

A partir do resumo exposto na Tabela 6, pode-se constatar que o *UPS* atende aos requisitos de regulação de tensão e frequência previstos na norma. A partir das Tabelas Tabela 7 e Tabela 8 e comparando-as com os valores da Tabela 2, nota-se que o *UPS* não atende aos requisitos de distorção harmônica para ter a saída considerada senoidal, principalmente nos ensaios a vazio e com carga não linear.

Para avaliação do desempenho transitório do *UPS*, são realizados os ensaios de degrau de carga aditivo e subtrativo para cada carga. A Figura 48 mostra o resultado obtido na simulação de um degrau aditivo correspondente a 80% da carga linear com o *UPS* operando a

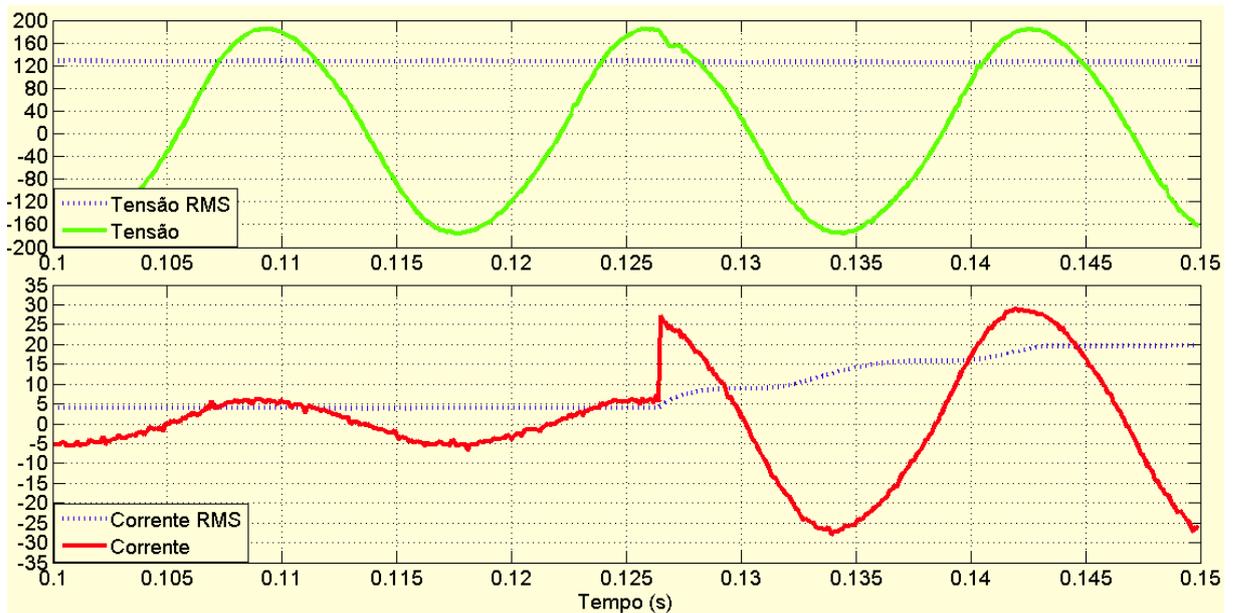
partir de uma carga base de 20%. A Figura 49 mostra o mesmo resultado para o ensaio experimental. A Figura 50 apresenta em detalhe o efeito da adição do degrau de carga no valor *RMS* de saída.

Figura 48 Simulação de um degrau aditivo de carga linear correspondente a 80% da potência ativa nominal



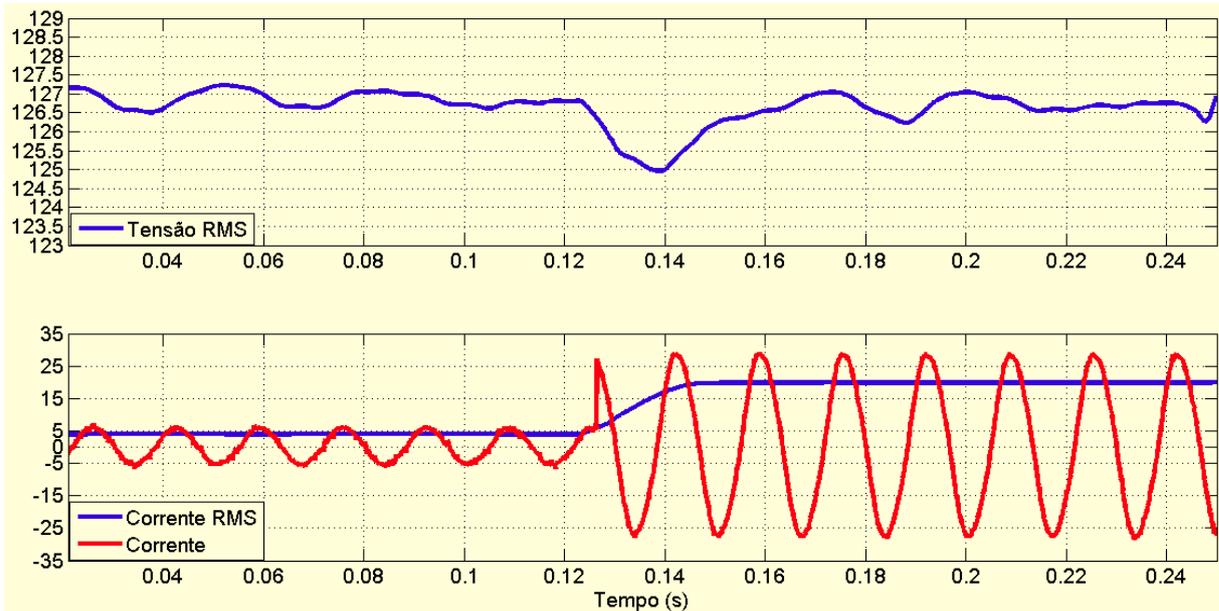
Fonte: Imagens geradas pelo autor utilizando o *software* MATLAB/Simulink.

Figura 49 Forma experimental de um degrau aditivo de 80% da carga linear nominal



Fonte: Imagens geradas no *software* MATLAB a partir dos dados obtidos com o osciloscópio.

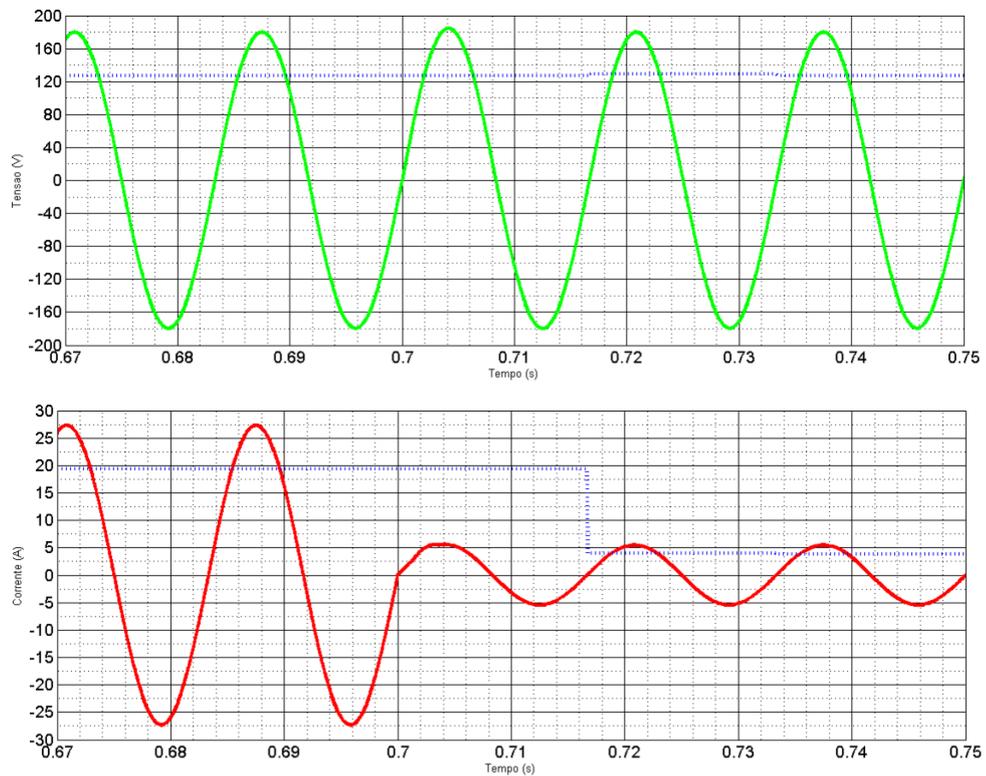
Figura 50 Detalhe da variação do valor RMS da tensão e corrente no momento de inserção do degrau de carga



Fonte: Imagens geradas no *software* MATLAB a partir dos dados obtidos com o osciloscópio.

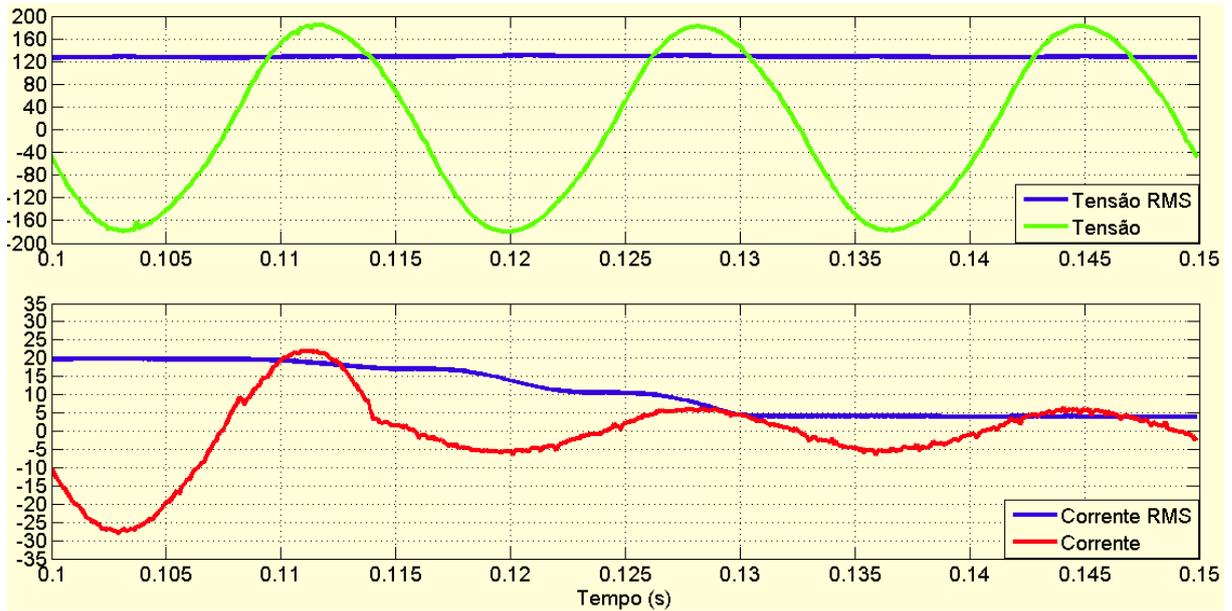
A Figura 51 mostra a simulação da remoção do degrau de carga linear, até a carga base de 20%. A Figura 52 mostra o mesmo resultado para o ensaio experimental. A Figura 53 apresenta em detalhe o efeito da remoção do degrau de carga no valor *RMS* da saída do *UPS*.

Figura 51 Simulação de um degrau subtrativo de carga linear correspondente a 80% da potência ativa nominal



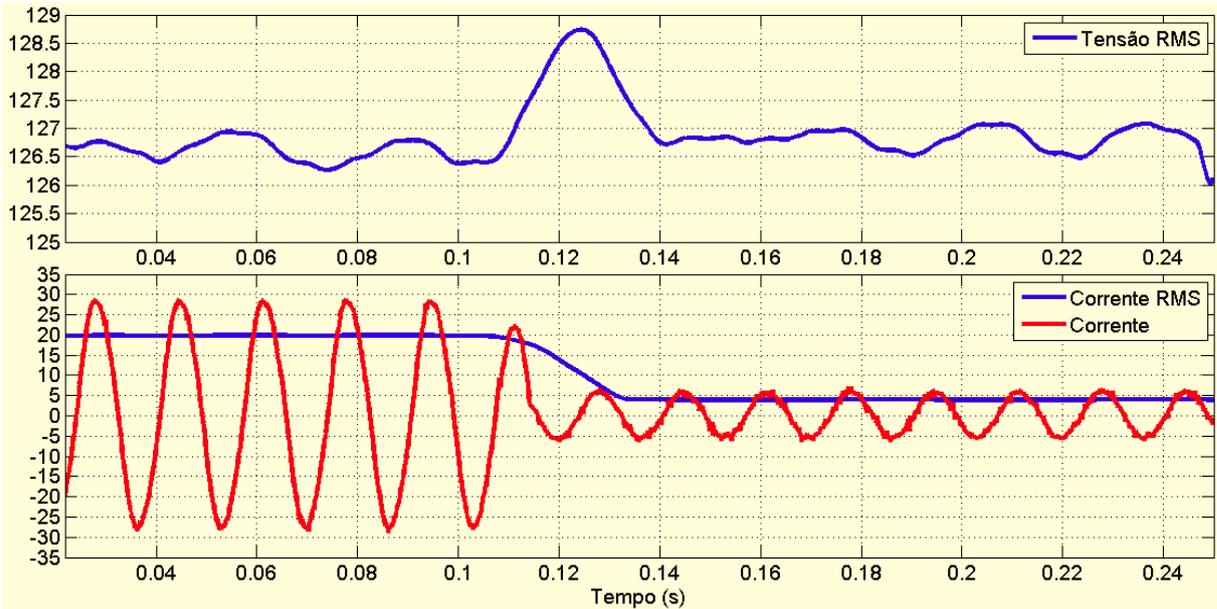
Fonte: Imagens geradas pelo autor utilizando o *software* MATLAB/Simulink

Figura 52 Resposta experimental a um degrau subtrativo de 80% da carga linear



Fonte: Imagens geradas no *software* MATLAB a partir dos dados obtidos com o osciloscópio.

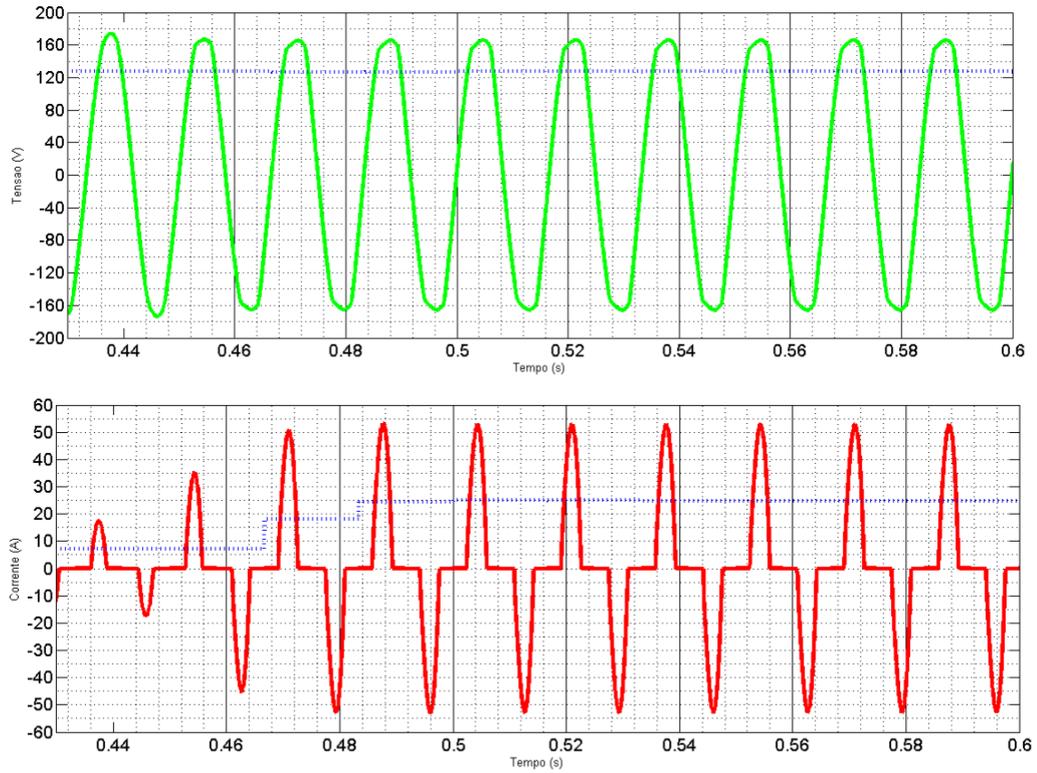
Figura 53 Detalhe da variação do valor RMS da tensão e corrente no momento de remoção do degrau de carga



Fonte: Imagens geradas no *software* MATLAB a partir dos dados obtidos com o osciloscópio.

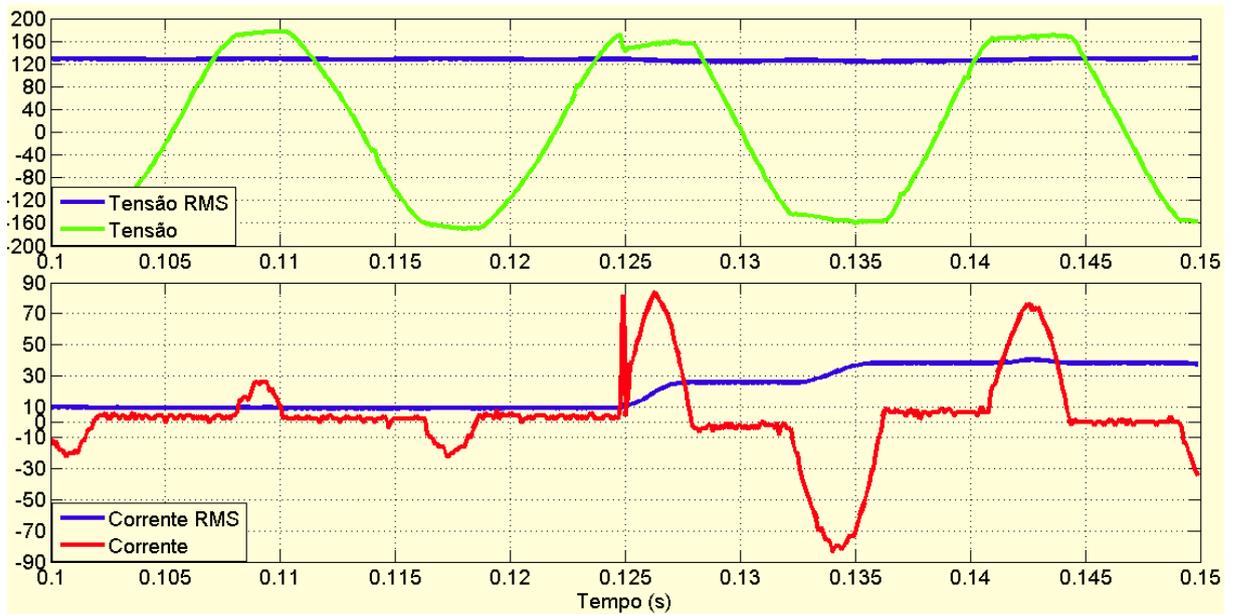
A Figura 54 mostra o resultado obtido na simulação de um degrau aditivo correspondente a 75% da carga não linear com o *UPS* operando a partir de uma carga base de 25%. A Figura 55 mostra o mesmo resultado para o ensaio experimental. A Figura 56 apresenta em detalhe o efeito da adição do degrau de carga no valor *RMS* de saída.

Figura 54 Simulação de um degrau aditivo de carga não linear correspondente a 75% da potência nominal



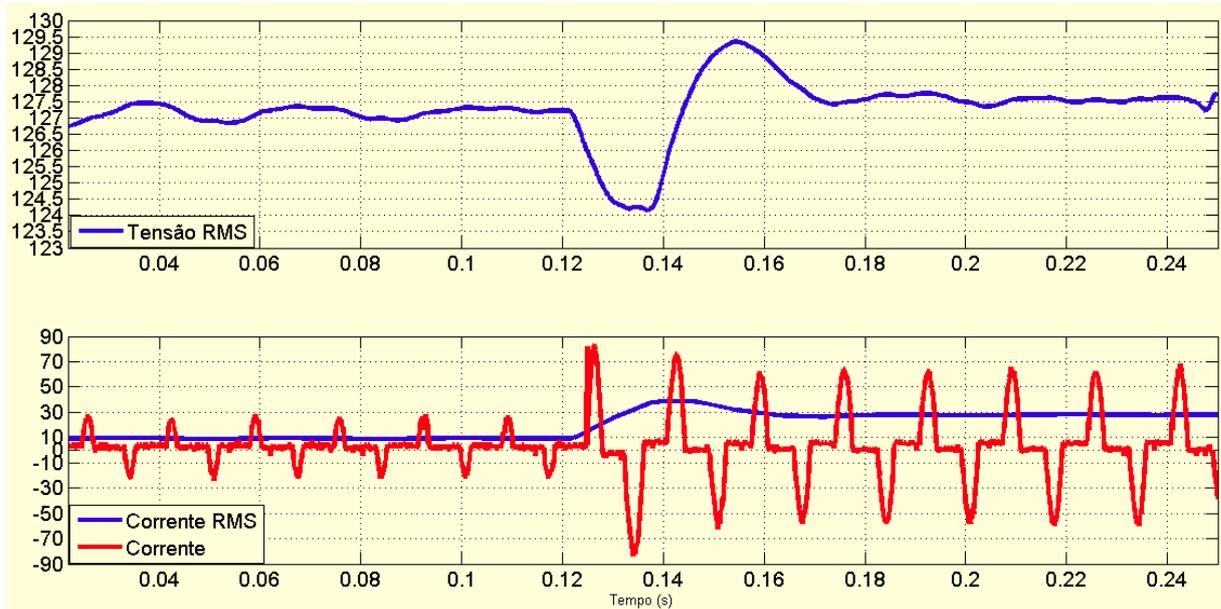
Fonte: Imagens geradas pelo autor utilizando o *software* MATLAB/Simulink

Figura 55 Resposta experimental do ensaio de inserção de degrau de 75% da carga não linear



Fonte: Imagens geradas no *software* MATLAB a partir dos dados obtidos com o osciloscópio.

Figura 56 Detalhe da variação do valor RMS da tensão e corrente na inserção do degrau de carga não linear



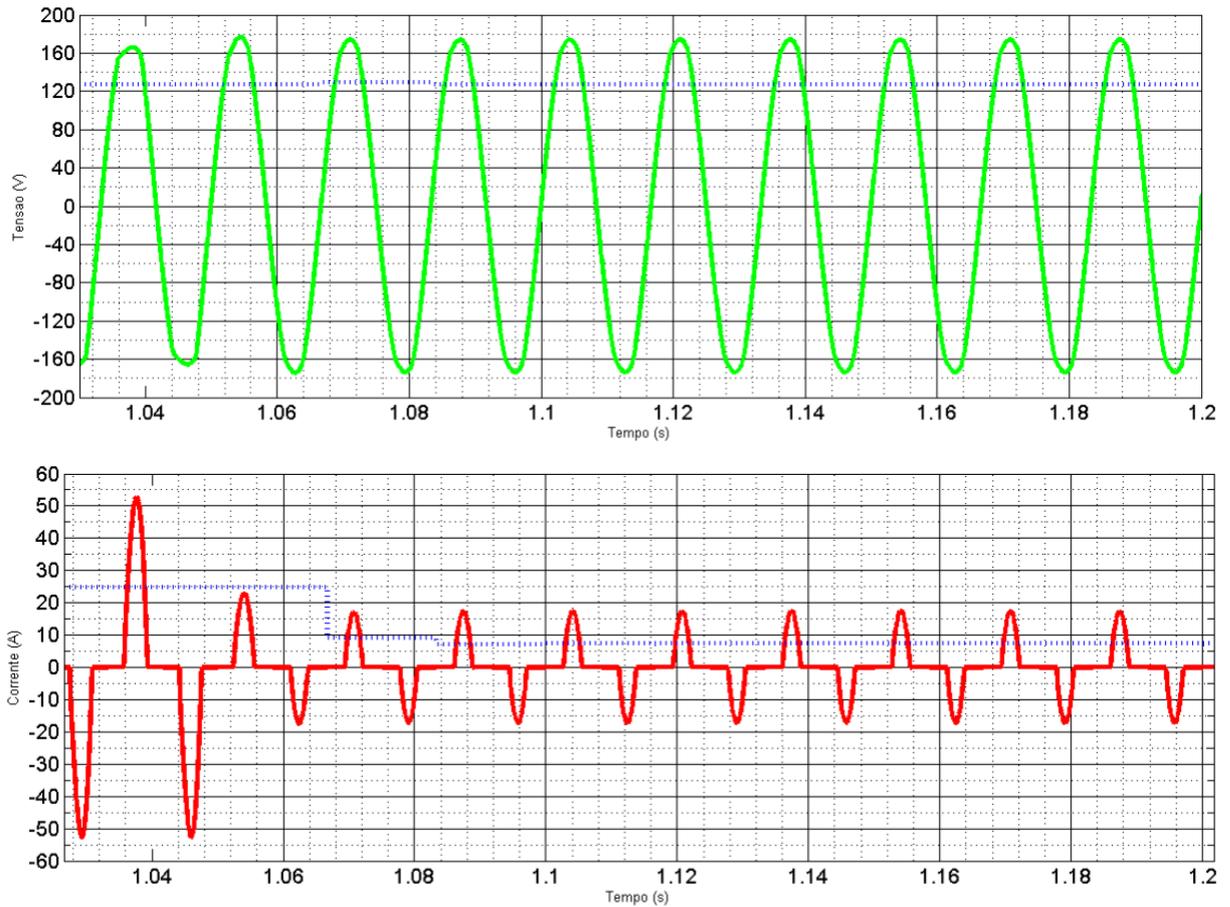
Fonte: Imagens geradas no *software* MATLAB a partir dos dados obtidos com o osciloscópio.

A Figura 57 mostra a simulação da remoção do degrau de carga não linear, passando o *UPS* para a carga base de 25%. A Figura 58 mostra o mesmo resultado para o ensaio experimental. A Figura 59 apresenta em detalhe o efeito da remoção do degrau de carga no valor *RMS* da saída do *UPS*.

Analisando os perfis de resposta transitória obtidos nos ensaios para ambas cargas com degraus aditivos e subtrativos e comparando-os aos perfis das Figuras Figura 19, Figura 20 e Figura 21 estabelecidos na norma, nota-se claramente que o *UPS* atende à exigência de classificação de desempenho dinâmico 1 (exigido para cargas críticas sensíveis), pois a variação da tensão durante o transitório não ultrapassa a regulação de tensão máxima de 10% exigida em regime permanente. É possível notar a influência do tempo de resposta dos contadores na resposta transitória, tornando-a mais suave principalmente nos degraus de remoção de carga, devido ao tempo maior de abertura dos contatos e extinção do arco elétrico.

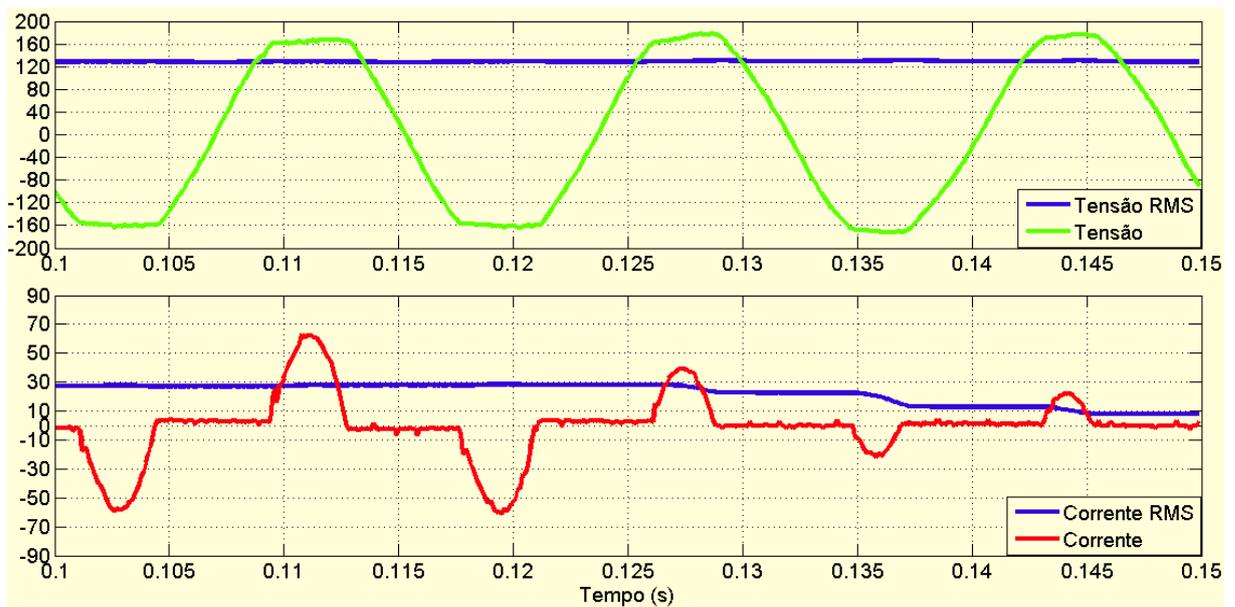
Finalmente, a partir dos ensaios realizados, o *UPS* recebe, de acordo com a norma IEC 62040-3, a classificação de 8 dígitos VFI-X-11, correspondente a um *UPS* com capacidade de regular tensão e frequência de saída e que apresenta saída senoidal para cargas lineares, atendendo a classificação de desempenho dinâmico 1 para cargas críticas lineares e não lineares. Os dígitos faltantes correspondem a testes não aplicáveis ao protótipo utilizado.

Figura 57 Simulação de um degrau subtrativo de carga não linear correspondente a 75% da potência nominal



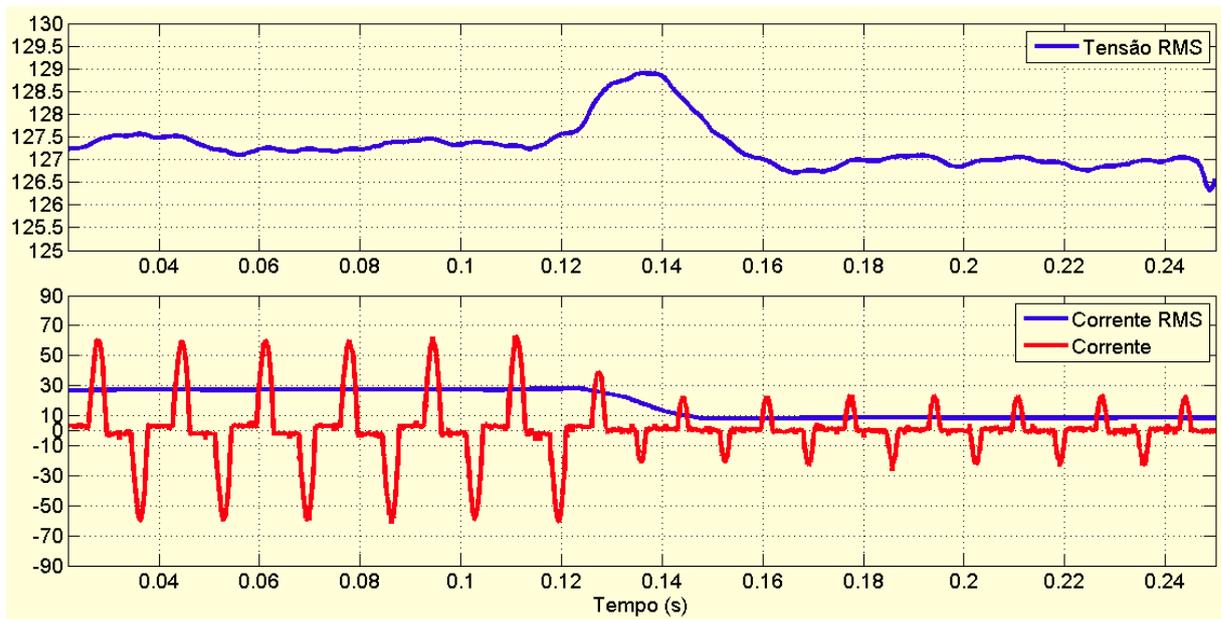
Fonte: Imagens geradas pelo autor utilizando o software MATLAB/Simulink

Figura 58 Resposta experimental para a remoção de 75% da carga não linear



Fonte: Imagens geradas no software MATLAB a partir dos dados obtidos com o osciloscópio.

Figura 59 Detalhe da variação do valor RMS da tensão e corrente na remoção do degrau de carga não linear



Fonte: Imagens geradas no *software* MATLAB a partir dos dados obtidos com o osciloscópio.

4 CONCLUSÃO

A ausência de uma norma brasileira mais rigorosa para sistemas ininterruptos de energia faz com que os nobreaks encontrados no mercado brasileiro não necessariamente atuem de maneira satisfatória para a alimentação das cargas críticas e muitas vezes tenham apenas a função de fonte de energia de *backup* por determinado período. Apesar das normas brasileiras que tratam do assunto serem relativamente recentes e já existirem outras normas internacionais de referência na época da sua elaboração, a norma da ABNT é bastante restrita.

Diferentes estratégias de controle estão sendo elaboradas e aperfeiçoadas para possibilitar resposta satisfatória dos sistemas ininterruptos de energia. A partir do resultado dos ensaios, nota-se que os requisitos de desempenho para *UPS* com saída senoidal da norma IEC 62040 exigem um sistema de controle complexo e não foram atendidos em sua totalidade com a utilização do controlador ressonante. O sistema de controle de um *UPS* se assemelha ao controle necessário para um sistema de armazenamento de energia ser conectado à rede de distribuição pública de energia elétrica. Com a crescente expansão da utilização de fontes renováveis e a busca por armazenamento de energia capaz de possibilitar sua ampla utilização faz com que o interesse nestas estratégias de controle também aumente.

As principais tecnologias existentes para o armazenamento de energia elétrica foram apresentadas brevemente, para situar o leitor quanto a sua importância e desenvolvimento. Antes do projeto do sistema de cargas acionável por computador, foram apresentadas as principais estratégias de controle utilizadas em sistemas *UPS* e um estudo detalhado e comparativo das normas e recomendações aplicáveis a estes equipamentos. Após, foram dimensionados e projetados o acionamento e as cargas necessárias conforme os testes previstos em norma.

Além de proporcionar o conhecimento e análise do funcionamento de sistemas *UPS* e suas estratégias de controle, este trabalho proporcionou maior experiência na utilização de ferramentas computacionais amplamente utilizadas na Engenharia, como o *software* MATLAB/Simulink, integradas a ferramentas mais específicas, como a aplicação PSim e a plataforma de prototipagem e controle em tempo real dSpace, juntamente com o *software* Control Desk. Ainda, a montagem do quadro de comando e cargas possibilitou o aprimoramento de habilidades práticas de organização, planejamento, orçamento, gerenciamento de tempo e cuidados com segurança, envolvendo diversas características desenvolvidas durante o curso de Engenharia, assim como a implementação correta dos

sistemas projetados. É importante poder avaliar e ver em funcionamento o projeto desenvolvido.

O objetivo de possibilitar a automação dos ensaios previstos na norma IEC 62040-3 utilizando o computador para acionamento das cargas foi alcançado com êxito. O sistema implementado garante praticidade e segurança no acionamento das cargas e permite o ensaio de qualquer *UPS* com potência nominal até 4 kVA. Apesar do tempo de abertura dos contatos dos contatores influenciar na resposta transitória do sistema, seu efeito não é prejudicial, pois torna a transição mais suave. As medições e ensaios realizados se aproximam satisfatoriamente dos resultados de simulação e permitem a avaliação das características de desempenho do *UPS* e do controlador em teste.

Dependendo da capacidade da rede primária de energia, se faz necessária a implementação de um sistema de acionamento para limitar a corrente de *inrush* dos capacitores da carga não linear. Este sistema pode ser constituído por resistores ligados em série às cargas no momento da conexão com a rede primária e, após, aciona-se um contator de *by-pass* para eliminar os resistores do circuito no momento do ensaio. Futuramente, pode-se estender o sistema de acionamento para *UPS* com potência nominal superior a 4 kVA, adaptando o sistema para possibilitar três degraus de carga não linear correspondentes a 1/3 da carga nominal. Recomenda-se implementar o programa de acionamento em um micro controlador independente da plataforma dSpace, para limitar o processamento da plataforma ao sistema de controle. Durante os ensaios, observou-se algumas vezes a mensagem “*Task overrun error*”, devido a elevada frequência de amostragem necessária ao controlador e alta demanda de processamento. Ainda, pode-se aprimorar o sincronismo do acionamento para ocorrer no pico da senóide de saída e garantir que os formatos de rede primária e saída do *UPS* estejam constantemente em fase.

Para finalizar, sugere-se utilizar o sistema de acionamento implementado para submeter aos testes os demais controladores citados no trabalho e avaliar se estes atendem satisfatória e plenamente os requisitos de desempenho das normas internacionais.

REFERÊNCIAS

1. WESTERN POWER DISTRIBUTION. **Disturbances to your electrical equipment and supply**. Bristol, UK. 2011.
2. KAPLAN, D. **Software for Grid-Connected Energy Storage**. IEEE-Northwest Energy Systems Symposium (NWESS). Seattle, USA: University of Washington. April 2014.
3. GOV.UK. Feed-in Tariffs. **GOV.UK**, Agosto 2014. Disponível em: <<https://www.gov.uk/feed-in-tariffs/overview>>. Acesso em: Setembro 2014.
4. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **Uninterruptible power systems (UPS) - Part 3: Method of specifying the performance and test requirements**. IEC. Bruxelas, BE. 2011. (IEC62040-3:2011).
5. DARWISH, D. M. UPS Systems. Londres, UK: Brunel University, 2013.
6. ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. **Electricity Energy Storage Technology Options**. Electric Power Research Institute. Palo Alto, USA, p. ix. 2010.
7. U. S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. International Energy Statistics. Disponível em: <<http://www.eia.gov/countries/data.cfm>>. Acesso em: Setembro 2014.
8. PIEPER, C.; RUBEL, H. **Revisiting Energy Storage: There Is a business case**. The Boston Consulting Group. [S.l.], p. 23. 2011.
9. SYMANSKI, D. P. **Residential & Commercial use of DC Power**. NEMA, UL & NFPA Low Voltage Direct Current Workshop. Arlington, USA: [s.n.]. 2011.
10. TODD, B. DC microgrids: a new source of local power generation? **renewableenergyfocus.com**, Agosto 2009.
11. NEMA. Nearing the First Standard for Energy Storage Systems, Abril 2013. Disponível em: <<http://www.nema.org/news/Pages/Nearing-the-First-Standard-for-Energy-Storage-Systems.aspx>>. Acesso em: Setembro 2014.
12. LORENZINI, C. **Controladores ressonantes-repetitivos em sistemas ininterruptos de energia**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 79. 2013.
13. RASMUSSEN, N. **The different types of UPS systems**. APC - American Power Conversion. West Kingston, USA. 2003.
14. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Conversor a semicondutor - Sistema de alimentação de potência ininterrupta, com saída em corrente alternada (nobreak) - Terminologia**. ABNT. Rio de Janeiro. 2003. (NBR 15014).
15. FURLONG, D. E. R. **UPS Topologies for Large Critical Power Systems (> 500 KVA)**. Annual Power Quality Exhibition & Conference. Atlanta, USA: [s.n.]. 2002.

16. THEODORIDIS, M. P. Electric Energy Storage. London, UK: Brunel University, 2012.
17. WARTH, A. Conta de luz terá reajuste médio de mais de 17% na tarifa. **Estadão**, São Paulo, Out 2014.
18. GOMES, K. Para evitar crise, Brasil precisa diversificar matriz energética. **Carta Capital**, São Paulo, Fev 2014.
19. EEUWENS, K. Alcoa May Close Brazil Units on High Energy Costs, Valor Says. **Bloomberg**, Londres, UK, Jan 2012.
20. VALOR ECONÔMICO. Energia brasileira é uma das mais caras do mundo, afirma presidente da Alcoa. **Companhia Hidro Elétrica do São Francisco**, São Paulo, Nov 2010.
21. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2013**. EPE. Rio de Janeiro. 2013.
22. GRIDSTOR JOINT INDUSTRY PROJECT. **RECOMMENDED PRACTICE FOR GRID-CONNECTED ENERGY STORAGE SYSTEMS**. DNV GL. Bærum, Norway. 2014.
23. HÄGGLUND, T.; ÅSTRÖM, K. J. **PID Controllers: Theory, design and tuning**. 2. ed. [S.l.]: Instrument Society of America, 1995.
24. THOMAZ, G. **Projeto de leis de controle robusto do tipo PSC via realimentação de estados aplicada a um sistema UPS**. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2009.
25. DENG, H.; ORUGANTI, R.; SRINIVASAN, D. **Modeling and Control of Single-Phase UPS Inverters: A Survey**. IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems. Kuala Lumpur, Malasia: IEEE. 2005.
26. TEODORESCU, R.; LISERRE, M.; RODRÍGUEZ, P. Appendix C: Resonant Controller. In: _____ **Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 2010.
27. HAYKIN, S. S.; VAN VEEN, B. **Sinais e Sistemas**. 1. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 668 p.
28. ALVES PEREIRA, L. F. et al. Multiple Resonant Controllers for Uninterruptible Power Supplies A Systematic Robust Control Design Approach. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 61, p. 1528-1538, 2014.
29. LI, P. Y. Internal Model Principle and Repetitive Control. In: _____ **Advanced Control System Design**. [S.l.]: University of Minnesota, 2012.
30. YAMAMOTO, Y. **An Overview on Repetitive Control**. Kyoto University. Kyoto. 2001.
31. HARA, S. et al. Repetitive control system: a new type servo system for periodic exogenous signals. **IEEE Transactions on Automatic Control**, Tokyo, Japão, 1988.
32. VIEIRA FLORES, J. et al. Síntese de controladores repetitivos chaveados: uma aplicação à fontes ininterruptas de energia (UPS). **Sba Controle & Automação**, Campinas, BRA, Março/Abril 2011.

33. ALVES PEREIRA, L. F. et al. A Resonant-Repetitive Control Scheme Applied to Uninterruptible Power Supplies (UPS). **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, Campinas, v. 24, p. 253-262, 2013.
34. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Conversor a semicondutor - Sistema de alimentação de potência ininterrupta com saída em corrente alternada (nobreak) - Segurança e desempenho**. ABNT. Rio de Janeiro. 2005. (NBR 15204).
35. INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. **IEEE Recommended Practice for the application and testing of UPS for Power Generating Stations**. IEEE. New York, USA. 1986. (IEEE Std 944).
36. ENERGY STAR. **ENERGY STAR® Program Requirements for Uninterruptible Power Supplies (UPSs)**. Energy Star. Washington, USA. 2012.
37. CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **Performance test method for uninterruptible power supplies**. CSA Group. Ontario, CA. 2014. (CSA C813.1-14).