

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

WALTER FERREIRA DINIZ JUNIOR

**VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DO MÉTODO ALTERNATIVO PARA O
CONTROLADOR RESSONANTE APLICADO EM NOBREAK**

Porto Alegre
2015

WALTER FERREIRA DINIZ JUNIOR

**VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DO MÉTODO ALTERNATIVO PARA O
CONTROLADOR RESSONANTE APLICADO EM NOBREAK**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Luís Fernando Alves Pereira

Porto Alegre
2015

WALTER FERREIRA DINIZ JUNIOR

**VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DO MÉTODO ALTERNATIVO PARA O
CONTROLADOR RESSONANTE APLICADO EM NOBREAK**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de "Projeto de Diplomação", do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo orientador e pela banca Examinadora

Orientador: Prof. Dr. Luís Fernando Alves Pereira

Coordenador do Curso: Prof. Dr. Alexandre Balbinot, UFRGS

Aprovado em 24/06/2015

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luís Fernando Alves Pereira, UFRGS
Doutor pelo ITA - São José dos Campos, Brasil

Prof. Dr. Jeferson Vieira Flores, UFRGS
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Renato Ventura Bayan Henriques, UFRGS
Doutor pela Universidade Federal de Minas Gerais - Belo Horizonte, Brasil

Porto Alegre
2015

Dedico este trabalho a minha mãe, Ivonete Silva Santos, pelo apoio, paciência e conselhos durante toda a minha graduação.

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus por tornar isso possível, depois a minha família por me apoiar, ajudar e acreditar no meu potencial. Num terceiro momento, a Tássia Valquíria Silva Santos, irmã, amiga e motivadora dos momentos mais difíceis e também dos mais fáceis. De toda forma, sempre muito presente.

Agradeço ao professor Luís Fernando Alves Pereira pela orientação e por conselhos, continuamente, na elaboração deste trabalho.

Agradeço também ao mestrando Charles Lorenzini que me passou as instruções da operação da UPS, no LASCAR, tratada neste trabalho.

Em última análise agradeço aos meus colegas da graduação de engenharia elétrica que de alguma forma contribuíram para eu concluí-la.

Resumo

Este trabalho pretende validar a simulação e os resultados experimentais da tensão de saída de uma planta UPS (Do inglês - *Uninterruptible Power Supply*) de $3.5kVA$, segundo as normas IEC (Do inglês - *International Electrotechnical Commission*) e IEEE (Do inglês - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*), considerando o modelo alternativo desenvolvido pelo Msc. Fábio Medeiros de Carvalho. O modelo alternativo altera os ganhos do controlador ressonante formulado e sintetizado pela abordagem LMI (Do inglês - *Linear Matrix Inequality*) de uma UPS escolhida convenientemente. A formulação LMI supramencionado compreende o resultado da manipulação algébrica das restrições idealizadas segundo a teoria de estabilidade, especificamente o método direto, desenvolvida pelo matemático e físico russo Aleksandr Lyapunov. As restrições compreendem a minimização da energia do sinal de controle, para rejeição de harmônicos e seguimento assintótico da referência, e a D-estabilidade, para melhor desempenho transitório quando adicionado ou subtraído um degrau de carga. Para este trabalho foi utilizado os ganhos da formulação LMI da UPS de $10kVA$ e, em seguida, determinado o polinômio característico desejado, para recalcular os ganhos da planta, disponível no LASCAR (Laboratório e Automação, Sistemas de Controle e Robótica) da UFRGS, de $3.5kVA$ e, desta forma determinar o polinômio característico dinâmico. Nas simulações do PSIM (Do inglês - *Power Electronic Simulation*) foi constatado que o controlador ressonante satisfaz para o método das LMIs e Alternativo, o perfil 1,2 e 3 da norma IEC 62040-3 para a carga linear, enquanto para carga não linear o desempenho nos três perfis ficou no limite para o método Alternativo, e acima do limite para o método das LMIs. Quanto aos níveis de THD (Do inglês - *Total Harmonic Distortion*), somente para a carga linear o controlador ressonante, para ambos os métodos, atendeu as exigências das normas IEEE 944 e IEC 62040-3. Finalmente, os níveis de tensão RMS (Do inglês - *Root Mean Square*) para a carga linear foram satisfeitos com relativa margem, para ambos os métodos, enquanto para a carga não linear ficaram, praticamente, no limite da IEEE 944 para ambos os métodos. Os resultados experimentais apresentaram valores semelhantes para a THD de carga não linear, $THD = 12.63\%_{Simulado} \cong 12.6\%_{Prático}$. A THD da carga linear, para o método alternativo, prático e simulado no PSIM foram bastantes defasadas, $THD = 0.25\%_{Simulado} \neq 3.6\%_{Prático}$, porém satisfatórios para as normas IEC 62040-3 ($8\%_{Limite}$), IEEE 944 ($5\%_{Limite}$) e suficiente para o escopo deste trabalho.

Palavras-chave: Controlador Ressonante, IEE 944, IEC 62040-3.

Abstract

This work aims to validate the simulation and experimental results of the output voltage of a UPS plant $3.5kVA$, according to the standards IEC 62040-3 and IEEE 944, considering the alternative model developed by MSc. Fábio Medeiros de Carvalho. The alternative model alters the resonant controller gains formulated and summarized by LMI approach (Linear Matrix Inequality) of a UPS chosen conveniently. The above LMI formulation comprises the result of the algebraic manipulation of restrictions idealized according to the theory of stability, specifically the direct method, developed by russian mathematician and physicist Aleksandr Lyapunov. The restrictions include minimizing the control signal power, rejection of harmonics, and the D-stability, asymptotic tracking and better transient performance when added or subtracted a load step. For this work we used the LMI formulation of gains from UPS $10kVA$ and then given the desired characteristic polynomial, to recalculate the plant's earnings, available on LASCAR of UFRGS, from $3.5kVA$ and thus determine the dynamic characteristic polynomial. In PSIM simulations it was found that the resonant controller satisfied, too loosely, to the method of LMI and Alternative, Profile 1, 2 and 3 of the IEC 62040-3 standard for linear load, while for non-linear load performance in three profiles was the limit for the Alternative Method, and just above the limit for the method of LMI. As for the THD levels only for the linear load resonant controller for both methods has met the requirements of the IEEE 944 and IEC 62040-3 standards. Finally, RMS voltage levels of linear load were satisfied with clearance relative to both methods, while for the nonlinear load were practically at the boundary for both methods. The experimental results showed similar values for the nonlinear load THD, $THD = 12.63\%_{Simulated} \cong 12.6\%_{Practical}$. The THD of the linear load to the alternative method, practical and simulated in PSIM were quite outdated, $THD = 0.25\%_{Simulated} \neq 3.6\%_{Practical}$, but satisfactory for the standards IEC 62040-3 ($8\%_{Limit}$), IEEE 944 ($5\%_{Limit}$) and sufficient for the scope of this work.

Keywords: Control Ressonant, IEE 944, IEC 62040-3.

Lista de Figuras

1	Perfil 1 da norma IEC 62040-3.	14
2	Perfil 2 da norma IEC 62040-3, 2004.	14
3	Perfil 3 da norma IEC 62040-3, 2004.	15
4	Principais distúrbios encontrados na rede elétrica.	15
5	Esquemático simplificado de uma UPS.	18
6	Exemplo de carga não linear.	21
7	Corrente em cargas não lineares.	23
8	Modelo de carga admitido.	23
9	Diagrama de BODE do controlador ressonante.	24
10	Implementação direta II do Controlador Ressonante.	26
11	Fluxograma para escolha de P_D	30
12	Níveis percentuais de tensão para harmônicos.	33
13	Transiente da tensão em degrau aditivo e subtrativo de carga.	34
14	Sistema UPS com carga no PSIM.	34
15	Acionamento e carga linear no PSIM.	35
16	Acionamento e carga não linear no PSIM.	35
17	Comparação das curvas da tensão, corrente e referência para carga linear.	36
18	Comparação da variação da tensão RMS para carga linear.	37
19	Comparação do THD da tensão de saída para carga linear.	38
20	Comparação do sinal de controle para carga linear.	39
21	Comparação dos transientes de tensão conforme perfil 1 para carga linear.	40
22	Comparação dos transientes de tensão conforme perfil 2 para carga linear.	40
23	Comparação dos transientes de tensão conforme perfil 3 para carga linear.	41
24	Comparação das curvas da tensão, corrente e referência para carga não linear.	42
25	Comparação da variação da tensão RMS para carga não linear.	43
26	Comparação do THD da tensão de saída para carga não linear.	44
27	Comparação do sinal de controle para carga não linear.	45
28	Comparação dos transientes de tensão conforme perfil 1 para carga não linear.	46
29	Comparação dos transientes de tensão conforme perfil 2 para carga não linear.	46
30	Comparação dos transientes de tensão conforme perfil 3 para carga não linear.	47
31	Placa de aquisição DSPACE.	49
32	Algoritmo de Controle Utilizado.	50
33	Subsistema do Controlador Discretizado.	50
34	Subsistema do inversor de meia ponte.	50
35	Variador de tensão trifásico.	51
36	Tensão e corrente a vazio (Fig. a) e tensão e corrente com carga linear (Fig. b).	52
37	THD da tensão operando a vazio (Fig. a) e com carga linear (Fig. b).	52
38	Tensão, corrente (Fig. a) e THD (Fig. b) da tensão.	53
39	Transitório do degrau aditivo (Fig. a) e subtrativo (Fig. b) de carga.	54
40	Perfil 1 da IEC para o transitório da Figura 37.	55
41	Perfil 2 da IEC para o transitório da Figura 37.	55
42	Perfil 3 da IEC para o transitório da Figura 37.	56

43	Curva tensão de saída da UPS com 100% de carga não linear.	61
44	Valor RMS da tensão de saída da UPS.	62
45	THD da tensão de saída da UPS.	62
46	Perfil 1 da norma IEC para tensão de saída da UPS.	63
47	Curva tensão de saída da UPS com 100% de carga não linear.	63
48	Valor RMS da tensão de saída da UPS.	64
49	THD da tensão de saída da UPS.	64
50	Perfil 1 da norma IEC para tensão de saída da UPS.	65
51	Curva tensão de saída da UPS com 100% de carga não linear.	65
52	Valor RMS da tensão de saída da UPS.	66
53	THD da tensão de saída da UPS.	66
54	Perfil 1 da norma IEC para tensão de saída da UPS.	67
55	Curva tensão de saída da UPS com 100% de carga não linear.	67
56	Valor RMS da tensão de saída da UPS.	68
57	THD da tensão de saída da UPS.	68
58	Perfil 1 da norma IEC para tensão de saída da UPS.	69

Lista de Tabelas

1	Expressões das constantes do Polinômio (P_d)	31
2	Coefficientes do polinômio P_d	32
3	Ganhos determinados por ambos os métodos	32
4	Percentuais da tensão RMS em diferentes modos de operação	37
5	THD da tensão em diferentes modos de operação	38
6	Método Alternativo com carga linear	42
7	Método das LMIs com carga linear	42
8	Percentuais da tensão RMS em diferentes modos de operação	43
9	THD da tensão em diferentes modos de operação	44
10	Método Alternativo com carga não linear	48
11	Método das LMIs com carga não linear	48
12	Coefficientes do função discretizada	48
13	Coefficientes do Método Alternativo	49
14	Resultado experimental para a carga linear.	53
15	Resultado experimental para a carga não linear.	54
16	Percentuais da tensão RMS em diferentes modos de operação	62
17	THD da tensão em diferentes modos de operação	62
18	Percentuais da tensão RMS em diferentes modos de operação	64
19	THD da tensão em diferentes modos de operação	64
20	Percentuais da tensão RMS em diferentes modos de operação	66
21	THD da tensão em diferentes modos de operação	66
22	Percentuais da tensão RMS em diferentes modos de operação	68
23	THD da tensão em diferentes modos de operação	69

Lista de Abreviaturas e Siglas

UPS – Uninterruptible Power Supply

IEC – International Electrotechnical Commission

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

LMI – Linear Matrix Inequality

LASCAR – Laboratório e Automação, Sistemas de Controle e Robótica

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

PSIM – Power SIMulation

THD – Total Harmonic Distortion

PID – Proportional Integral Derivative

RMS – Root Mean Square

PWM – Pulse Width Modulation

MATLAB – MATrix LABoratory

DSPACE – Digital Signal Processing And Control Engineering

IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor

FPGA – Field Programmable Gate Array

CC – Corrente Contínua

DC – Direct Current

CA – Alternating Current

Conteúdo

1	Introdução	12
2	Motivação para Elaboração do Modelo Alternativo	14
2.1	Distúrbios na Rede Elétrica	14
2.2	Aplicações na Indústria	17
3	Modelagem do sistema UPS	18
3.1	Modelagem da Planta UPS	18
3.2	Modelagem da Carga Linear	21
3.3	Modelagem da Carga Não Linear	21
3.4	Modelagem do Controlador Ressonante	24
4	Metodologia e Sintonia do Controlador Ressonante	27
4.1	Formulação LMI das Restrições	27
4.2	Polinômio Característico Desejado - (Pd)	28
4.3	Polinômio Característico Dinâmico - (Pc)	29
4.4	O Método Alternativo	29
5	Simulação no PSIM da UPS de 3.5kVA	33
5.1	Definições da norma IEC 62040-3	33
5.2	Planta UPS, Acionamento e Cargas no PSIM	34
5.3	Comparação do Método Alternativo e das LMIs	35
5.3.1	Carga linear	35
5.3.2	Carga não linear	42
6	Resultados Experimentais	48
6.1	Discretização do Controlador Ressonante	48
6.2	Implementação Prática da UPS de 3.5kVA	49
6.3	Resultados da Implementação	52
7	Conclusão	57
8	Referências	59
9	Apêndice A - Simulação para 2, 3, 4 e 5 Modos Ressonantes	61
9.1	Simulação para 2 Modos Ressonantes	61
9.2	Simulação para 3 Modos Ressonantes	63
9.3	Simulação para 4 Modos Ressonantes	65
9.4	Simulação para 5 Modos Ressonantes	67
10	Anexo A - Código Desenvolvido para o Método Alternativo	70

1 Introdução

Com o advento das cargas não lineares, compreendendo principalmente retificadores de onda completa, a qualidade de energia elétrica diminuiu bastante, ou seja, a taxa de distorção harmônica aumentou, o que acentuou o conteúdo harmônico da tensão da rede elétrica. Não obstante, a qualidade de energia da rede pode ser bastante comprometida quando alimentando os equipamentos na indústria, uma vez que esse ambiente hostil apresenta partidas de motores, subtensão, sobretensão, ruídos, falta de rede e, eventualmente variação de frequência. A utilização de uma UPS (UNINTERRUPTIBLE POWER SYSTEM - PART 3, 2004), também conhecida por *Nobreak* (ASSOCIAÇÃO DE NORMAS TÉCNICAS, 2003) se torna imprescindível para alimentar cargas críticas (WILLMANN, 2004), fornecendo qualidade e confiabilidade no fornecimento de energia. A qualidade de energia é garantida pois a estratégia de controle procura minimizar a taxa de distorção harmônica da tensão e corrente na saída, além de apresentar um desempenho transitório que satisfazem os níveis de tensão RMS nas normas IEC 62040-3 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2004) e IEEE 944 (AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE, 1986).

Existem diversas técnicas de controle aplicadas em UPS, a primeira desenvolvida é o controlador PID (ASTRON, K.; HAGGLUND, T., 1995) e que se baseia no cálculo do valor RMS do sinal de saída da UPS para comparar com o valor RMS da referência. Essa estratégia, no entanto, apresenta o incômodo de ter de calcular o valor RMS, o que gera um atraso na dinâmica do sensor, pois esse cálculo precisa de um ciclo completo do sinal. A segunda técnica e que aqui será desenvolvida é a de utilizar o controlador ressonante (BONAN et al., 2010), na malha de ramo direto. A estratégia se baseia no princípio do modelo interno (FRANCIS; WONHAM, 1976), segundo o qual a variável de processo segue a referência se, e somente se, o sistema for estável em malha-fechada e na malha de controle houver um modo igual a referência. Para modelagem matemática do controlador e da planta UPS foi utilizada a representação por espaços de estados (OGATA, K., 2011) e uma matriz de ganho por realimentação de estados. Para o projeto da matriz de ganho do controlador foi utilizado duas restrições, a minimização da energia do sinal de controle e a D-estabilidade (Estabilidade Regional).

A primeira restrição utilizada, equações (4.1.8) e (4.1.9) da subseção (4.1), para realizar o equacionamento das LMIs, através da teoria de estabilidade de Lyapunov (KHALIL, 1996), foi a minimização da energia (TAKAZATO; OYA, H.; MUKAIDANI, 2011) do sinal de controle. Logo, estabelecendo um limite, um parâmetro, para a máxima energia do sinal de controle é possível estabelecer um compromisso com a distorção harmônica na saída da UPS. Quanto menor é esse parâmetro, maior é o esforço de controle (Altas amplitudes) e, conseqüentemente, menor é a THD.

A segunda restrição, equações (4.1.4) a (4.1.7) da subseção (4.1), compreende o desempenho transitório na saída da UPS quando esta é carregada. Para a formalização LMI da restrição de desempenho transitório é necessário a função candidata de Lyapunov (Função quadrática) e o conceito de D-estabilidade (GAHINET, P.; CHILALI, M., 1999). A D-estabilidade compreende lugares geométricos (Cone, circunferência e reta) no semi-plano esquerdo do plano complexo s que definirão as possíveis posições dos autovalores de desempenho dinâmico da UPS quando esta é carregada por uma carga de potência projetada. Assim, nesse controle os parâmetros utilizados são a posição da reta vertical, o

raio do semicírculo e o ângulo da geratriz do cone no semiplano esquerdo. A manipulação da posição da reta garante uma taxa de decaimento exponencial dos estados conveniente, o raio do círculo garante um desempenho transitório similar para o intervalo de cargas projetado e o ângulo da geratriz do cone garante uma menor oscilação do desempenho transitório. A intersecção desses três lugares geométricos cria uma região (SHRIKANTM; SEN, 2000) convexa estável (Pois está no semiplano esquerdo do plano complexo s), ou também D-estável.

As duas restrições, minimização da energia do sinal de controle, o qual irá atuar na situação de regime permanente, e a D-estabilidade, o qual atuará no desempenho dinâmico da UPS, atuam em última análise na matriz de ganho, de forma que, deverá haver uma correta manipulação de ambos os controles para balancear as respostas da saída da UPS. Portanto, tanto a minimização excessiva da energia do sinal de controle quanto regiões D-estáveis no semiplano esquerdo muito pequenas e distantes do eixo imaginário gerarão amplitudes saturantes do sinal de controle. Assim, uma correta manipulação desses parâmetros é imprescindível, e deve ser realizada de forma criteriosa na etapa de projeto.

Após a formulação LMI das restrições da subseção (4.1) aqui apresentadas foi realizada a solução conjunta das desigualdades matriciais lineares para projeto da matriz de ganho do controlador ressonante. Para dimensionamento desses ganhos é necessário dois pacotes de *software*, o *parser*, para conversão do conjunto de desigualdades matriciais lineares da forma *standart* (Não manipulável) para a forma genérica (Manipulável) e o *solutions*, para resolução do conjunto de desigualdades matriciais lineares via otimização numérica. Nesse trabalho foi utilizada, para o *parser*, o *software* do MATLAB, LMIEdit, e o *software*, para o *solutions*, o LMILab. O código desenvolvido neste trabalho para síntese da matriz de ganhos se encontra no Anexo A.

Após o projeto dos controladores foi realizada as simulações, conforme seção (5), no *software* PSIM (POWERSIM, 2013) e MATLAB (MATH WORKS, 2001), simultaneamente, através do programa SimCoupler para comparação do método alternativo e do método tradicional das LMIs (L. EL GHAOUI AND S.-I. NICULESCU (Ed.), 2000), dos controladores ressonantes (FUKUDA; IMAMURA, 2005).

Após a realização da otimização das LMIs e dimensionamento dos ganhos pelo método alternativo foi realizada a simulação dos ganhos na planta através do *software* PSIM, MATLAB e Simulink e o programa SimCoupler (Responsável por integrar o Simulink com o PSIM), de acordo com as Figuras 14, 15 e 16 da subseção (5.2). O propósito é verificar a eficiência do método alternativo (CARVALHO, F. M., 2013) comparando com o desempenho dos ganhos calculados pela LMI, tanto com o carregamento linear quanto não linear, em tempo contínuo.

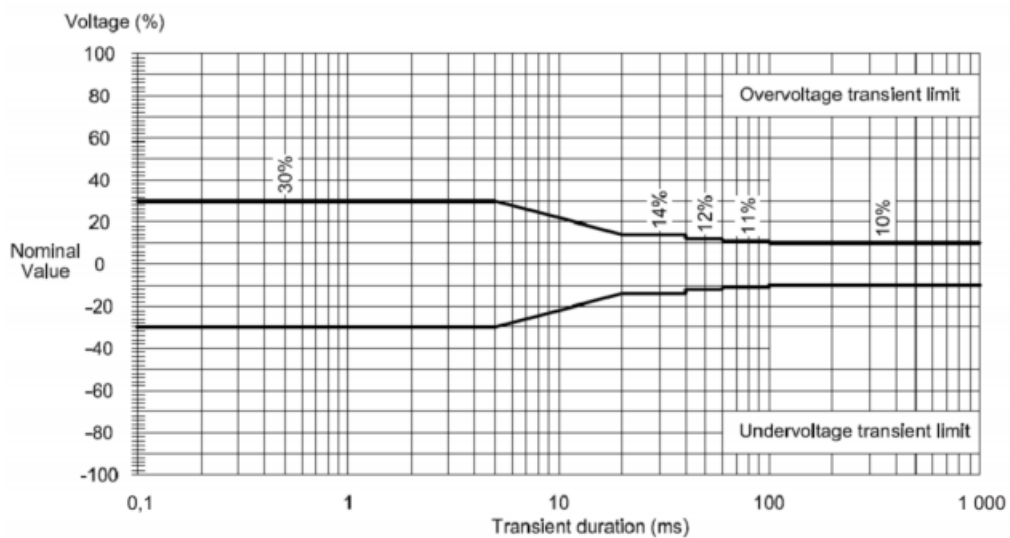
Finalmente na seção (6), foi aplicado na planta UPS de 3.5kVA, disponível no LAS-CAR da UFRGS, os ganhos do método alternativo e verificado o valor RMS e taxa de distorção harmônica da tensão de saída, em seguida, comparados com os resultados exigidos pelas normas IEC 62040-3 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2004) e IEEE 944 (AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE, 1986).

2 Motivação para Elaboração do Modelo Alternativo

2.1 Distúrbios na Rede Elétrica

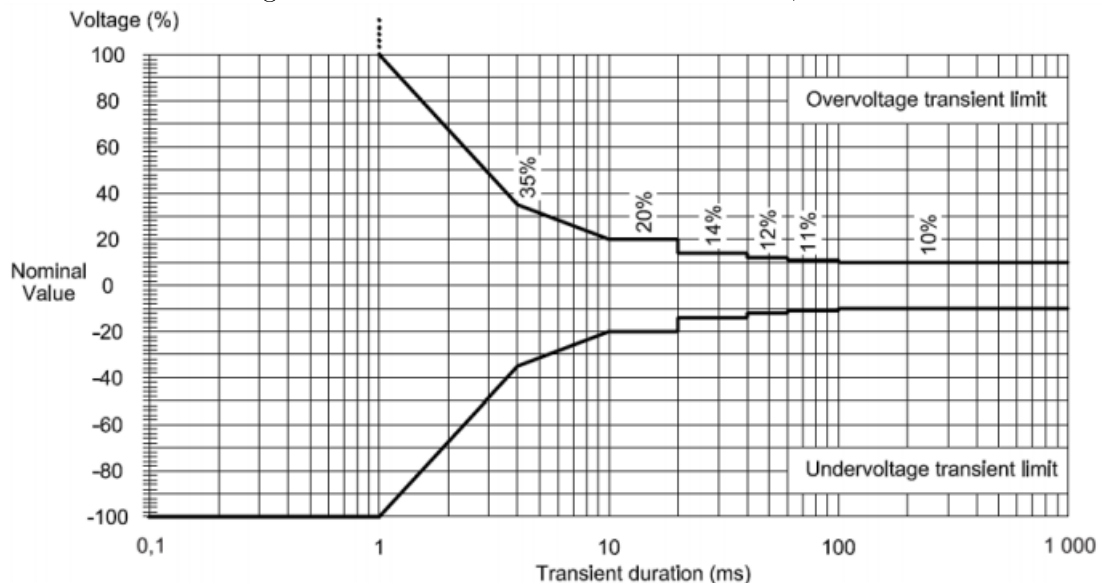
Os transitórios de tensão em cargas lineares e não lineares (compreendendo principalmente retificadores de onda em geral) devem operar satisfatoriamente dentro de limites estabelecidos pela norma IEC 62040-3 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2004). Essa norma apresenta três perfis, conforme Figuras 1, 2 e 3. Nessas curvas é possível ver o tempo de duração do transitório, tempo de recuperação, desvio vertical de tensão do transitório e erro em regime. Os principais distúrbios da rede que ocasionam tais transitórios podem ser visualizados na Figura 4.

Figura 1: Perfil 1 da norma IEC 62040-3.



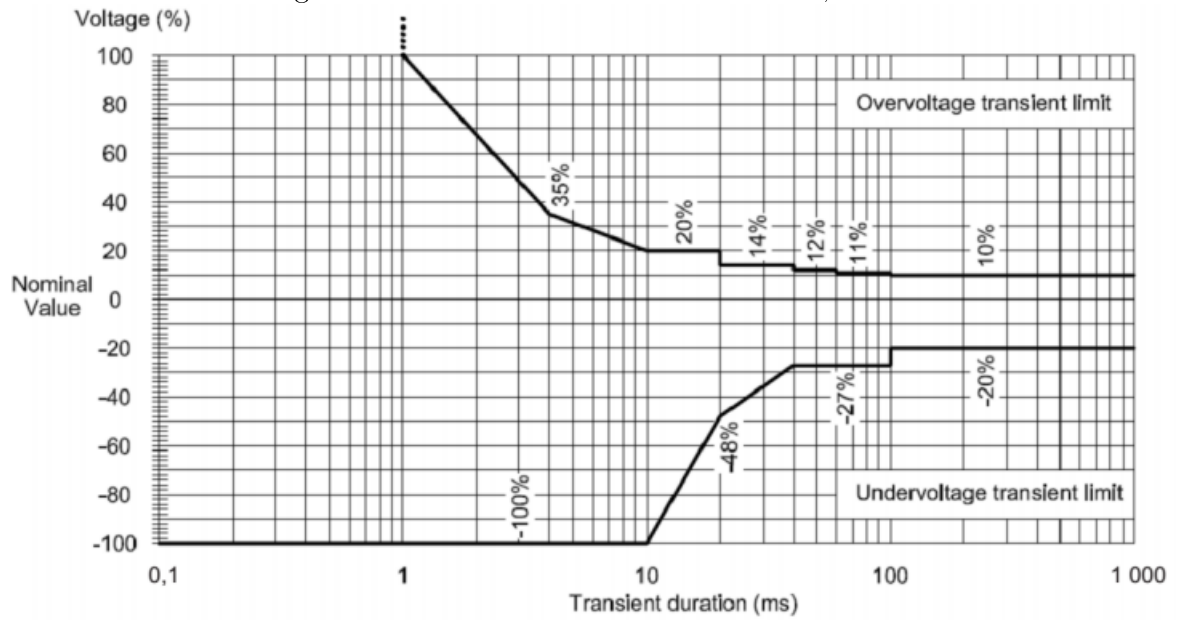
FONTE: IEC 62040-3, 2004.

Figura 2: Perfil 2 da norma IEC 62040-3, 2004.



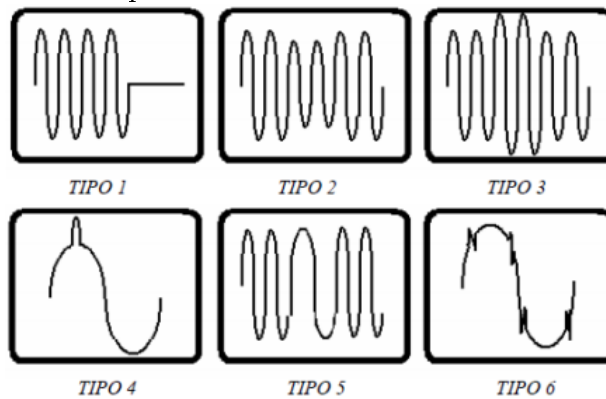
FONTE: IEC 62040-3, 2004.

Figura 3: Perfil 3 da norma IEC 62040-3, 2004.



FONTE: IEC 62040-3, 2004.

Figura 4: Principais distúrbios encontrados na rede elétrica.



FONTE: <http://tecnicodesom.no.comunidades.net/>

As Características dos principais distúrbios da Figura 4 serão explanados como segue abaixo:

- TIPO 1 – A falta de rede é caracterizado pela ausência, súbita, total de energia elétrica.
- TIPO 2 – A subtensão é caracterizada pela diminuição da tensão eficaz da rede elétrica por um período de tempo relativamente longo.
- TIPO 3 – A sobretensão é caracterizada pelo aumento da tensão eficaz da rede elétrica.
- TIPO 4 – O surto de tensão, ou *spike*, é caracterizado pelo drástico aumento da tensão instantânea da rede elétrica (picos de tensão).
- TIPO 5 – Variações de frequência na rede elétrica são provocadas por variações bruscas de cargas de grande porte ou mesmo curto-circuito na rede elétrica.
- TIPO 6 – O ruído é caracterizado pela interferência eletromagnética (EMI) e/ou de rádio frequência (RFI) que poluem a rede elétrica.

2.2 Aplicações na Indústria

O método alternativo, idealizado e desenvolvido na referência (CARVALHO, F. M., 2013), surpreende pela simplicidade de calcular os ganhos a partir dos parâmetros da indutância, capacitância, frequência e potência de trabalho da planta UPS de interesse (O dito polinômio característico dinâmico) e disponível no chão-de-fábrica. Ou seja, dispensa o ferramental para otimização das LMIs das restrições de projeto. Na ocasião deste material foi utilizado os ganhos de uma planta UPS de $10kVA$ (CARVALHO, F. M., 2013), polinômio desejado, para recalculer os ganhos de uma planta UPS de $3.5kVA$, polinômio característico dinâmico, disponível no LASCAR da UFRGS. O processo de recalculer os ganhos do controlador ressonante de interesse começa quando se escolhe um *Nobreak* (A. FIGUEIRA, 2005) e sintetiza seus ganhos pelo ferramental LMI e, em seguida, se cria o polinômio desejado a partir dos autovalores no semiplano esquerdo, considerando a situação de carga máxima, e, finalmente, se iguala ao polinômio característico dinâmico da nova planta UPS. Portanto, uma vez com o polinômio desejado é possível recalculer, algebricamente, os ganhos de qualquer outro *Nobreak* comercial a partir dos parâmetros supramencionados.

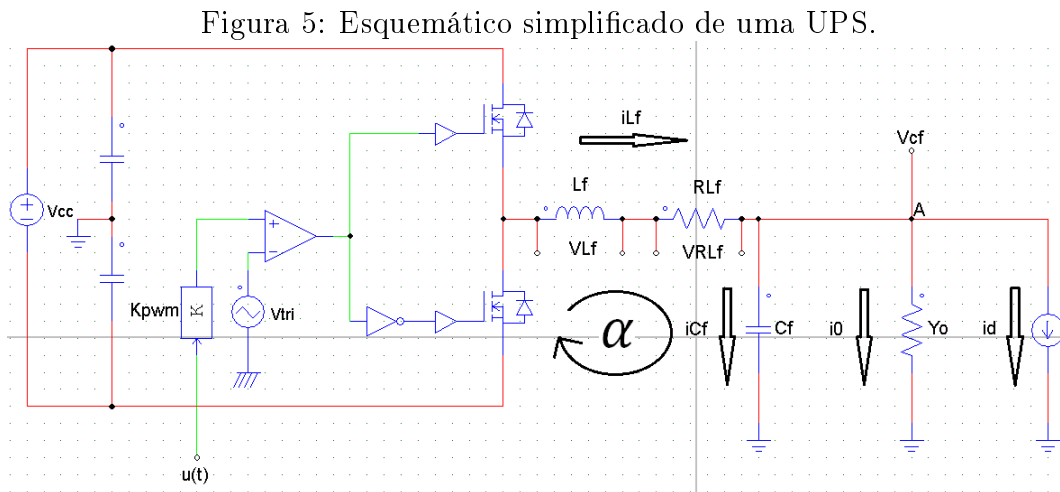
Na indústria dos tempos modernos é comum a fabricação, desenvolvimento ou montagem de um produto serem realizadas na linha de produção, ou seja, uma esteira rolante movida por algum tipo de energia (frequentemente a de natureza elétrica). Este trabalho pretende aplicar um método de síntese de ganhos do controlador ressonante para um *No-break* que seja simples, fácil e rápido, sem perda de qualidade e confiabilidade de energia para os equipamentos elétricos e eletrônicos da linha de produção no chão-de-fábrica.

A principal desvantagem da utilização dos ganhos obtidos diretamente da otimização pelo método das LMIs no chão-de-fábrica é a necessidade de pessoal qualificado para realização da edição das LMIs, com um *parser* comercial (LMIEdit, YALMIP) e da otimização, com um *solutions* comercial (SDPT3, SeDuMi e LMILab), eventualmente técnicos, engenheiros, físicos, matemáticos e cientistas em geral da área de sistemas de controle são enxergados como uma mão-de-obra de alto custo. O método alternativo aqui desenvolvido, precisa apenas de um equacionamento algébrico (identidade de polinômios) que pode ser realizado fácil e rapidamente, indispensável para a dinâmica de produção da indústria. De toda forma, é indispensável já possuir o polinômio característico desejado de algum *No-break* (comercial: $2kVA$, $4kVA$, $5kVA$, $6kVA$, $8kVA$, $10kVA$, $12kVA$, $15kVA$, $18kVA$, $20kVA$ e $25kVA$) previamente escolhido através de trabalhos científicos ou mesmo com o pessoal qualificado, pois este polinômio é formado pela matriz de ganho otimizada via LMI e, desta forma, precisa dos pacotes de *softwares* supramencionados.

3 Modelagem do sistema UPS

3.1 Modelagem da Planta UPS

A modelagem da UPS no espaço de estados (OGATA, KATSUHIKO, 2011) descreve o comportamento dinâmico do inversor, sendo os elementos armazenadores de energia representados pelo indutor L_f e o capacitor C_f , pertencentes ao filtro de saída do inversor. Para entender melhor as relações entre os componentes do inversor, vide Figura 5, onde é apresentado o esquemático simplificado da planta UPS.



FONTE: Imagem retirada do PSIM pelo autor

Na Figura 5 é apresentado um esquemático simplificado de uma UPS, nesta representação é mostrado o sinal de controle $u(t)$ que irá atuar na planta, o ganho $K_{PWM} = \frac{V_{cc}}{2V_{tri}} = 1040V/V$ para manter a excursão do sinal de controle no intervalo $-0.5V < u(t) < +0.5V$ (pois o hardware da DSPACE, Figura 31, possui fundo de escala de $1V$), a tensão do link CC $V_{cc} = 520V$, a portadora triangular $V_{tri} = 0.5V$, a indutância $L_f = 1mL$ e a capacitância $C_f = 300\mu F$ do filtro de saída da UPS. A resistência $R_{Lf} = 15m\Omega$ somente foi considerada no modelo pois possui mesma ordem de grandeza da indutância L_f . A carga linear carregada na saída da UPS é representada por uma admitância Y_0 e a carga não linear representada por essa admitância e por uma corrente de distúrbio, em paralelo com a carga, i_d (característico de correntes em retificadores no estágio de entrada de fontes de alimentação) para o sistema.

Basicamente são utilizadas duas equações (MANO, O., 2010) para o circuito simplificado da UPS, conforme Figura 5, uma referente a equação de malha em (3.1.1) e a outra da equação dos nós em (3.1.2).

Aplicando LKT na malha α e LKC no nó **A** do circuito da Figura 5, tem-se:

$$K_{PWM}u(t) = V_{Cf} + V_{Lf} + V_{RLf} \quad (3.1.1)$$

$$i_{Lf} = i_{Cf} + i_o + i_d \quad (3.1.2)$$

Sabendo que a relação entre tensão e corrente no indutor e no capacitor são dadas por:

$$i_{Cf} = C_f \frac{dV_{Cf}}{dt} \quad (3.1.3)$$

$$V_{Lf} = L_f \frac{di_{Lf}}{dt} \quad (3.1.4)$$

Reescrevendo (3.1.2) considerando a expressão (3.1.3)

$$i_{Lf} = C_f \frac{dV_{Cf}}{dt} + V_{Cf}Y_0 + i_d \quad (3.1.5)$$

Isolando a derivada da tensão de saída

$$\frac{dV_{Cf}}{dt} = \frac{i_{Lf}}{C_f} - \frac{V_{Cf}Y_0}{C_f} - \frac{i_d}{C_f} \quad (3.1.6)$$

Considerando a resistência de enrolamento do indutor

$$V_{RLf} = i_{Lf}R_{Lf} \quad (3.1.7)$$

Reescrevendo (3.1.1) considerando a expressão (3.1.4) e (3.1.7)

$$K_{PWM}u(t) = L_f \frac{di_{Lf}}{dt} + R_{Lf}i_{Lf} + V_{Cf} \quad (3.1.8)$$

Isolando a derivada da corrente do indutor

$$\frac{di_{Lf}}{dt} = K_{PWM} \frac{u(t)}{L_f} - i_{Lf} \frac{R_{Lf}}{L_f} - \frac{V_{Cf}}{L_f} \quad (3.1.9)$$

Definindo um estado como a corrente no indutor e outro estado como a tensão no capacitor, obtém-se a seguinte representação por variáveis de estado:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ew(t) \\ z(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (3.1.10)$$

onde $x(t) = [x_1 \ x_2]^T = [i_{Lf} \ V_{Cf}]^T$ é o vetor de estados, $w(t) = i_d$ é o sinal de perturbação externa, $u(t)$ é o sinal de controle, $z(t) = V_{Cf}$ é a saída de interesse, $C = [0 \ 1]$, e

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_{Lf}}{L_f} & -\frac{1}{L_f} \\ \frac{1}{C_f} & -\frac{Y_0}{C_f} \end{bmatrix} \quad (3.1.11)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{K_{PWM}}{L_f} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.1.12)$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{C_f} \end{bmatrix} \quad (3.1.13)$$

$$C = [0 \quad 1] \quad (3.1.14)$$

Em (3.1.11), a matriz A é uma função afim em relação ao parâmetro variante Y_0 e, por esta razão, ela será representada pela notação $A(Y_0)$ para ressaltar a dependência em relação a Y_0 .

3.2 Modelagem da Carga Linear

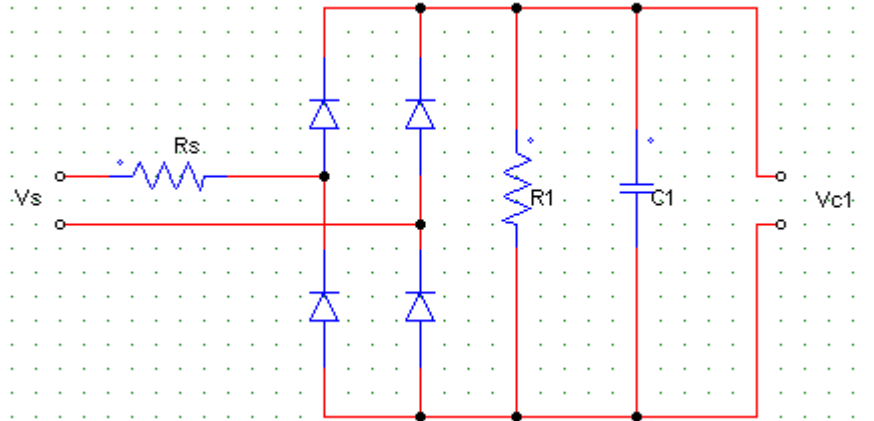
O equacionamento de (3.1.1) a (3.1.9) na subseção (3.1) leva em consideração a característica variante da carga no tempo e modela a matriz em (3.1.11) como dependente de Y_0 . Assim, a modelagem da carga linear é representado por um parâmetro incerto variante no tempo, sendo seus valores representados por uma admitância máxima (Y_{max}) e mínima (Y_{min}), isto é:

$$Y_0 = Y_0(t) \in \Delta, \Delta = \{Y_0(t) \in \Re : Y_{min} \leq Y_0(t) \leq Y_{max}\}$$

3.3 Modelagem da Carga Não Linear

As cargas não lineares que correspondem ao estágio de entrada da maioria das fontes de alimentação utilizadas na indústria, geram, na rede elétrica, um elevado conteúdo harmônico. O circuito de uma carga não linear comumente encontrada pode ser visualizada na Figura 6.

Figura 6: Exemplo de carga não linear.



FONTE: Imagem retirada do PSIM pelo autor

A norma IEC 62040-3 estabelece uma referência para carga não linear monofásica para testes de operação de sistemas UPS. No diagrama da figura 6, a resistência R_s é dimensionada para dissipar 4% da potência aparente total S , enquanto a resistência R_1 é escolhida para dissipar os restantes 66%, de forma a gerar uma carga com fator de potência 0.7. O capacitor C_1 é calculado de maneira a obter um ripple de 5% em relação a tensão V_{c1} pico a pico. O dimensionamento dos componentes R_s , R_1 e C_1 são determinados através das seguintes expressões, onde são desconsideradas as perdas nos diodos retificadores:

$$V_{c1} = 1.22V_s \quad (3.3.1)$$

$$R_s = 0.04 \frac{V_s^2}{S} \quad (3.3.2)$$

$$R_1 = \frac{V_{c1}^2}{0.66S} \quad (3.3.3)$$

$$C_1 = \frac{7.5}{R_1 f_1} \quad (3.3.4)$$

sendo f é a frequência da rede elétrica, R_s a resistência de entrada e R_1 a resistência de carga (ambas dadas em Ohms) e C_1 é a capacitância de carga (dada em *Faraday F*).

Em particular, considerando que o sistema UPS utilizado nos testes possui uma tensão de entrada eficaz $V_s = 127V_{RMS}$ e uma potência aparente total $S = 3.5kVA$ o que leva aos seguintes valores para as equações (3.3.1) a (3.3.4): $V_{c1} = 155V$, $R_s = 0.263\Omega$, $R_1 = 14.85\Omega$ e $C_1 = 12028\mu F$.

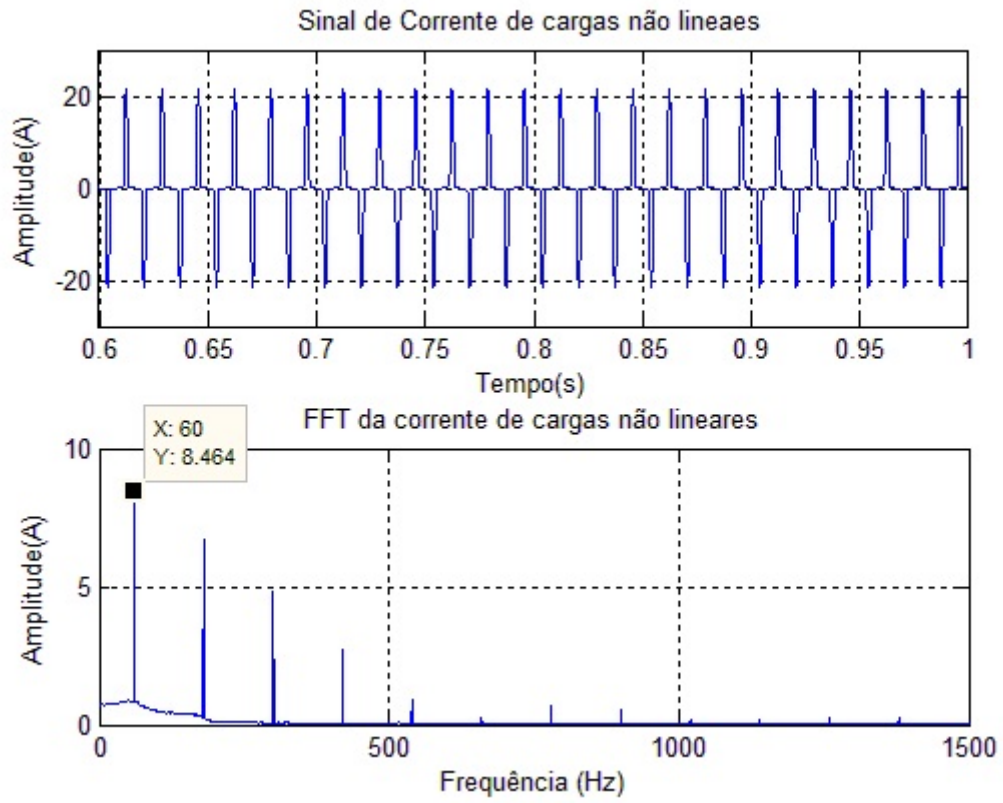
Por outro lado, a corrente de cargas não lineares (MANO, O., 2010) é um sinal periódico com elevado conteúdo harmônico que pode ser representada por uma série de Fourier, conforme equação (3.3.5).

$$i_d = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (3.3.5)$$

sendo i_d a corrente da carga, a_0 o nível CC da corrente, n a ordem dos harmônicos, a_n é a amplitude do cosseno do harmônico de ordem n , b_n a amplitude do seno, ω a frequência angular e t o tempo. Desta forma, pode-se representar uma carga não linear pela sua componente fundamental e pelas componentes harmônicas (múltiplas da frequência da componente fundamental). Por exemplo, o circuito retificador ilustrado na Figura 6, gera harmônicos de ordem ímpar cujas componentes harmônicas mais significativas são a 3^a, 5^a, 7^a e 9^a. Alimentando a carga não linear da Figura 6 com a tensão de $127V_{RMS}$, a forma de onda resultante da corrente de carga i_d (Seguida de seu espectro em frequência) é vista na Figura 7.

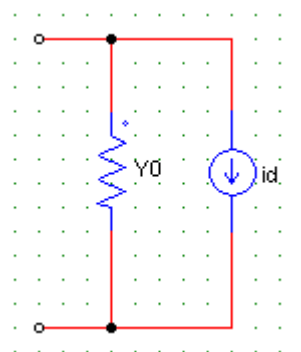
Portanto, utiliza-se o circuito da Figura 8, para considerar as cargas não lineares, ou seja, a admitância Y_0 e um distúrbio i_d , em paralelo a essa admitância, semelhante aquele da Figura 7.

Figura 7: Corrente em cargas não lineares.



FONTE: Imagem retirada do MATLAB pelo autor

Figura 8: Modelo de carga admitido.



FONTE: Imagem retirada do PSIM pelo autor

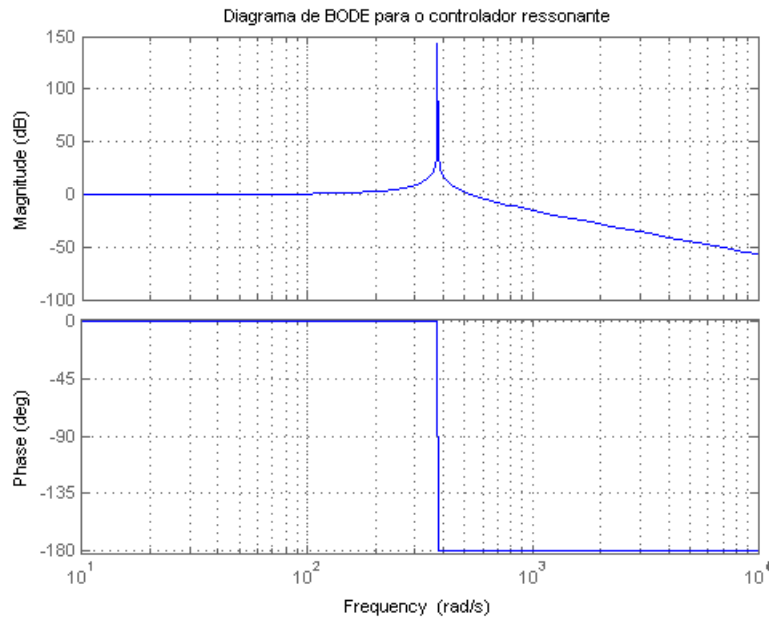
3.4 Modelagem do Controlador Ressonante

Segundo o princípio do modelo interno é preciso incluir um modelo no caminho direto da malha de realimentação para obtenção de seguimento assintótico e rejeição em regime permanente de perturbações de um sinal senoidal com frequência ω . A função de transferência do controlador abordado nesse trabalho é visualizado na equação (3.4.1), onde Z_{RC} é o sinal de saída do controlador e U_{RC} o sinal de entrada.

$$G_r(s) = \frac{Z_{RC}(s)}{U_{RC}(s)} = \frac{\omega_r^2}{s^2 + \omega_r^2} \therefore \omega_r \cong 377 \text{rad/s} \quad (3.4.1)$$

A resposta em frequência (Diagrama de BODE), com espectro em amplitude e fase da função de transferência da equação (3.4.1) é mostrada na Figura 9.

Figura 9: Diagrama de BODE do controlador ressonante.



FONTE: Imagem retirada do MATLAB pelo autor

A representação por variáveis de estado para o controlador ressonante da equação (3.4.1) é apresentado a seguir:

$$\dot{x}_{RC}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_r^2 & 0 \end{bmatrix} x_{RC}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_{RC}(t) \quad (3.4.2)$$

$$z_{RC}(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x_{RC}(t) \quad (3.4.3)$$

onde $x_{RC}(t) = [x_{RC,1} \ x_{RC,2}]^T$ é o vetor de estados do controlador, $u_{RC}(t)$ é o sinal de entrada do controlador e $z_{RC}(t)$ o sinal de saída do controlador.

Para construir uma representação do sistema aumentado, ou seja, considerando a equação (3.1.10) da planta UPS e, portanto seus estados, foi determinado um sinal de

erro do sistema aumentado conforme equação (3.4.4).

$$u_{RC}(t) = e(t), e(t) = V_{ref}(t) - V_{Cf}(t) \quad (3.4.4)$$

sabendo que $e(t)$ é o sinal de erro, $V_{ref}(t)$ a tensão de referência e $V_{Cf}(t)$ a tensão na carga. A representação aumentada inclui os estados da UPS da equação (3.1.10) e os estados do compensador ressonante da equação (3.4.2) levando a seguinte representação por variáveis de estado:

$$\begin{cases} \dot{x}_a(t) = A_a(Y_0)x_a(t) + B_a u(t) + E_a w_a(t) \\ z_a(t) = C_a x_a(t) \end{cases} \quad (3.4.5)$$

sendo $x_a(t) = [i_{Lf} \ V_{Cf} \ x_{RC,1} \ x_{RC,2}]^T$ o vetor de estados aumentado, $w_a(t) = [V_{ref} \ i_d]^T$ a perturbação aumentada, $z_a(t)$ a saída do sistema aumentado, e (3.4.6), (3.4.7), (3.4.8), (3.4.9) as matrizes do sistema (3.4.5).

$$A_a(Y_0) = \begin{bmatrix} -\frac{R_{Lf}}{L_f} & -\frac{1}{L_f} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_f} & -\frac{Y_0}{C_f} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & -\omega^2 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.4.6)$$

$$B_a(Y_0) = \begin{bmatrix} \frac{K_{PWM}}{L_f} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.4.7)$$

$$E_a(Y_0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_f} \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.4.8)$$

$$C_a = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T \quad (3.4.9)$$

Para controlar as equações de estado aumentado da equação (3.4.5), cria-se uma matriz de ganho e, portanto, um sinal de controle, conforme expressão (3.4.10). O diagrama de blocos, forma direta II, do controlador ressonante pode ser visualizado na Figura 10.

$$u(t) = k_1 i_{Lf}(t) + k_2 e(t) + k_3 x_{RC,1}(t) + k_4 x_{RC,2}(t) = [k_1 \ -k_2 \ k_3 \ k_4] x_a(t) + k_2 V_{ref}(t) \quad (3.4.10)$$

onde k_1 , k_2 , k_3 e k_4 são parâmetros a serem determinados. Aplicando (3.4.10) em

(3.4.5), obtém-se a representação do sistema de controle em malha fechada como dado a seguir:

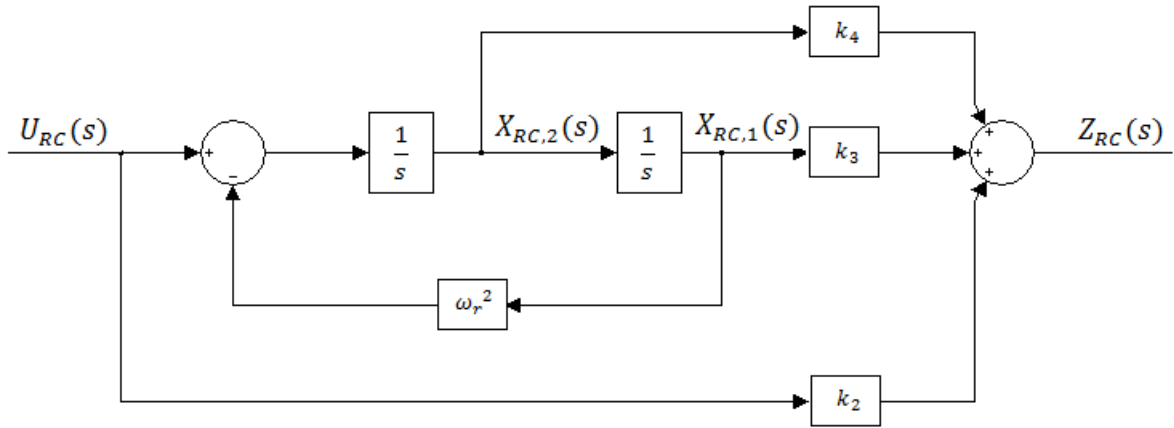
$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_{cl}(Y_0)x_a(t) + E_{cl}w_a(t) \\ z_a(t) = C_{cl}x_a(t) \end{cases} \quad (3.4.11)$$

onde

$$A_{cl}(Y_0) = \begin{bmatrix} \frac{-R_{L_f} + k_1}{L_f} & \frac{-1 - k_2}{L_f} & \frac{k_3}{L_f} & \frac{k_4}{L_f} \\ \frac{1}{C_f} & -\frac{Y_0}{C_f} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & -\omega^2 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.4.12)$$

$$E_{cl} = \begin{bmatrix} \frac{k_2}{L_f} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_f} \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, C_{cl} = C_a \quad (3.4.13)$$

Figura 10: Implementação direta II do Controlador Ressonante.



FONTE: Imagem retirada do Simulink pelo autor

4 Metodologia e Sintonia do Controlador Ressonante

4.1 Formulação LMI das Restrições

O equacionamento das restrições idealizadas neste trabalho requerem a manipulação da função candidata quadrática de Lyapunov e a transformação ou complemento de Schur (F. ZHANG, 1995) até a formalização das LMIs (CARVALHO, F. M., 2013). Utilizando a representação por espaço de estados é possível equacionar a planta UPS e o controlador. A planta UPS possui dois estados, a tensão no capacitor e a corrente no indutor do filtro (Passa-baixa passivo de 2º ordem), enquanto o modo ressonante, de $60Hz$, do controlador também possui dois estados.

A primeira restrição, a minimização da energia do sinal de controle compreende a menor energia necessária do barramento CC para seguimento e rejeição de harmônicos, logo, o barramento CC deve ser corretamente dimensionado de forma a evitar saturação do sinal de controle e, conseqüentemente, distorção da tensão do filtro de saída. A segunda restrição, alocação de polos numa região convexa no semiplano esquerdo, determina o desempenho dinâmico do sistema quando carregado com alguma potência no intervalo de interesse.

Para realizar a formalização LMI (D.F. COUTINHO, K.A. BARBOSA E A. TROFINO, 2002) é preciso dimensionar o valor mínimo e máximo da admitância. Assim, para a admitância máxima (Y_{max}) foi utilizado a potência máxima (S_{max}) da carga na saída da UPS e para a admitância mínima (Y_{min}) foi utilizado 4% da potência máxima, multiplicada pelo FP , conforme instruções da norma IEC 62040-3.

$$4\% \cdot ((FP \cdot S_{max})/V_s^2) < Y < (S_{max}/V_s^2) \quad (4.1.1)$$

Para determinar uma posição dos autovalores no semiplano esquerdo do plano complexo s que garanta um desempenho dinâmico dentro das especificações das normas estabelecidas é preciso realizar simulações para diferentes valores de α , r e θ . Esse procedimento foi realizado e se obteve os seguintes parâmetros $\alpha < -150$, $r > -10^5$ e $\theta = 90^\circ$.

A desigualdade matricial linear que garante todos os polos menores que $\alpha = -150rad/s$ é:

$$[QA_a(Y_{max})^T + W^T B_a^T + B_a W + A_a(Y_{max})Q + 2\alpha Q] \quad (4.1.2)$$

$$[QA_a(Y_{min})^T + W^T B_a^T + B_a W + A_a(Y_{min})Q + 2\alpha Q] \quad (4.1.3)$$

No intuito de ter polos com fator de amortecimento igual a $\zeta = 0$ ($\theta = 90^\circ$) foram inseridas as inequações abaixo para formulação das LMIs (V. J. S. LEITE, V. F. MONTAGNER, P. J. DE OLIVEIRA, R. C. L. F. OLIVEIRA, D. C. W. RAMOS, and P. L. D. PERES, 2004).

$$\begin{bmatrix} \sin(\theta)A_a(Y_{max})Q + \sin(\theta)QA_a(Y_{max})^T + & \cos(\theta)A_a(Y_{max})Q + \cos(\theta)B_a W - \\ \sin(\theta)B_a W + \sin(\theta)W^T B_a^T & \cos(\theta)QA_a(Y_{max})^T - \cos(\theta)W^T B_a^T \\ \cos(\theta)A_a(Y_{max})Q + \cos(\theta)B_a W - & \sin(\theta)A_a(Y_{max})Q + \sin(\theta)B_a W + \\ \cos(\theta)QA_a W - \cos(\theta)W^T B_a^T & \sin(\theta)QA_a(Y_{max})^T + \sin(\theta)W^T B_a^T \end{bmatrix} < 0 \quad (4.1.4)$$

$$\begin{bmatrix} \sin(\theta)A_a(Y_{min})Q + \sin(\theta)QA_a(Y_{min})^T + & \cos(\theta)A_a(Y_{min})Q + \cos(\theta)B_aW - \\ \sin(\theta)B_aW + \sin(\theta)W^TB_a^T & \cos(\theta)QA_a(Y_{min})^T - \cos(\theta)W^TB_a^T \\ \cos(\theta)A_a(Y_{min})Q + \cos(\theta)B_aW - & \sin(\theta)A_a(Y_{min})Q + \sin(\theta)B_aW + \\ \cos(\theta)QA_aW - \cos(\theta)W^TB_a^T & \sin(\theta)QA_a(Y_{min})^T + \sin(\theta)W^TB_a^T \end{bmatrix} < 0 \quad (4.1.5)$$

Foi inserida na formulação LMI (V. LEITE AND P. PERES, 2003), inequações para limitar o valor mínimo da parte real dos polos, de raio $r = -10^5 rad/s$ e centro $(-c, 0)$ na origem, ou seja, $c = 0$.

$$\begin{bmatrix} -rQ & cQ + A_a(Y_{max})Q + B_aW \\ cQ + QA_a(Y_{max})^T + B_a^TW^T & -rQ \end{bmatrix} < 0 \quad (4.1.6)$$

$$\begin{bmatrix} -rQ & cQ + A_a(Y_{min})Q + B_aW \\ cQ + QA_a(Y_{min})^T + B_a^TW^T & -rQ \end{bmatrix} < 0 \quad (4.1.7)$$

Também, foram inseridas LMIs que garantem o menor consumo de energia do barramento CC durante a operação do módulo inversor.

min $\gamma \in \Re^+$ sujeito a:

$$\begin{bmatrix} QA_a(Y_{max})^T + W^TB_a^T + B_aW + A_a(Y_{max})Q & WD_{uz_e} \\ D_{uz_e}^T W^T & -\gamma I_{nz_e} \end{bmatrix} < 0 \quad (4.1.8)$$

$$\begin{bmatrix} QA_a(Y_{min})^T + W^TB_a^T + B_aW + A_a(Y_{min})Q & WD_{uz_e} \\ D_{uz_e}^T W^T & -\gamma I_{nz_e} \end{bmatrix} < 0 \quad (4.1.9)$$

As desigualdades matriciais descritas acima foram programadas com os *softwares* LMI-Lab e LMIEdit ambos do MATLAB, conforme código desenvolvido no Anexo A.

4.2 Polinômio Característico Desejado - (Pd)

O polinômio característico desejado é obtido a partir da equação característica da matriz de estado aumentado A_a , considerando a matriz de ganho K obtida via otimização LMI de algum *Nobreak* previamente selecionado (Na ocasião deste trabalho foi utilizado o *Nobreak* de $10kVA$) e carga máxima Y_{max} . Com o resultado do problema de factibilidade (Realizado na subseção (4.1)), associado ao problema de D-Estabilidade e de custo garantido, obtém-se o vetor W e a matriz Q , variáveis de decisão do problema. Através da relação $K = WQ^{-1}$ é obtido a matriz de ganho de realimentação de estados.

Assim, a matriz de ganho K do polinômio característico desejado é resultado do problema de factibilidade da subseção (4.1). Portanto, essa matriz de ganho tem um compromisso com o desempenho dinâmico e com o desempenho em regime permanente.

Paratanto, determinado a admitância de interesse $Y_{máx}$ de um *Nobreak* selecionado, é possível obter as matrizes A_a e B_a de estado aumentado do filtro de saída e inversor

da UPS e escrever a equação (4.2.1) em função apenas de λ , caracterizando, assim o polinômio desejado.

$$P_d(\lambda) = \det(\lambda I - A_a(Y_{max}) - B_a K_{Otimizado_LMI}) \quad (4.2.1)$$

Expandindo o determinante da expressão (4.2.1) em função da variável λ é possível obter a equação do polinômio característico desejado conforme a relação (4.2.2).

$$P_d(s) = \alpha_0 s^{2n+2} + \alpha_1 s^{2n+1} + \alpha_2 s^{2n} + \dots + \alpha_{2n+1} s + \alpha_{2n+2} \quad (4.2.2)$$

Onde n é o número de modos ressonantes e as variáveis $\alpha_0, \dots, \alpha_{2n+2}$ as constantes do polinômio característico desejado de um *Nobreak* escolhido, convenientemente.

4.3 Polinômio Característico Dinâmico - (Pc)

O polinômio característico dinâmico é obtido a partir da equação característica da matriz de estado aumentado A_{cl} e carga máxima do *Nobreak* disponível no chão-de-fábrica. Esse polinômio possui como variáveis a ser encontradas a matriz de ganho $K_{Desempenho_Dinâmico}$ e a posição dos autovalores no semiplano esquerdo do plano complexo s .

Assim, os ganhos da equação (4.3.1) serão escolhidos de acordo com o interesse em alocar estrategicamente os autovalores no semiplano esquerdo do plano complexo s , ou seja, escolha de P_D da subseção (4.2). Logo, a matriz de ganho do polinômio característico dinâmico possuirá apenas um compromisso com o desempenho dinâmico.

O polinômio característico da matriz dinâmica é:

$$P_c(\lambda) = \det(\lambda I - A_{cl}(Y_{max}, K_{Desempenho_Dinâmico})) \quad (4.3.1)$$

Expandindo o determinante da expressão (4.3.1) é possível obter a expressão do polinômio característico dinâmico na equação (4.3.2).

$$P_c(s, k_1, k_2, \dots, k_n) = \alpha_0(k_1, k_2, \dots, k_n) s^{2n+2} + \alpha_1(k_1, k_2, \dots, k_n) s^{2n+1} + \dots + \alpha_{2n+1}(k_1, k_2, \dots, k_n) s + \alpha_{2n+2}(k_1, k_2, \dots, k_n) \quad (4.3.2)$$

Para $n = 2$, obtêm-se a seguinte expressão para o polinômio P_c :

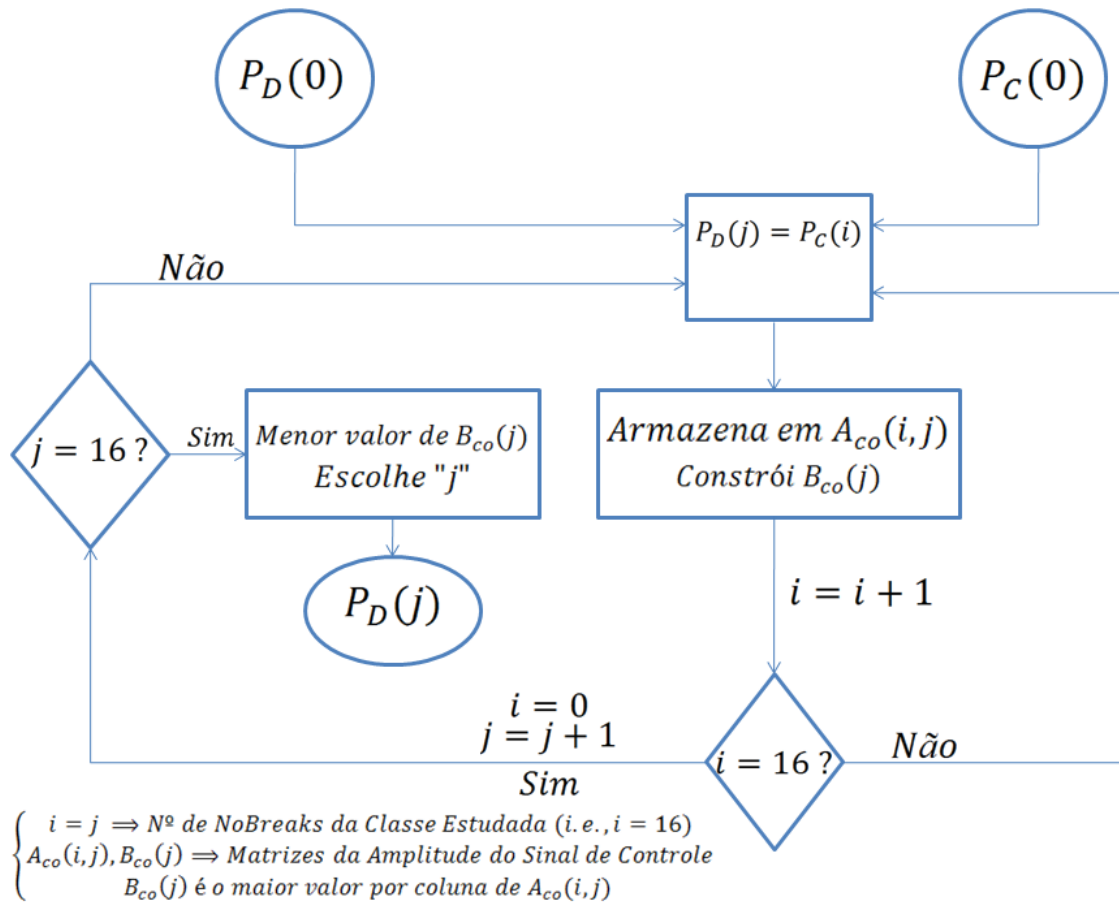
$$P_c(\lambda) = \lambda^4 + \left(\frac{L_f Y + C_f (R_{L_f} - k_1)}{C_f L_f} \right) \lambda^3 + \frac{Y (R_{L_f} - k_1) \omega^2 C_f L_f + 1 - k_2}{C_f L_f} \lambda^2 + \frac{((L_f Y + (R_{L_f} - k_1) C_f) \omega^2 + k_4)}{C_f L_f} \lambda + \frac{1 - k_2 + (R_{L_f} - k_1) Y \omega^2 + k_3}{C_f L_f} \quad (4.3.3)$$

4.4 O Método Alternativo

O método alternativo consiste em determinar um posicionamento adequado dos polos no semiplano esquerdo do plano complexo s determinando um P_d (De um único *No-break*) de uma classe comercial de *Nobreak* ($2kVA$, $4kVA$, $5kVA$, $6kVA$, $8kVA$, $10kVA$, $12kVA$, $15kVA$, $18kVA$, $20kVA$ e $25kVA$) que possua o menor sinal de controle quando aplicado em qualquer P_c (De Todo e qualquer *Nobreak*) da classe supramencionada de

Nobreak. Ou seja, fixa-se um P_d , escolhido aleatoriamente da classe comercial de *Nobreak* e, em seguida, determina-se um P_c de cada *Nobreak* da classe para formar a identidade de polinômios, e, finalmente, verifica-se se a identidade de polinômios por meio de simulações computacionais (Para este trabalho foi utilizado o PSIM/Simulink/MATLAB) que apresenta o menor esforço de controle do barramento CC, conforme teoriza a referência (CARVALHO, F. M., 2013). A idéia por traz desse processo é forçar os autovalores do polinômio P_c se alocar exatamente na posição dos autovalores do polinômio P_d e, assim calcular os ganhos. O custo a se pagar nesse processo é que haverão P_c de *Nobreaks* com um excelente (Autovalores ótimos bem próximos dos autovalores do P_d escolhido) desempenho dinâmico enquanto que para outros *Nobreaks* o desempenho dinâmico será inferior (Autovalores ótimos bem distantes dos autovalores do P_d escolhido). A descrição deste método pode ser melhor compreendida conforme fluxograma da Figura 11.

Figura 11: Fluxograma para escolha de P_D .



FONTE: Imagem Retirada do PowerPoint pelo autor

O fluxograma da Figura 11 funciona da seguinte maneira, primeiramente, determina-se um polinômio característico desejado $P_D(0)$ (zero para indicar um *Nobreak* inicial) de algum *Nobreak* de uma classe estudada (no fluxograma da classe estudada têm-se 17 *No-breaks*) para alocar os autovalores no semiplano esquerdo do plano complexo s com melhor desempenho dinâmico. Em seguida, forma-se o polinômio característico dinâmico $P_C(0)$ de algum *Nobreak* da classe estudada. Depois, iguala-se os polinômios $P_D(0) = P_C(0)$, determina-se a matriz de ganho do método alternativo e aplica-se no sistema de controle ressonante, da Figura 10, para realizar as simulações computacionais (no PSIM/Simulink,

por exemplo) e, finalmente, armazenar o valor da amplitude do sinal de controle $u(t)$ na matriz $A_{co}(0, 0)$ (i é o número de Nobreaks de $P_C(i)$ e j o número de Nobreaks de $P_D(j)$). Após armazenar a amplitude do sinal de controle verifica-se se já foi realizada a 16ª iteração do polinômio característico dinâmico $P_C(i)$, caso contrário, verifica-se um próximo polinômio característico $P_C(1)$, para armazenar $A_{co}(0, 1)$ e se estende até a matriz $A_{co}(0, 16)$. Assim, a primeira coluna da matriz A_{co} foi concluída.

Quando $j = 16$, ou seja, $A_{co}(16, 16)$, todas as 17 colunas com 17 linhas foram preenchidas e, assim, é construído o vetor $B_{co}(j)$ (este vetor representa os maiores valores por coluna de $A_{co}(i, j)$). O menor valor encontrado no vetor $B_{co}(j)$ será o escolhido para formar o P_D da classe estudada (17 *Nobreaks*).

Considerando um controlador com apenas um modo ressonante, $n = 2$, e igualando a equação (4.3.3) com a equação (4.2.2) é possível saber quem são os coeficientes α_0 , α_1 , α_2 , α_3 e α_4 . Essas constantes foram manipulados através da identidade de polinômios $P_D = P_C$ e isolados, conforme Tabela 1.

Tabela 1: Expressões das constantes do Polinômio (P_d)

$\alpha_0 = 1$
$\alpha_1 = \left(\frac{L_f Y + C_f + C_f(R_{Lf} - k_1)}{C_f L_f} \right)$
$\alpha_2 = \frac{Y(R_{Lf} - k_1) + \omega^2 C_f L_f + 1 - k_2}{C_f L_f}$
$\alpha_3 = \left(\frac{(L_f Y + (R_{Lf} - k_1)C_f)\omega^2 + k_4}{C_f L_f} \right)$
$\alpha_4 = \left(\frac{1 - k_2 + (R_{Lf} - k_1)Y\omega^2 + k_3}{C_f L_f} \right)$

FONTE: Constantes α isoladas da equação $P_c = P_d$

As constantes α_1 , α_2 , α_3 e α_4 são obtidos através dos termos do polinômio P_d . Enquanto as constantes C_f , L_f , R_{Lf} , Y e ω , são os parâmetros intrínsecos do filtro e inversor do *Nobreak* de interesse disponível no chão-de-fábrica. Os valores de Y e ω são relacionados a carga máxima e a frequência de operação. Portanto, as únicas variáveis não conhecidas da Tabela 1 são os ganhos: k_1 , k_2 , k_3 e k_4 . Isolando os ganhos é possível obter as equações (4.4.1) a (4.4.4).

Portanto, para diminuir o esforço de controle quando utilizados os ganhos calculados pelo método alternativo, foi selecionado o conjunto de autovalores do *Nobreak* de 10kVA para formar o P_d . A viabilidade do emprego dos autovalores do *Nobreaks* de 10kVA para toda classe de Nobreaks foi demonstrada na referência (CARVALHO, F. M., 2013).

$$k_1(C_f, L_f, R_f, Y, \omega) = \frac{-\alpha_1 C_f L_f + L_f Y + C_f R_f}{C_f} \quad (4.4.1)$$

$$k_2(C_f, L_f, R_f, Y, \omega) = \alpha_2 C_f L_f + \omega^2 (R_f - k_1) + \omega^2 C_f L_f + 1 \quad (4.4.2)$$

$$k_3(C_f, L_f, R_f, Y, \omega) = \alpha_4 C_f L_f - ((1 - k_2) + (R_f - k_1)Y)\omega^2 \quad (4.4.3)$$

$$k_4(C_f, L_f, R_f, Y, \omega) = \alpha_3 C_f L_f - (L_f Y + (R_f - k_1)C_f)\omega^2 \quad (4.4.4)$$

Após a determinação do P_d pertencente ao *Nobreak* de 10kVA, foi construída a Tabela 2 com as constantes da Tabela 1 já calculadas pela substituição dos parâmetros intrínsecos

desse *Nobreak*.

Tabela 2: Coeficientes do polinômio P_d

Coeficiente	Valor
α_0	1
α_1	1.1870e+004
α_2	3.8918e+007
α_3	2.4379e+010
α_4	9.5850e+012

FONTE: Constantes α do polinômio P_d para o *Nobreak* de 10kVA

Na Tabela 3 foi colocado os ganhos para o compensador ressonante considerando ambos os métodos aqui discutidos: Método Alternativo e Método das LMIs.

Tabela 3: Ganhos determinados por ambos os métodos

Ganhos	k_1	k_2	k_3	k_4
Método Alternativo	-11.1316	-8.2139	1222150.5699	6807.5762
Método das LMIs	-1.3779	-0.1992	119445.4117	816.6197

FONTE: Ganhos obtidos pelo MATLAB

5 Simulação no PSIM da UPS de 3.5kVA

5.1 Definições da norma IEC 62040-3

Na Figura 12 é possível visualizar a tabela disponível na norma IEC 62040-3, onde é estabelecido os limites percentuais de tensão RMS de harmônicas múltiplas da frequência fundamental.

Figura 12: Níveis percentuais de tensão para harmônicos.

Odd harmonics non-multiple of 3		Odd harmonics multiple of 3 ^a		Even harmonics	
Harmonic order n	Harmonic voltage %	Harmonic order n	Harmonic voltage %	Harmonic order n	Harmonic voltage %
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 ≤ n ≤ 49	2,27 × (17/n) – 0,27	21 ≤ n ≤ 45	0,2	10 ≤ n ≤ 50	0,25 × (10/n) + 0,25

NOTE All of the harmonic levels in this table are assumed not to occur simultaneously.

^a The levels given for odd harmonics that are multiples of three apply to zero sequence harmonics. Also, on a three-phase network without a neutral conductor or without load connected between line and ground, the values of the 3rd and 9th harmonics may be much lower than the compatibility levels, depending on the unbalance of the system.

FONTE: IEC 62040-3, 2004.

As figuras das subseções (5.3.1) e (5.3.2) foram obtidas no MATLAB, Simulink e PSIM (integrando com o software Simcoupler) conforme a descrição da norma IEC 62040-3. Segundo essa norma a adição e subtração de um degrau de carga linear e não linear deve obedecer um procedimento padrão como descrito a seguir:

Para a carga linear:

Com a UPS operando a vazio, aplicar um degrau de 20% de carga e, em seguida, um degrau de 80% de carga.

Com a UPS operando com 100% de carga, aplicar um degrau subtrativo de 80% de carga e, em seguida, um degrau de 20% de carga.

Para a carga não linear:

Com a UPS operando a vazio, aplicar um degrau de 25% de carga e, seguida, um degrau de 75% de carga.

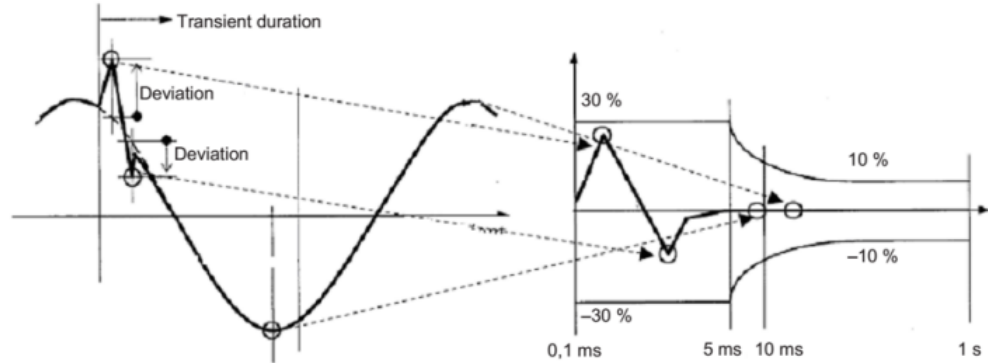
Com a UPS operando com 100% de carga, aplicar um degrau subtrativo de 75% de carga e, em seguida, um degrau de 25% de carga.

Desempenho dinâmico:

No ponto do valor de pico da forma de onda da tensão de saída da UPS, aplicar um degrau aditivo ou subtrativo de carga linear ou não linear e armazenar os pontos de

desvios do início e fim do transitório. Esse método de cálculo é visualizado na Figura 13 e aplicado nos perfis 1, 2 e 3, das Figuras 1, 2 e 3, respectivamente.

Figura 13: Transiente da tensão em degrau aditivo e subtrativo de carga.

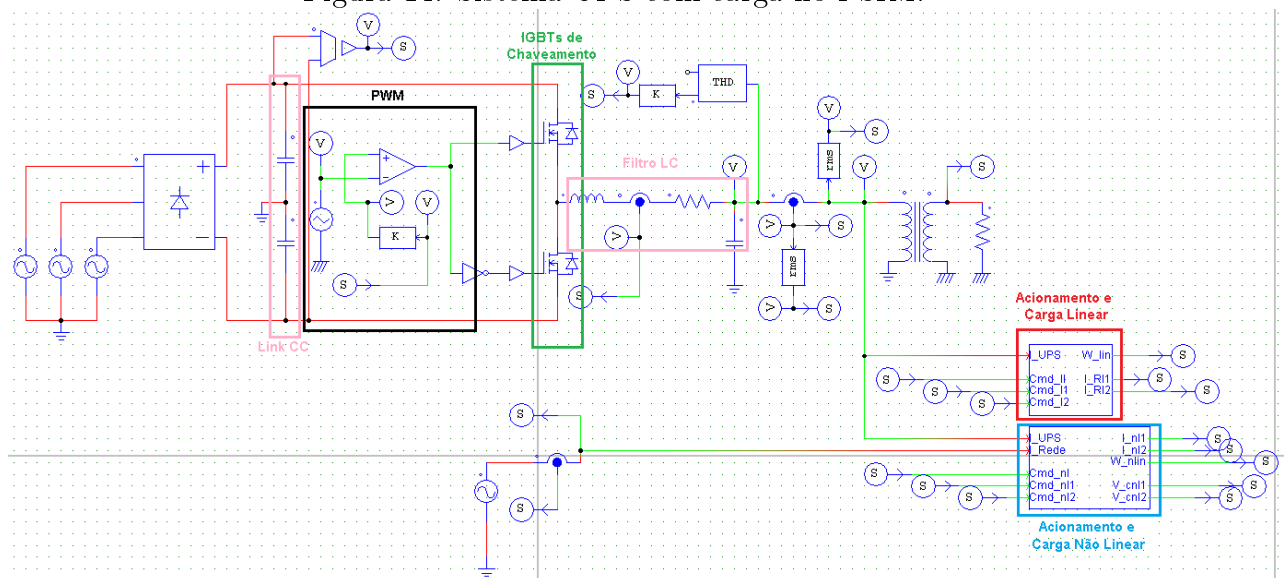


FONTE: IEC 62040-3, 2004.

5.2 Planta UPS, Acionamento e Cargas no PSIM

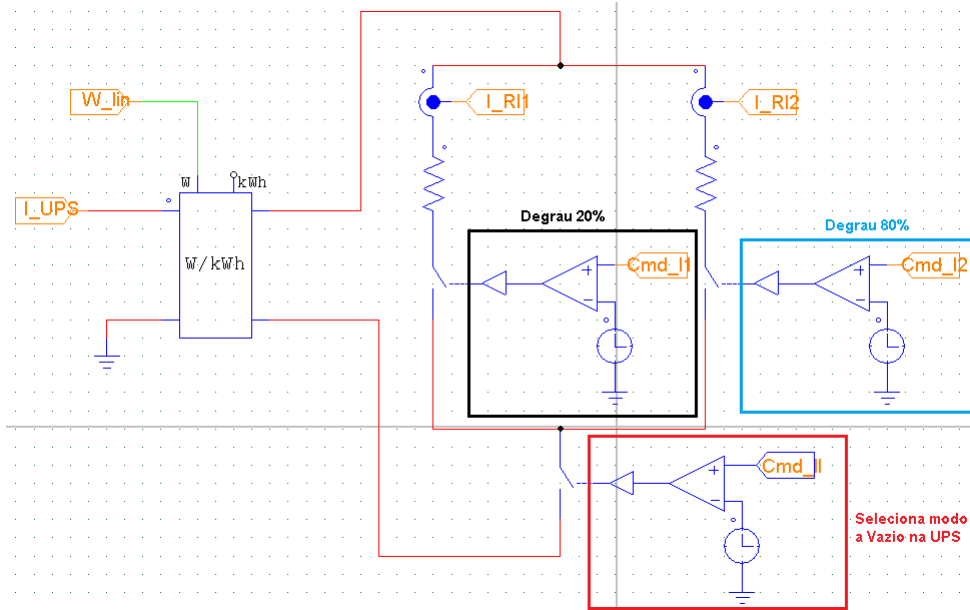
O sistema modelado na seção 3 foi desenhado no PSIM, para efeito de simulação, conforme Figuras 14, 15 e 16. Para as subseções (5.3.1) e (5.3.2) foi utilizado apenas um modo ressonante ($f_r = 60\text{Hz}$, ou ainda, $\omega_r \cong 377\text{rad/s}$). No Apêndice A é possível analisar as simulações para 2, 3, 4 e 5 modos ressonantes para a carga não linear.

Figura 14: Sistema UPS com carga no PSIM.



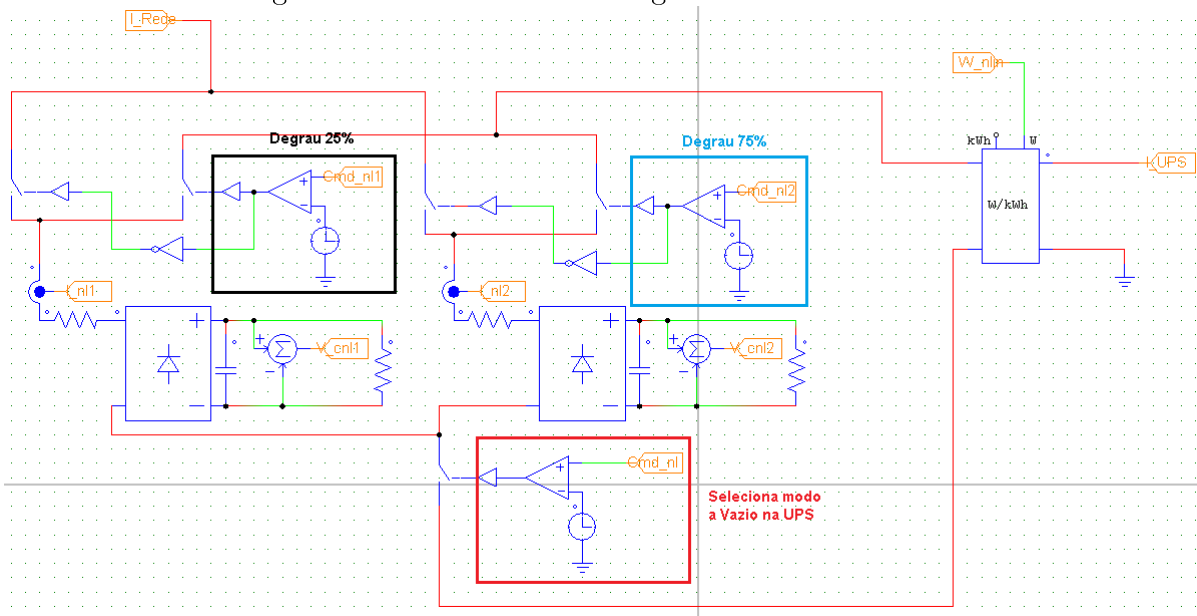
FONTE: Imagem retirada do PSIM pelo autor

Figura 15: Acionamento e carga linear no PSIM.



FONTE: Imagem retirada do PSIM pelo autor

Figura 16: Acionamento e carga não linear no PSIM.



FONTE: Imagem retirada do PSIM pelo autor

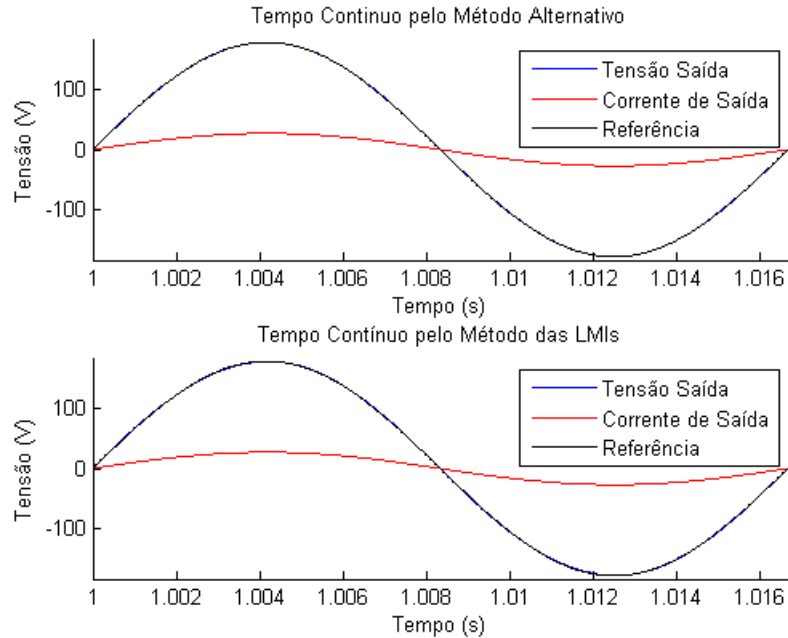
5.3 Comparação do Método Alternativo e das LMIs

5.3.1 Carga linear

Na Figura 17 é visualizado um ciclo (16,67ms) da tensão (127V_{RMS}) e corrente de saída da UPS com 100% de carga linear, apresentado tanto no método tradicional das LMIs quanto no método alternativo aqui proposto. Nesse gráfico fica evidente como a curva da tensão se ajusta quase que perfeitamente sobre a curva da referência. De forma

semelhante a curva da corrente apresenta uma aparência quase que senoidal. Em ambos os métodos não há diferenças significativas inferidas dos gráficos da Figura 17.

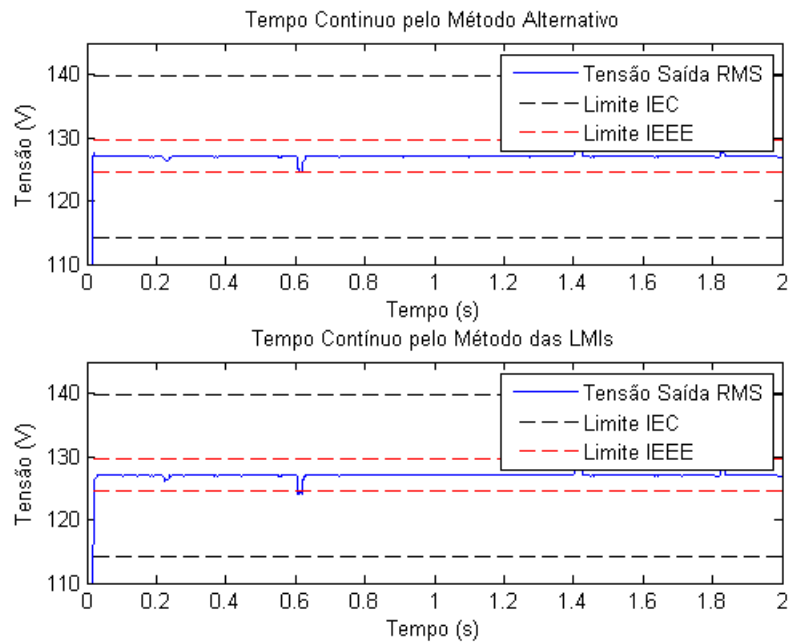
Figura 17: Comparação das curvas da tensão, corrente e referência para carga linear.



FONTE: Imagem retirada do MATLAB pelo autor

A Figura 18 apresenta o comportamento da tensão RMS da UPS no período de dois segundos considerando um degrau aditivo em $t = 0.2s$ de 20% da carga e um degrau aditivo restante de 80% em $t = 0.6s$. Nos segundos seguintes, em $t = 1.4s$ um degrau subtrativo de $t = 80%$ e, finalmente, em $t = 1.8s$ um degrau subtrativo de 20%. É possível observar que o valor RMS da tensão permanece satisfazendo a norma mais rigorosa, ou seja, limite da IEEE 944 ($\pm 2%$ do valor nominal da tensão de trabalho, ou seja, $127V_{RMS}$). É importante observar que esse gráfico não leva em consideração o momento transitório da inserção ou retirada da carga, assim, o que nos interessa na avaliação desse gráfico é a tensão em regime. Os valores da tensão RMS a vazio, com 20% e 100% de carga linear é visualizado na Tabela 4.

Figura 18: Comparação da variação da tensão RMS para carga linear.



FONTE: Imagem retirada do MATLAB pelo autor

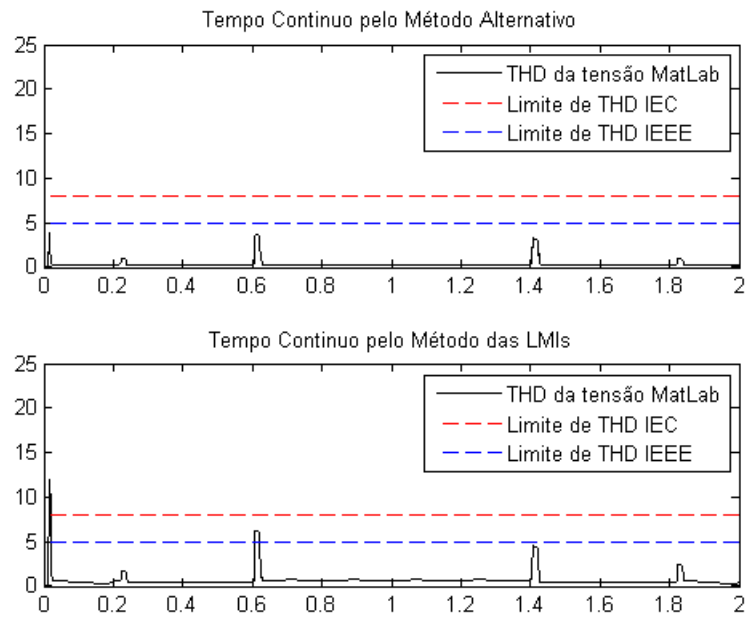
Tabela 4: Percentuais da tensão RMS em diferentes modos de operação

Modo de Operação	Vazio	20%	100%
% Tensão RMS (LMI)	0	0	0
% Tensão RMS (Alternativo)	0	0	0

FONTE: Dados obtidos da Figura 20

Na Figura 19 é possível ver o THD da tensão de saída da UPS no período de degrau aditivo de 20% em $t = 0.2s$ e o degrau aditivo restante de 80% em $t = 0.6s$. Em $t = 1.4s$ ocorre o degrau subtrativo de 80% e, finalmente, em $t = 1.8s$ o degrau subtrativo de 20%. De toda forma, os valores da THD com a UPS a vazio, com 20% e 100% de carga linear é visualizado na Tabela 5.

Figura 19: Comparação do THD da tensão de saída para carga linear.



FONTE: Imagem retirada do MATLAB pelo autor

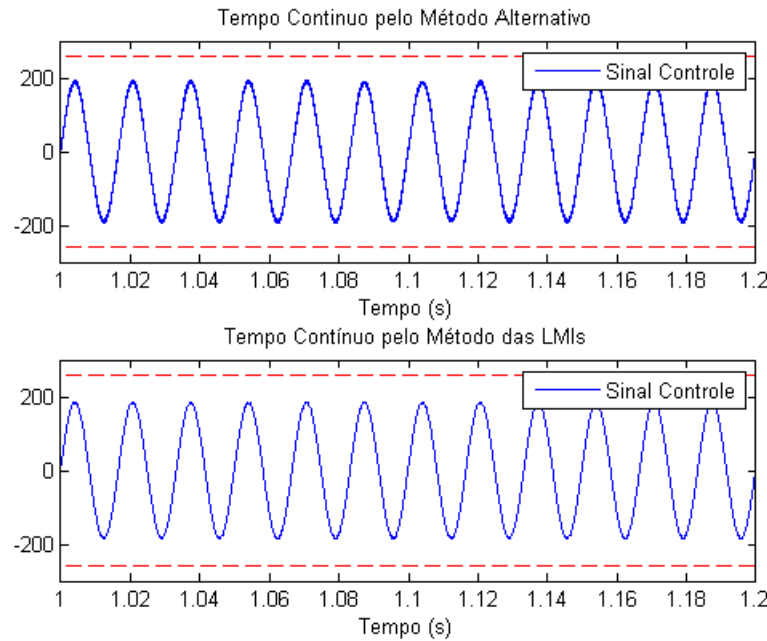
Tabela 5: THD da tensão em diferentes modos de operação

Modo de Operação	<i>Vazio</i>	20%	100%
% THD da tensão (LMI)	0.36	0.39	0.7
% THD da tensão (Alternativo)	0.25	0.2	0.25

FONTE: Dados obtidos da Figura 21

A Figura 20 mostra o sinal de controle em regime, ou seja, com 100% de carga linear. Como se observa a linha tracejada em vermelho representa o nível máximo que o sinal de controle pode excursionar, ou seja, $(Link_{cc}/2) = 260V$. O sinal de controle, em azul, está abaixo desse limite, o que comprova que esse sinal não é deteriorado pelo saturador do PWM (Do inglês - *Pulse Width Modulation*), conforme Figura 14. O sinal de controle apresenta forma e amplitude semelhantes para o método das LMIs e do método alternativo.

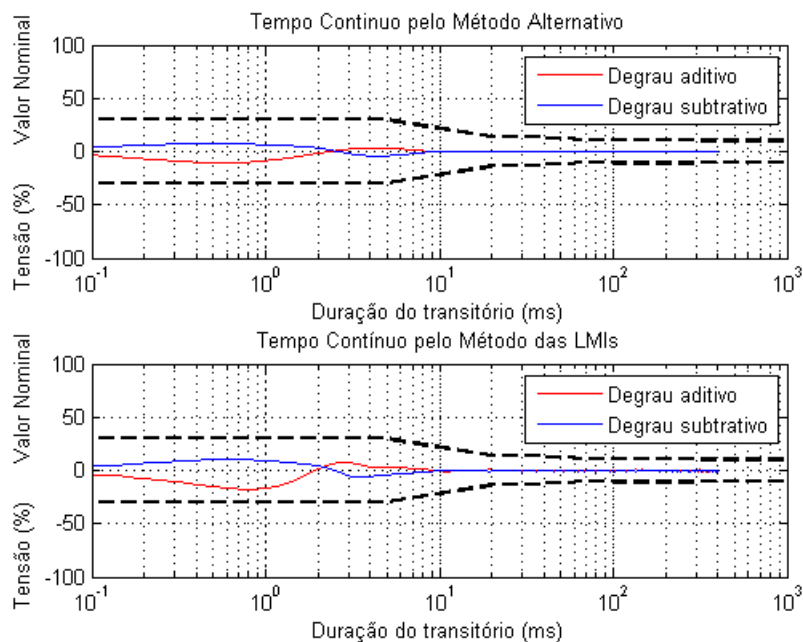
Figura 20: Comparação do sinal de controle para carga linear.



FONTE: Imagem retirada do MATLAB pelo autor

Conforme discutido nessa seção, o gráfico do perfil 1 da norma IEC 62040-3 mostra os limites de transitório permitidos da tensão de saída da UPS conforme definição da Figura 13. Vê-se pela Figura 21 que para carga linear essa exigência é satisfeita com relativa margem, para ambos os métodos. Pelo método das LMIs o comportamento transitório apresentou um desvio vertical máximo de -17.65% (degrau aditivo), 10.24% (degrau subtrativo) e um tempo de recuperação de, aproximadamente, $10ms$. Enquanto pelo método alternativo, o desvio vertical máximo foi de -10.63% (degrau aditivo), 7.5% (degrau subtrativo) e um tempo de recuperação de, aproximadamente, $8ms$.

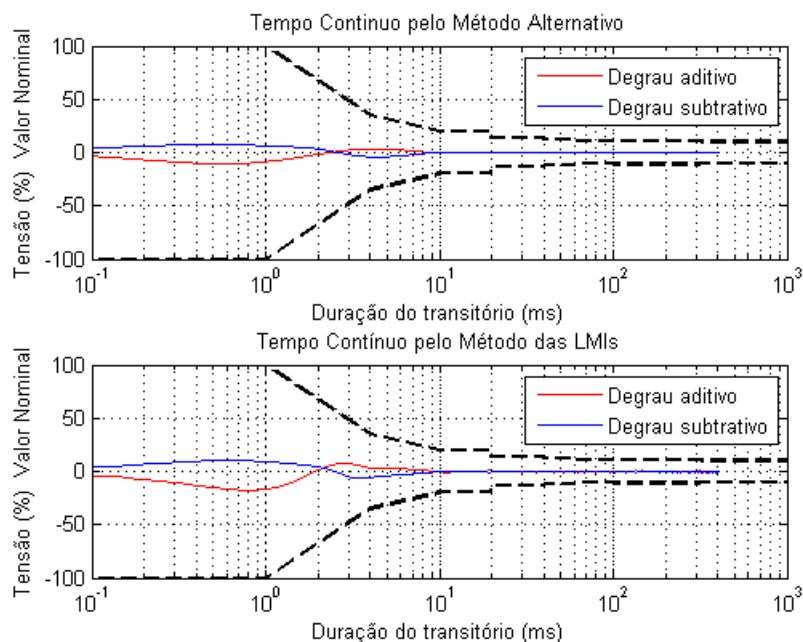
Figura 21: Comparação dos transientes de tensão conforme perfil 1 para carga linear.



FONTE: Imagem retirada do MATLAB pelo autor

O gráfico do perfil 2 da norma IEC 62040-3, Figura 22, mostra os limites de transitório permitidos da tensão de saída da UPS. No método das LMIs, o transitório da tensão apresentou um desvio vertical máximo de -17.65% (degrau aditivo), 10.24% (degrau subtrativo) e um tempo de recuperação de, aproximadamente, $10ms$. Enquanto pelo método alternativo, o desvio vertical máximo foi de -10.63% (degrau aditivo), 7.5% (degrau subtrativo) e um tempo de recuperação de, aproximadamente, $8ms$.

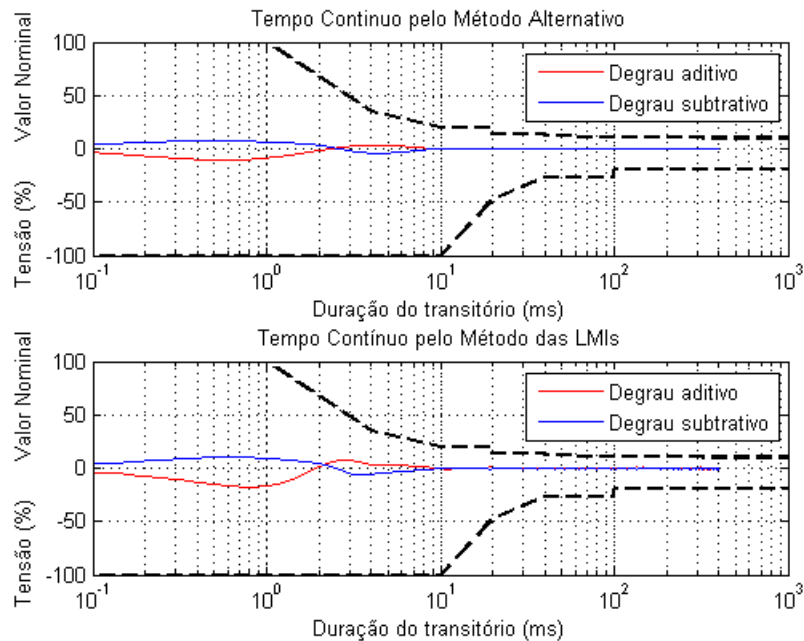
Figura 22: Comparação dos transientes de tensão conforme perfil 2 para carga linear.



FONTE: Imagem retirada do MATLAB pelo autor

Por fim, no gráfico da Figura 23, perfil 3 da norma IEC 62040-3, mostra os limites de transitório da tensão de saída da UPS. Vê-se que para carga linear esse exigência é satisfeita com relativa margem, para ambos os métodos. No entanto, novamente, o desvio vertical máximo e o tempo de recuperação pelo método das LMIs é mais acentuado que pelo método alternativo.

Figura 23: Comparação dos transientes de tensão conforme perfil 3 para carga linear.



FONTE: Imagem retirada do MATLAB pelo autor

A tabela 6 mostra o percentual RMS da tensão dos harmônicos, de acordo com a norma IEC da Figura 12, ímpares múltiplos da fundamental até a 17ª harmônica, considerando a UPS com carga linear e utilizado a estratégia de controle do método alternativo. Os harmônicos pares não foram apresentados, pois apresentaram valores nulos. A tabela 7 por sua vez apresenta os parâmetros semelhantes da Tabela 6, no entanto, considera o método das LMIs.

Avaliando ambas as tabelas é possível verificar que os percentuais RMS da tensão dos harmônicos são menores para o método alternativo, comparativamente, ao método das LMIs.

Tabela 6: Método Alternativo com carga linear

Ordem da Harmônica	3 ^a	5 ^a	7 ^a	9 ^a	11 ^a	13 ^a	15 ^a	17 ^a
% Tensão RMS da Harmônica IEC	5	6	5	1.5	3.5	3	0.3	2
% Tensão RMS da Harmônica	0.3	0.1	0	0	0	0	0	0

FONTE: Percentuais por harmônicas obtidas no MATLAB

Tabela 7: Método das LMIs com carga linear

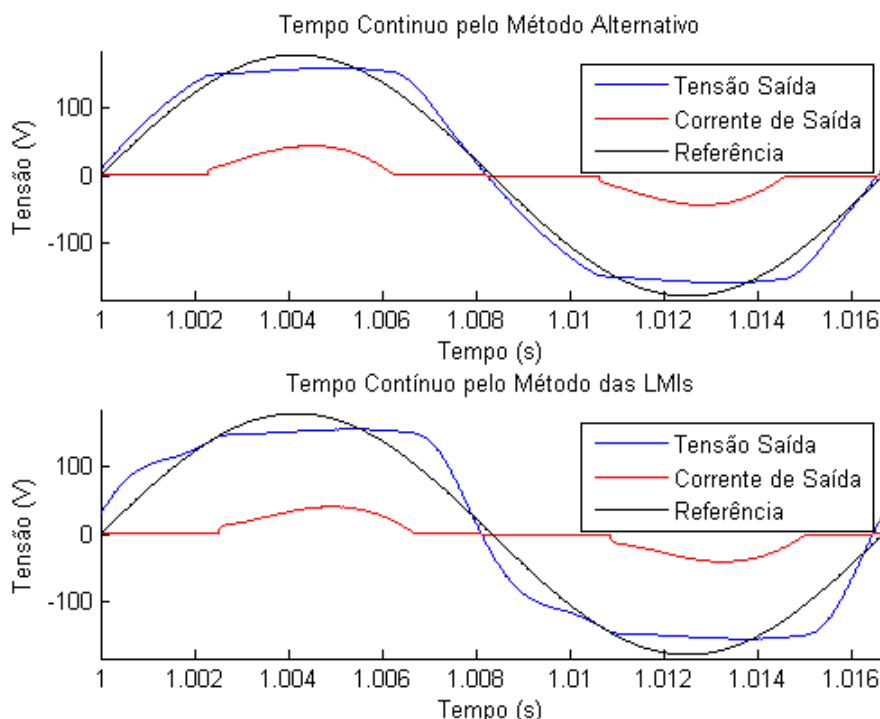
Ordem da Harmônica	3 ^a	5 ^a	7 ^a	9 ^a	11 ^a	13 ^a	15 ^a	17 ^a
% Tensão RMS da Harmônica IEC	5	6	5	1.5	3.5	3	0.3	2
% Tensão RMS da Harmônica	0.7	0.2	0	0	0	0	0	0

FONTE: Percentuais por harmônicas obtidas no MATLAB

5.3.2 Carga não linear

Assim como na Figura 17, a Figura 24 é visualizado um ciclo da tensão e corrente de saída da UPS com 100% de carga não linear (potência aparente de $3.5kVA$, com $FP = 0.7$), apresentado tanto no método tradicional das LMIs quanto no método alternativo aqui proposto. No entanto, diferente como para carga linear, na carga não linear, a forma da tensão é pouco deformada. No método das LMIs a deformação da curva da tensão é mais acentuada.

Figura 24: Comparação das curvas da tensão, corrente e referência para carga não linear.

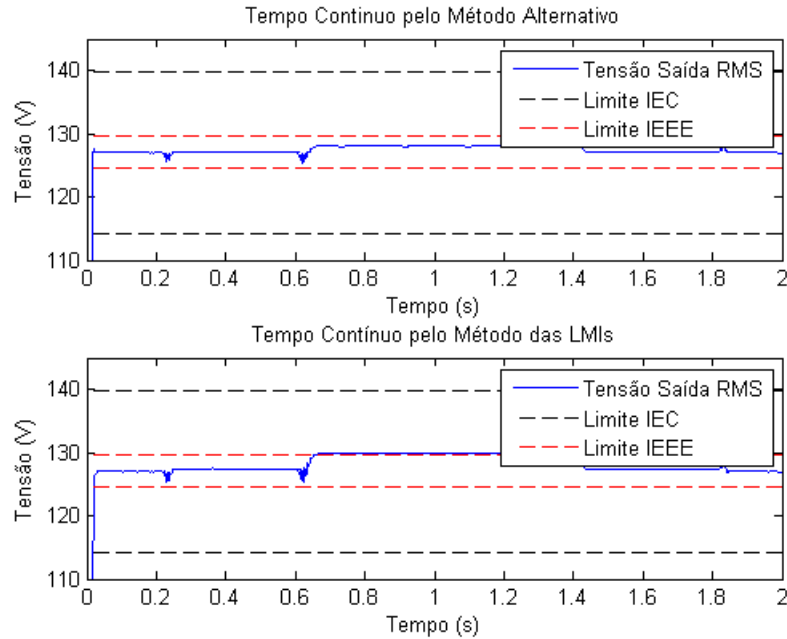


FONTE: Imagem retirada do MATLAB pelo autor

A Figura 25 apresenta o comportamento da tensão RMS, em regime, da UPS no período de dois segundos considerando um degrau aditivo em $t = 0.2s$ de 25% da carga não linear e um degrau aditivo restante de 75% em $t = 0.6s$. Nos segundos seguintes, em $t = 1.4s$ um degrau subtrativo de $t = 75%$ e, finalmente, em $t = 1.8s$ um degrau

subtrativo de 25% de carga não linear. É possível observar que o valor RMS da tensão permanece satisfazendo a norma mais rigorosa, ou seja, dentro do limite da IEEE 944 ($\pm 2\%$) para o método alternativo. No entanto, para o método das LMIs, quando ocorre a adição de 100% de carga não linear o valor RMS da tensão ultrapassa pouco o limite da norma IEEE 944 ($\pm 2\%$). Os valores da tensão RMS a vazio, com 20% e 100% de carga não linear é visualizado na Tabela 8.

Figura 25: Comparação da variação da tensão RMS para carga não linear.



FONTE: Imagem retirada do MATLAB pelo autor

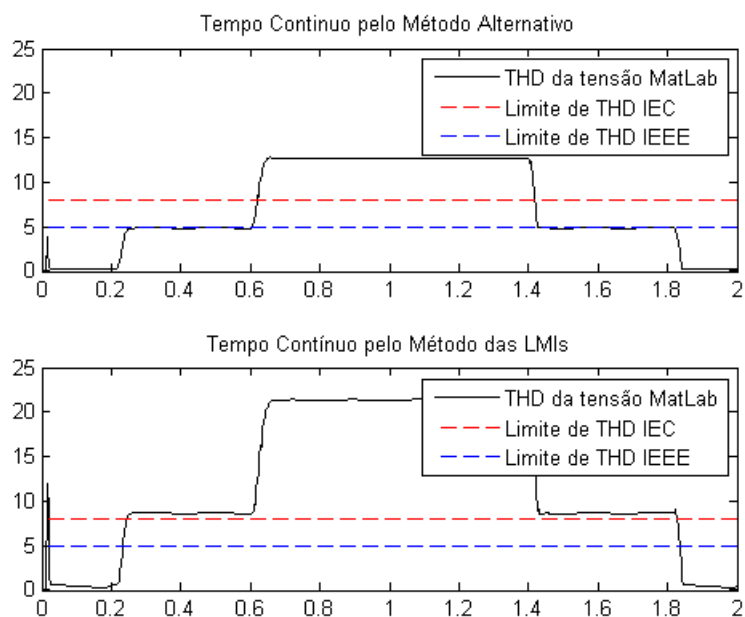
Tabela 8: Percentuais da tensão RMS em diferentes modos de operação

Modo de Operação	Vazio	20%	100%
% Tensão RMS (LMI)	0	0.4	2.2
% Tensão RMS (Alternativo)	0	0.1	0.8

FONTE: Dados obtidos da Figura 27

Na Figura 26 é possível ver o THD da tensão de saída da UPS no período de degrau aditivo de 25% em $t = 0.2s$ e o degrau aditivo restante de 75% em $t = 0.6s$. Em $t = 1.4s$ ocorre o degrau subtrativo de 75% e, finalmente, em $t = 1.8s$ o degrau subtrativo de 25%. De toda forma, a THD com 25% e com 100% carga não linear não satisfaz as normas IEEE e IEC para o método das LMIs, enquanto para o método alternativo a norma IEC 62040-3 é satisfeita para 25% de carga não linear e satisfaz, praticamente, no limite a norma IEEE 944 para 25% de carga não linear. Os valores da THD com a UPS a vazio, com 25% e 100% de carga não linear é visualizado na Tabela 9.

Figura 26: Comparação do THD da tensão de saída para carga não linear.



FONTE: Imagem retirada do MATLAB pelo autor

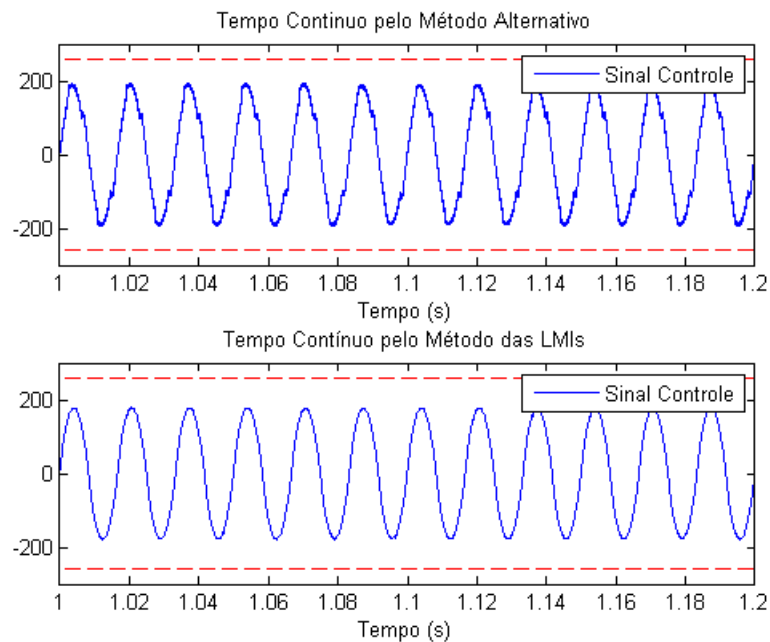
Tabela 9: THD da tensão em diferentes modos de operação

Modo de Operação	<i>Vazio</i>	20%	100%
% THD da tensão (LMI)	0.4	8.6	21.4
% THD da tensão (Alternativo)	0.2	4.8	12.63

FONTE: Dados obtidos da Figura 28

A Figura 27 mostra o sinal de controle em regime, ou seja, com 100% de carga não linear. Como se observa a linha tracejada em vermelho representa o nível máximo que o sinal de controle pode excursionar, ou seja, $(Link_{cc}/2) = 260V$. O sinal de controle, em azul, está dentro desse limite, o que comprova que esse sinal não é deteriorado pelo saturador do PWM. O sinal de controle apresenta amplitude semelhantes para o método das LMIs e do método alternativo, no entanto, a forma de onda do sinal de controle pelo método das LMIs quase que se confunde com uma senóide. Enquanto que o sinal de controle pelo método alternativo apresenta deformidades acentuadas durante as oscilações.

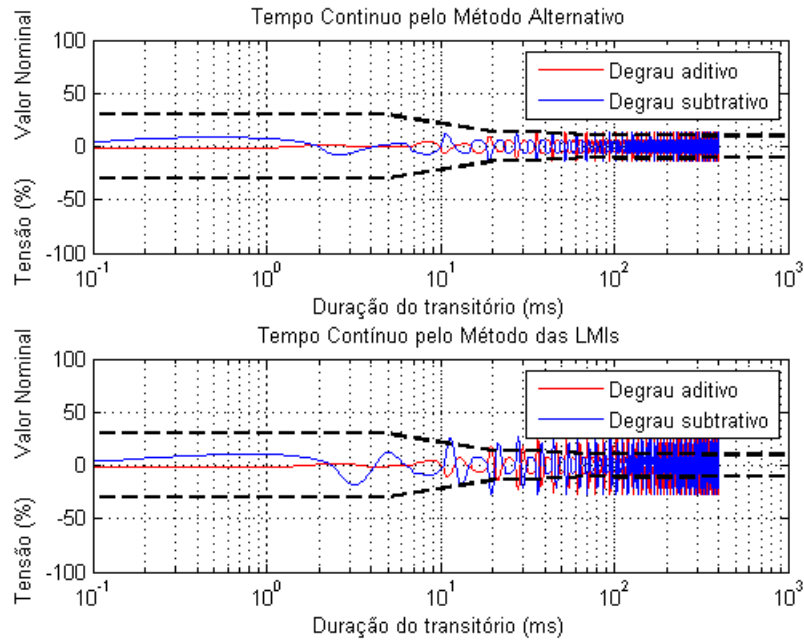
Figura 27: Comparação do sinal de controle para carga não linear.



FONTE: Imagem retirada do MATLAB pelo autor

Conforme discutido nessa seção, o gráfico do perfil 1 da norma IEC 62040-3 mostra os limites de transitório da tensão de saída da UPS conforme definição da Figura 13. Vê-se pela Figura 28, no perfil 1, que o transitório para a carga não linear é satisfeita, para ambos os métodos, no momento da adição e subtração do degrau de carga, ou seja, antes de $4ms$. Sendo o desvio vertical máximo, para o método das LMIs de -1.8% (degrau aditivo), 10.65% (degrau subtrativo), enquanto o desvio vertical máximo, para o método alternativo de -1.97% (degrau aditivo), 8.7% (degrau subtrativo). No entanto, após $4ms$, para o método alternativo, a amplitude de desvio, da adição e subtração do degrau de carga não linear, ficou no limite dos $\pm 10\%$ da norma. Enquanto para o método das LMIs, a amplitude de desvio, da adição e subtração do degrau de carga não linear, após $4ms$, ficou fora dos limites de $\pm 10\%$ estipulado pela IEC 62040-3.

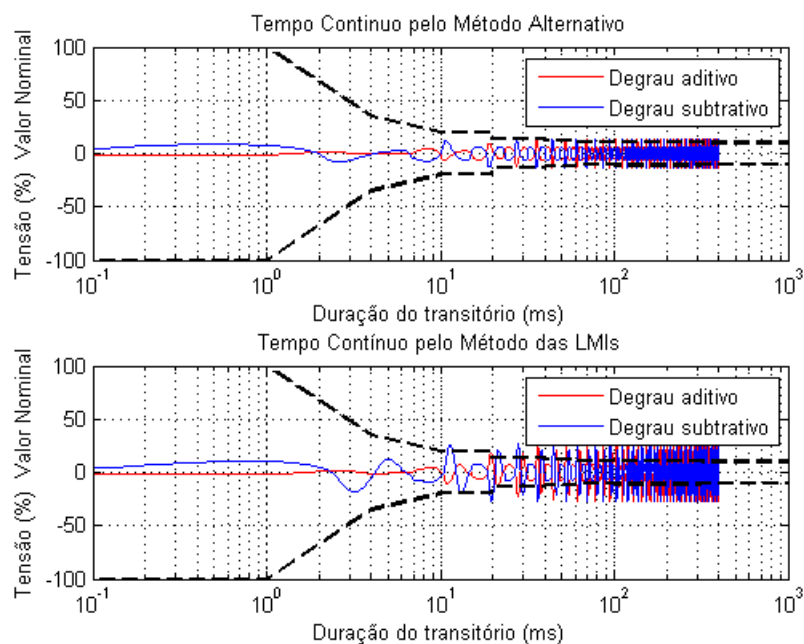
Figura 28: Comparação dos transientes de tensão conforme perfil 1 para carga não linear.



FONTE: Imagem retirada do MATLAB pelo autor

O gráfico do perfil 2 da norma IEC 62040-3 mostra os limites de transitório permitidos da tensão de saída da UPS. Vê-se pela Figura 29 que para carga não linear essa exigência é satisfeita, para o método alternativo até $4ms$ e, no limite após esse tempo. Pelo método das LMIs, o transitório da tensão apresenta o comportamento mais acentuado que o método alternativo após $4ms$, ultrapassando o limite de $\pm 10\%$ estipulado pela norma IEC.

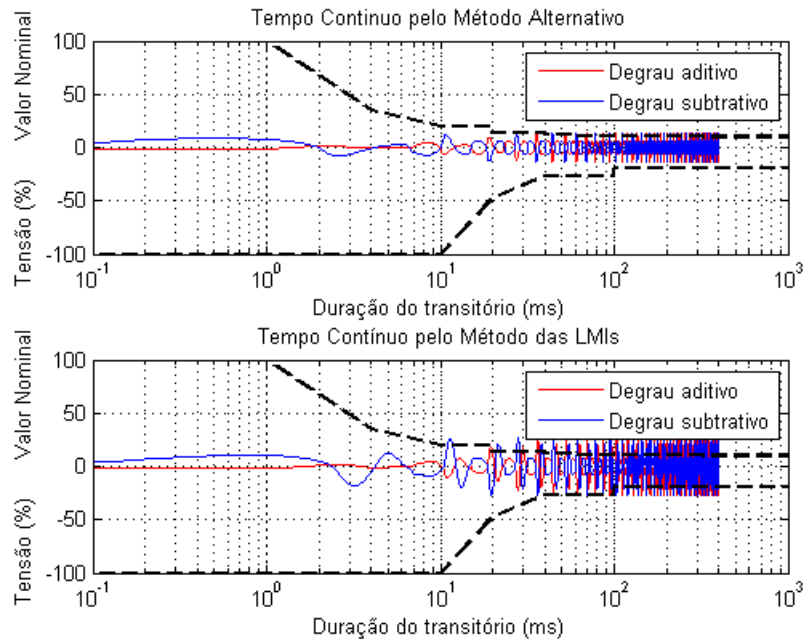
Figura 29: Comparação dos transientes de tensão conforme perfil 2 para carga não linear.



FONTE: Imagem retirada do MATLAB pelo autor

Por fim, no gráfico da Figura 30, perfil 3 da norma, mostra os limites de transitório da tensão de saída da UPS. Vê-se que para a carga não linear esse exigência é satisfeita, para o método alternativo, até $4ms$ e, no limite após esse tempo. No entanto, novamente, o transitório da tensão pelo método das LMIs é mais acentuado que o método alternativo a partir de $4ms$, ultrapassando os limites de $+10\%$ e -20% , porém ainda satisfazendo a norma IEC 62040-3 antes de $4ms$.

Figura 30: Comparação dos transientes de tensão conforme perfil 3 para carga não linear.



FONTE: Imagem retirada do MATLAB pelo autor

Com 100% de carga não linear e utilizando o método alternativo desenvolvido neste trabalho é possível preencher a Tabela 10 de acordo com a Figura 12, considerando a tensão RMS de harmônicas múltiplas da fundamental. Por outro lado, a Tabela 11 apresenta os mesmos parâmetros da Tabela 10, mas considerando o método tradicional das LMIs. Analisando os percentuais em ambas as tabelas dos métodos, fica claro que o método alternativo apresenta percentuais menores, para as mesmas harmônicas, que utilizando o método das LMIs.

Tabela 10: Método Alternativo com carga não linear

Ordem da Harmônica	3 ^a	5 ^a	7 ^a	9 ^a	11 ^a	13 ^a	15 ^a	17 ^a
% Tensão RMS da Harmônica IEC	5	6	5	1.5	3.5	3	0.3	2
% Tensão RMS da Harmônica	12.3	2.6	1.75	0.63	0.59	0.25	0.25	0.16

FONTE: Percentuais por harmônicas obtidas no MATLAB

Tabela 11: Método das LMIs com carga não linear

Ordem da Harmônica	3 ^a	5 ^a	7 ^a	9 ^a	11 ^a	13 ^a	15 ^a	17 ^a
% Tensão RMS da Harmônica IEC	5	6	5	1.5	3.5	3	0.3	2
% Tensão RMS da Harmônica	19.13	7.7	3.6	0.25	0.76	0	0.32	0

FONTE: Percentuais por harmônicas obtidas no MATLAB

6 Resultados Experimentais

6.1 Discretização do Controlador Ressonante

O controlador ressonante dificilmente será realizado no domínio contínuo. A implementação dos controladores nos projetos atuais é através de microcontroladores, microprocessadores, FPGAs (Do inglês - *Field Programmable Gate Array*) e outros sistemas digitais que tornam o custo e o prazo de desenvolvimento e implementação dos projetos menores. Por este motivo, também é proposto neste trabalho a versão discreta do controlador ressonante. Para obter esta estrutura utilizou-se a técnica de discretização por *Tustin* a qual estabelece a seguinte aproximação entre os domínios contínuo e o discreto:

$$s \approx \frac{2}{T_s} \frac{z - 1}{z + 1} \quad (6.1.1)$$

Aplicando a aproximação da expressão (6.1.1) na equação (3.4.1) é obtida a seguinte função de transferência discreta para o controlador ressonante:

$$G_{mfz}(z) = \frac{b_0 z^2 + b_1 z + b_2}{a_0 z^2 + a_1 z + a_2} \quad (6.1.2)$$

As constantes b_0 , b_1 , b_2 e a_0 , a_1 , a_2 tem relação com os parâmetros do controlador, conforme a Tabela 12. A taxa de amostragem utilizada é representada pela variável T_s .

Tabela 12: Coeficientes do função discretizada

Compensador Discretizado - Frequência Fundamental	
b_2	$-(-4.k_1 + 2.T_s.k_3 + (k_2 - k_1.\omega^2).T_s^2)$
b_1	$-(2((k_2 - k_1.\omega^2).T_s^2 + 4.k_1))$
b_0	$-(-4.k_1 - 2.T_s.k_3 + (k_2 - k_1.\omega^2).T_s^2)$
a_2	$-(4 + \omega^2.T_s^2)$
a_1	$-2(\omega^2.T_s^2 - 4)$
a_0	$-(4 + \omega^2.T_s^2)$
T_s	$2.3148e - 005s$

FONTE: Equações algébricas da discretização da equação (3.4.1)

Aplicando as transformações algébricas da Tabela 12 é possível concluir os valores na Tabela 13.

Tabela 13: Coeficientes do Método Alternativo

Coeficientes do Método Alternativo - Frequência Fundamental	
b_2	-0.0786
b_1	0.0003
b_0	0.0790
a_2	1.0000
a_1	-2.0000
a_0	1.0000

FONTE: Coeficientes obtidos pela substituição de ganhos k na tabela 12

6.2 Implementação Prática da UPS de 3.5kVA

No laboratório LASCAR da UFRGS foi realizado os procedimentos experimentais para obtenção do valor RMS (Do inglês - *Root Mean Square*), a THD (Do inglês - *Total Harmonic Distortion*) e forma de onda da tensão de saída além da corrente na carga. O hardware utilizado compreende a DSPACE (Do inglês - *Digital Signal Processing And Control Engineering*) para aquisição de amostra de corrente e tensão e um computador para implementação do controlador ressonante e acionamento das cargas lineares e não lineares. O modelo da DSPACE utilizado, conforme Figura 31, foi o DS1104. Esse hardware permite configurar um período de amostragem de até $45\mu s$, suficiente para análise de transitórios e harmônicas de frequências inferiores a $11.1kHz$ (Metade da taxa máxima de amostragem da DSPACE, que é $22.2kHz$). Os transitório de carga tem duração de *milisegundos*, ou seja, de baixa frequência e a máxima harmônica relevante para esse trabalho é a 17^a , ou seja, $1020Hz$ (≈ 11 vezes menor que a maior frequência amostrada sem sofrer o *aliasing* e poder ser recuperada).

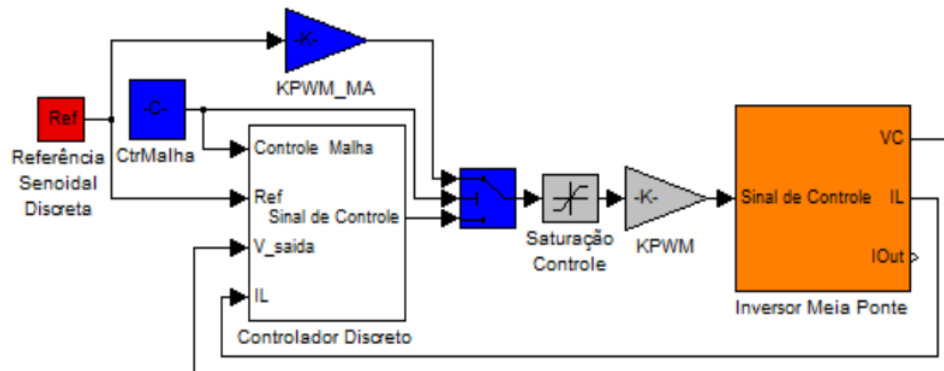
Figura 31: Placa de aquisição DSPACE.



FONTE: <https://www.dspace.com>

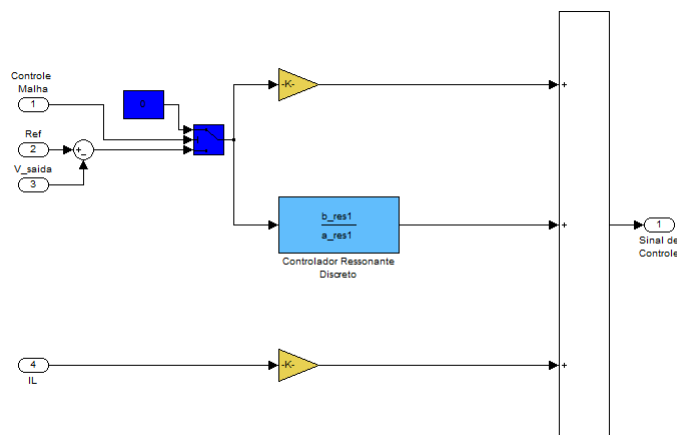
A estratégia de controle desenvolvida no Simulink pode ser visualizada na Figura 32, onde é possível ver o bloco inversor de meia ponte, o controlador ressonante e a referência. O bloco do controlador, conforme Figura 33, é a implementação em diagrama de blocos da função de transferência discretizada da equação (6.1.2). Finalmente, o bloco inversor da Figura 34, apresenta o bloco de comunicação física, ou seja, o ADC. O conversor analógico digital é de 12 bits e como o fundo de escala é de $1V$, a resolução é de $R = 488.28\mu V/bits$.

Figura 32: Algoritmo de Controle Utilizado.



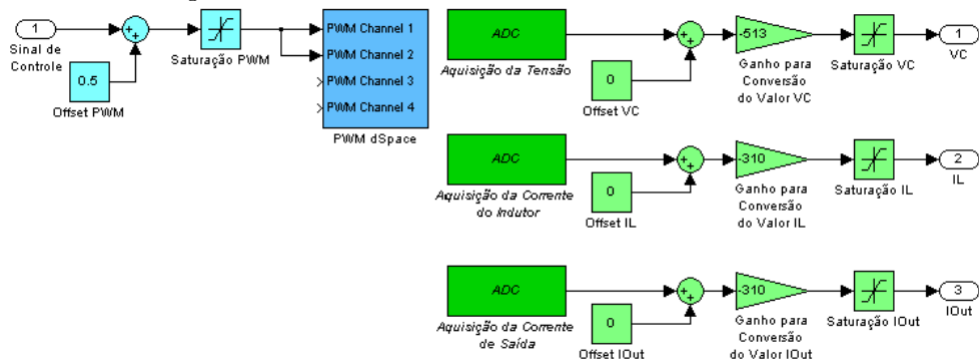
FONTE: Imagem retirada do Simulink pelo autor

Figura 33: Subsistema do Controlador Discretizado.



FONTE: Imagem retirada do Simulink pelo autor

Figura 34: Subsistema do inversor de meia ponte.



FONTE: Imagem retirada do Simulink pelo autor

Após desenvolver a estratégia de controle, conforme Figura 33, no Simulink foi realizada a "queima" do arquivo do Simulink no software da DSPACE. Em seguida, foi realizado o acionamento das carga lineares e não lineares de $3.5kVA$ com FP de 0.7 através do programa de interface *Control Desk* da DSPACE.

Os componentes do esquemático da UPS disponível no LASCAR é constituído por um *variac* (com $127V_{RMS}$ de tensão de saída) trifásico, conforme Figura 35, um retificador trifásico (simplificado por um *Link CC V_{cc}*), 2 IGBTs (do inversor de frequência), um filtro LC de saída e o hardware da DSPACE (para realizar a aquisição das amostras de corrente e tensão e o chaveamento o PWM), conforme Figura 31. O transdutor de entrada para obter a amostra de corrente do indutor foi utilizado um sensor de efeito *Hall*, enquanto para obter uma amostra da tensão, sobre o capacitor, foi utilizado um transformador de sinal.

Para fornecer energia dentro das especificações de funcionamento do inversor e das normas IEC e IEEE, foi utilizado um variador de tensão trifásico com tensão de saída de $127V_{RMS}$ fase neutro representado pela Figura 35.

Figura 35: Variador de tensão trifásico.



FONTE: Imagem retirada do LASCAR pelo autor

A carga necessária para os testes foi montada com um conjunto de resistências cuja potência total é $3.5kVA$ ($FP = 0.7$) e um conjunto de 4 capacitores eletrolíticos de $3300\mu F$ (valor nominal) para formar uma capacitância total de $12028\mu F$ (valor calculado).

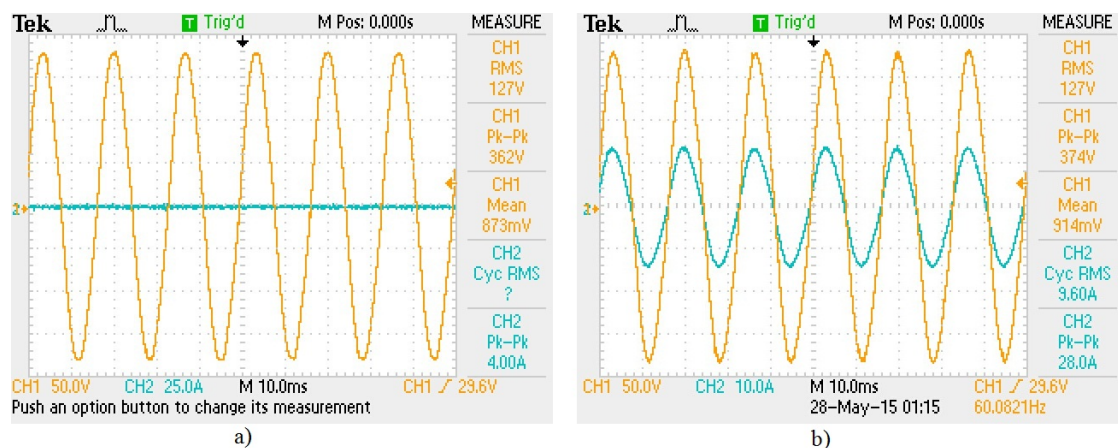
Para medir os resultados dos experimentos foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Dois multímetros FLUKE 115 TRUE RMS;
- Um osciloscópio TEKTRONICS TDS 2014;
- Uma ponteira de corrente FLUKE 80I-110S;
- Uma analisador de qualidade de energia FLUKE 43B

6.3 Resultados da Implementação

Na planta UPS de 3.5kVA disponível no LASCAR da UFRGS, foi realizado experimentos de modo a obter os resultados da tensão, corrente, THD, degrau aditivo e degrau subtrativo (Para análise de transitório conforme Figura 13).

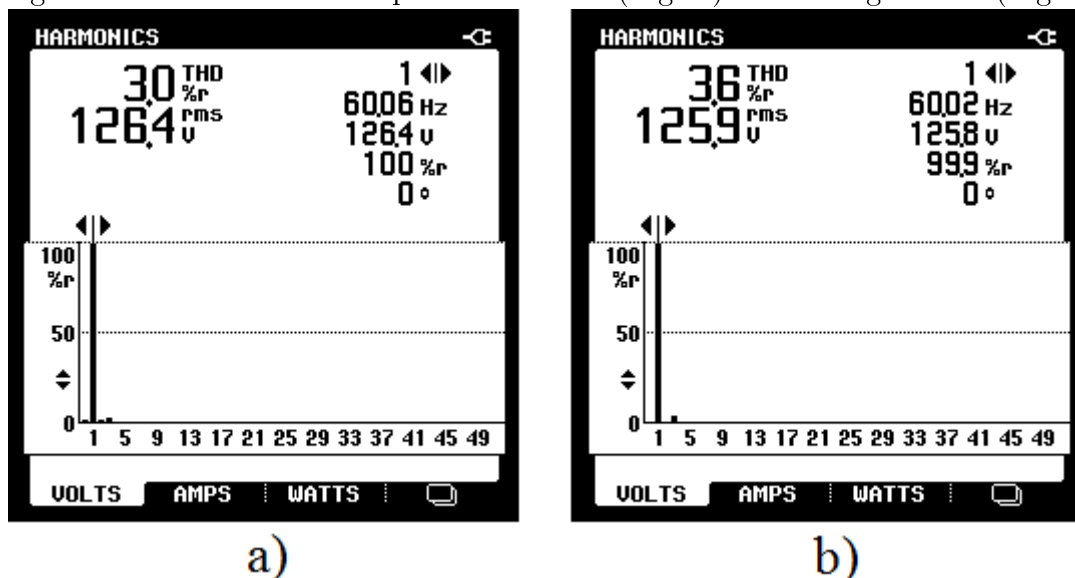
Figura 36: Tensão e corrente a vazio (Fig. a) e tensão e corrente com carga linear (Fig. b).



FONTE: Imagem retirada do TEKTRONICS TDS 2014

Alimentando a UPS com o variador de tensão trifásica da Figura 35 e fazendo a mesma operar a vazio é possível obter a resposta da Figura 36 através do osciloscópio TEKTRONICS TDS 2014. Conforme instruções da norma IEC 62040-3 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013) a frequência se encontra em 60Hz e a tensão em 127V_{RMS} . A Figura 37, do Fluke 43B, apresenta a tensão, frequência e THD do sistema operando a vazio, confirmando as exigências da norma e apresentando similaridades dos valores de frequência e tensão com o osciloscópio. De forma semelhante é possível concluir para o sistema operando com 100% de carga linear.

Figura 37: THD da tensão operando a vazio (Fig. a) e com carga linear (Fig. b).



FONTE: Imagem retirada do FLUKE 43B

Na Tabela 14 foram colocados os valores percentuais da tensão RMS das harmônicas múltiplas ímpares da fundamental, até a 17^a. Nota-se nessa tabela que os percentuais ficaram muito acima daqueles simulados no PSIM, conforme Tabela 6, porém atendeu os limites estabelecidos pela norma IEC 62040-3.

Tabela 14: Resultado experimental para a carga linear.

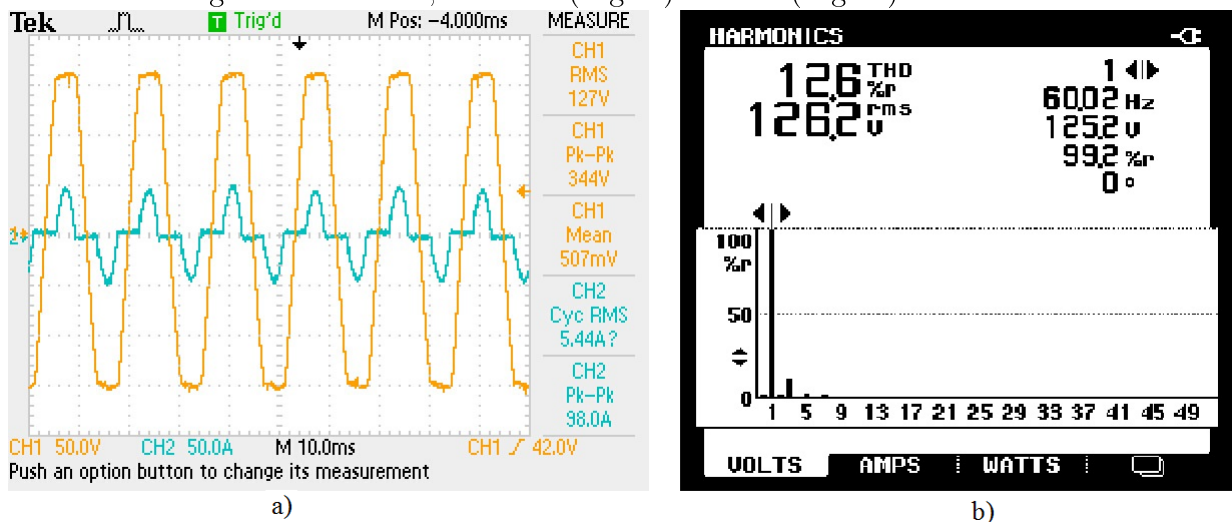
Ordem da Harmônica	3 ^a	5 ^a	7 ^a	9 ^a	11 ^a	13 ^a	15 ^a	17 ^a
% Tensão RMS da Harmônica IEC	5	6	5	1.5	3.5	3	0.3	2
% Tensão RMS da Harmônica	3.4	0.6	0.1	0.1	0	0	0	0

FONTE: Percentuais por harmônicas obtidas no *software* da DSPACE e FLUKE 43B

A THD da tensão de saída da UPS da Figura 36 para o sistema operando com carga linear (Fig. 36b) apresentou um valor bem acima dos valores simulados na Figura 19, ou seja, enquanto na Figura 19 foi $THD_{Simulado} \simeq 0.25\%$ na Figura 37 foi $THD_{Experimental} \simeq 3.6\%$, considerando o método Alternativo. No entanto, a forma de onda da Figura 17 e Figura 36 (Fig. 36b) apresentam um formato muito peculiar a uma senóide.

A Figura 38 (Fig. a e b) apresenta um $THD_{Alternativo} \simeq 12.6\%$, forma de onda da tensão e corrente muito similar ao $THD_{Alternativo} \simeq 12.63\%$, forma de onda da tensão e corrente da Figura 26, para o método alternativo.

Figura 38: Tensão, corrente (Fig. a) e THD (Fig. b) da tensão.



FONTE: Imagem retirada do TEKTRONICS TDS e FLUKE 43B

A Tabela 15 apresenta os valores percentuais da tensão RMS das harmônicas múltiplas ímpares da fundamental, até a 17^a. Nota-se nessa tabela que os valores percentuais ficaram praticamente iguais aqueles simulados no PSIM, conforme Tabela 12, atendendo os percentuais da norma IEC 62040-3 a partir da 5^a harmônica.

Para validar o desempenho transitório na adição e subtração de carga linear de acordo com a norma IEC 62040-3, ou seja, os perfis 1, 2 e 3 desta norma, quando o sistema

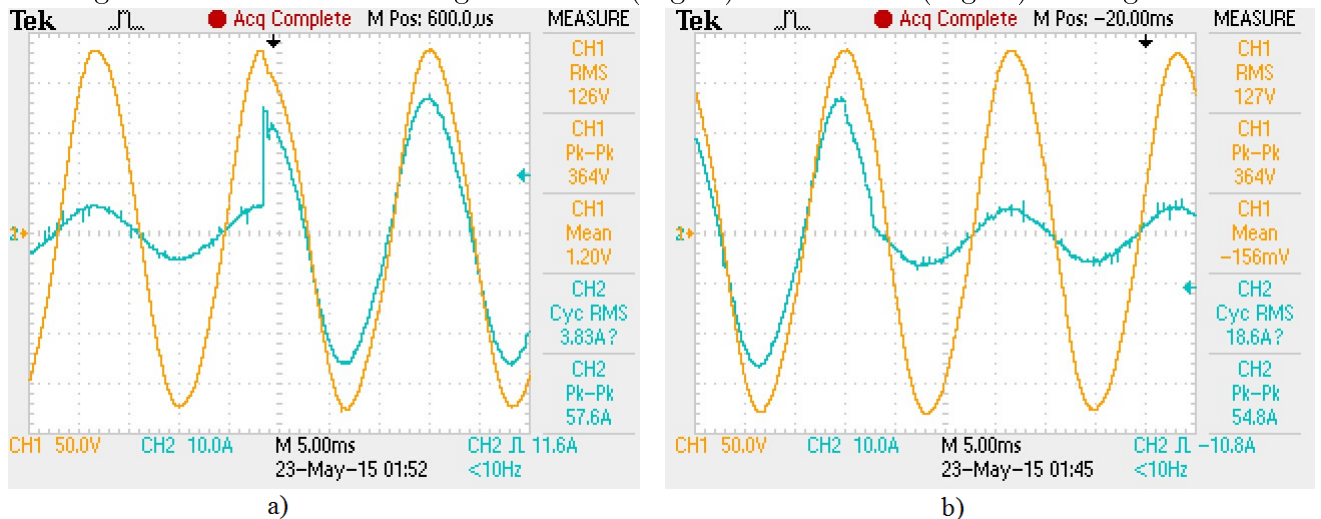
Tabela 15: Resultado experimental para a carga não linear.

Ordem da Harmônica	3 ^a	5 ^a	7 ^a	9 ^a	11 ^a	13 ^a	15 ^a	17 ^a
% Tensão RMS da Harmônica IEC	5	6	5	1.5	3.5	3	0.3	2
% Tensão RMS da Harmônica	12.1	2.7	1.8	0.7	0.6	0.2	0.2	0.2

FONTE: Percentuais por harmônicas obtidas no *software* da DSPACE e FLUKE 43B

estava com 20% da carga linear foi adicionado os 80% restantes de carga para análise de transitório. Para a subtração de carga, foi retirado os 80% quando o sistema operava em regime, ou seja, com 100% de carga. O resultado pode ser visualizado na Figura 39 e conforme se observa, a retirada (Fig. 39b) da carga apresenta um comportamento mais suave (dinâmica lenta) que a entrada (Fig. 39a) da carga.

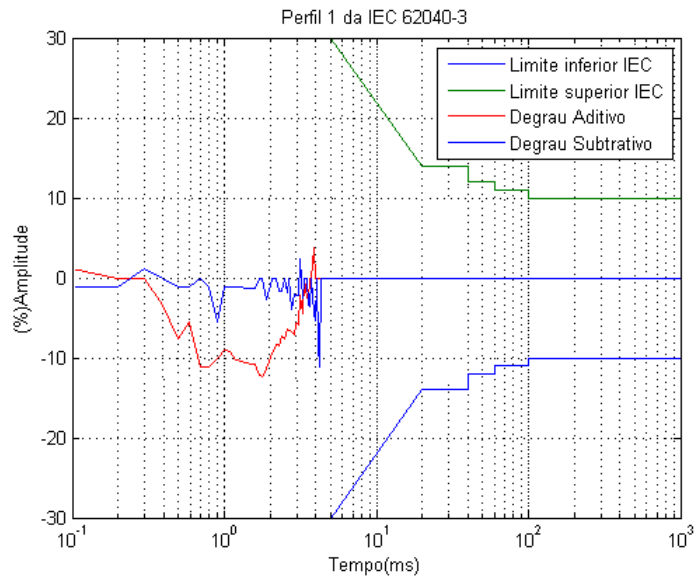
Figura 39: Transitório do degrau aditivo (Fig. a) e subtrativo (Fig. b) de carga.



FONTE: Imagem retirada do TEKTRONICS TDS 2014

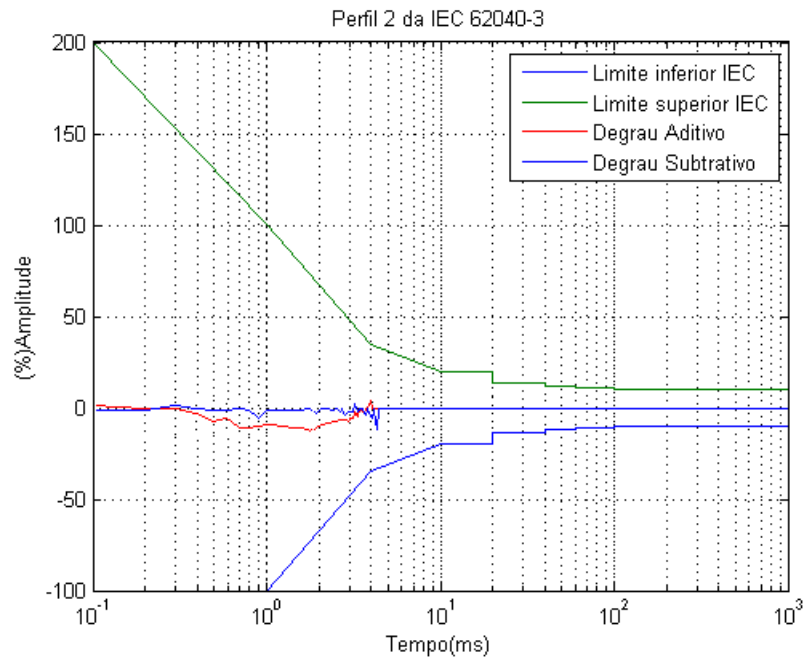
Nas Figuras 40, 41 e 42 é possível ver os perfis 1, 2 e 3, respectivamente para a adição e subtração de carga linear da Figura 39. Em todos os perfis o desempenho transitório satisfaz com relativa margem os limites estabelecidos pela norma IEC 62040-3 e, com comportamento similar aos obtidos via simulação das Figuras 21, 22 e 23 na subseção (5.3.1).

Figura 40: Perfil 1 da IEC para o transitório da Figura 37.



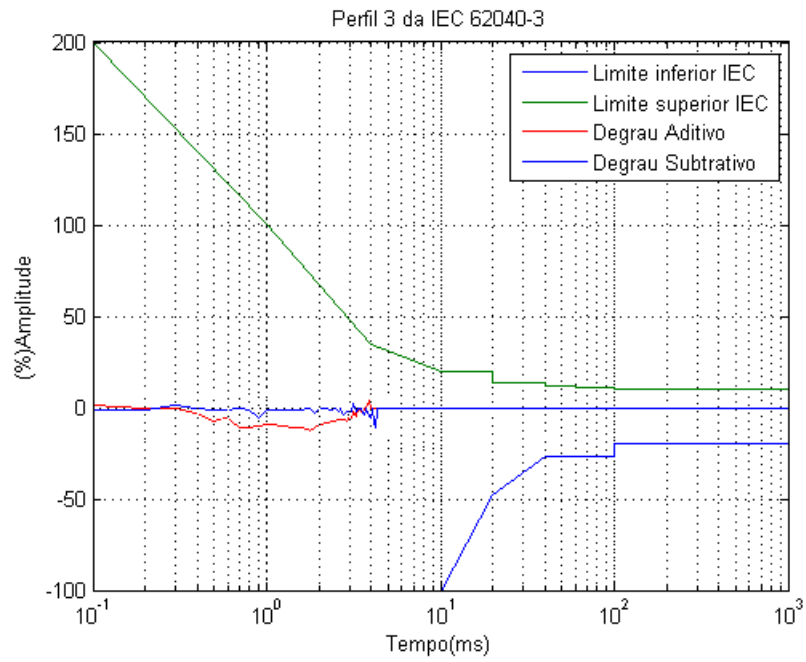
FONTE: Imagem retirada do MATLAB e osciloscópio pelo autor

Figura 41: Perfil 2 da IEC para o transitório da Figura 37.



FONTE: Imagem retirada do MATLAB e osciloscópio pelo autor

Figura 42: Perfil 3 da IEC para o transitório da Figura 37.



FONTE: Imagem retirada do MATLAB e osciloscópio pelo autor

7 Conclusão

Em síntese, ficou comprovado o quão satisfatórios foram as simulações do controlador discutido na subseção (3.4), para a carga linear e não linear, da subseção (5.3), e seus resultados experimentais, da seção 6, tomando como parâmetro os limites e as curvas das normas IEC 62040-3 e IEEE 944. Na subseção (5.3.1) foi comparado, para o método alternativo e das LMIs, as simulações da carga linear no MATLAB, utilizando o código desenvolvido no Anexo A, na subseção (5.3.2) foi comparado, para o método alternativo e das LMIs, as simulações da carga não linear e, finalmente, na subseção (6.3) foi adquirido e apresentado os resultados experimentais do método alternativo.

Na Figura 18 foi apresentado o comportamento do valor RMS da tensão de saída da UPS considerando o método alternativo e o tradicional método das LMIs. Nesse gráfico ficou constatado que, para a carga linear, ambos os métodos satisfazem as normas IEC e IEEE. Ou seja, adicionar ou subtrair 20% e 80% de carga linear não altera a tensão a ponto de ultrapassar os limites estabelecidos pelas normas, conforme se ver os percentuais nos modos de operação da Tabela 4. De forma semelhante, a THD da Figura 19, para ambos os métodos aqui tratados, apresentam valores, aproximadamente, nulos nos períodos a vazio, com 20% e 100% de carga linear, conforme Tabela 5. Finalmente, para os perfis 1, 2 e 3 das Figuras 21, 22 e 23, respectivamente, os transitórios de tensão da adição e subtração de carga linear, para o método alternativo e o método das LMIs, foram muito abaixo dos limites das curvas da IEC 62040-3, sendo que o desempenho dos transitórios pelo método alternativo apresentou um comportamento levemente inferior que os transitórios pelo método das LMIs, portanto, o método alternativo apresentou um desempenho melhor.

Por outro lado, na Figura 25 da subseção (5.3.2) o comportamento da tensão RMS da saída da UPS apresentou um valor abaixo dos níveis estabelecidos pelas normas IEC e IEEE, para adição e subtração de 25% e 75% de carga não linear, porém acima comparando com a simulação para a carga linear. A tensão RMS a vazio, com 25% e 100% de carga não linear utilizando o método alternativo apresentou valores menores que utilizando o método das LMIs. Para o método das LMIs, com 100% de carga não linear, a tensão RMS ficou pouco acima do limite para a norma mais rigorosa, IEEE 944, diferentemente do método alternativo que apresentou uma pequena margem, com 100% de carga não linear, conforme Tabela 8. A THD da tensão de saída da UPS, Figura 26, com 25% de carga não linear para o método alternativo ficou no limite para a norma IEEE e bem abaixo da IEC, no entanto, com 100% de carga não linear a THD da tensão não satisfaz as normas IEC e IEEE, conforme Tabela 9. Diferentemente, a THD da tensão de saída para o método das LMIs não satisfaz as normas IEC e IEEE com 25% e 100% de carga não linear, conforme Tabela 9. Os perfis 1, 2 e 3, respectivamente, das curvas das Figuras 28, 29 e 30 o transitório da tensão de saída para um degrau aditivo ou subtrativo de carga apresentou um melhor comportamento para o método alternativo.

Finalmente, foi realizado os procedimentos experimentais, conforme seção (6.3), de forma a obter a forma de onda da tensão e corrente a vazio (Figura 36), com carga linear (Figura 36) e carga não linear (Figura 38). Paralelamente, foi obtido a THD da tensão com carga linear (Figura 37) e não linear (Figura 38). A THD da tensão para a carga linear foi de $THD_{prático} = 3.6\%$, enquanto para a simulação, conforme Figura 19, foi de

$THD_{Simulado} \cong 0.25\%$, considerando o método alternativo e com 100% de carga linear. Enquanto para a carga não linear, a THD da tensão de saída foi de $THD_{prático} = 12.6\%$, praticamente, igual ao valor simulado na Figura 26, ou seja, $THD_{Simulado} = 12.63\%$, considerando o método alternativo e a UPS com 100% de carga não linear. O Valor RMS da tensão de saída com 100% de carga linear foi de $V_{RMS} = 125.9V_{prático}$ (0.87%) enquanto o valor simulado foi de $V_{RMS} = 126.8V_{Simulado}$, ambos satisfazendo com relativa margem a norma IEEE 944. Por outro lado, o valor RMS da tensão de saída com 100% de carga não linear foi de $V_{RMS} = 126.2V_{prático}$, enquanto o valor simulado foi de $V_{RMS} = 128.1V_{Simulado}$ (0.8%), ambos satisfazendo a norma IEEE 944.

Assim, a THD e valor RMS da tensão de saída da UPS para carga linear e não linear para as simulações e os valores experimentais apresentaram concordância, exceto para a THD da carga linear experimental que apresentou $THD_{prático} = 3.6\%$, bem acima do valor simulado que foi de $THD_{Simulado} \cong 0.25\%$. A THD da tensão da carga não linear simulado e prático, $THD_{Simulado} = 12.63\%$ e $THD_{prático} = 12.6\%$, respectivamente, foram acima das normas IEC 62040-3 e IEEE 944, porém de acordo com o esperado na teoria.

Por fim, para trabalhos futuros seria interessante adicionar os modos ressonantes de 3ª a 5ª harmônicos e discutir o THD, valor RMS e transitório de tensão de saída da UPS para carga linear e não linear, para cada modo adicionado. Na ocasião deste trabalho não foi possível a aplicação prática (A simulação foi realizada no Apêndice A) da adição desses modos em decorrência da limitação do hardware disponível no LASCAR. Também seria oportuno averiguar a amplitude do sinal de controle para diferentes UPS, além da UPS de 10kVA aqui discutido. Finalmente, seria interessante utilizar o controlador ressonante em paralelo com a estratégia do controlador repetitivo, utilizando o método alternativo desenvolvido na subseção (4.4), ou seja, determinando um P_d e P_c .

8 Referências

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 62040-3: Uninterruptible power systems (UPS) - Part 3: Method of specifying the performance and test requirements. Switzerland, 2004.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE - AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. IEEE Std 944-1986: IEEE recommended practice for the application and testing of uninterruptible power supplies for power generating stations. New York, 1986.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. IEEE Std 519-1992: IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems. New York, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15014: Conversor a semicondutor - Sistema de alimentação de potência ininterrupta, com saída em corrente alternada (nobreak) - Terminologia. Rio de Janeiro, 2003.

CARVALHO, F. M. Método alternativo para sintonia de múltiplos controladores ressonantes aplicados em sistemas ininterruptos de energia (Nobreak). 116 f. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande Do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2013.

MANO, O. Projeto de controladores ressonantes para sistemas ininterruptos de energia para seguimento assintótico de sinais de referência senoidais e rejeição de harmônicos. 95 f. Porto Alegre: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Faculdade de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2010.

BONAN, G.; MANO, O.; PEREIRA, L. F. A.; COUTINHO, D. F. Robust control design of multiple resonant controllers for sinusoidal tracking and harmonic rejection in uninterruptible power supplies. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS (ISIE), 2010., 2010, Bari. Anais..., New York: IEEE, 2010. p. 303 –308.

SHRIKANTM, P.; SEN, I. Robust Pole Placement Stabilizer Design Using Linear Matrix Inequalities. IEEE Transactions on Power Systems, Brookline, v.15, n.1, p.313–319, Feb. 2000.

POWERSIM. Tutorial on How to Use the SimCoupler Module. Disponível em: <http://www.powersimtech.com/manual/Tutorial - Simcoupler Module.pdf>.

ASTRON, K.; HAGGLUND, T. "PID Control: theory, design and tuning". 2.ed. Research Triangle Park: Instrument Society of America, 1995.

THE MATH WORKS: LMI CONTROL TOOLBOX, 2001.
http://www.mathworks.com/.../toolbox/lmi/lmi_product_page.html

S. FUKUDA AND R. IMAMURA, "Application of a Sinusoidal Internal Model to Current Control of Three-Phase Utility-Interface Converters," IEEE Trans. Industrial Electron., vol. 52, n. 2, pp. 420-426, 2005.

UNINTERRUPTIBLE POWER SYSTEMS (UPS) – PART 3: "Method of Specifying the Performance and Test Requirements," CEI/IEC 62040-3, 2004.

D.F. COUTINHO, K.A. BARBOSA E A. TROFINO, "Sistemas Multivariáveis: Uma Abordagem Via LMIs". Notas de aula da disciplina de Controle Robusto – DAS – UFSC, 2002.

V. J. S. LEITE, V. F. MONTAGNER, P. J. DE OLIVEIRA, R. C. L. F. OLIVEIRA, D. C. W. RAMOS, and P. L. D. PERES, "Estabilidade robusta de sistemas lineares através de desigualdades matriciais lineares," Revista Controle e Automação, vol.15, n. 1, pp. 24-40, 2004.

V. LEITE AND P. PERES. "An improved LMI condition for robust D-stability of uncertain polytopic systems," IEEE Trans. Automation. Contr., vol. 48, n. 3, pp. 500–504, 2003.

OGATA, KATSUHIKO, "Engenharia de Controle Moderno," 5. ed., São Paulo, 2011.

L. EL GHAOUI AND S.-I. NICULESCU (Ed.), "Advances in Linear Matrix Inequality Methods in Control", SIAM, Philadelphia, 2000.

F. ZHANG, "The Schur Complement and its Applications", Series: Numerical Methods and Algorithms, Springer, Vol. 4, 1995.

A. FIGUEIRA, "Sistemas No-Breaks Estáticos". Rio de Janeiro, BR: Antenna Edições Técnicas, Ltda., 2005.

M. Chilali, P. Gahinet, and P. Apkarian, "Robust Pole Placement in LMI Regions," IEEE Trans. Automatic Contr., vol. 44, n. 12, pp. 2257-2270, 1999.

KHALIL, H. Nonlinear Systems. 2.ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1996.

FRANCIS, B. A.; WONHAM, W. M. The internal model principle in control theory. Automatica, v. 12, n. 5, p. 457–465, Sept. 1976.

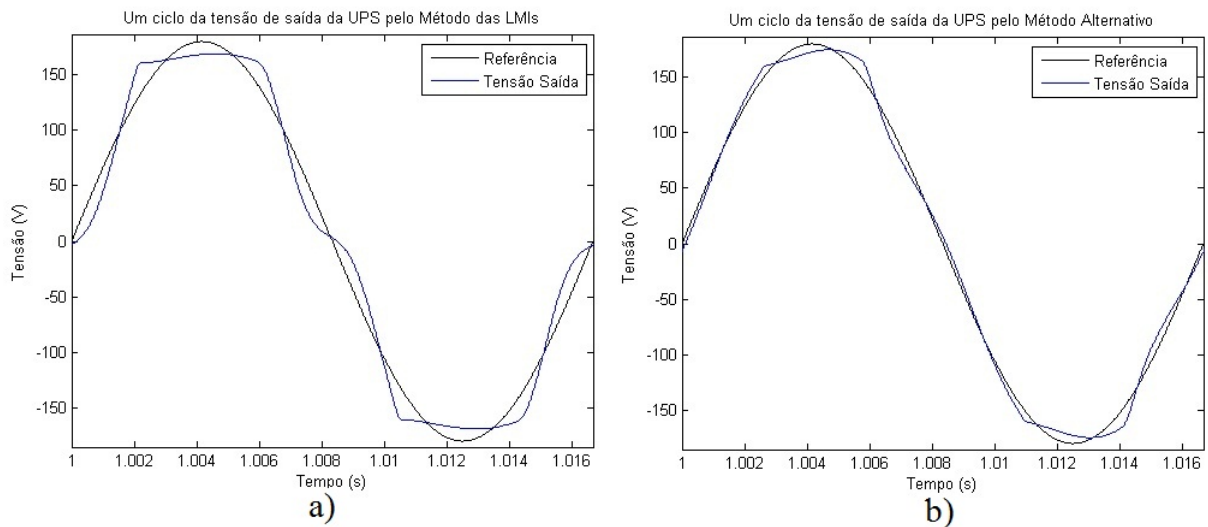
9 Apêndice A - Simulação para 2, 3, 4 e 5 Modos Ressonantes

A simulação para 2, 3, 4 e 5 modos ressonantes desta seção foi realizado no PSIM e MATLAB (Através do programa SimCoupler) conforme circuitos das Figuras 14 e 16, ou seja, carga não linear, e código desenvolvido do Anexo A. Nesta seção será comparado o desempenho do valor RMS da tensão de saída, da THD da tensão de saída e do perfil 1 da norma IEC 62040-3 (Transitório da tensão de saída da UPS do degrau aditivo e subtrativo de carga não linear). As Figuras a) representam a simulação para o método das LMIs, enquanto as Figuras b) representam a simulação para o método alternativo.

Os limites percentuais de valor RMS admissíveis pelas normas IEC e IEEE são, respectivamente, $\pm 9\%$ e $\pm 2\%$ do valor nominal da tensão de trabalho, ou seja, $127V_{RMS}$. E, os limites percentuais de THD admissíveis pelas normas IEC e IEEE são, respectivamente, 8% e 5% .

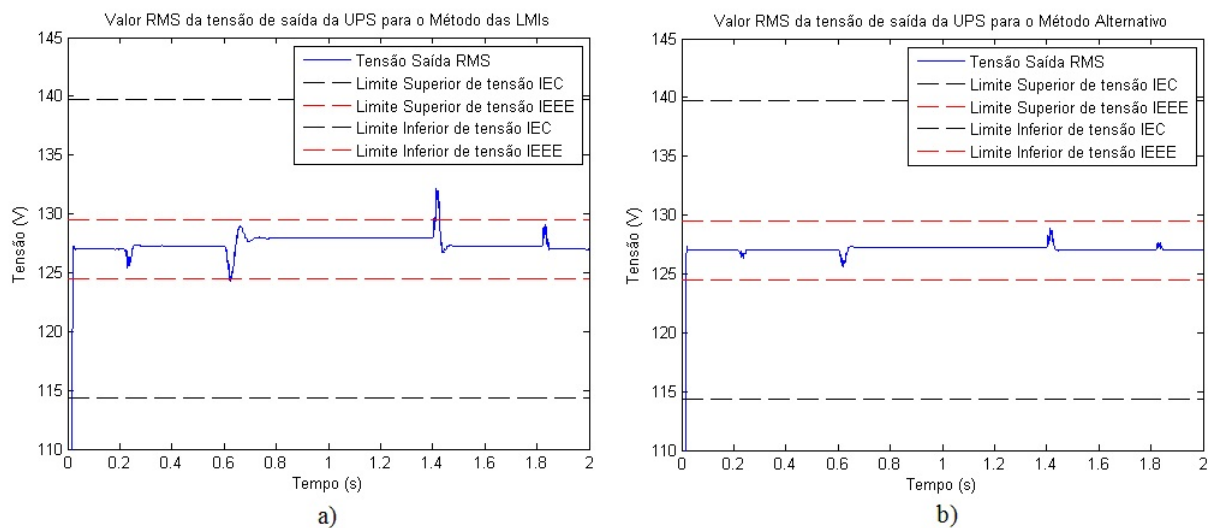
9.1 Simulação para 2 Modos Ressonantes

Figura 43: Curva tensão de saída da UPS com 100% de carga não linear.



FONTE: Imagem retirada do MATLAB pelo autor

Figura 44: Valor RMS da tensão de saída da UPS.



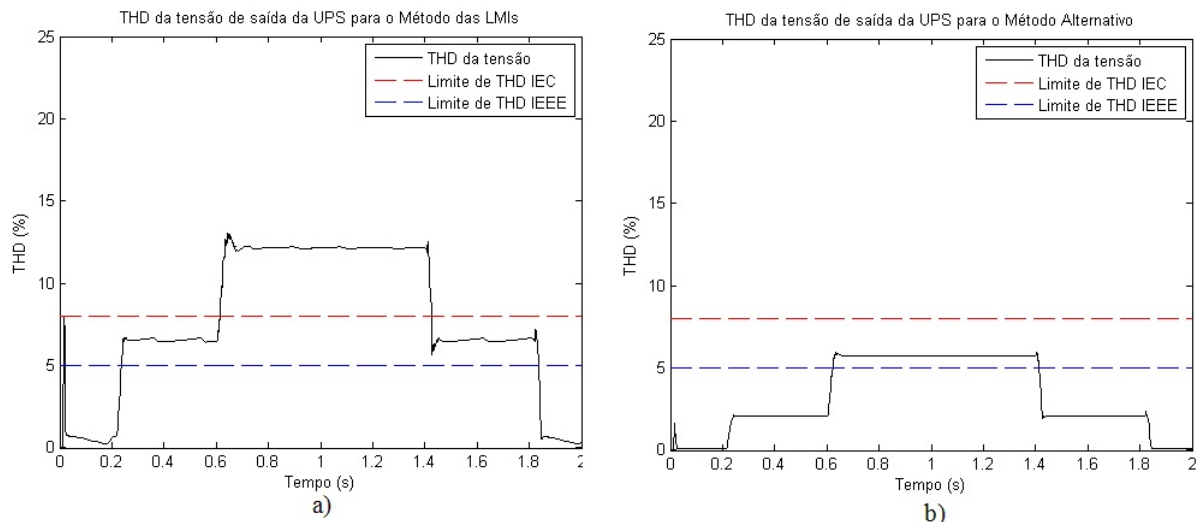
FONTE: Imagem retirada do MATLAB pelo autor

Tabela 16: Percentuais da tensão RMS em diferentes modos de operação

Modo de Operação	Vazio	20% de Carga	100% de Carga
% Tensão RMS (LMI)	0	0.23	0.71
% Tensão RMS (Alternativo)	0	0	0.16

FONTE: Dados obtidos da Figura 44

Figura 45: THD da tensão de saída da UPS.



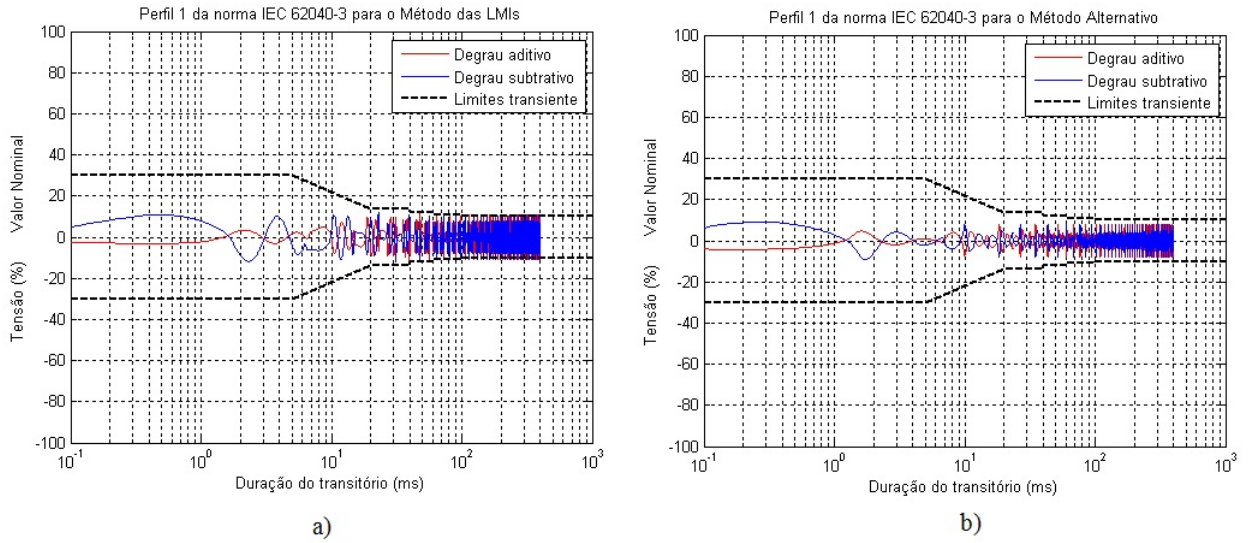
FONTE: Imagem retirada do MATLAB pelo autor

Tabela 17: THD da tensão em diferentes modos de operação

Modo de Operação	Vazio	20% de Carga	100% de Carga
% THD da tensão (LMI)	0.48	6.45	12.18
% THD da tensão (Alternativo)	0.1	2.1	5.72

FONTE: Dados obtidos da Figura 45

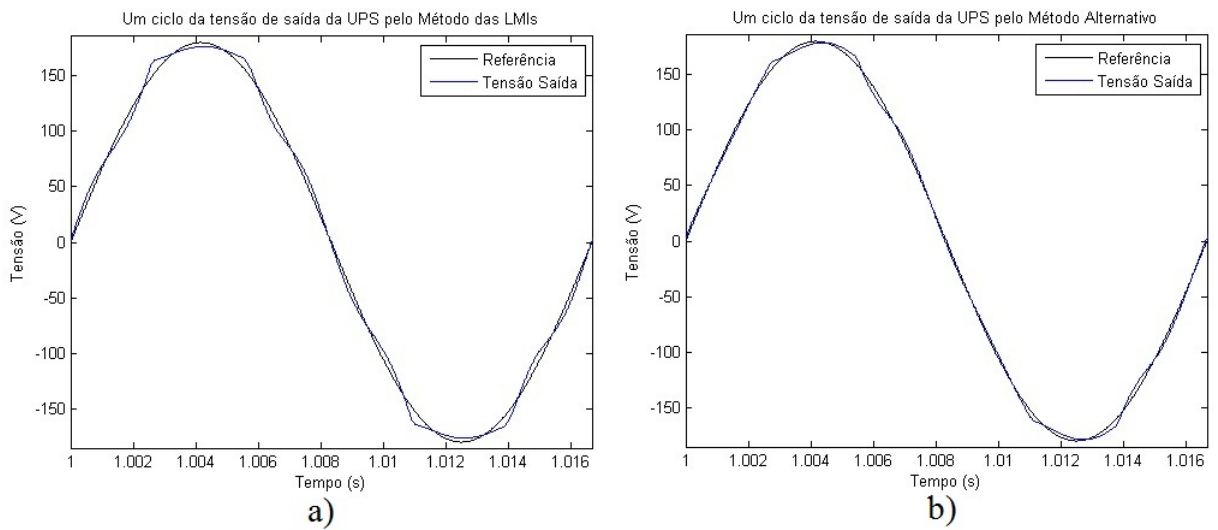
Figura 46: Perfil 1 da norma IEC para tensão de saída da UPS.



FONTE: Imagem retirada do MATLAB pelo autor

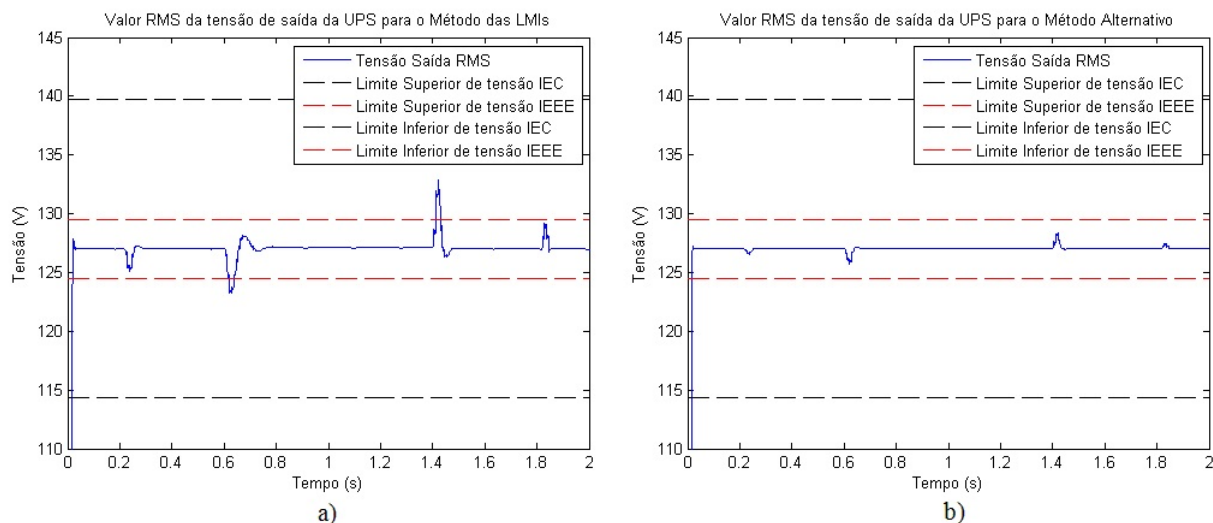
9.2 Simulação para 3 Modos Ressonantes

Figura 47: Curva tensão de saída da UPS com 100% de carga não linear.



FONTE: Imagem retirada do MATLAB pelo autor

Figura 48: Valor RMS da tensão de saída da UPS.



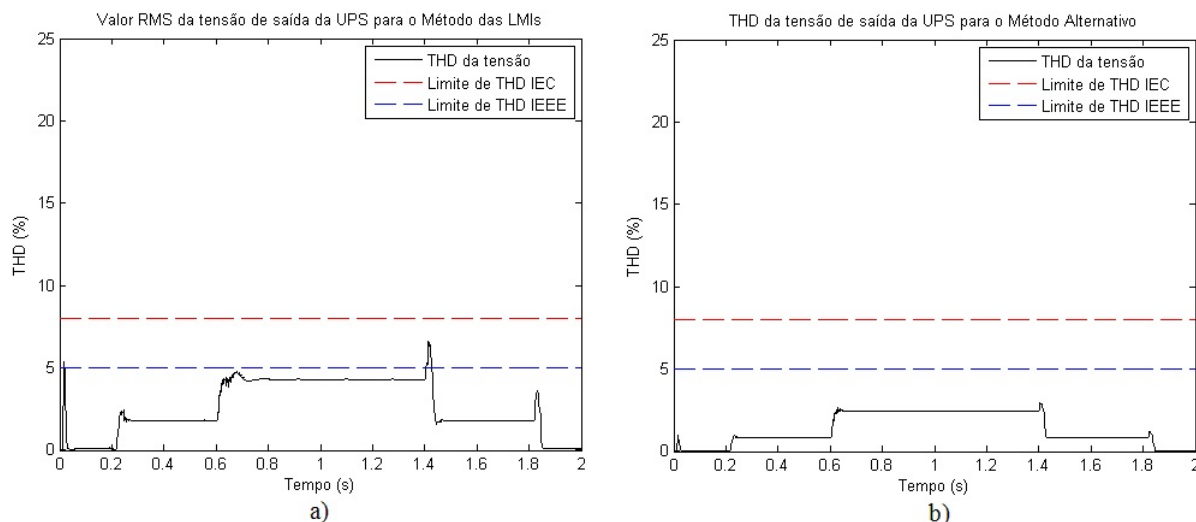
FONTE: Imagem retirada do MATLAB pelo autor

Tabela 18: Percentuais da tensão RMS em diferentes modos de operação

Modo de Operação	Vazio	20% de Carga	100% de Carga
% Tensão RMS (LMI)	0	0	0.1
% Tensão RMS (Alternativo)	0	0	0

FONTE: Dados obtidos da Figura 48

Figura 49: THD da tensão de saída da UPS.



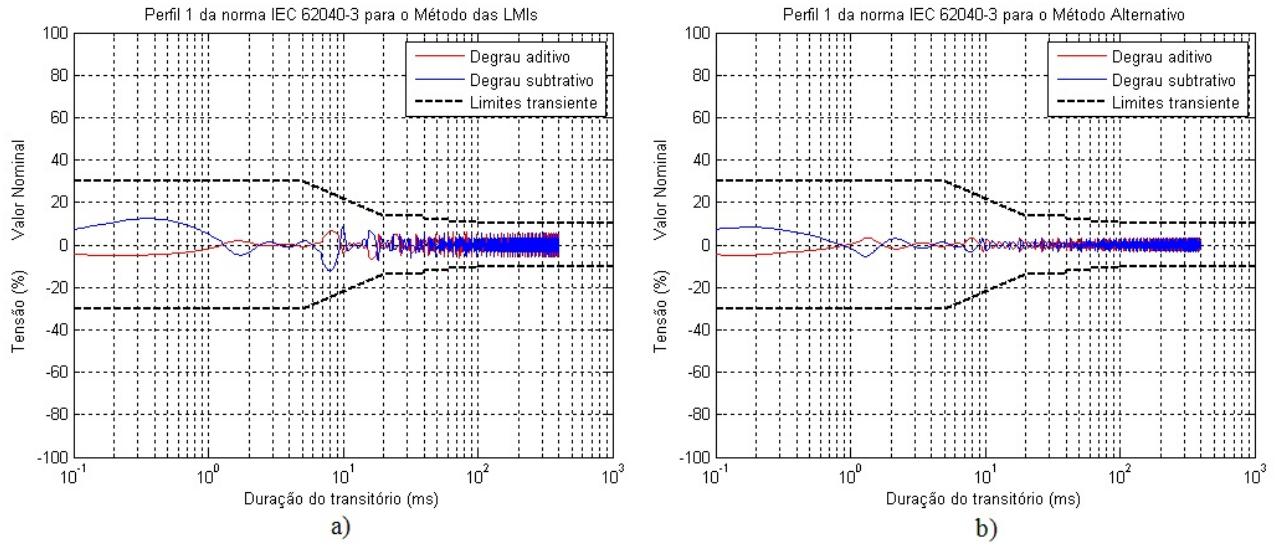
FONTE: Imagem retirada do MATLAB pelo autor

Tabela 19: THD da tensão em diferentes modos de operação

Modo de Operação	Vazio	20% de Carga	100% de Carga
% THD da tensão (LMI)	0.1	1.8	4.29
% THD da tensão (Alternativo)	0.04	0.82	2.45

FONTE: Dados obtidos da Figura 49

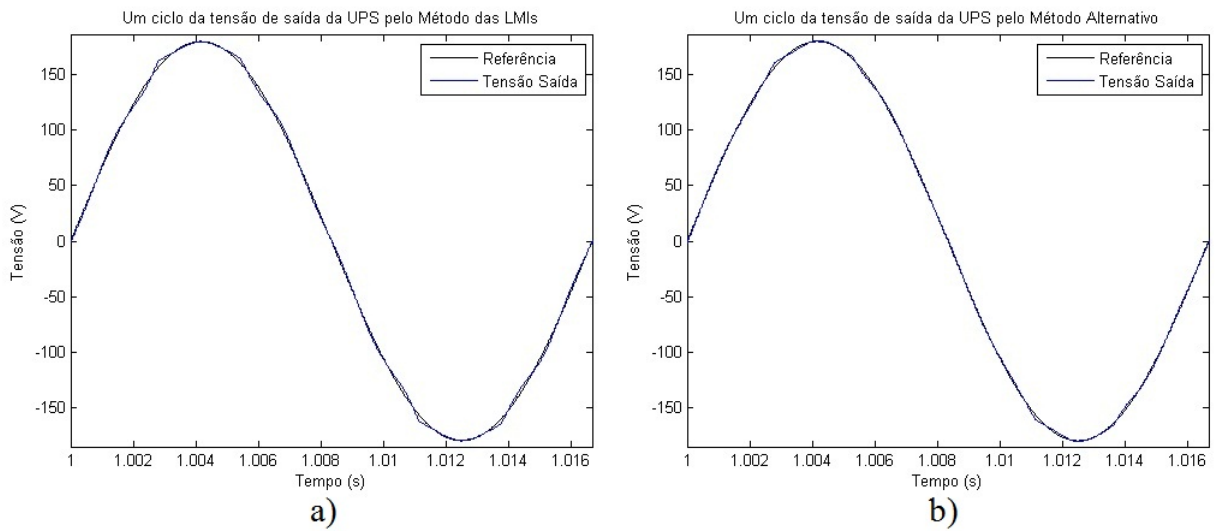
Figura 50: Perfil 1 da norma IEC para tensão de saída da UPS.



FONTA: Imagem retirada do MATLAB pelo autor

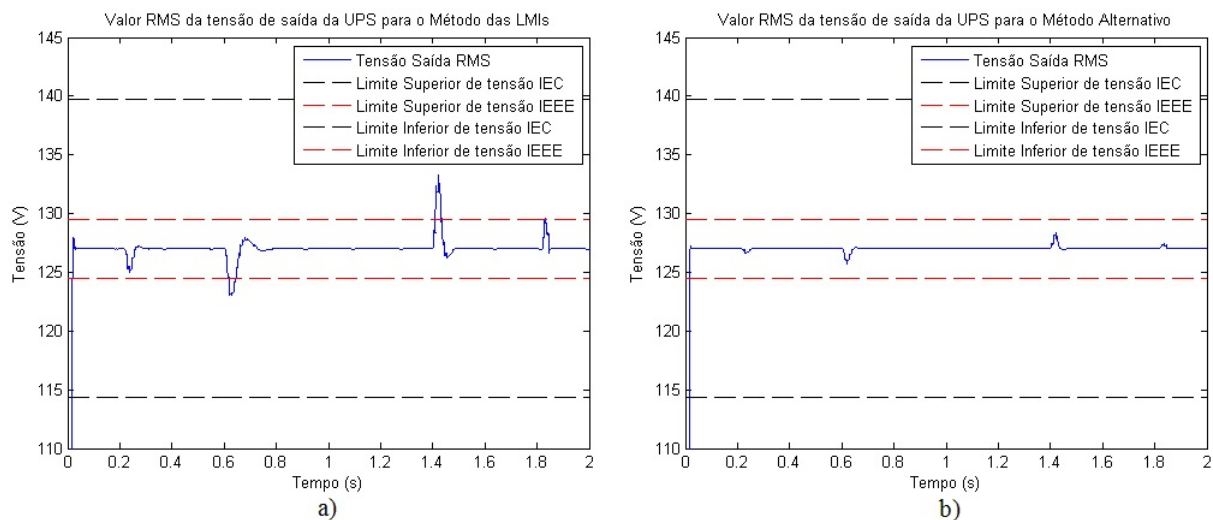
9.3 Simulação para 4 Modos Ressonantes

Figura 51: Curva tensão de saída da UPS com 100% de carga não linear.



FONTA: Imagem retirada do MATLAB pelo autor

Figura 52: Valor RMS da tensão de saída da UPS.



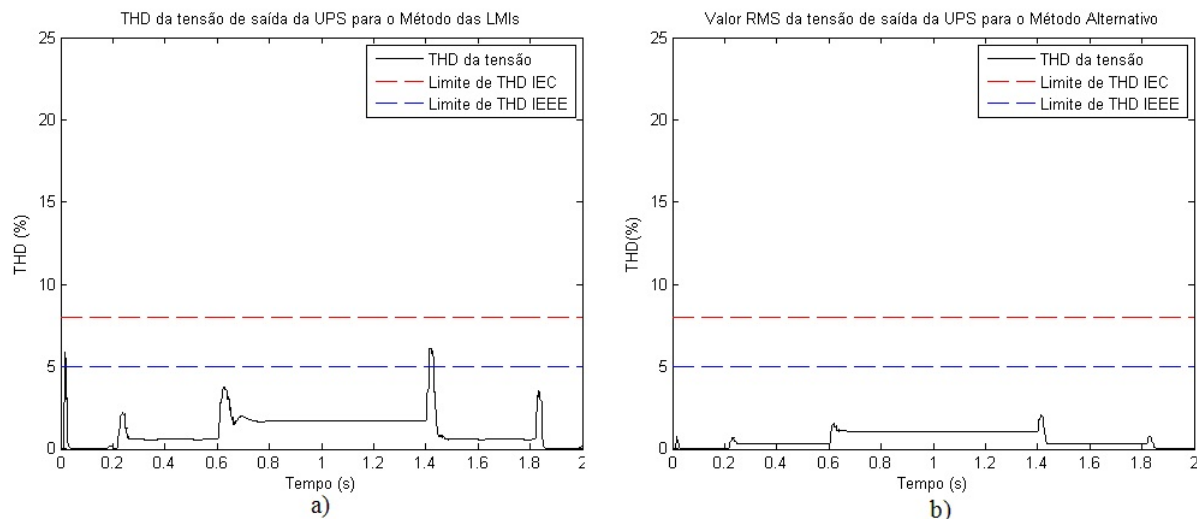
FONTE: Imagem retirada do MATLAB pelo autor

Tabela 20: Percentuais da tensão RMS em diferentes modos de operação

Modo de Operação	Vazio	20% de Carga	100% de Carga
% Tensão RMS (LMI)	0	0	0
% Tensão RMS (Alternativo)	0	0	0

FONTE: Dados obtidos da Figura 52

Figura 53: THD da tensão de saída da UPS.



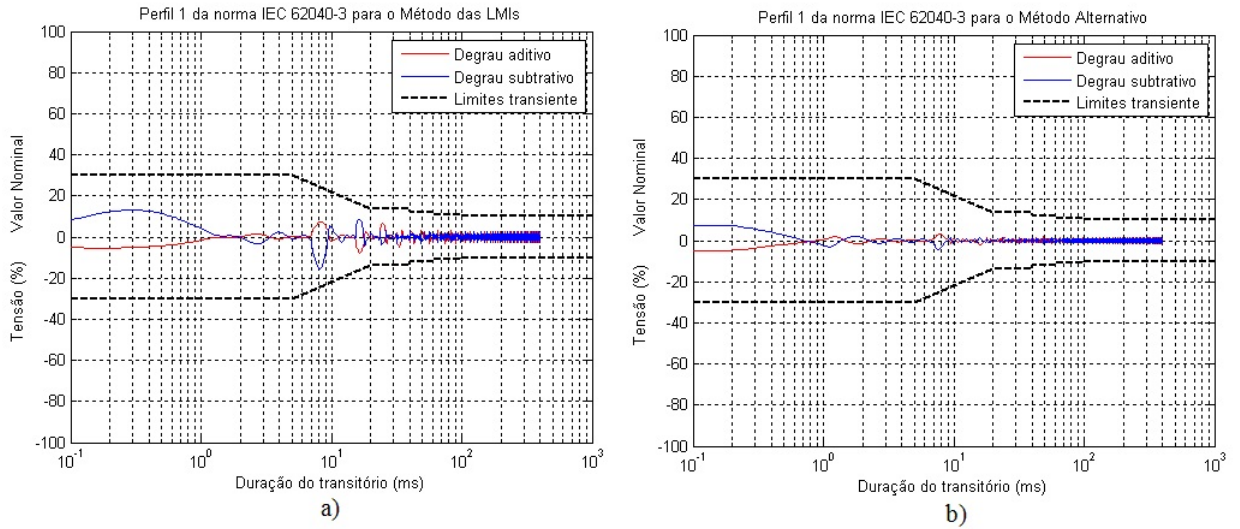
FONTE: Imagem retirada do MATLAB pelo autor

Tabela 21: THD da tensão em diferentes modos de operação

Modo de Operação	Vazio	20% de Carga	100% de Carga
% THD da tensão (LMI)	0.06	0.58	1.7
% THD da tensão (Alternativo)	0.04	0.31	1.1

FONTE: Dados obtidos da Figura 53

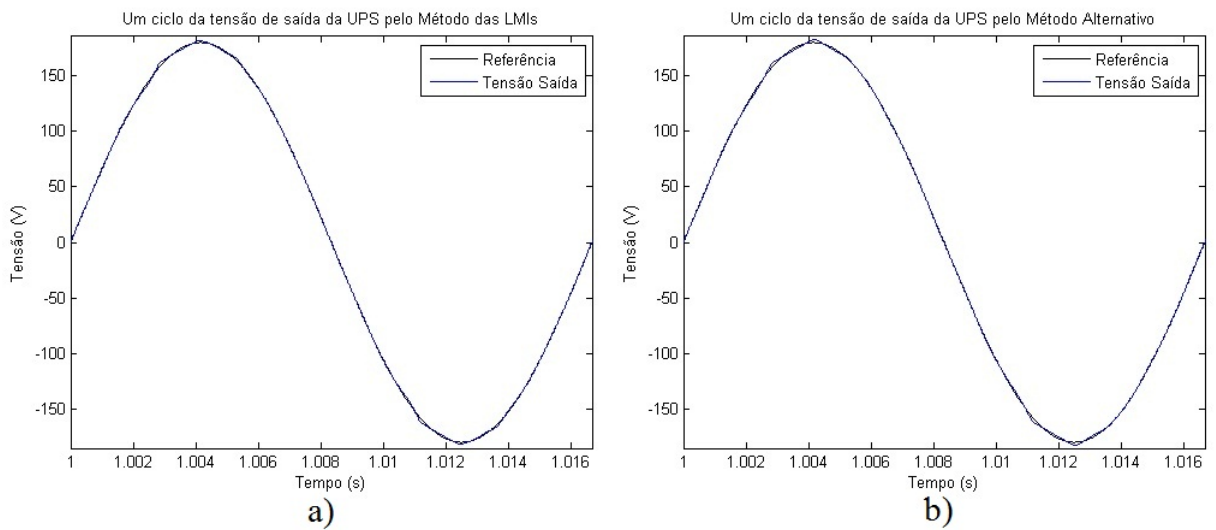
Figura 54: Perfil 1 da norma IEC para tensão de saída da UPS.



FONTE: Imagem retirada do MATLAB pelo autor

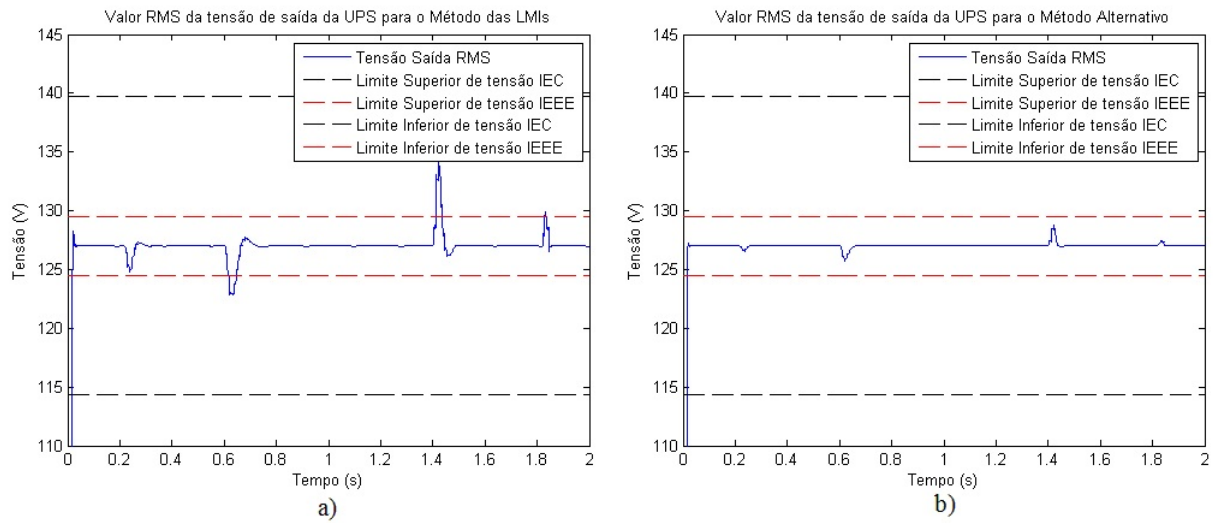
9.4 Simulação para 5 Modos Ressonantes

Figura 55: Curva tensão de saída da UPS com 100% de carga não linear.



FONTE: Imagem retirada do MATLAB pelo autor

Figura 56: Valor RMS da tensão de saída da UPS.



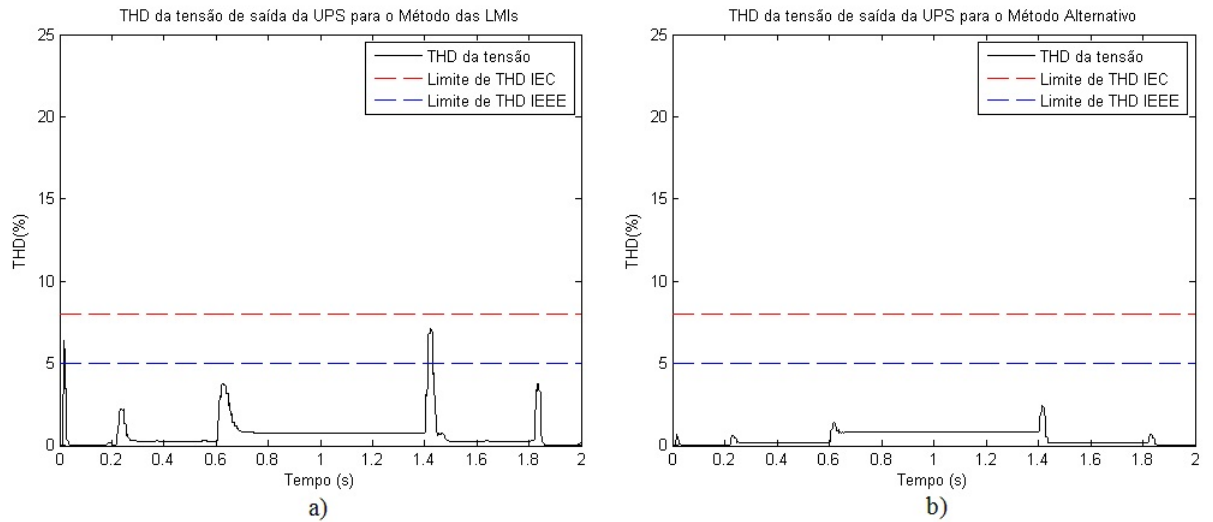
FORNTE: Imagem retirada do MATLAB pelo autor

Tabela 22: Percentuais da tensão RMS em diferentes modos de operação

Modo de Operação	Vazio	20% de Carga	100% de Carga
% Tensão RMS (LMI)	0	0	0
% Tensão RMS (Alternativo)	0	0	0

FORNTE: Dados obtidos da Figura 56

Figura 57: THD da tensão de saída da UPS.



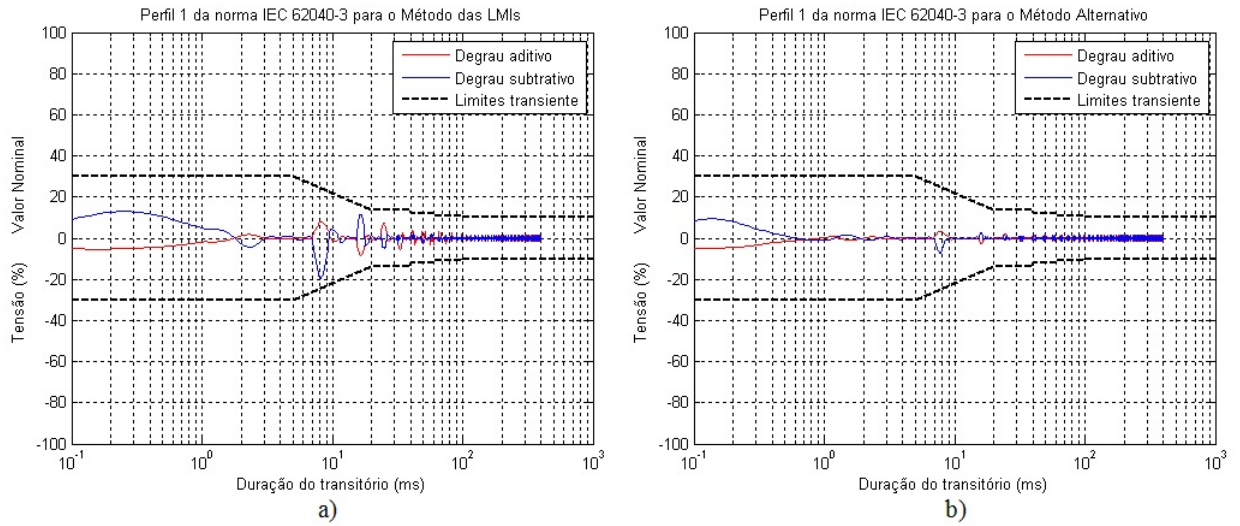
FORNTE: Imagem retirada do MATLAB pelo autor

Tabela 23: THD da tensão em diferentes modos de operação

Modo de Operação	Vazio	20% de Carga	100% de Carga
% THD da tensão (LMI)	0.05	0.27	0.78
% THD da tensão (Alternativo)	0.03	0.17	0.81

FONTE: Dados obtidos da Figura 57

Figura 58: Perfil 1 da norma IEC para tensão de saída da UPS.



FONTE: Imagem retirada do MATLAB pelo autor

10 Anexo A - Código Desenvolvido para o Método Alternativo

Arquivo TOP para simulação e implementação dos controladores

Última alteração: 05/06/2015

% Walter Diniz

% MATLAB Math Works

clc

clear all

close all

% Parâmetros gerais

tstart = tic;

PSIM = 1; % Atualizar dados do PSIM (0->Nao / 1->Sim)

CtrMalha = 1; % 0 Malha Fechada 1 Malha Aberta

tempo = 1; % 1 - Contínuo

% 2 - Discreto

ctrlr = 2; % 1 - Ressonante - LMI (Só versão de tempo contínuo)

% 2 - Ressonante - Proposto (Pd e Pc)(Versão de tempo Contínua e Discreta)

CLinear = 0; % 0 - Carga linear desligada

% 1 - Carga linear ligada

CNLinear = 1; % 0 - Carga não linear desligada

% 1 - Carga não linear ligada

Simulacao = 0; % 0 - Não realiza simulação

% 1 - Realiza simulação

Plotar = 0; % 0 - Não gera gráficos

% 1 - Gera gráficos

NHarmonica = 17; % Número de harmonicas no plot | Máx=30

%% Parâmetros para o controlador Ressonante Alternativo

NumHarmonica=1; % 1 - Ressonante Fundamental

% 2 - Fundamental + 3 harmonica

% 3 - Fundamental + 3 e 5 harmonicas

% 4 - Fundamental + 3, 5 e 7 harmonicas

% 5 - Fundamental + 3, 5, 7 e 9 harmonicas

Autovalores_ UPS=10000; % Seleciona Os autovalores da UPS desejada

```

para determinar o Polinomio Desejado (Pd)
%Parâmetro da posição da reta vertical no semiplano esquerdo

Alfa1=150;
%
%PARAMETRO: D-Estabilidade Cone
%
Psi=90; % Ângulo da geratriz do cone em relação a abscissa, vértice na
origem.
%
%PARAMETRO: D-Estabilidade Circunferencia
HabCirc=1; %Se HabCirc=1 nabilita circunferência do semiplano esquerdo e,
em caso contrário(ZERO) desabilita
r1=100000; %r-> raio da circunferencia
c=0; % c-> centro da circunferencia

%% Parâmetros UPS

Vout_rms = 127; % Tenão RMS de saída da UPS [V]
Vout_pk = Vout_rms * sqrt(2); % Tenão RMS de saída da UPS [V]
refer = Vout_pk;
f = 60; % Frequência da senoide [Hz]
wr = 2 * pi * f; % Frequencia da rede eletrica [rad/s]

V_rede_pk = Vout_pk;
f_rede = f;
teta_rede = 0;

Pout_nom_va = 3500; % Potência nominal da UPS [VA]
Pout_nom_w = Pout_nom_va * 0.7; % Potência nominal ativa da UPS [W]
fs = 21600; % Frequencia de Chaveamento

Ts = 1/(fs * 2); % Periodo de amostragem
Tsim = Ts/10; % Passo da simulacao
t_end = 2; % Tempo da simulacao
%%Parmetrosfiltrosada

P1 = Pout_nom_va;
Potencia_UPS
Rcf = 0; % Resistencia interna do Capacitor

%% Carga Linear

```


$R_{lin1} = V_{out_rms}^2 / (P_{out_nom_w} * 0.2)$; % Resist. 1ro degrau
 carga linear $R_{lin2} = V_{out_rms}^2 / (P_{out_nom_w} * 0.8)$; % Resist. 2do degrau
 carga linear

$YY0 = 1 / ((R_{lin1} * R_{lin2} / (R_{lin1} + R_{lin2})))$; % Admitancia da carga

$Yd = YY0 / 2$; % Admitância média /
 vértice %% Carga não linear

$R_{snonlin1} = 0.04 * (V_{out_rms})^2 / (P_{out_nom_va} * 1/4)$;

$R_{snonlin2} = 0.04 * (V_{out_rms})^2 / (P_{out_nom_va} * 3/4)$;

$R_{nlin1} = (1.22 * V_{out_rms})^2 / (0.66 * 1/4 * P_{out_nom_va})$;

$R_{nlin2} = (1.22 * V_{out_rms})^2 / (0.66 * 3/4 * P_{out_nom_va})$;

$C_{nlin1} = 7.5 / (f * R_{nlin1})$;

$C_{nlin2} = 7.5 / (f * R_{nlin2})$;

$V_{Cap} = 150$; % Tensão inicial dos capacitores

%% Parametros do Hardware - Utilizados pelo PSIM e SIMULINK

$V_{in} = 320$; % Tensao da Fonte de Entrada Trifasica;

$C_{cc} = 6600e-6$; % Capacitancia do Barramento CC

$V_{cc} = 520$;

$V_{tri} = 0.5$; % Tensão de pico da triang. PWM

$K_{pwm} = V_{cc} / V_{tri}$;

$u_0 = V_{cc} / 2$; % Limite para saturação do sinal de controle

$SAT_u = 500000$; % Limite superior do saturador para os compensadores de

3°, 5°, 7° e 9° $SAT_u1 = SAT_u$; % Limite inferior do saturador para os compensadores de
 3°, 5°, 7° e 9°

$V_{ma} = V_{out_rms} * 1.1$; % Limite de regulacao estatica

$V_{mi} = V_{out_rms} * 0.9$; % Limite de regulacao estatica

%% Transfere dados para o PSIM

dados_psim % Arquivo .m para para transferir dados para o PSIM

%% Multimodo Ressonante

if(ctrle==1)

Liga_LMI=1; % Se Liga_LMI=1 habilita abordagem LMI e se Liga_LMI=0
 habilita método proposto

Liga_Contínuo=1; % Se Liga_Contínuo=1 habilita controlador contínuo e
 se Liga_Contínuo=0 habilita controlador discreto

Ressonante_Alternativo % Arquivo .m para cálculo do P_d e P_c

elseif(ctrle==2)

if(tempo==1)

```

Liga_LMI=0;
Liga_Contínuo=1;% Se Liga_Contínuo=1 habilita controlador contínuo
e se Liga_Contínuo=0 habilita controlador discreto
Ressonante_Alternativo
elseif(tempo==2)
Liga_Contínuo=0;
Liga_LMI=0;
Ressonante_Alternativo
MODOS_Discretizados % Arquivo .m para discretizar o controlado ressonante
end
end
%% Simulação do Simulink
if (Simulacao==1)
sim ups_cont_res % Simulink do controlador ressonante contínuo e discretizado
end

if (Plotar==1)
gera_grafico % Arquivo .m para gerar os graficos das Figuras deste trabalho
end

```

"Ressonante_Alternativo": Arquivo .m para calculo de P_c , P_d

```

%Localização da planta conforme valor de S
Potencia_UPS
Ws=377;
V_DC=Vcc;
 $Y0max = P1/(Vout\_rms^2)$ ;
 $Y0min = 5/(Vout\_rms^2)$ ;

%-----
%-----

 $Au11 = [-Rlf/Lf - 1/Lf00; 1/Cf - Y0max/Cf00; 0001; 0 - 1 - ((Ws)^2)0]$ ;
 $Bu1 = [1/Lf; 0; 0; 0]$ ;
 $Eu1 = [0; -1/Cf; 0; 0]$ ;
 $Cu1 = [0100]$ ;

for  $IdNum = 2 : 1 : NumHarmonica$ 
 $Au11 = [Au11zeros(2 + 2 * (IdNum - 1), 2); zeros(1, 2 * (IdNum - 1))0001; 0 - 1$ 
 $zeros(1, 2 * (IdNum - 1)) - (((2 * IdNum - 1) * Ws)^2)0]$ ;
 $Bu1 = [Bu1; zeros(2, 1)]$ ;
 $Eu1 = [Eu1; zeros(2, 1)]$ ;
 $Cu1 = [Cu1zeros(1, 2)]$ ;
end

if( $NumHarmonica == 1$ )

```

```

syms lambda1
syms K1 K2 K3 K4
T = [K1 K2 K3 K4];
B1 = lambda1 * eye(2 + 2 * NumHarmonica) - Au11 - Bu1 * T;
Pc = det(B1);
alph = coeffs(Pc, lambda1);
a = 5;

```

```

Liga_mod03=0;
Liga_mod05=0;
Liga_mod07=0;
Liga_mod09=0;

```

```

elseif (NumHarmonica==2)
syms lambda1
syms K1 K2 K3 K4 K5 K6
T=[K1 K2 K3 K4 K5 K6];
B1=lambda1*eye(2+2*NumHarmonica)-Au11-Bu1*T;
Pc=det(B1);
alph=coeffs(Pc,lambda1);
a=7;

```

```

Liga_mod03=1;
Liga_mod05=0;
Liga_mod07=0;
Liga_mod09=0;

```

```

elseif (NumHarmonica==3)
syms lambda1
syms K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8
T=[K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8];
B1=lambda1*eye(2+2*NumHarmonica)-Au11-Bu1*T;
Pc=det(B1);
alph=coeffs(Pc,lambda1);
a=9;

```

```

Liga_mod03=1;
Liga_mod05=1;
Liga_mod07=0;
Liga_mod09=0;

```

```

for f_1=9:12
Kp(1,f_1)=0;
end

```

```

elseif (NumHarmonica==4)
syms lambda1
syms K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8 K9 K10
T=[K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8 K9 K10];

```

```

B1=lambda1*eye(2+2*NumHarmonica)-Au11-Bu1*T;
Pc=det(B1);
alph=coeffs(Pc,lambda1);
a=11;
Liga_mod03=1;
Liga_mod05=1;
Liga_mod07=1;
Liga_mod09=0;

elseif (NumHarmonica==5)
syms lambda1
syms K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8 K9 K10 K11 K12
T=[K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8 K9 K10 K11 K12];
B1=lambda1*eye(2+2*NumHarmonica)-Au11-Bu1*T;
Pc=det(B1);
alph=coeffs(Pc,lambda1);
a=13;
Liga_mod03=1;
Liga_mod05=1;
Liga_mod07=1;
Liga_mod09=1;
else
('Erro, NumHarmonica=5 ou NumHarmonica<5 ')
break
end

for i=1:a
alpha_Pc(1,(a+1)-i)=alph(1,i);
end

alpha_Pc(:,1)=[];

%-----
%-----

for i=1:12

Kproposto(1,i)=0;

end
%-----
%-----

Au1 = [-Rlf/Lf - 1/Lf00; 1/Cf - Y0max/Cf00; 0001; 0 - 1 - ((Ws)^2)0];
Au2 = [-Rlf/Lf - 1/Lf00; 1/Cf - Y0min/Cf00; 0001; 0 - 1 - ((Ws)^2)0];
Bu = [1/Lf; 0; 0; 0];
Eu = [0; -1/Cf; 0; 0];
Cu = [0100];

```

$Du = Uc;$

for IdNum=2:1:NumHarmonica

$Au1 = [Au1zeros(2 + 2 * (IdNum - 1), 2); zeros(1, 2 * (IdNum - 1))0001; 0 - 1$
 $zeros(1, 2 * (IdNum - 1)) - (((2 * IdNum - 1) * Ws)^2)0];$

$Au2 = [Au2zeros(2 + 2 * (IdNum - 1), 2); zeros(1, 2 * (IdNum - 1))0001; 0 - 1$
 $zeros(1, 2 * (IdNum - 1)) - (((2 * IdNum - 1) * Ws)^2)0];$

$Bu = [Bu; zeros(2, 1)];$

$Eu = [Eu; zeros(2, 1)];$

$Cu = [Cuzeros(1, 2)];$

end

%_____

%_____

Calcula_K_LMI

%Calcula a matriz de ganhos K

$Kp = Wf * inv(Qf);$

%_____

%_____

%Ptência da planta UPS

$P1 = \text{Autovalores_UPS};$ %Localização da planta conforme valor de S

Potencia_UPS

%Parâmetros que serão exportados para o PSIM

$Y0max = P1 / (Vout_rms^2);$

$Y0min = 5 / (Vout_rms^2);$

%_____

%_____

$Au1 = [-Rlf/Lf - 1/Lf00; 1/Cf - Y0max/Cf00; 0001; 0 - 1 - ((Ws)^2)0];$

$Au2 = [-Rlf/Lf - 1/Lf00; 1/Cf - Y0min/Cf00; 0001; 0 - 1 - ((Ws)^2)0];$

$Bu = [1/Lf; 0; 0; 0];$

$Eu = [0; -1/Cf; 0; 0];$

$Cu = [0100];$

$Du = Uc;$

for IdNum=2:1:NumHarmonica

$Au1 = [Au1zeros(2 + 2 * (IdNum - 1), 2); zeros(1, 2 * (IdNum - 1))0001; 0 - 1$
 $zeros(1, 2 * (IdNum - 1)) - (((2 * IdNum - 1) * Ws)^2)0];$

$Au2 = [Au2zeros(2 + 2 * (IdNum - 1), 2); zeros(1, 2 * (IdNum - 1))0001; 0 - 1$
 $zeros(1, 2 * (IdNum - 1)) - (((2 * IdNum - 1) * Ws)^2)0];$

$Bu = [Bu; zeros(2, 1)];$

```

Eu = [Eu; zeros(2,1)];
Cu = [Cuzeros(1,2)];
end

```

```

%_____
%_____
Calcula_K_LMI

```

```

%Calcula a matriz de ganhos K
K=Wf*inv(Qf);

```

```

%_____
%_____

```

```

syms lambda5;
B=lambda5*eye(2+2*NumHarmonica)-Au1-Bu*K;
Pd=det(B);

```

```

alpha_Pd=sym2poly(Pd);
alpha_Pd(:,1)=[];

```

```

%_____
%_____

```

```

if (NumHarmonica==1)
syms K1 K2 K3 K4
H=alpha_Pc-alpha_Pd;
S=solve(H, K1, K2, K3, K4);
Kproposto(1,1)=S.K1;
Kproposto(1,2)=S.K2;
Kproposto(1,3)=S.K3;
Kproposto(1,4)=S.K4;
for i=5:12

```

```

Kp(1,i)=0;

```

```

end
elseif (NumHarmonica==2)
syms K1 K2 K3 K4 K5 K6
H=alpha_Pc-alpha_Pd;
S=solve(H, K1, K2, K3, K4, K5, K6);
Kproposto(1,1)=S.K1;
Kproposto(1,2)=S.K2;
Kproposto(1,3)=S.K3;
Kproposto(1,4)=S.K4;

```

```

Kproposto(1,5)=S.K5;
Kproposto(1,6)=S.K6;
for i=7:12

Kp(1,i)=0;

end
elseif (NumHarmonica==3)
syms K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8
H=alpha_Pc-alpha_Pd;
S=solve(H, K1, K2, K3, K4, K5, K6, K7, K8);
Kproposto(1,1)=S.K1;
Kproposto(1,2)=S.K2;
Kproposto(1,3)=S.K3;
Kproposto(1,4)=S.K4;
Kproposto(1,5)=S.K5;
Kproposto(1,6)=S.K6;
Kproposto(1,7)=S.K7;
Kproposto(1,8)=S.K8;
for i=9:12

Kp(1,i)=0;

end

elseif (NumHarmonica==4)
syms K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8 K9 K10
H=alpha_Pc-alpha_Pd;
S=solve(H, K1, K2, K3, K4, K5, K6, K7, K8, K9, K10);
Kproposto(1,1)=S.K1;
Kproposto(1,2)=S.K2;
Kproposto(1,3)=S.K3;
Kproposto(1,4)=S.K4;
Kproposto(1,5)=S.K5;
Kproposto(1,6)=S.K6;
Kproposto(1,7)=S.K7;
Kproposto(1,8)=S.K8;
Kproposto(1,9)=S.K9;
Kproposto(1,10)=S.K10;
for i=11:12

Kp(1,i)=0;

end

elseif (NumHarmonica==5)
syms K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8 K9 K10 K11 K12
H=alpha_Pc-alpha_Pd;
S=solve(H, K1, K2, K3, K4, K5, K6, K7, K8, K9, K10, K11, K12);

```

```

Kproposto(1,1)=S.K1;
Kproposto(1,2)=S.K2;
Kproposto(1,3)=S.K3;
Kproposto(1,4)=S.K4;
Kproposto(1,5)=S.K5;
Kproposto(1,6)=S.K6;
Kproposto(1,7)=S.K7;
Kproposto(1,8)=S.K8;
Kproposto(1,9)=S.K9;
Kproposto(1,10)=S.K10;
Kproposto(1,11)=S.K11;
Kproposto(1,12)=S.K12;

```

```
end
```

"MODOS Discretizados": Arquivo .m para discretização do controlador da subseção (3.4)

```

    if (NumHarmonica==1)
FiltroRES1 = tf([Kproposto(1,4)Kproposto(1,3)], [10(2 * pi * 60)^2]);
%
Definição do filtro PB

FiltroRES_Disc1 = c2d(FiltroRES1, Ts, 'tustin'); % Discretização do filtro
PB

[b_res1, a_res1] = tfdata(FiltroRES_Disc1, 'v'); % Cria vetores dos
parâmetros do Filtro PB discretizado

elseif(NumHarmonica==2)
FiltroRES1 = tf([Kproposto(1,4)Kproposto(1,3)], [10(2 * pi * 60)^2]); %
Definição do filtro PB

FiltroRES_Disc1 = c2d(FiltroRES1, Ts, 'tustin'); % Discretização do filtro
PB

[b_res1, a_res1] = tfdata(FiltroRES_Disc1, 'v'); % Cria vetores dos
parâmetros do Filtro PB discretizado

FiltroRES2 = tf([Kproposto(1,6)Kproposto(1,5)], [10(2 * pi * 180)^2]); %
Definição do filtro PB

FiltroRES_Disc2 = c2d(FiltroRES2, Ts, 'tustin'); % Discretização do filtro
PB

[b_res2, a_res2] = tfdata(FiltroRES_Disc2, 'v'); % Cria vetores dos

```


parâmetros do Filtro PB discretizado

```
elseif(NumHarmonica==3)
```

```
FiltroRES1 = tf([Kproposto(1,4)Kproposto(1,3)], [10(2 * pi * 60)2]); % Definição do  
filtro PB
```

```
FiltroRES_Disc1 = c2d(FiltroRES1, Ts, 'tustin'); % Discretização do filtro  
PB
```

```
[b_res1, a_res1] = tfdata(FiltroRES_Disc1, 'v'); % Cria vetores dos  
parâmetros do Filtro PB discretizado
```

```
FiltroRES2 = tf([Kproposto(1,6)Kproposto(1,5)], [10(2 * pi * 180)2]); % Definição do  
filtro PB
```

```
FiltroRES_Disc2 = c2d(FiltroRES2, Ts, 'tustin'); % Discretização do filtro  
PB
```

```
[b_res2, a_res2] = tfdata(FiltroRES_Disc2, 'v'); % Cria vetores dos  
parâmetros do Filtro PB discretizado
```

```
FiltroRES3 = tf([Kproposto(1,8)Kproposto(1,7)], [10(2 * pi * 300)2]);  
% Definição do filtro PB
```

```
FiltroRES_Disc3 = c2d(FiltroRES3, Ts, 'tustin'); % Discretização do filtro  
PB
```

```
[b_res3, a_res3] = tfdata(FiltroRES_Disc3, 'v'); % Cria vetores dos  
parâmetros do Filtro PB discretizado
```

```
elseif(NumHarmonica==4)
```

```
FiltroRES1 = tf([Kproposto(1,4)Kproposto(1,3)], [10(2 * pi * 60)2]);  
% Definição do filtro PB
```

```
FiltroRES_Disc1 = c2d(FiltroRES1, Ts, 'tustin'); % Discretização do filtro  
PB
```

```
[b_res1, a_res1] = tfdata(FiltroRES_Disc1, 'v'); % Cria vetores dos  
parâmetros do Filtro PB discretizado
```

```
FiltroRES2 = tf([Kproposto(1,6)Kproposto(1,5)], [10(2 * pi * 180)2]);  
% Definição do filtro PB
```

```
FiltroRES_Disc2 = c2d(FiltroRES2, Ts, 'tustin'); % Discretização do filtro  
PB
```

```
[b_res2, a_res2] = tfdata(FiltroRES_Disc2, 'v'); % Cria vetores dos  
parâmetros do Filtro PB discretizado
```

```
FiltroRES3 = tf([Kproposto(1, 8)Kproposto(1, 7)], [10(2 * pi * 300)2]);  
% Definição do filtro PB
```

```
FiltroRES_Disc3 = c2d(FiltroRES3, Ts, 'tustin'); % Discretização do filtro  
PB
```

```
[b_res3, a_res3] = tfdata(FiltroRES_Disc3, 'v'); % Cria vetores dos  
parâmetros do Filtro PB discretizado
```

```
FiltroRES4 = tf([Kproposto(1, 10)Kproposto(1, 9)], [10(2 * pi * 420)2]);  
% Definição do filtro PB
```

```
FiltroRES_Disc4 = c2d(FiltroRES4, Ts, 'tustin'); % Discretização do filtro  
PB
```

```
[b_res4, a_res4] = tfdata(FiltroRES_Disc4, 'v'); % Cria vetores dos  
parâmetros do Filtro PB discretizado
```

```
elseif(NumHarmonica==5)
```

```
FiltroRES1 = tf([Kproposto(1, 4)Kproposto(1, 3)], [10(2 * pi * 60)2]);  
% Definição do filtro PB
```

```
FiltroRES_Disc1 = c2d(FiltroRES1, Ts, 'tustin'); % Discretização do filtro  
PB
```

```
[b_res1, a_res1] = tfdata(FiltroRES_Disc1, 'v'); % Cria vetores dos  
parâmetros do Filtro PB discretizado
```

```
FiltroRES2 = tf([Kproposto(1, 6)Kproposto(1, 5)], [10(2 * pi * 180)2]);  
% Definição do filtro PB
```

```
FiltroRES_Disc2 = c2d(FiltroRES2, Ts, 'tustin'); % Discretização do filtro  
PB
```

```
[b_res2, a_res2] = tfdata(FiltroRES_Disc2, 'v'); % Cria vetores dos  
parâmetros do Filtro PB discretizado
```

```
FiltroRES3 = tf([Kproposto(1, 8)Kproposto(1, 7)], [10(2 * pi * 300)2]);  
% Definição do filtro PB
```

```
FiltroRES_Disc3 = c2d(FiltroRES3, Ts, 'tustin'); % Discretização do filtro  
PB
```

```
[b_res3, a_res3] = tfdata(FiltroRES_Disc3, 'v'); % Cria vetores dos  
parâmetros do Filtro PB discretizado
```

```
FiltroRES4 = tf([Kproposto(1, 10)Kproposto(1, 9)], [10(2 * pi * 420)2]);  
% Definição do filtro PB
```

```
FiltroRES_Disc4 = c2d(FiltroRES4, Ts, 'tustin'); % Discretização do filtro  
PB
```

```
[b_res4, a_res4] = tfdata(FiltroRES_Disc4,'v'); % Cria vetores dos
parâmetros do Filtro PB discretizado

FiltroRES5 = tf([Kproposto(1, 12)Kproposto(1, 11)], [10(2 * pi * 540)^2]);
% Definição do filtro PB

FiltroRES_Disc5 = c2d(FiltroRES5, Ts,'tustin'); % Discretização do filtro
PB
[b_res5, a_res5] = tfdata(FiltroRES_Disc5,'v'); % Cria vetores dos
parâmetros do Filtro PB discretizado

end
```

"gera_grafico": Arquivo .m para gerar gráficos da subseção (5.3.1) e (5.3.2)

```
V_vazio = 127.00;

%% Tensão Saída
numfig = 1;
figure(numfig)
sinal_referencia1=sinal_referencia(:,2);
tensao_saida1=tensao_saida(:,3);
plot(tout,sinal_referencia1,'k')
hold on
axis([1 1.01666666666666666666666666666667 -185 185])
%title('Tempo Discreto pelo Método Alternativo')
plot(tout,tensao_saida1)
xlabel('Tempo (s)')
ylabel('Tensão (V)')
legend('Referência','Tensão Saída')

numfig = numfig + 1;
figure(numfig)
tensao_saida_rms1 = tensao_saida_rms(:, 2);
tensao_saida_rms_matlab1=tensao_saida_rms_matlab(:,2);
plot(tout,tensao_saida_rms1,'b--')
hold on
plot(tout,tensao_saida_rms_matlab1,'b')
hold on
plot(tout,Vmin(:,2),'k-')
hold on
plot(tout,Vmin(:,2)/0.9*0.98,'r-')
hold on
plot(tout,Vmax(:,2),'k-')
hold on
plot(tout,Vmax(:,2)/1.1*1.02,'r-')
```



```

legend('Corrente de Saída RMS')

%% Corrente Indutor

numfig = numfig + 1;
figure(numfig)
sinal_controle1=sinal_controle(:,2);
plot(tout,sinal_controle1)
hold on
plot(tout,Vmin(:,2)/Vmi*Vcc/2,'r-')
hold on
plot(tout,-Vmin(:,2)/Vmi*Vcc/2,'r-')
%title('Tempo Discreto pelo Método Alternativo')
xlabel('Tempo (s)')
legend('Sinal Controle')

tout=tout;
timec_a=tout(((t_end*18/60+0.25/60)/Ts+1):((t_end*18/60+0.25/60)/Ts
+1+0.4/Ts))-tout((t_end*18/60+0.25/60)/Ts+1);

timec_s=tout(((t_end*18/60+0.25/60)/Ts+1+(t_end*0.4)/Ts):((t
_end*18/60+0.25/60)/Ts+1+0.4/Ts+(t_end*0.4)/Ts))
-tout((t_end*18/60+0.25/60)/Ts+1+(t_end*0.4)/Ts);

%% Perfil 1

% Dedicacao dos valores para primeiro perfil de curva
VMax= [30 30 30 14 14 14 12 12 11 11 10 10];
VMin= [-30 -30 -30 -14 -14 -14 -12 -12 -11 -11 -10 -10];
Time=[0.1 5 5 20 20 40 40 60 60 100 100 1000];

numfig = numfig + 1;
figure(numfig)
semilogx(timec_a*1000,(tensao_saida(((t_end*18/60+0.25/60)/Ts+1):((t
_end*18/60+0.25/60)/Ts+1+0.4/Ts),3) -
tensao_saida_1_4_load(((t
_end*18/60+0.25/60)/Ts+1):((t_end*18/60+0.25/60)/T
s+1+0.4/Ts),2))*100/
tensao_saida(5940,3),'r')
P1=(tensao_saida(((t_end*18/60+0.25/60)/Ts+1):((t_end*18/60+0.25/60)/Ts
+1+0.4/Ts),3) - tensao_saida_1_4_load(((t_end*18/60+0.25/60)/Ts+1):((t
_end*18/60+0.25/60)/Ts+1+0.4/Ts),2))*100/tensao_saida(5940,3);
hold on
semilogx(timec_a*1000,(tensao_saida(((t_end*18/60+0.25/60)/Ts+1+(t
_end*0.4)
/Ts):((t_end*18/60+0.25/60)/Ts+1+0.4/Ts+(t_end*0.4)/Ts),3) -

```

```

tensao_saida_full(((t_end*18/60+0.25/60)/Ts+1+(t_end*0.4)/Ts):((t
_end*18/60+0.25/60)/Ts+1+0.4/Ts+(t_end*0.4)/Ts),2))*100/
tensao
_saida(5940,3),'b')
tensao_saida_full(((t_end*18/60+0.25/60)/Ts+1+(t_end*0.4)/Ts):((t
_end*18/60+0.25/60)/Ts+1+0.4/Ts+(t_end*0.4)/Ts),2))*100/
tensao
_saida(5940,3);
hold on
semilogx(Time,VMax,'k-', 'LineWidth',2)
hold on
semilogx(Time,VMin,'k-', 'LineWidth',2)
hold on
legend('Degrau aditivo','Degrau subtrativo','Limites transiente')
grid on
axis([0.1 1000 -100 100])
title('Perfil 1 - IEC 62040')
xlabel('Duração do transitório (ms)')
ylabel('Tensão (%) Valor Nominal')

%% Perfil 2

% Dedicção dos valores para segundo perfil de curva

VMax=[200 100 35 20 20 14 14 12 12 11 11 10 10];
VMin=[-100 -100 -35 -20 -20 -14 -14 -12 -12 -11 -11 -10 -10];
Time=[0.1 1 4 10 20 20 40 40 60 60 100 100 1000];

numfig = numfig + 1;
figure(numfig)
semilogx(timec_a*1000,(tensao_saida(((t_end*18/60+0.25/60)/Ts+1):((t
_end*18/60+0.25/60)/Ts+1+0.4/Ts),3) -
tensao_saida_1_4_load(((t
_end*18/60+0.25/60)/Ts+1):((t_end*18/60+0.25/60)/Ts
+1+0.4/Ts),2))*100/
tensao_saida(5940,3),'r')
P2=(tensao_saida(((t_end*18/60+0.25/60)/Ts+1):((t_end*18/60+0.25/60)/Ts
+1+0.4/Ts),3) - tensao_saida_1_4_load(((t_end*18/60+0.25/60)/Ts+1):
((t_end*18/60+0.25/60)/Ts+1+0.4/Ts),2))*100/tensao_saida(5940,3);
hold on
semilogx(timec_a*1000,(tensao_saida(((t_end*18/60+0.25/60)/Ts+1+(t
_end*0.4)/
Ts):((t_end*18/60+0.25/60)/Ts+1+0.4/Ts+(t_end*0.4)/Ts),3) -
tensao_saida_full(((t_end*18/60+0.25/60)/Ts+1+(t_end*0.4)/Ts):((t
_end*18/60+0.25/60)/Ts+1+0.4/Ts+(t_end*0.4)/Ts),2))*100/tensao
_saida(5940,3),'b')
P22=(tensao_saida(((t_end*18/60+0.25/60)/Ts+1+(t_end*0.4)/Ts):
((t

```

```

_end*18/60+0.25/60)/Ts+1+0.4/Ts+(t_end*0.4)/Ts),3) - tensao_saida
_full(((t_end*18/60+0.25/60)/Ts+1+(t_end*0.4)/Ts):((t
_end*18/60+0.25/60)/Ts+1+0.4/Ts+(t_end*0.4)/Ts),2))*100/tensao
_saida(5940,3);
hold on
semilogx(Time,VMax,'k-', 'LineWidth',2)
hold on
semilogx(Time,VMin,'k-', 'LineWidth',2)
legend('Degrau aditivo','Degrau subtrativo','Limites transiente')
grid on
axis([0.1 1000 -100 100])
title('Perfil 1')
xlabel('Duração do transitório (ms)')
ylabel('Tensão (%) Valor Nominal')

```

%% Perfil 3

```

VMax=[200 100 35 20 20 14 14 12 12 11 11 10 10];
VMin=[-100 -100 -100 -100 -48 -48 -27 -27 -27 -27 -27 -20 -20 ];
Time=[0.1 1 4 10 20 20 40 40 60 60 100 100 1000];

```

```

numfig = numfig + 1;
figure(numfig)
semilogx(timec_a*1000,(tensao_saida(((t_end*18/60+0.25/60)/Ts+1):((t
_end*18/60+0.25/60)/Ts+1+0.4/Ts),3) -
tensao_saida_1_4_load(((t
_end*18/60+0.25/60)/Ts+1):((t_end*18/60+0.25/60)/
Ts+1+0.4/Ts),2))*100/
tensao_saida(5940,3),'r')
P3=(tensao_saida(((t_end*18/60+0.25/60)/Ts+1):((t_end*18/60+0.25/60)/Ts
+1+0.4/Ts),3) - tensao_saida_1_4_load(((t_end*18/60+0.25/60)/Ts+1):
((t_end*18/60+0.25/60)/Ts+1+0.4/Ts),2))*100/tensao_saida(5940,3);
hold on

```

```

semilogx(timec_a*1000, (tensao_saida(((t_end*18/60+0.25/60)/Ts+1+(t_end*
0.4)/Ts) : ((t_end*18/60+0.25/60)/Ts+1+0.4/Ts+(t_end*0.4)/Ts),3) -
tensao_saida_full(((t_end*18/60+0.25/60)/Ts+1+(t_end*0.4)/Ts) : ((t
_end*18/60+0.25/60)/Ts+1+0.4/Ts+(t_end*0.4)/Ts),2)) * 100/tensao
_saida(5940,3),'b')
hold on
semilogx(Time,VMax,'k-', 'LineWidth',2)
hold on
semilogx(Time,VMin,'k-', 'LineWidth',2)
legend('Degrau aditivo','Degrau subtrativo','Limites transiente')
grid on
axis([0.1 1000 -100 100])
title('Perfil 3')
xlabel('Duração do transitório (ms)')

```

```
ylabel('Tensão (%) Valor Nominal')
```

"Calcula_K_LMI": Arquivo .m para cálculo das LMIs

```
senPSI=sind(Psi);
cosPSI=cosd(Psi);
% SCRIPTs anexos

%=====
% Sistema Aumentado
%=====
%SistemaAumentado
%% PARAMETRO: D-Estabilidade -Semi Plano direito
%

%Cria uma LMI
setlmis([]);

N_Estados=2+2*NumHarmonica;

I=eye(N_Estados);
[Q,n1] = lmivar(1,[N_Estados1]); %
[W,n2] = lmivar(2,[1N_Estados]); %
Gama = lmivar(1,[11]);

% D-Estabilidade -Semi Plano direito

LMI1=newlmi; %  $Q^*A' + W'*Bu' + Bu*W + A*Q + 2*Alfa*Q < 0$ 
lmiterm([LMI1 1 1 Q],Au1,1,'s');
%lmiterm([LMI1 1 1 Q],1,Au1);
lmiterm([LMI1 1 1 Q],2*Alfa1,1);
lmiterm([LMI1 1 1 W],Bu,1,'s');
%lmiterm([LMI1 1 1 -W],1,Bu');

LMI2=newlmi; %  $Q^*A' + W'*Bu' + Bu*W + A*Q + 2*Alfa*Q < 0$ 
lmiterm([LMI2 1 1 Q],Au2,1,'s');
%lmiterm([LMI2 1 1 Q],1,Au2');
lmiterm([LMI2 1 1 Q],2*Alfa1,1);
lmiterm([LMI2 1 1 W],Bu,1,'s');
%lmiterm([LMI2 1 1 -W],1,Bu');

% D-Estabilidade Cone
%
%  $senPSI*Au*Q + senPSI*Bu*W + senPSI*Q*Au' + senPSI*W'*Bu'$ 
```



```

cosPSI*Au*Q+cosPSI*Bu*W-cosPSI*Q*Au'-cosPSI*W'*Bu'
% -cosPSI*Au*Q-cosPSI*Bu*W+cosPSI*Q*Au'+cosPSI*W'*Bu'
senPSI*Au*Q+senPSI*Bu*W+senPSI*Q*Au'+senPSI*W'*Bu'
LMI3=newlmi;
lmiterm([LMI3 1 1 Q],senPSI*Au1,1,'s');
lmiterm([LMI3 1 1 W],senPSI*Bu,1,'s');

lmiterm([LMI3 1 2 Q],cosPSI*Au1,1);
lmiterm([LMI3 1 2 W],cosPSI*Bu,1);
lmiterm([LMI3 1 2 Q],-cosPSI,Au1');
lmiterm([LMI3 1 2 -W],-cosPSI,Bu');

% lmiterm([LMI3 2 1 Q],-cosPSI*Au1,1);
% lmiterm([LMI3 2 1 W],-cosPSI*Bu,1);
% lmiterm([LMI3 2 1 Q],cosPSI,Au1');
% lmiterm([LMI3 2 1 -W],cosPSI,Bu');

lmiterm([LMI3 2 2 Q],senPSI*Au1,1,'s');
lmiterm([LMI3 2 2 W],senPSI*Bu,1,'s');

% senPSI*Au*Q+senPSI*Bu*W+senPSI*Q*Au'+senPSI*W'*Bu' cosPSI*Au*Q
+cosPSI*Bu*W-cosPSI*Q*Au'-cosPSI*W'*Bu'
% -cosPSI*Au*Q-cosPSI*Bu*W+cosPSI*Q*Au'+cosPSI*W'*Bu' senPSI*Au*Q
+senPSI*Bu*W+senPSI*Q*Au'+senPSI*W'*Bu'
LMI4=newlmi;
lmiterm([LMI4 1 1 Q],senPSI*Au2,1,'s');
lmiterm([LMI4 1 1 W],senPSI*Bu,1,'s');

lmiterm([LMI4 1 2 Q],cosPSI*Au2,1);
lmiterm([LMI4 1 2 W],cosPSI*Bu,1);
lmiterm([LMI4 1 2 Q],-cosPSI,Au2');
lmiterm([LMI4 1 2 -W],-cosPSI,Bu');

% lmiterm([LMI4 2 1 Q],-cosPSI*Au2,1);
% lmiterm([LMI4 2 1 W],-cosPSI*Bu,1);
% lmiterm([LMI4 2 1 Q],cosPSI,Au2');
% lmiterm([LMI4 2 1 -W],cosPSI,Bu');

lmiterm([LMI4 2 2 Q],senPSI*Au2,1,'s');
lmiterm([LMI4 2 2 W],senPSI*Bu,1,'s');

% D-Estabilidade Circunferencia
% -r*Q c*Q+A*Q+Bu*W
% c*Q+Q*A'+W'*Bu' -r*Q
if (HabCirc==1)
LMI5=newlmi;
lmiterm([LMI5 1 1 Q],-r1,1);

```

```

lmiterm([LMI5 1 2 Q],c,1);
lmiterm([LMI5 1 2 Q],Au1,1);
lmiterm([LMI5 1 2 W],Bu,1);
lmiterm([LMI5 2 1 Q],c,1);
lmiterm([LMI5 2 1 Q],1,Au1');
lmiterm([LMI5 2 1 -W],1,Bu');
lmiterm([LMI5 2 2 Q],-r1,1);

```

```

LMI6=newlmi;
lmiterm([LMI6 1 1 Q],-r1,1);
lmiterm([LMI6 1 2 Q],c,1);
lmiterm([LMI6 1 2 Q],Au2,1);
lmiterm([LMI6 1 2 W],Bu,1);
lmiterm([LMI6 2 1 Q],c,1);
lmiterm([LMI6 2 1 Q],1,Au2');
lmiterm([LMI6 2 1 -W],1,Bu');
lmiterm([LMI6 2 2 Q],-r1,1);
end

```

```

LMI8=newlmi;
lmiterm([LMI8 1 1 Q],Au1,1,'s');
lmiterm([LMI8 1 1 W],Bu,1,'s');

```

```

lmiterm([LMI8 1 2 -W],1,Du',1);

```

```

% lmiterm([LMI8 2 1 W],Du,1);

```

```

lmiterm([LMI8 2 2 Gama],-1,1);

```

```

LMI9=newlmi;
lmiterm([LMI9 1 1 Q],Au2,1,'s');
lmiterm([LMI9 1 1 W],Bu,1,'s');

```

```

lmiterm([LMI9 1 2 -W],1,Du',1);

```

```

% lmiterm([LMI9 2 1 W],Du,1);

```

```

lmiterm([LMI9 2 2 Gama],-1,1);

```

```

LMI7=newlmi; % Q > 0
lmiterm([-LMI7 1 1 Q],1,1);

```

```

%Finaliza a declaração das LMI's e cria o sistema de inequações
LMISYS = getlmis;

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Inicio do Solver "feasp"%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%Verifica se as LMIs convergem  
[tmin, xfeas] = feasp(LMISYS);  
%  
%Miniza as LMIs  
no=decnbr(LMISYS);  
co=zeros(no,1);  
for j=1:no  
gama_j=defcx(LMISYS,j,Gama);  
co(j)=gama_j;  
end  
h[copt, xfeas] = mincx(LMISYS,co);
```

```
%dec2mat mostrara os valores de Q e W  
Qf=dec2mat(LMISYS,xfeas,Q);  
Wf=dec2mat(LMISYS,xfeas,W);  
Gf=dec2mat(LMISYS,xfeas,Gama);
```

"dados_psim": Arquivo .m para transferir arquivo do MATLAB para o PSIM

```
% Carregamento dos Parâmetros Simulink/PSIM
```

```
if PSIM == 1
```

```
% Saida dos Dados para o PSIM  
delete('Potencia_param.txt')  
diary('Potencia_param.txt')
```

```
display(['Tsim=',num2str(Tsim)]);  
display(['t_end=',num2str(t_end)]);
```

```
display(['Vin=',num2str(Vin)]);  
display(['Ccc=',num2str(Ccc)]);  
display(['fs=',num2str(fs)]);
```

```
display(['V_rede_pk=',num2str(V_rede_pk)]);  
display(['f_rede=',num2str(f_rede)]);  
display(['teta_rede=',num2str(teta_rede)]);
```

```
display(['f=',num2str(f)]);
```

```
display(['Lf=',num2str(Lf)]);
```

```

display(['Rlf=',num2str(Rlf)]);
display(['Cf=',num2str(Cf)]);

display(['Vcc=',num2str(Vcc)]);
display(['Vtri=',num2str(Vtri)]);
display(['Kpwm=',num2str(Kpwm)]);

display(['Rlin1=',num2str(Rlin1)]);
display(['Rlin2=',num2str(Rlin2)]);
display(['Vout_pk=',num2str(Vout_pk)]);

display(['Rnlin1=',num2str(Rnlin1)]);
display(['Rnlin2=',num2str(Rnlin2)]);

display(['Cnlin1=',num2str(Cnlin1)]);
display(['Cnlin2=',num2str(Cnlin2)]);
display(['VCap=',num2str(VCap)]);

display(['Rsnlin1=',num2str(Rsnlin1)]);
display(['Rsnlin2=',num2str(Rsnlin2)]);

diary off
end

```