

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE DIPLOMAÇÃO

Christian Sasso Vieira

Aplicação do controlador repetitivo de alta ordem em
sistemas UPS

Porto Alegre

2015

Christian Sasso Vieira

Aplicação do controlador repetitivo de alta ordem em sistemas UPS

Trabalho de CC apresentado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Orientador: Jeferson Vieira Flores

Porto Alegre

2015

Ficha Catalográfica

- V658a Vieira, Christian Sasso
Aplicação do controlador repetitivo de alta ordem em sistemas UPS /
Christian Sasso Vieira. – 2015.
43 f. : il. color.
Trabalho de conclusão (especialização) – Universidade Federal do Rio
Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica. Porto Alegre, BR-RS, 2015.
Orientador: Jéferson Vieira Flores.
1. Controlador repetitivo. 2. Fonte ininterrupta de energia. 3. Análise de
frequência. I. Flores, Jéferson Vieira, orient. II. Título.

CDU: 62-52(043)

Christian Sasso Vieira

Aplicação do controlador repetitivo de alta ordem em sistemas UPS

Este Trabalho de CC foi analisado e julgado adequado para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Jeferson Vieira Flores
Orientador

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jeferson Vieira Flores - UFRGS _____
Prof.^a Dr.^a Luciola Campestrini - UFRGS _____
Prof. Dr. Fausto Bastos Libano - UFRGS _____

Dedico este trabalho a
minha família, pela com-
preensão, paciência e
apoio.

*“Sapientia et virtus in domo
eius et scientia omnium
rerum manet apud eum in
saeculum saeculi.”*
(The greater Key of Solomon)

Resumo

Este trabalho tem por objetivo verificar a robustez do controlador repetitivo de alta ordem (do termo em inglês, *High Order Repetitive Control* - HORC) aplicado a fontes ininterruptas de energia (do termo em inglês, *Uninterruptible Power Supplies* - UPS), quando este sistema é submetido a um sinal de referência com frequência incerta. Primeiramente é feita uma breve descrição do modelo matemático e dos parâmetros adotados para a UPS e para o controlador. Com isso foram realizadas diversas simulações com os controladores HORC de primeira, segunda e terceira ordem, a fim de verificar os valores de THD (do inglês, *Total Harmonic Distortion*) e RMS (do inglês, *Root Mean Square*) da tensão de saída da UPS. Os resultados se mostraram satisfatórios, mostrando que o controlador repetitivo de alta ordem torna o sistema mais robusto a variações na frequência. O HORC de segunda ordem foi, entre os controladores testados, o que apresentou melhor resultado. Este controlador manteve o valor RMS da saída dentro dos limites impostos pela norma ANSI/IEEE Std 944, para uma variação de até $\pm 5\%$ na frequência de referência e manteve também a distorção harmônica abaixo do limite imposto pela norma IEC 62040-3, para esta mesma faixa de frequência.

Palavras-chave: UPS, HORC, RC, rejeição de distúrbios, variação de frequência.

Abstract

This work has as objective to validate the robustnesses of the High Order Repetitive Control (HORC) applied to Uninterruptible Power Supplies (UPS), when this system is subjected to an uncertain frequency reference signal. First is done a brief explanation of the mathematical model and of the chosen parameter for the UPS and for its controller. Subsequently it is done several simulations with the HORC of first, second, and third order, for the purpose of check the UPS output voltage THD and RMS. The acquired results fulfilled the expectations, as the high order repetitive control increase the system frequency robustness. The HORC of second order ended up to become, between all the tested controllers, the one with most satisfactory response. This controller was able to keep the RMS output voltage between the ANSI/IEEE Std 944 limits, for a frequency deviation of $\pm 5\%$ in the reference and it was also able to keep the harmonic distortion under the IEC 62040-3 boundary, for the same frequency deviation.

Key-words: UPS, RC, HORC, disturbance rejection, frequency deviation.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Topologia nobreak <i>on-line</i> de dupla conversão	17
Figura 2 – Esquemático simplificado da UPS	18
Figura 3 – Bloco responsável por gerar a tensão chaveada.	19
Figura 4 – Esquema básico do controlador repetitivo.	20
Figura 5 – Diagrama de Bode de G_{RC}	21
Figura 6 – Diagrama de blocos do controlador repetitivo de alta ordem.	23
Figura 7 – Bloco $H(s)$ expandido	23
Figura 8 – Diagrama de Bode de G_{HORC} para $N = 1, 2$ e 3	24
Figura 9 – Diagrama utilizado para as simulações.	28
Figura 10 – Diagrama elétrico da UPS, obtido através do <i>PSIM</i>	29
Figura 11 – Diagrama montado no <i>Simulink</i> para simulação do controlador HARC de ordens 1, 2 e 3.	30
Figura 12 – Análise na frequência do erro relativo para o controlador G_{HORC} , sendo $N = 1$ e sem a correção proposta por (LORENZINI, 2015)	32
Figura 13 – Análise na frequência do erro relativo para o controlador G_{HORC} , sendo $N = 1$ e com a correção proposta por (LORENZINI, 2015)	33
Figura 14 – Análise na frequência do erro relativo para o controlador G_{HORC} , sendo $N = 2$ e sem a correção proposta por (LORENZINI, 2015)	34
Figura 15 – Análise na frequência do erro relativo para o controlador G_{HORC} , sendo $N = 2$ e com a correção proposta por (LORENZINI, 2015)	35
Figura 16 – Análise na frequência do erro relativo $e_r(\omega)$ para o controlador G_{HORC} , sendo $N = 3$	37
Figura 17 – Análise na frequência do erro relativo $Erro_r(\omega)$ para o controlador G_{HORC} , sendo $N = 3$ e com a correção proposta em (LORENZINI, 2015).	37
Figura 18 – Diagrama de bode do controlador HARC de primeira, segunda e terceira ordem	38

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros da UPS adotada	29
Tabela 2 – Parâmetros α e ω_c adotados para os controladores HORC	31
Tabela 3 – Valores de THD da tensão de saída da UPS implementada com o controlador HORC de primeira ordem	32
Tabela 4 – Erro no valor RMS da tensão de saída, em relação ao valor nominal, da UPS implementada com o controlador HORC de primeira ordem	32
Tabela 5 – Valores de THD da tensão de saída da UPS implementada com o controlador HORC de segunda ordem	34
Tabela 6 – Erro no valor RMS da tensão de saída, em relação ao valor nominal, da UPS implementada com o controlador HORC de segunda ordem	34
Tabela 7 – Valores de THD da tensão de saída da UPS implementada com o controlador HORC de terceira ordem	36
Tabela 8 – Erro no valor RMS da tensão de saída, em relação ao valor nominal, da UPS implementada com o controlador HORC de terceira ordem	36
Tabela 9 – Valores de THD da tensão de saída da UPS implementada com o RC, sendo $\alpha = 15$ e $\omega_c = 500rad/s$	38
Tabela 10 – Erro no valor RMS da tensão de saída, em relação ao valor nominal, da UPS implementada com o RC, sendo $\alpha = 15$ e $\omega_c = 500rad/s$	39

Lista de abreviaturas e siglas

ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
BIBO	<i>Bounded-Input, Bounded-Output</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Continua
HORC	<i>High order Hipetitive Control</i>
IEC	<i>International Electromechanical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
LMI	<i>Linear Matrix Inequalities</i>
PID	<i>Proportional, Integral and Derivative</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RC	<i>Repetitive Control</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>

Lista de símbolos

α	Garante um decaimento exponencial para a trajetória do sistema
C_1 e C_2	Capacitores do barramento CC
C_f	Capacitância do filtro LC da UPS
f_0	Frequência da referência
f_c	Frequência de corte do filtro $F(s)$ em Hz
f_s	Frequência de chaveamento dos IGBTs
K	Ganho associado ao sistema UPS/HORC
K_c	Ganho associado ao HORC
K_p	Ganho associado a UPS
K_{PWM}	Constante de equivalência da geração do PWM
L_f	Indutância do filtro LC da UPS
N	Ordem do HORC
P_n	Potência nominal da UPS
R_{L_f}	Resistência série do indutor L_f
$S1$ e $S2$	IGBTs do inversor da UPS
τ_0	Período fundamental do sinal de referência
V_{CC}	Tensão do barramento CC
V_{ref}	Tensão eficaz da referência
V_{refp}	Valor de pico da tensão de referência
V_{RMS}	Valor RMS da tensão de saída da UPS
V_{tri}	Amplitude de pico a pico da fonte de tensão triangular do inversor
W_i	Contribuição dos elementos de atraso do HORC
ω_c	Frequência de de corte do filtro $F(s)$

$i(t)$	Corrente sob o indutor L_f
$i_d(t)$	Carga não-linear ligada a UPS
$e(t)$	Sinal de erro
$e_r(\omega)$	Erro relativo
$q(t)$	Vetor de sinais exógenos
$r(t)$	Sinal de referência
$u(t)$	Sinal de controle
$v_{out}(t)$	Tensão de saída da UPS
$Y_0(t)$	Carga linear ligada a UPS
Y_{min}	Valor mínimo possível para a carga linear
Y_{max}	Valor máximo possível para a carga linear
$x_a(t)$	Variável de estados do sistema aumentado
$x_c(t)$	Variável de estados do HORC
$x_p(t)$	Vetor de estados do sistema da UPS
$y_c(t)$	Saída do HORC
$y_p(t)$	Saída do espaço de estados da UPS
$F(s)$	Filtro passa baixas
$H(s)$	Função transferência dos elementos de atraso do HORC
$G_{RC}(s)$	Função transferência do RC
$G_{HORC}(s)$	Função transferência do HORC
A_a, A_{d_i}, B_a, B_q	Matrizes do sistema aumentado
A_p, B_p, B_{d_p}, C_p	Matrizes do espaço de estados da UPS

Sumário

	Introdução	14
1	UPS	16
1.1	Normas Aplicáveis	16
1.1.1	NBR 15014	16
1.1.2	ANSI/IEEE Std 944 e IEC 62040-3	17
1.2	Modelagem da UPS	17
1.2.1	Modelagem elétrica	17
1.2.2	Modelagem matemática	18
2	CONTROLADOR REPETITIVO	20
2.1	Modelo básico	20
2.2	Filtro $F(s)$	21
3	CONTROLADOR REPETITIVO DE ALTA ORDEM	23
3.1	Modelo básico	23
3.2	Modelagem em espaço de estados	25
3.3	Projeto do Controlador	25
4	METODOLOGIA E SIMULAÇÃO	28
4.1	Ambiente de Simulação	28
4.1.1	Potência	28
4.1.2	Controle	29
4.2	Metodologia	29
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
5.1	HORC de Primeira Ordem	31
5.2	HORC de Segunda Ordem	33
5.3	HORC de Terceira Ordem	35
5.4	Resultados Finais	38
6	CONCLUSÕES	40
	REFERÊNCIAS	42

Introdução

Fontes ininterruptas de energia, também conhecidas pelo termo UPS (do inglês *Interruptible Power Supply*) ou *nobreak*, foram desenvolvidas com o objetivo de garantir o fornecimento contínuo de energia para equipamentos com cargas críticas (aparelhos hospitalares, sistemas de segurança, computadores).

Com o intuito de assegurar que a UPS opere dentro de um limite aceitável de desempenho, foram criadas normas técnicas para estabelecer alguns parâmetros de referência. Entre as normas utilizadas pode-se citar a ANSI/IEEE Std 944 e a IEC 62040-3, as quais serão discutidas na sequência deste trabalho.

De forma a atender as normas, aumentando também a eficiência e a robustez, os sistemas UPS são normalmente implementadas utilizando algum método de controle. Entre os métodos de controle utilizados em UPS, pode-se citar topologias tradicionais como por exemplo o controlador PID (proporcional, integral e derivativo) (RODRIGUES, 2010) ou ainda topologias mais avançadas como o controlador repetitivo (do termo em inglês *Repetitive Controller* - RC) (LORENZINI, 2015).

Nos dias atuais ainda são desenvolvidas novas pesquisas tentando encontrar outros métodos de controle, mais robustos, mais eficientes ou que atendam a uma necessidade específica. O controlador repetitivo de alta ordem (do termo em inglês *High Order Repetitive Controller* - HORC) (STEINBUCH, 2002) foi desenvolvido com o intuito de lidar com o problema de seguimento de referências ou rejeição de distúrbios onde os sinais envolvidos apresentam frequência incerta e variante no tempo.

Algumas topologias de *nobreak*, como por exemplo a *on-line* de dupla conversão (ABNT, 2003), tem sua referência dependente da frequência da tensão da rede CA, tornando então o sistema UPS sujeito a possíveis variações da rede. Em (DECKER et al., 2006) é mostrado um estudo sobre o comportamento da frequência da rede CA do sistema brasileiro, onde são apresentados casos de falhas em linhas de transmissão e seus efeitos na frequência do sinal. Neste estudo é relatada uma falta, ocorrida em 16 de outubro de 2005 às 20h38min, na linha de transmissão de 765kV entre Itaipu e São Paulo, a qual resultou em uma oscilação na frequência do sistema que passou de 60,12hz para 58,32hz, em um intervalo de 3s.

Métodos de controle como o controlador repetitivo podem vir a se mostrar ineficientes para situações onde a frequência de referência for instável (GRÜNDLING; MICHELS; STEFANELLO, 2009). Existem alguns estudos que abordam este problema (MATTAVELLI; MARAFAO, 2004; TZOU et al., 1997; JUNG; HUANG; TZOU, 1998; GARCIA-CERRADA et al., 2007; WANG et al., 2007), porém a maior parte destes apenas

comenta a sua existência. Em (GRÜNDLING; MICHELS; STEFANELLO, 2009) é sugerida uma topologia modificada do controlador repetitivo com solução e em (MATTAVELLI; MARAFAO, 2004) é sugerida a utilização de um identificador de período para ajustar a taxa de amostragem do sistema. Estas soluções se apresentaram eficientes, no entanto complexas e de difícil implementação. Neste trabalho é proposto, a aplicação do controlador HORC como uma alternativa para contornar este tipo de problema, sendo este um modelo de controlador simples e de fácil implementação.

Ao longo deste trabalho serão expostos, em mais detalhes, a topologia do *nobreak* adotado assim como as normas técnicas relevantes para este estudo e a seguir será levantado o modelo elétrico e matemático da UPS. Após serão então descritos os métodos de controle repetitivo e repetitivo de alta ordem e posteriormente serão apresentados resultados de cossimulação Matlab-PSIM na UPS a fim de determinar a eficácia do controlador HORC.

1 UPS

Neste capítulo será feita uma breve revisão das normas aplicáveis a Fontes Ininterruptas de Energia, além de apresentar a topologia adotada e descrever a modelagem elétrica e matemática desta UPS.

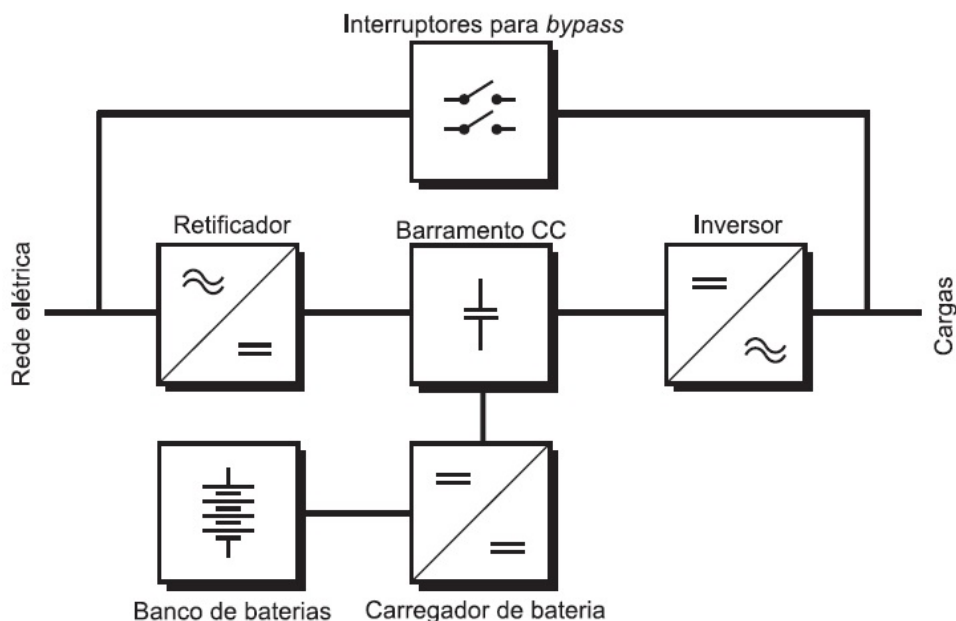
1.1 Normas Aplicáveis

Entre as normas responsáveis pela regulação de fontes ininterruptas de energia, algumas se mostram relevantes para este trabalho, a norma brasileira NBR (ABNT, 2003) e as normas internacionais (IEEE, 1986) e (IEC, 2011).

1.1.1 NBR 15014

Existem diversas topologias para sistemas UPS, porém em geral todas seguem a mesma estrutura básica que é composta por um retificador, um banco de baterias e um inversor. A NBR 15014 é responsável por definir as terminologias e definições aplicáveis à sistemas UPS com topologias do tipo *on-line*, interativo e *stand-by*.

Para este trabalho será utilizada a topologia *on-line* de dupla conversão, apresentada na Fig. 1, que se caracteriza pela saída ser dependente da tensão e da frequência da rede. Nesta topologia, quando operando no modo *bypass*, a potência fornecida à carga é de inteira responsabilidade da rede CA de entrada. No momento em que a entrada apresentar características inferiores às definidas em norma, o modo bateria deverá ser ativado, devendo a saída do inversor estar em fase com a rede, para assim evitar mudanças abruptas na saída da UPS, o que poderia acabar por danificar a carga.

Figura 1: Topologia nobreak *on-line* de dupla conversão

Fonte: NBR 15014

1.1.2 ANSI/IEEE Std 944 e IEC 62040-3

As normas ANSI/IEEE Std 944 e IEC 62040-3 estabelecem as características mínimas de operação para nobreaks monofásicos e trifásicos com tensão RMS de até 1000V.

Na norma ANSI/IEEE Std 944 é definido que, para o desempenho estático, o valor RMS (do inglês *Root Mean Square*) da tensão de saída da UPS pode ter um erro de até no máximo $\pm 2\%$ do valor nominal e a THD (do inglês *Total Harmonic Distortion*) deve ser inferior a 5%. A norma IEC 62040-3 estabelece que a THD da tensão de saída da UPS deve ser inferior a 8%.

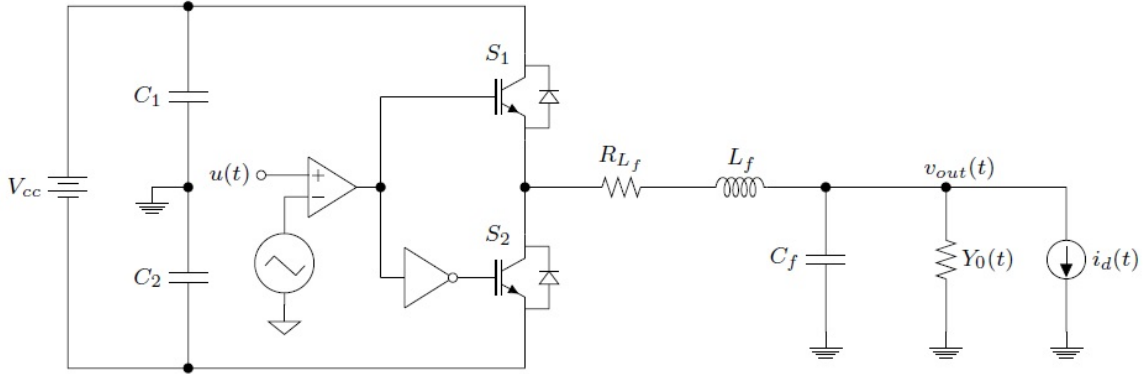
1.2 Modelagem da UPS

Nesta secção serão evidenciadas as modelagens elétrica (implementada com o uso do software *PSIM Ver. 9.0*) e matemática (implementada utilizando o ambiente do *Matlab Ver. 7.10.0*).

1.2.1 Modelagem elétrica

Este trabalho foca no controle do estágio de saída de uma UPS, de tal forma que é possível considerar que a tensão V_{cc} do barramento CC é estável ao longo da operação do sistema. A Fig. 2 apresenta o diagrama elétrico simplificado desta UPS.

Figura 2: Esquemático simplificado da UPS



Fonte: (LORENZINI, 2015)

No esquema da Fig. 2 o sinal de controle, representado por $u(t)$, é comparado com uma onda triangular para assim gerar um sinal modulado por largura de pulso (do termo em inglês *Pulse Width Modulation* - PWM). Os componentes S_1 e S_2 são transistores com base bipolar isolada (do termo em inglês *Insulated-Gate Bipolar Transistor* - IGBT), as quais são acionados pelo sinal PWM de forma a produzir uma tensão chaveada.

Ainda na Fig. 2 a tensão de saída desta UPS é simbolizada por $v_{out}(t)$, sendo esta obtida através da filtragem do sinal produzido por um filtro LC. A indutância do filtro L_f não é considerada ideal, de forma que o efeito da sua resistência série é representado por R_{L_f} . Finalmente, a capacitância do filtro é denotada por C_f .

Os efeitos das cargas aplicadas à UPS, assim como descrito em (PEREIRA et al., 2014), são representados pela admitância $Y_0(t)$ (carga linear) e a $i_d(t)$ (carga não linear). A variável $Y_0(t)$ tem como limite inferior o valor de carga a vazio Y_{min} e como limite superior o de carga nominal Y_{max} .

1.2.2 Modelagem matemática

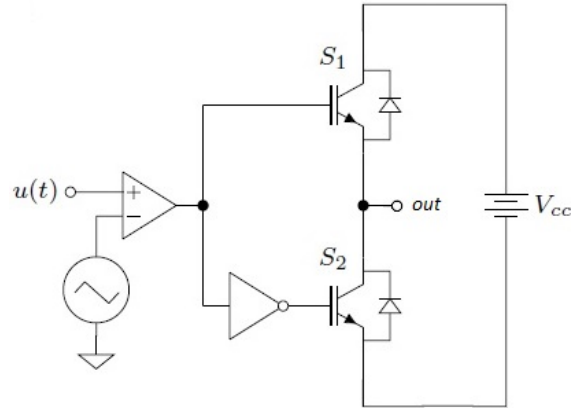
De acordo com (CHEN et al., 2007) pode-se simplificar a modelagem matemática representando o bloco da Fig. 3 pela multiplicação entre uma contante K_{PWM} e o sinal de controle $u(t)$, sendo K_{PWM} obtido por:

$$K_{PWM} = \frac{V_{cc}/2}{V_{tri}} \quad (1.1)$$

onde V_{tri} é a amplitude de pico a pico da fonte de tensão triangular.

Em (PEREIRA et al., 2014) foi descrita uma possível formulação em espaços de estados para a UPS, onde o vetor de estados do sistema é definido por $x_p(t) = [i(t) \quad v_{out}(t)]^T$, sendo $i(t)$ a corrente sob o indutor L_f e $v_{out}(t)$ a tensão sob o capacitor

Figura 3: Bloco responsável por gerar a tensão chaveada.



Fonte: (LORENZINI, 2015)

C_f . As equações que descrevem este espaço de estados são:

$$\begin{cases} \dot{x}_p(t) = A_p(Y_0(t))x_p(t) + B_p u(t) + B_{d_p} i_d(t) \\ y_p(t) = C_p x_p(t) \\ e(t) = r(t) - y_p(t) \end{cases} \quad (1.2)$$

onde $y_p(t)$ é a saída, $r(t)$ é o sinal de referência a ser seguido e $e(t)$ é o sinal de erro.

Através da teoria de circuitos e utilizando (1.1), é possível determinar as matrizes $A_p(Y_0(t))$, B_p , B_{d_p} e C_p como sendo:

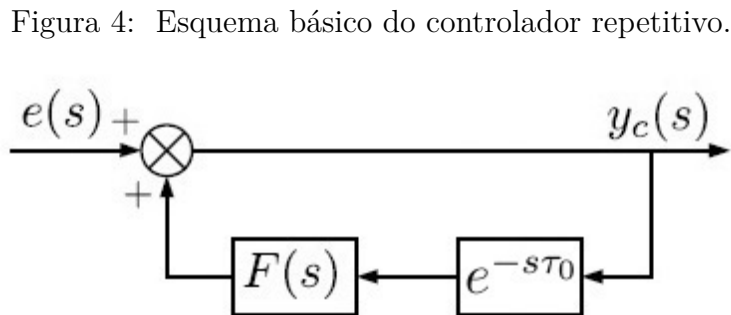
$$A_p(Y_0(t)) = \begin{bmatrix} -\frac{R_{L_f}}{L_f} & -\frac{1}{L_f} \\ \frac{1}{C_f} & -\frac{Y_0(t)}{C_f} \end{bmatrix}, \quad B_p = \begin{bmatrix} \frac{K_{PWM}}{L_f} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B_{d_p} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{C_f} \end{bmatrix} \quad e \quad C_p = [0 \quad 1]$$

2 Controlador Repetitivo

O controlador repetitivo (do termo em inglês *Repetitive Control* - RC) foi primeiramente apresentado em (HARA et al., 1988). Este tipo de controlador baseia-se no princípio de modelo interno (FRANCIS; WONHAM, 1975) para garantir seguimento e rejeição de sinais periódicos, o que o torna muito útil para aplicações tais como sistemas UPS (BONAN et al., 2011), suspensão de veículos (HAN et al., 2013), trens bala (LI; HOU, 2015) e filtros ativos (RAMOS; COSTA-CASTELLÓ; OLM, 2015).

2.1 Modelo básico

O RC é normalmente implementado com o uso de um elemento de atraso na malha de controle. Na Fig. 4 é exibido o esquema básico do controlador repetitivo, sendo $F(s) = 1$, onde τ_0 é o período do sinal de referência.

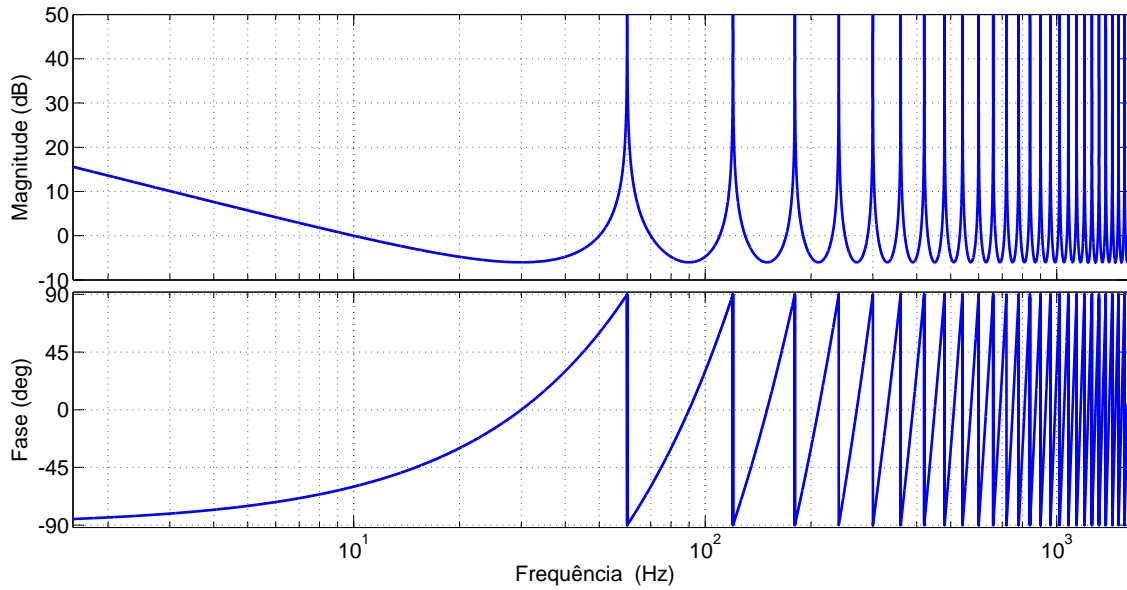


Fonte: Elaborada pelo autor

Através da análise dos diagramas de blocos apresentado na Fig. 4 obtém-se a seguinte função de transferência:

$$G_{RC}(s) = \frac{1}{1 - F(s)e^{-s\tau_0}} \quad (2.1)$$

Substituindo s por $j\omega$ e fazendo $\omega = \frac{2\pi k}{\tau}$ (sendo $k = \mathbb{N}^*$) verifica-se que $G_{RC}(s)$ terá ganho infinito para toda frequência $2\pi/\tau_0$ ou múltiplo inteiro desta frequência, ou seja, o controlador repetitivo é composto por infinitos picos de ressonância, localizados na frequência fundamental e em todas as suas harmônicas. Estes picos de ganho garantem o seguimento de referência e a rejeição de distúrbios nestas frequências. A Fig. 5 mostra o diagramas de Bode da função de transferência $G_{RC}(s)$, sendo $\tau_0 = 0.0167s$ (frequência de $60Hz$).

Figura 5: Diagrama de Bode de G_{RC} 

Fonte: Elaborada pelo autor

2.2 Filtro $F(s)$

Na prática, o sistema geralmente estará sujeito a ruídos, os quais tendem a ser amplificados, podendo levar o sistema à instabilidade. Este efeito se deve ao fato de o controlador RC ter infinitos picos de ganho, assim como pode ser visto na Fig. 5. Como uma alternativa para solucionar este problema, normalmente é aplicado um filtro passa baixas $F(s)$ em série com o elemento de atraso de modo a atenuar a influência do controlador em altas frequências (HARA et al., 1988), o qual é descrito por:

$$F(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (2.2)$$

onde ω_c é a frequência de corte em rad/s .

Apesar deste filtro aumentar a robustez do sistema em relação a ruídos, ele também faz com que os picos de ressonância já não sejam mais infinitos, ainda que obtendo valores elevados, levando o controlador a ter um erro de seguimento.

Este filtro $F(s)$ também insere um erro na fase do controlador o que acaba por deslocar os picos de ganho para frequências diferentes de kf_0 , $k = \mathbb{N}^*$ (sendo f_0 a frequência do sinal de referência). Em (LORENZINI, 2015) é descrita uma possível correção para esse problema, sendo projetado um controlador RC com frequência fundamental $f_0 + \Delta f$, de forma que o primeiro pico de ressonância esteja localizado em f_0 . O valor de Δf é obtido através da seguinte equação:

$$\Delta f = f_0 \frac{\arctan(f_0/f_c)}{2\pi - \arctan(f_0/f_c)} \quad (2.3)$$

sendo f_0 a frequência fundamental do sinal de referência e f_c a frequência de corte do filtro passa baixas.

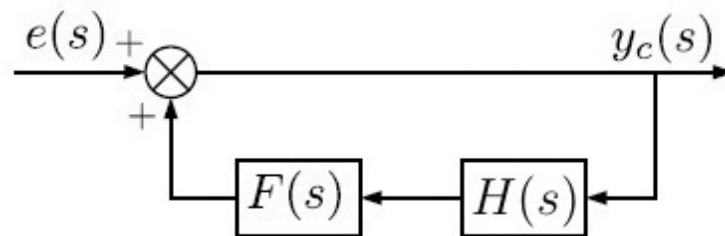
3 Controlador Repetitivo de Alta Ordem

Apesar de o controlador repetitivo apresentar bons resultados para sinais periódicos, este se demonstra ineficiente quando o sinal de referência tem um período incerto ou variável no tempo, tendo uma perda significativa em sua performance para variações maiores que 10% de seu período fundamental (STEINBUCH, 2002). O controlador repetitivo de alta ordem (STEINBUCH, 2002) surgiu como uma alternativa para lidar com este tipo de sinal.

3.1 Modelo básico

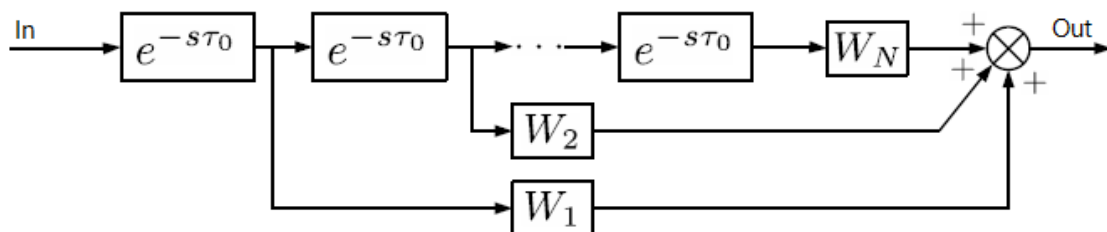
Analisando a Fig. 5 pode-se ver que os picos de ganho do controlador RC estão basicamente todos localizados na frequência fundamental e em suas harmônicas, o HORC foi desenvolvido com o intuito de aumentar o ganho em torno destas frequências. Para isso, tendo como base o modelo descrito na Fig. 4, introduziu-se uma soma de diversos elementos de atraso cada qual com uma contribuição livre para escolha.

Figura 6: Diagrama de blocos do controlador repetitivo de alta ordem.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 7: Bloco $H(s)$ expandido



Fonte: (FLORES; SALTON; CASTRO, 2015)

O modelo básico do HORC é retratado na Fig. 6 onde $F(s)$ é o mesmo filtro passa baixas usado no RC (secção 2.2) e $H(s)$ uma soma ponderada de elementos de atrasos.

A Fig. 7 apresenta com detalhamento o bloco $H(s)$, sendo N a ordem do controlador e W_i , $i = 1, \dots, N$ constantes que definem a contribuição de cada elemento de atraso. Segundo (STEINBUCH, 2002), para garantir a satisfação do princípio do modelo interno e por motivos de desempenho, os parâmetros livres W_i devem ser calculados por:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N W_i = 1 \\ \sum_{i=1}^N i^{(l-1)} W_i = 0, \quad l = 2, \dots, N \end{cases} \quad (3.1)$$

Note que o HORC de primeira ordem ($N = 1$) é na verdade o controlador repetitivo em sua forma original.

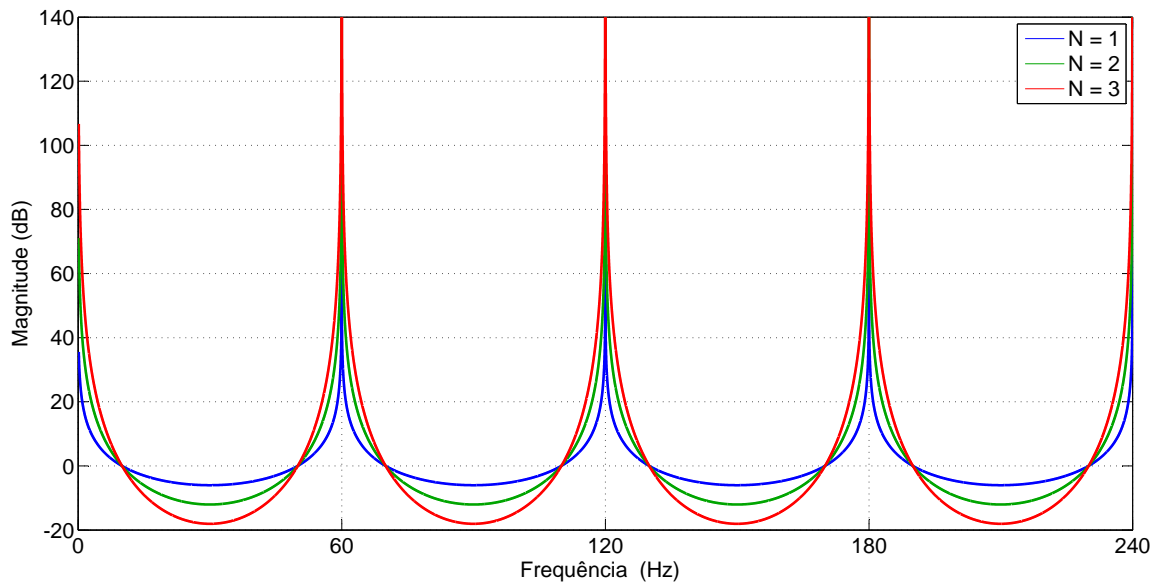
Através da análise do diagrama de blocos exposto na Fig. 6, obtém-se a função transferência (3.2).

$$G_{HORC}(s) = \frac{1}{1 - F(s)H(s)} \quad (3.2)$$

sendo $H(s)$ definido por:

$$H(s) = \sum_{i=1}^N W_i e^{-si\tau_0} \quad (3.3)$$

Figura 8: Diagrama de Bode de G_{HORC} para $N = 1, 2$ e 3



Fonte: Elaborada pelo autor

De forma análoga à análise realizada no controlador repetitivo e levando em conta (3.1), tem-se que a função de transferência $G_{HORC}(s)$, assim como no RC, apresenta picos de ressonância na frequência fundamental do sinal de referência e em suas harmônicas. Na Fig. 8 pode ser visto o comportamento de $G_{HORC}(s)$ no domínio da frequência, sendo $F(s) = 1$ e $\tau_0 = 0.0167s$. Nota-se que quanto maior a ordem do controlador, maior a região de ganho elevado no entorno das frequências de interesse.

3.2 Modelagem em espaço de estados

De forma a tornar possível a síntese do controlador HORC, faz-se necessária a descrição do mesmo em espaço de estados. Assim como demonstrado em (FLORES; SALTON; CASTRO, 2015), tem-se que, a partir de (3.2), pode-se chegar na seguinte representação para este controlador:

$$\begin{cases} \dot{x}_c(t) &= -\omega_c x_c(t) + \omega_c \sum_{i=1}^N W_i x_c(t - i\tau_0) + \omega_c \sum_{i=1}^N W_i e(t - i\tau_0) \\ y_c(t) &= x_c(t) + e(t) \end{cases}, \quad (3.4)$$

onde x_c é a variável de estados e y_c a saída do controlador. Sabe-se que $e(t) = r(t) - Cx(t)$ e que, devido a periodicidade do sinal de referência, $r(t - i\tau_0) = r(t), \forall i \in \mathbb{Z}$, logo \dot{x}_c pode ser reescrito, na seguinte forma:

$$\dot{x}_c(t) = -\omega_c x_c(t) + \omega_c \sum_{i=1}^N W_i x_c(t - i\tau_0) + \omega_c r(t) - \omega_c \sum_{i=1}^N W_i Cx(t - i\tau_0). \quad (3.5)$$

Com base nos modelos em espaço de estados da UPS (1.2) e do controlador (3.4) é então possível determinar a conexão entre ambos através da variável de estados $x_a = [x_p(t)' x_c(t)']'$, criando assim o espaço de estados aumentado, sendo este definido por:

$$\dot{x}_a(t) = A_a(\lambda)x_a(t) + \sum_{i=1}^N A_{di}x_c(t - i\tau_0) + B_a u(t) + B_q q(t) \quad (3.6)$$

sendo $q(t) = [r(t) \ i_d(t)]'$ e

$$A_a(\lambda) = \begin{bmatrix} A(\lambda) & 0_{n \times 1} \\ 0_{1 \times n} & -\omega_c \end{bmatrix}, \quad A_{di} = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & 0_{n \times 1} \\ -\omega_c W_i C & \omega_c W_i \end{bmatrix}, \quad B_a = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B_q = \begin{bmatrix} 0 & B_d \\ \omega_c & 0 \end{bmatrix}.$$

Ainda, assume-se que o sinal de controle $u(t)$ pode ser obtido através de uma soma ponderada dos efeitos associados às variáveis da UPS (corrente no indutor $i(t)$ e tensão sob o capacitor $v_{out}(t)$) e o efeito associado à saída do controlador $y_c(t)$ (FLORES; SALTON; CASTRO, 2015). Tem-se então que $u(t) = Kx_a(t)$, sendo $K = [K_p \ K_c]$, logo, pode-se reescrever (3.6) na seguinte forma:

$$\dot{x}_a(t) = (A_a(\lambda) + BaK)x_a(t) + \sum_{i=1}^N A_{di}x_c(t - i\tau_0) + B_q q(t) \quad (3.7)$$

3.3 Projeto do Controlador

De acordo com (FLORES; SALTON; CASTRO, 2015), a estabilidade interna do sistema em malha fechada (3.7) também implica em sua estabilidade BIBO (do inglês *Bounded-Input, Bounded-Output*), de forma que o termo dependente de $q(t)$ pode ser desconsiderado. Segue então que o problema de otimização do sistema pode ser resumido em (FLORES; SALTON; CASTRO, 2015):

- I:** Uma vez definidas as matrizes $A_a(\lambda)$, A_{di} e B_a e escolhida uma frequência de corte ω_c , determinar um valor de K para que

$$\dot{x}_a(t) = (A_a(\lambda) + BaK)x_a(t) + \sum_{i=1}^N A_{di}x_c(t - i\tau_0) \quad (3.8)$$

seja assintoticamente estável para todo e qualquer valor de $A(\lambda)$.

- II:** Definir uma variável α responsável por garantir um decaimento exponencial para a trajetória do sistema, tal que

$$\|x_a(t)\| \leq \beta \|\phi\|_{\bar{\tau}} e^{-\alpha t}, \text{ for } t > 0, \quad (3.9)$$

onde β é um escalar positivo e

$$\|\phi\|_{\bar{\tau}} := \sup_{t \in [-\bar{\tau}, 0]} \|x_a(t)\|$$

sendo $\bar{\tau} = N\tau_0$ (MAO; CHU, 2006).

- III:** Minimizar a função custo

$$J(x_a, u) := \|p(t)\|_2^2 = \int_0^\infty p(t)'p(t)dt, \quad (3.10)$$

onde $p(t)$ é definido por

$$p(t) := \mathbf{C}_p x_a(t) + \mathbf{D}_p u(t), \quad (3.11)$$

sendo \mathbf{C}_p e \mathbf{D}_p matrizes a serem definidas.

A partir do problema descrito por I a III, (FLORES; SALTON; CASTRO, 2015) sugere a seguinte formulação em LMI (do inglês *Linear Matrix Inequalities*) para atender estes requisitos:

Teorema

Com base em (3.8) e supondo que existam matrizes simétricas e positivas $Q, S_i \in \mathbb{R}^{n+1 \times n+1}$, para $i = 1, 2, \dots, N$, uma matriz $Y \in \mathbb{R}^{1 \times n}$ e um escalar positivo ν que satisfaz:

$$\begin{bmatrix} \Upsilon_{11m} & \Upsilon_{12} & QC'_p + Y'\mathbf{D}'_p \\ \Upsilon'_{12} & -\Upsilon_{22} & 0_{N(n+1) \times 1} \\ \mathbf{C}_p Q + \mathbf{D}_p Y & 0_{N(n+1) \times 1} & -\nu \end{bmatrix} < 0, \quad (3.12)$$

sendo $m = 1, \dots, n_\lambda$ e

$$\begin{aligned} \Upsilon_{11m} &= He\{A_m Q + BY\} + \sum_{i=1}^N S_i + 2\alpha Q, \\ \Upsilon_{12} &= \begin{bmatrix} e^{\alpha\tau_0} A_{d1} Q & \dots & e^{\alpha N\tau_0} A_{dN} Q \end{bmatrix}, \\ \Upsilon_{22} &= \text{diag}\{S_1, \dots, S_N\}. \end{aligned}$$

A partir deste teorema, segue que o valor de K pode ser obtido pela solução do seguinte problema de otimização:

$$\min_{Q, Y, S_i} \nu \quad \text{sujeita a (3.12)} . \quad (3.13)$$

sendo então

$$K = YQ^{-1} \quad (3.14)$$

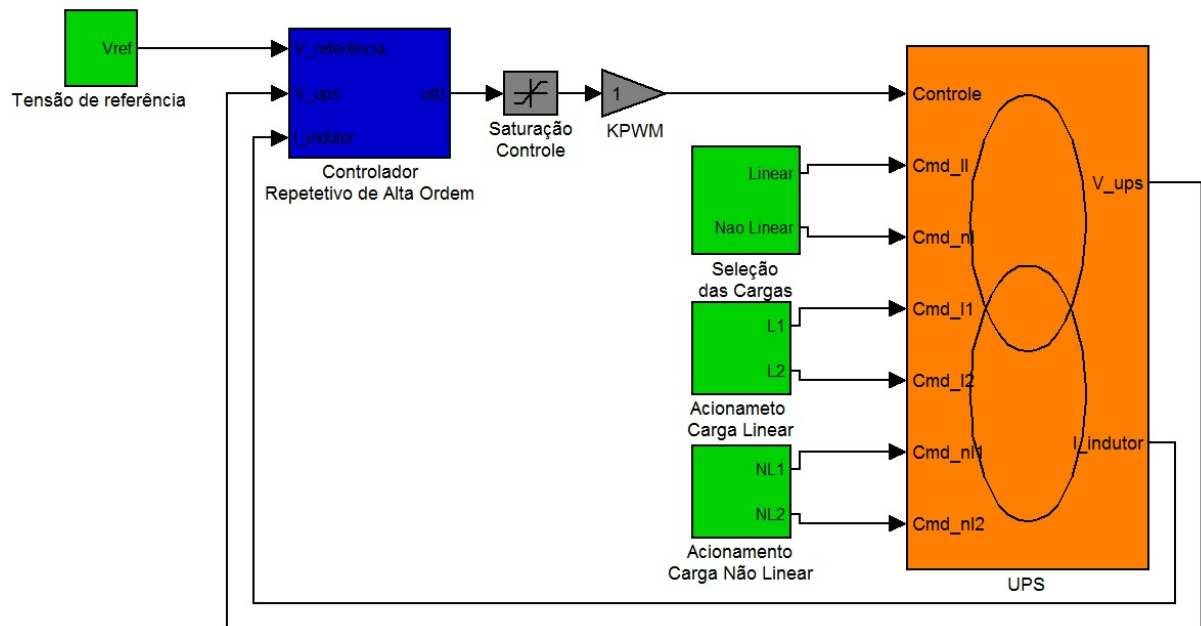
4 Metodologia e Simulação

Neste capítulo será retratado o ambiente de simulação e a metodologia adotada para averiguar a eficácia do HOCR. Todos estes dados foram obtido com base no trabalho (LORENZINI, 2015).

4.1 Ambiente de Simulação

De modo a facilitar a simulação da UPS, esta foi separada em um bloco de controle, implementado através do *Simulink*, e um bloco de potência, implementado através do *PSIM*. A Fig 9 apresenta o diagrama completo com a parte de controle e potência montado no *Simulink*.

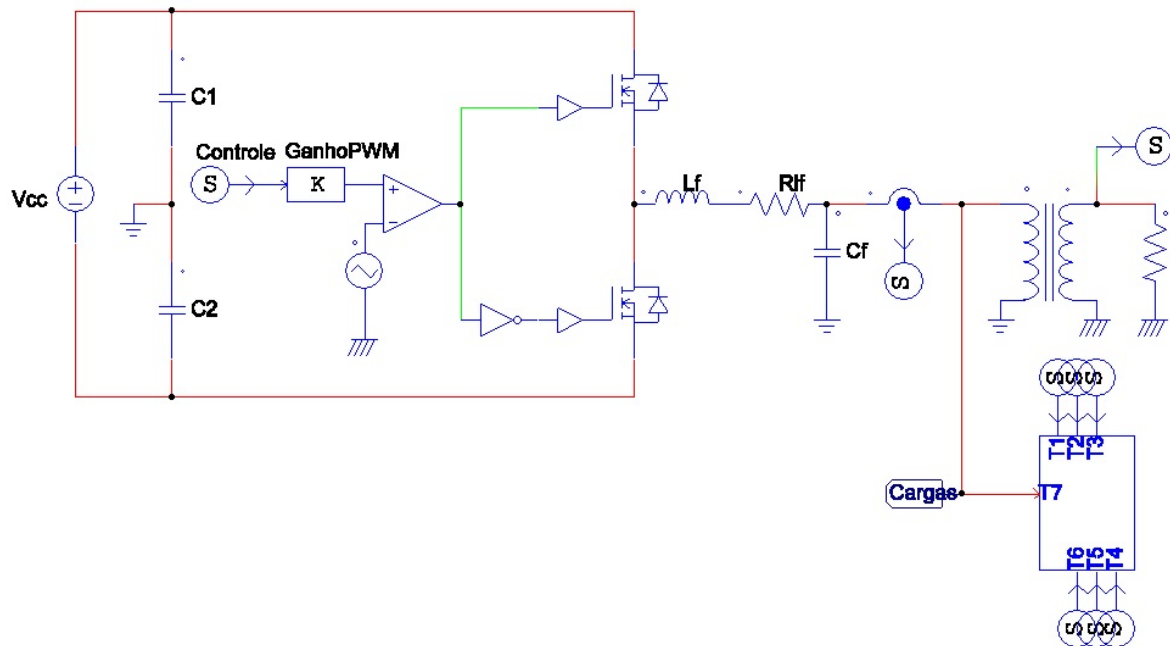
Figura 9: Diagrama utilizado para as simulações.



Fonte: Elaborada pelo autor

4.1.1 Potência

Para implementar o bloco de potência, se fez necessário primeiramente definir todos os parâmetros referentes à UPS a ser utilizada nos testes, as quais são apresentadas na tabela 1. As cargas lineares e não-lineares utilizadas na simulação foram determinadas de acordo com a norma IEC 62040-3 anexo E. Na Fig 10 é mostrado o esquema montado no *PSIM* pra simular a UPS.

Figura 10: Diagrama elétrico da UPS, obtido através do *PSIM*.

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 1: Parâmetros da UPS adotada

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade
P_n	Potência nominal	3500	VA
V_{ref}	Tensão eficaz da referência	127	V
f_0	Frequência da referência	60	Hz
V_{CC}	Tensão do barramento CC	520	V
C_1 e C_2	Capacitores do barramento CC	6600	μF
f_s	Frequência de chaveamento dos IGBTs	21.6	kHz
R_{L_f}	Resistência do indutor L_f	15	m Ω
L_f	Indutância do filtro LC	1	mH
C_f	Capacitância do filtro LC	300	μF

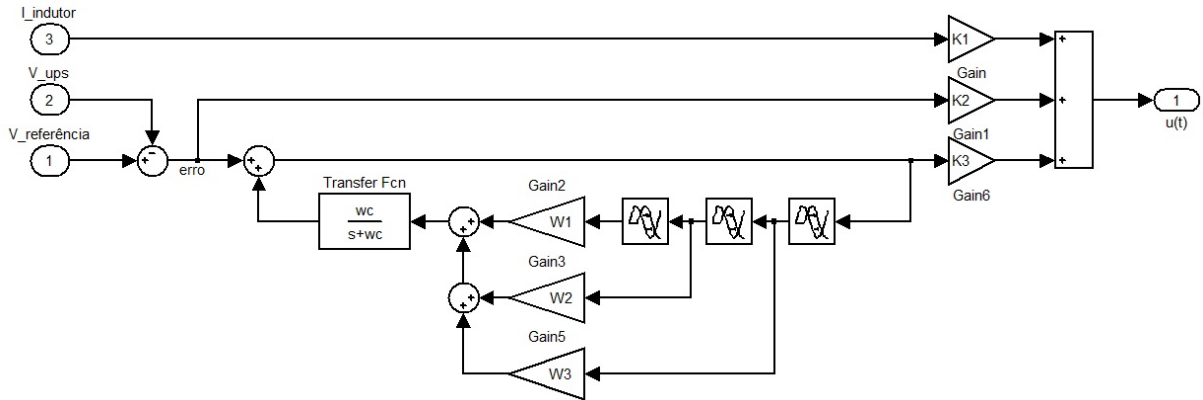
4.1.2 Controle

Para simular o bloco de controle, primeiramente se fez necessário construir uma rotina capaz de determinar os ganhos associados ao controlador através do algoritmo de otimização descrito na seção 3.3. O próximo passo foi então implementar o controlador utilizando a ferramenta de simulação *Simulink*, o diagrama montado pode ser visto na Fig. 11.

4.2 Metodologia

Para avaliar o desempenho da UPS implementada com o controlador HORC, esta será submetida a diversas simulações. Serão obtidos resultados para G_{HORC} com e sem

Figura 11: Diagrama montado no *Simulink* para simulação do controlador HORC de ordens 1, 2 e 3.



Fonte: Elaborada pelo autor

a correção proposta por (LORENZINI, 2015). Espera-se que, à medida que a ordem do controlador aumente, também aumente sua robustez a variações de frequência.

Primeiramente será necessário obter resultados de referência, os quais serão então comparados com o controlador HORC. Como mostrado anteriormente, o controlador repetitivo em sua formulação original, nada mais é do que o HORC para quando $N = 1$. No trabalho de (LORENZINI, 2015) são apresentadas análises referentes ao uso do controlador repetitivo aplicado a sistemas UPS, estas análises serviram então como base de referência para os resultados obtidos com os controladores HORC.

Tendo uma base de referência pode-se seguir ao próximo passo, onde tem-se como objetivo principal analisar a robustez do controlador repetitivo de alta ordem a variações de frequência. Sendo assim, serão obtidos resultados referentes ao comportamento da saída da UPS, quando seu sinal de referência sofrer variações de $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$ em sua frequência fundamental f_0 .

Em uma segunda análise, propõem-se obter a resposta no domínio da frequência deste sistema UPS. Para isso, será aplicado um sinal de referência com sua frequência variando de forma linear e então plotado o sinal de erro relativo, obtido através da seguinte equação:

$$e_r(\omega) = \frac{V_{ref}(\omega) - V_{out}(\omega)}{V_{ref_p}} \quad (4.1)$$

sendo $V_{ref}(\omega)$ e $V_{out}(\omega)$, respectivamente, a tensão de referência e saída da UPS para uma dada frequência ω e V_{ref_p} o valor de pico da tensão de referência.

Todas as simulações foram elaboradas com a UPS operando com toda a carga não linear aplicada e com os parâmetros α (taxa de decaimento das trajetórias) e ω_c (frequência de corte do filtro $F(s)$) determinados de forma a obter máximo desempenho na frequência fundamental.

5 Resultados e Discussões

Neste capítulo serão apresentados, através de gráficos e tabelas, os resultados obtidos com as simulações dos controladores HORC de primeira, segunda e terceira ordem e por último será feita uma síntese dos resultados.

Os valores de α e ω_c utilizados nas simulações podem ser conferidos na Tabela 2. Estes valores foram escolhidos de tal forma que o sinal de controle não viole o limite de $V_{cc}/2$ em regime permanente.

Tabela 2: Parâmetros α e ω_c adotados para os controladores HORC

Ordem N	Correção (LORENZINI, 2015)	α	ω_c (rad/s)
1	Não	35	3500
1	Sim	35	2500
2	Não	15	500
2	Sim	15	200
3	Não	1	300
3	Sim	1	150

5.1 HORC de Primeira Ordem

Nas Tabelas 3 e 4 são apresentados, respectivamente, os valores de THD e valor RMS da saída da UPS. A partir destas tabelas pode-se aferir algumas características do controlador repetitivo. Primeiramente percebe-se que, assim como previsto teoricamente, o controlador repetitivo tem uma grande perda de desempenho quando sua referência sofre variações em sua frequência.

Analisando a Tabela 3, percebe-se que o THD da saída da UPS viola a norma ANSI/IEEE Std 944 (THD máximo igual a 5%) para qualquer variação maior ou igual a $\pm 5\%$ na frequência do sinal de referência e viola também a norma IEC 62040-3 (THD máximo igual a 8%) para variações maiores ou iguais a $\pm 10\%$. Na Tabela 4 temos um resultado similar, onde a tensão de saída da UPS viola a norma ANSI/IEEE Std 944 (erro na tensão de saída máximo de 2%) para qualquer variação menor ou igual a -5% na frequência do sinal de referência.

Seguindo com os resultados para o HORC de primeira ordem, as Fig. 12 e 13 apresentam, respectivamente, a resposta no domínio da frequência, $e_r(\omega)$, da UPS para o controlador G_{HORC} sem e com a correção proposta por (LORENZINI, 2015). Examinando os gráficos, percebe-se claramente o comportamento esperado para um controlador

Tabela 3: Valores de THD da tensão de saída da UPS implementada com o controlador HORC de primeira ordem

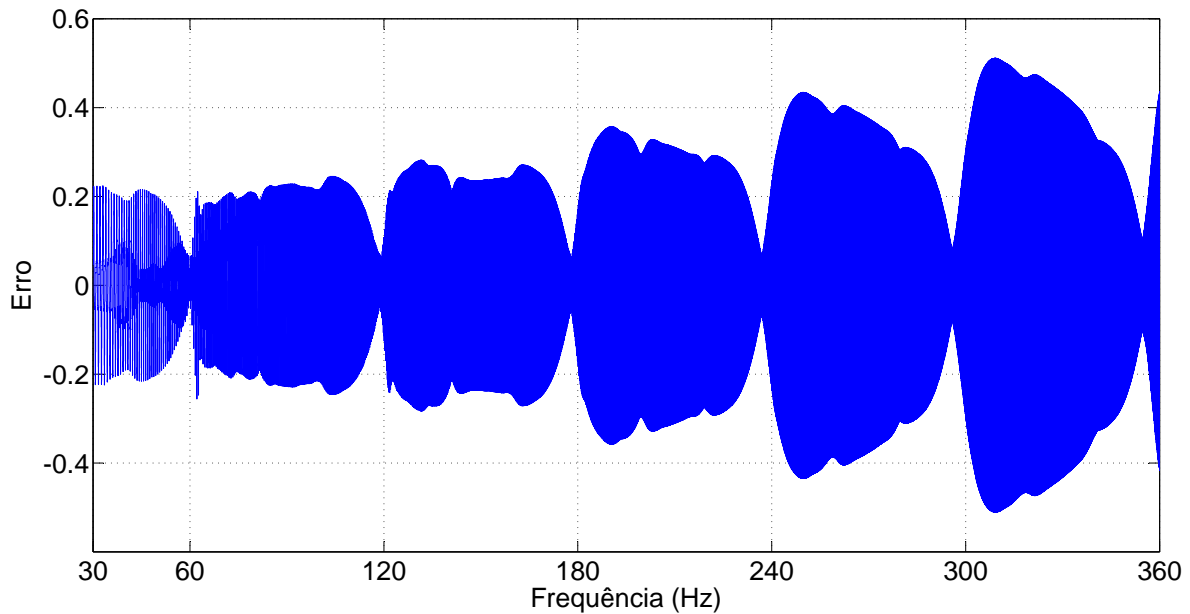
Correção (LORENZINI, 2015)	THD (%)				
	-10%	-5%	f_0	5%	10%
Não	7.934	5.905	4.777	8.769	8.972
Sim	8.703	7.001	2.023	8.459	9.68

Tabela 4: Erro no valor RMS da tensão de saída, em relação ao valor nominal, da UPS implementada com o controlador HORC de primeira ordem

Correção (LORENZINI, 2015)	V_{RMS} erro (%)				
	-10%	-5%	f_0	5%	10%
Não	-7.17	-2.91	0.79	1.42	-0.31
Sim	-8.74	-4.49	-0.16	1.50	0.79

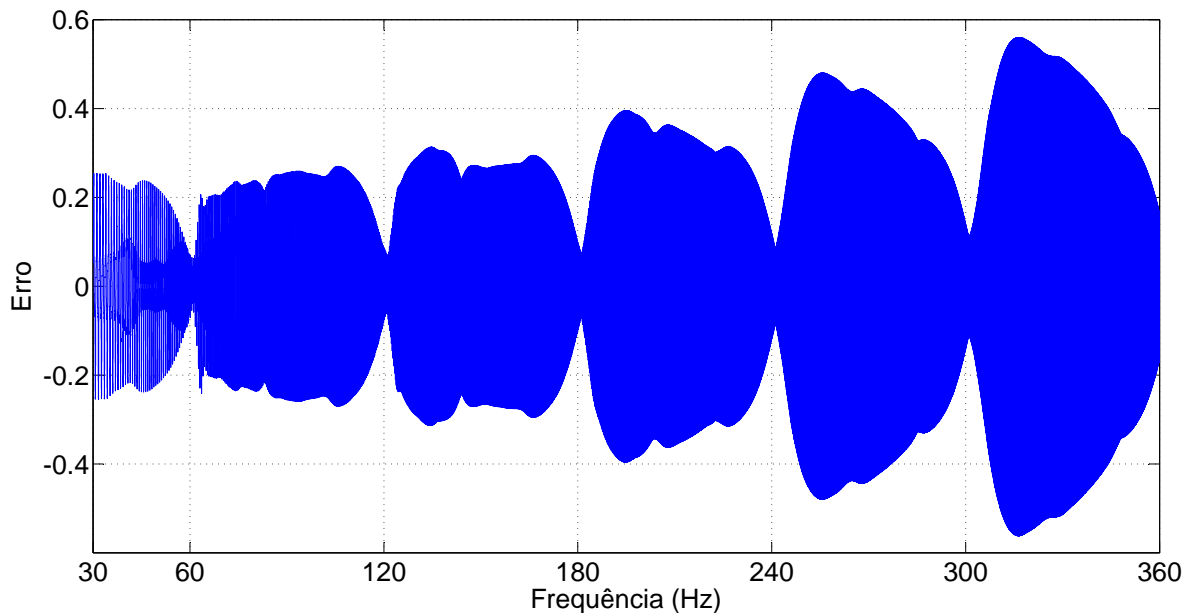
repetitivo, tendo as zonas de baixo erro localizadas estritamente próximas da frequência fundamental e de suas harmônicas. Além disso, nota-se que o erro aumenta nas altas frequências decorrente da atenuação causada pelo filtro $F(s)$.

Através das tabelas e dos gráficos expostos, pode-se aferir também que a correção proposta por (LORENZINI, 2015) centraliza as zonas de baixo erro na frequências de interesse, comprovando assim a correção, parcial, da fase do controlador repetitivo.

Figura 12: Análise na frequência do erro relativo para o controlador G_{HORC} , sendo $N = 1$ e sem a correção proposta por (LORENZINI, 2015)

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 13: Análise na frequência do erro relativo para o controlador G_{HORC} , sendo $N = 1$ e com a correção proposta por (LORENZINI, 2015)



Fonte: Elaborada pelo autor

5.2 HORC de Segunda Ordem

Nas Tabelas 5 e 6 são apresentados, respectivamente, os valores de THD e valor RMS da saída da UPS quando operando em regime permanente e com máxima carga não-linear aplicada na saída.

Comparando as Tabelas 3 e 5 é possível verificar uma redução na THD da tensão de saída para quando o sinal de referência sofre variações na frequência, entretanto, este mesmo parâmetro é agravado quando a UPS opera em condições normais de frequência. Nota-se que a norma ANSI/IEEE Std 944 (THD máximo igual a 5%) apenas é atendida nos casos com a correção proposta por (LORENZINI, 2015) para variações positivas na frequência, no entanto, a norma IEC 62040-3 (THD máximo igual a 8%) é atendida em praticamente todos os casos.

Comparando agora as Tabelas 4 e 6, verifica-se uma redução no erro do valor RMS da tensão de saída da UPS. Analisando a Tabela 6, observa-se que basicamente todos os casos atendem a norma ANSI/IEEE Std 944 (erro na tensão de saída máximo de 2%).

Continuando com a apresentação dos resultados obtidos para o HORC de segunda ordem, nas Fig. 14 e 15 são mostrados, respectivamente, a resposta no domínio da frequência, $e_r(\omega)$, da UPS com e sem a correção proposta por (LORENZINI, 2015). Pode-se notar um comportamento próximo ao esperado para o HORC de segunda ordem, tendo as regiões de menor erro distribuídas ao longo de uma faixa maior de frequência, se comparado com

Tabela 5: Valores de THD da tensão de saída da UPS implementada com o controlador HORC de segunda ordem

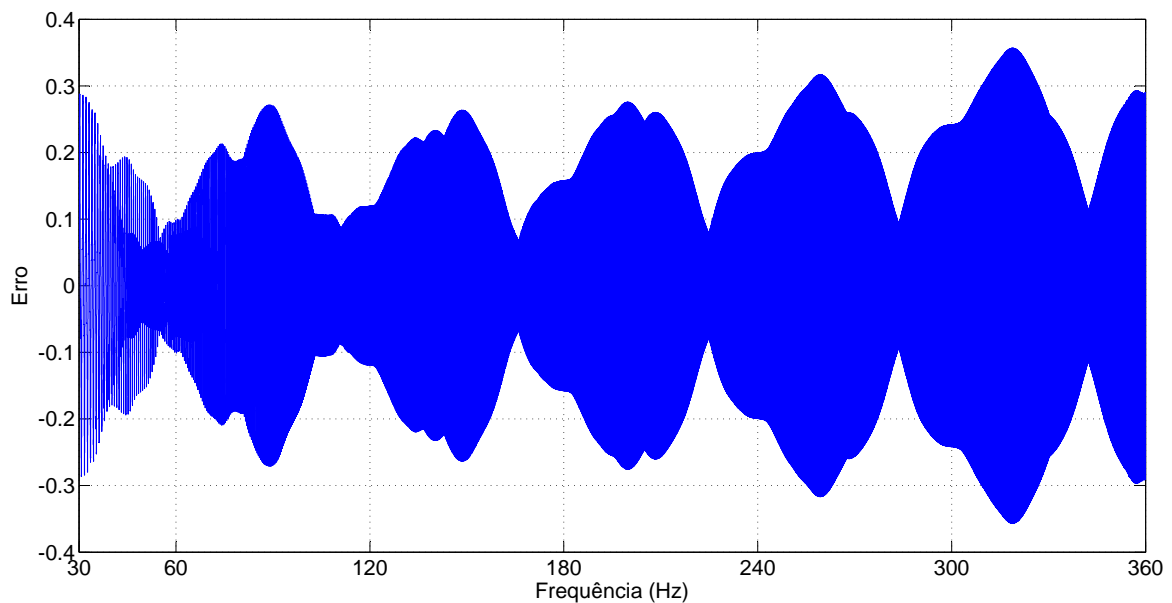
Correção (LORENZINI, 2015)	THD (%)				
	-10%	-5%	f_0	5%	10%
Não	4.113	3.954	5.119	6.443	8.201
Sim	6.519	6.844	5.972	4.578	3.983

Tabela 6: Erro no valor RMS da tensão de saída, em relação ao valor nominal, da UPS implementada com o controlador HORC de segunda ordem

Correção (LORENZINI, 2015)	RMS (%)				
	-10%	-5%	f_0	5%	10%
Não	2.36	0.16	-0.47	0.16	1.81
Sim	0.71	1.02	0.24	-1.18	-2.68

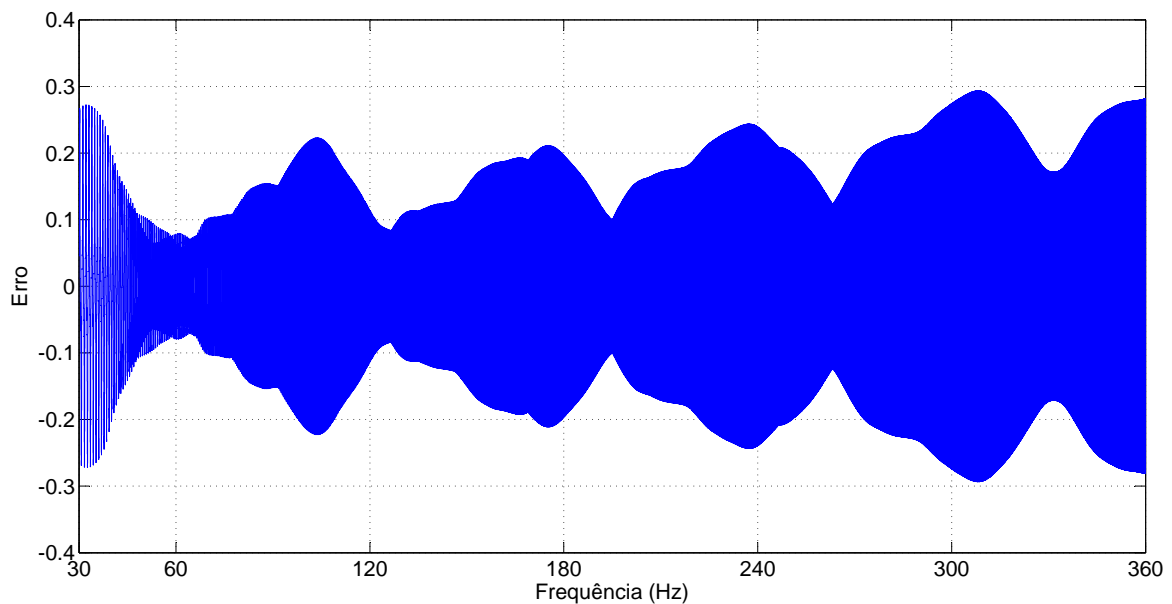
o controlador repetitivo.

Nota-se também que o método de correção descrito por (LORENZINI, 2015) já não se mostra tão efetivo como no controlador repetitivo, apesar de ainda garantir que o primeiro pico de ressonância ainda esteja localizado na frequência fundamental. .

Figura 14: Análise na frequência do erro relativo para o controlador G_{HORC} , sendo $N = 2$ e sem a correção proposta por (LORENZINI, 2015)

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 15: Análise na frequência do erro relativo para o controlador G_{HORC} , sendo $N = 2$ e com a correção proposta por (LORENZINI, 2015)



Fonte: Elaborada pelo autor

5.3 HORC de Terceira Ordem

O controlador HORC de terceira ordem exige demasiado esforço do sinal de controle, ultrapassando assim os limites de $u(t)$. Isto se deve ao elevado valor do ganho K projetado (3.14). Porém, assumindo um link CC de tensão igual a 800V, foi então possível lograr os resultados descritos abaixo.

Nas Tabelas 7 e 8 são mostrados, respectivamente, os resultados obtidos para a THD e valor RMS da tensão de saída da UPS com o controlador HORC de terceira ordem, onde pode-se ver claramente uma melhora quando comparado com os controladores evidenciados anteriormente.

Ao analisar os resultados, pode-se perceber que a correção proposta em (LORENZINI, 2015), se comparado com os resultados obtidos sem a correção, tem um efeito negativo para com o controlador HORC de terceira ordem, tendo um elevado THD na componente fundamental e se mostrando fraco quanto ao desempenho da saída da UPS para variações na frequência.

A partir da Tabela 7, pode-se notar que a norma IEC 62040-3 (THD máximo igual a 8%) é atendida para todos os casos e que a norma ANSI/IEEE Std 944 (THD máximo igual a 5%) é violada apenas no teste onde foi aplicada uma variação positiva de 10% na frequência da tensão de referência, para o caso sem correção.

Analisando agora o valor RMS da tensão da saída, percebe-se que a norma

ANSI/IEEE Std 944 (erro na tensão de saída máximo de 2%) é atendida para todos os casos com o controlador projetado sem nenhuma correção.

Tabela 7: Valores de THD da tensão de saída da UPS implementada com o controlador HORC de terceira ordem

Correção (LORENZINI, 2015)	THD (%)				
	-10%	-5%	f_0	5%	10%
Não	3.99	4.44	4.21	4.51	7.38
Sim	4.33	6.11	6.18	4.30	3.11

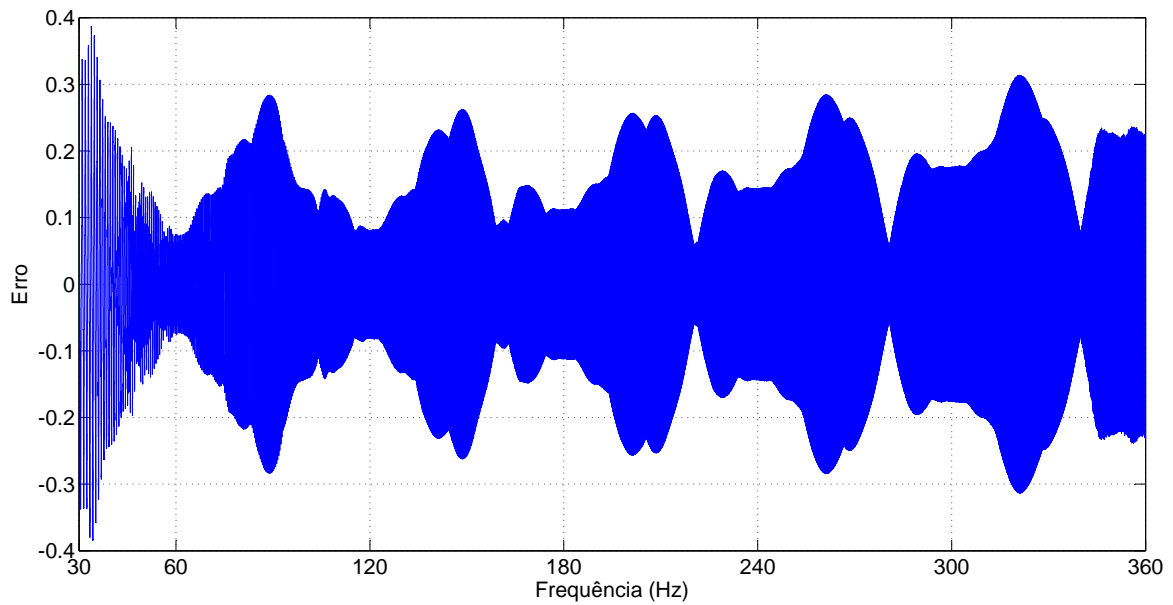
Tabela 8: Erro no valor RMS da tensão de saída, em relação ao valor nominal, da UPS implementada com o controlador HORC de terceira ordem

Correção (LORENZINI, 2015)	RMS (%)				
	-10%	-5%	f_0	5%	10%
Não	-0.63	-1.39	-1.39	-1.40	-0.44
Sim	4.87	2.53	0.24	-1.85	-3.01

Assim como para os controladores HORC de primeira e segunda ordem, também foi realizada uma análise no domínio da frequência do erro relativo $e_r(\omega)$ para este controlador, como pode ser visto nas Figuras 16 e 17.

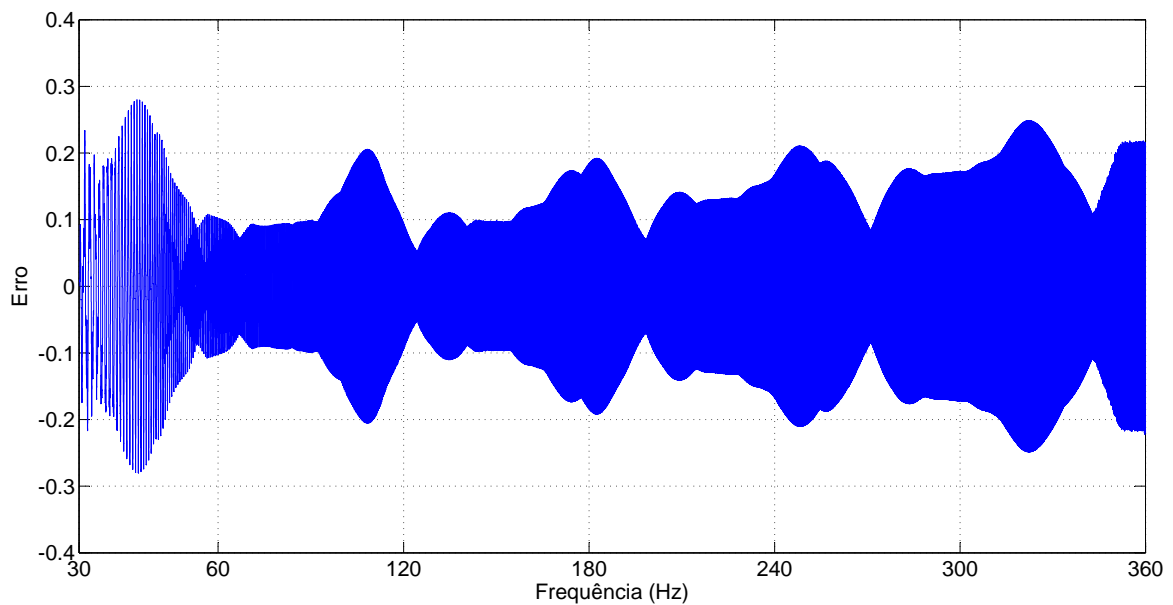
Na Fig. 16 percebe-se que as zonas de menor erro se apresentam bastante similares ao resultado obtido para o controlador repetitivo de segunda ordem, apesar de aparentar estarem levemente mais espalhadas em torno da frequência fundamental e suas harmônicas. Os resultados mostrados na Fig. 17, apenas servem para reiterar que a correção proposta em (LORENZINI, 2015) se mostra pouco eficiente para o controlador repetitivo de terceira ordem.

Figura 16: Análise na frequência do erro relativo $e_r(\omega)$ para o controlador G_{HORC} , sendo $N = 3$.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 17: Análise na frequência do erro relativo $Erro_r(\omega)$ para o controlador G_{HORC} , sendo $N = 3$ e com a correção proposta em (LORENZINI, 2015).

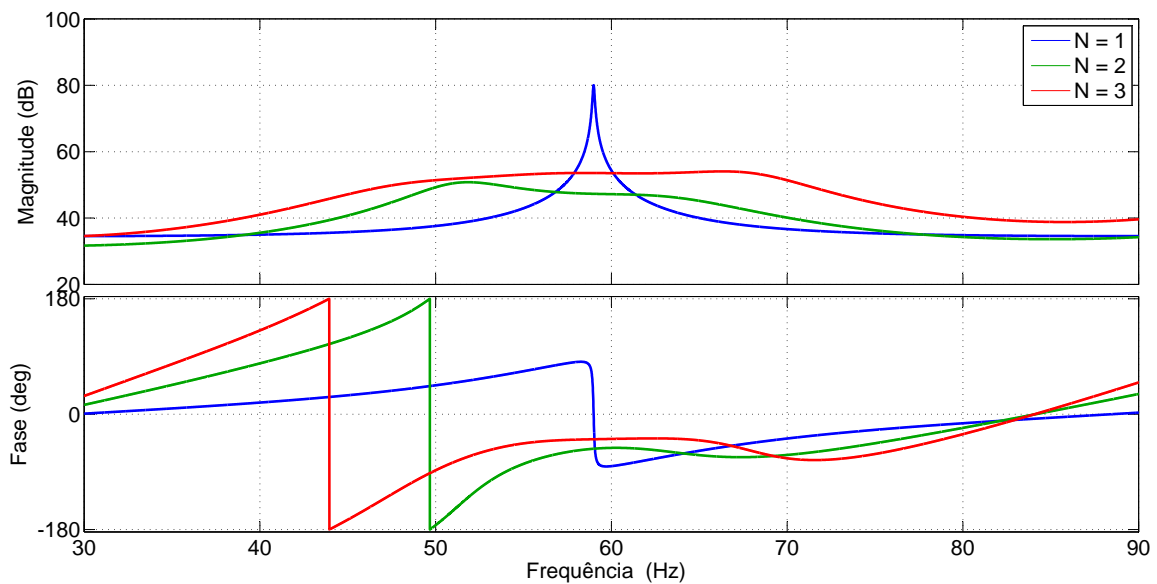


Fonte: Elaborada pelo autor

5.4 Resultados Finais

De forma a facilitar a visualização dos resultados, foi então plotado o diagrama de bode para os controladores HORC de primeira, segunda e terceira ordem, sem a correção proposta por (LORENZINI, 2015), estes diagramas de bode foram obtido utilizando os ganhos K calculados na otimização e com o filtro $F(s)$ já implementado.

Figura 18: Diagrama de bode do controlador HORC de primeira, segunda e terceira ordem



Fonte: Elaborada pelo autor

Analisando os resultados obtidos anteriormente, percebe-se uma melhora significativa entre o controlador repetitivo em sua forma original e o HORC. Entre os controladores testados, tem-se que o HORC de segunda ordem foi o que apresentou os melhores resultados, mantendo o sinal de controle dentro dos limites de operação e ao mesmo tempo tendo baixo erro RMS e um THD aceitável. Para que isso fosse possível, foi necessário o uso de um w_c baixo ($500rad/s$ para o caso sem correção e $200rad/s$ para o caso com correção). Sabe-se, no entanto, que o uso de um baixo valor de ω_c tende a aumentar o erro de seguimento do sistema. De forma a deixar isto claro, foram obtidos resultados para o RC tendo $\alpha = 15$ e $\omega_c = 500$, estes resultados podem ser vistos nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9: Valores de THD da tensão de saída da UPS implementada com o RC, sendo $\alpha = 15$ e $\omega_c = 500rad/s$

Correção (LORENZINI, 2015)	THD (%)				
	-10%	-5%	f_0	5%	10%
Não	7.26	6.61	8.77	9.81	9.76
Sim	9.63	8.72	7.39	6.77	8.38

Tabela 10: Erro no valor RMS da tensão de saída, em relação ao valor nominal, da UPS implementada com o RC, sendo $\alpha = 15$ e $\omega_c = 500rad/s$

Correção (LORENZINI, 2015)	V_{RMS} erro (%)				
	-10%	-5%	f_0	5%	10%
Não	-3.99	2.86	-4.47	-7.48	-11.14
Sim	-11.8	-7.65	-4.38	-3.33	-4.54

Com base nas Tabelas 9 e 10 pode-se perceber que o controlador repetitivo teve uma queda considerável em seu desempenho para um ω_c baixo, demonstrando valores demasiado elevados de erro RMS e THD da tensão de saída. Mostrando assim que, mesmo com o HOCR de segunda ordem tendo de se utilizar de um valor de frequência de corte baixo (Tabelas 5 e 6), este ainda manteve um bom desempenho se comparado ao RC sob condições semelhantes.

6 Conclusões

Este trabalho possibilitou verificar a robustez do controlador repetitivo de alta ordem aplicado a fontes ininterruptas de energia, sendo este submetido variações em sua frequência de referência. Todas as conclusões aqui expostas são feitas com base nos resultados obtidos através de diversas simulações do sistema UPS/HORC apresentado.

Por se tratar de um controlador de alto ganho, a amplitude do sinal de controle tende a aumentar conforme a ordem HORC também aumenta. Para que o sinal de controle ficasse entre os limites de operação foi necessária uma redução significativa nos valores de α e ω_c . Ainda assim, foi possível realizar os testes propostos e obter resultados satisfatórios.

O controlador repetitivo de primeira ordem, ou apenas controlador repetitivo, assim como já demonstrado em outros trabalhos (LORENZINI, 2015) se mostrou bastante efetivo para sistemas com sinal de referência de frequência constante. Entretanto, este tipo de controlador se demonstrou pouco eficiente para sinais de referência com frequência incerta, tendo um grande declínio em seu desempenho para qualquer variação superior a 5% do valor fundamental da frequência.

Assim como o esperado teoricamente, os controladores repetitivos de ordem superior se revelaram mais robustos a variações na frequência, ainda que tendo resultados menos satisfatórios para a UPS operando com frequência fundamental. Isso se justifica pelo emprego de um valor menor de ω_c quando comparado ao controlador repetitivo original. Esta limitação em ω_c também é a possível causa da perda de desempenho da correção do controlador repetitivo proposta em (LORENZINI, 2015).

Devido a limitação adotada para a excursão do sinal de controle $u(t)$, apenas foi possível simular, de forma satisfatória, o controlador repetitivo de segunda ordem. Com tudo, também foram apresentados os resultados referentes ao HORC de terceira ordem para o caso de um possível aumento nos limites de excursão.

Para o HORC de terceira ordem, obteve resultados satisfatórios no quesito de desempenho, demonstrando-se o mais robusto a variações na frequência, dos controladores testados. No entanto este necessita de um link CC demasiado elevado para que possa ser aplicável, o que torna sua implementação menos atrativa.

O controlador repetitivo de segunda foi, entre os controladores testados, o que apresentou melhor resultado. Pode-se constatar um aumento considerável em seu desempenho, se comparado com o controlador repetitivo em sua forma original, tendo uma oscilação aceitável no valor RMS da tensão saída da UPS, para a variação de $\pm 5\%$ na frequência fundamental do sinal de referência e mantendo também a distorção harmônica abaixo do

limite imposto pela norma IEC 62040-3, para esta mesma variação. Ao mesmo tempo este controlador foi capaz de manter o sinal de controle dentro dos limites impostos, ainda que implementado com um ω_c baixo.

Com este trabalho pode-se afirmar, com base nos resultados de simulação, que o controlador repetitivo de alta ordem cumpre com o esperado para seu desempenho. No entanto, para situações onde a frequência da tensão de referência for constante, o controlador repetitivo ainda se mostra a melhor opção. Como seguimento deste trabalho, fica a implementação deste controlador em sistemas UPS reais e o desenvolvimento de uma correção baseada nas demais frequências e não só na fundamental

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15014:2003*: Conversor a semicondutor - sistema de alimentação de potência ininterrupta, com saída em corrente alternada (nobreak) - terminologia. Rio de Janeiro, 2003. 5 p. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 16.

BONAN, G. et al. Repetitive controller design for uninterruptible power supplies: An lmi approach. In: *IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 704–709. ISSN 1553-572X. Citado na página 20.

CHEN, S. et al. Optimal design of repetitive controller for harmonic elimination in pwm voltage source inverters. In: *Telecommunications Energy Conference, 2007. INTELEC 2007. 29th International*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 236–241. Citado na página 18.

DECKER, I. et al. Performance of a synchronized phasor measurements system in the brazilian power system. In: *Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 8 pp.–. Citado na página 14.

FLORES, J. V.; SALTON, A. T.; CASTRO, R. S. Robust state feedback formulation for high order repetitive controllers. *Asian Journal of Control*, p. n/a–n/a, 2015. ISSN 1934-6093. Citado 3 vezes nas páginas 23, 25 e 26.

FRANCIS, B.; WONHAM, W. The internal model principle for linear multivariable regulators. *Applied Mathematics and Optimization*, Springer-Verlag, v. 2, n. 2, p. 170–194, 1975. ISSN 0095-4616. Citado na página 20.

GARCIA-CERRADA, A. et al. Application of a repetitive controller for a three-phase active power filter. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, v. 22, n. 1, p. 237–246, Jan 2007. ISSN 0885-8993. Citado na página 14.

GRÜNDLING, H.; MICHELS, L.; STEFANELLO, M. Controlador repetitivo para inversores pwm com referência de frequência variável. *Revista Controle & Automação*, v. 20, n. 3, p. 394–404, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.

HAN, S.-Y. et al. Optimal vibration control for vehicle active suspension discrete-time systems with actuator time delay. *Asian Journal of Control*, v. 15, n. 6, p. 1579–1588, 2013. ISSN 1934-6093. Citado na página 20.

HARA, S. et al. Repetitive control system: a new type servo system for periodic exogenous signals. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, v. 33, n. 7, p. 659–668, Jul 1988. ISSN 0018-9286. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. *ANSI/IEEE Std 944*: Recommended practice for the application and testing of uninterruptible power supplies for power generating stations. New York City, 1986. 7 p. Citado na página 16.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC 62040-3:2011*: Uninterruptible power supplies (ups) - part 3: Method of specifying the performance and test requirements. Genebra, Suíça, 2011. 214 p. Citado na página 16.

- JUNG, S.-L.; HUANG, H.-S.; TZOU, Y.-Y. A three-phase pwm ac-dc converter with low switching frequency and high power factor using dsp-based repetitive control technique. In: *Power Electronics Specialists Conference, 1998. PESC 98 Record. 29th Annual IEEE. [S.l.: s.n.]*, 1998. v. 1, p. 517–523 vol.1. ISSN 0275-9306. Citado na página 14.
- LI, Z.; HOU, Z. Adaptive iterative learning control based high speed train operation tracking under iteration-varying parameter and measurement noise. *Asian Journal of Control*, v. 17, n. 5, p. 1779–1788, 2015. ISSN 1934-6093. Citado na página 20.
- LORENZINI, C. *Desenvolvimento de um Controlador Ressonante-repetitivo Aplicado a Fontes Ininterruptas de Energia (UPS)*. Dissertação de Mestrado — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015. Citado 17 vezes nas páginas 8, 14, 18, 19, 21, 28, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39 e 40.
- MAO, W.-J.; CHU, J. D-stability for linear continuous-time systems with multiple time delays. *Automatica*, v. 42, n. 9, p. 1589–1592, 2006. ISSN 0005-1098. Citado na página 26.
- MATTAVELLI, P.; MARAFAO, F. Repetitive-based control for selective harmonic compensation in active power filters. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, v. 51, n. 5, p. 1018–1024, Oct 2004. ISSN 0278-0046. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.
- PEREIRA, L. A. et al. Multiple resonant controllers for uninterruptible power supplies: A systematic robust control design approach. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, v. 61, n. 3, p. 1528–1538, March 2014. ISSN 0278-0046. Citado na página 18.
- RAMOS, G. A.; COSTA-CASTELLÓ, R.; OLM, J. M. Precompensated second order repetitive control of an active filter under varying network frequency. *Asian Journal of Control*, v. 17, n. 4, p. 1243–1254, 2015. ISSN 1934-6093. Citado na página 20.
- RODRIGUES, A. *Estudo e implementação de estratégias de controle aplicadas a fontes ininterruptas de energia*. Dissertação de Mestrado — Universidade de São Paulo, 2010. Citado na página 14.
- STEINBUCH, M. Repetitive control for systems with uncertain period-time. *Automatica*, v. 38, n. 12, p. 2103–2109, 2002. ISSN 0005-1098. Citado 3 vezes nas páginas 14, 23 e 24.
- TZOU, Y.-Y. et al. High-performance programmable ac power source with low harmonic distortion using dsp-based repetitive control technique. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, v. 12, n. 4, p. 715–725, Jul 1997. ISSN 0885-8993. Citado na página 14.
- WANG, Y. et al. Fractional delay based repetitive control with application to pwm dc/ac converters. In: *Control Applications, 2007. CCA 2007. IEEE International Conference on. [S.l.: s.n.]*, 2007. p. 928–933. Citado na página 14.