

## Controle de um Retificador Buck-boost de Elevado Fator de Potência para Acionamentos de LED's

Pedro Henrique C. Lopes\* Josué L. da Silva\*\*  
Nayara M. S. Rocha, Pedro S. Almeida, André A. Ferreira\*\*\*

\* Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF, MG, (e-mail: pedrohenrique.lopes@estudante.ufjf.br).

\*\* Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET, MG

\*\*\* Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF, MG.

**Abstract:** In Brazil, public lighting consumes about 97 billion kWh per year, featuring lamps with low luminous efficiency. To reduce consumption, one solution is to increase the use of lamps with greater luminous efficacy, such as LED (Light Emitting Diode) lamps. For its activation, an AC-DC conversion process for rectification of the network voltage is necessary, which causes some power quality problems, such as a distortion of the network current and a low power factor. To solve these effects, this work uses active power factor correction methods, through a buck-boost converter such as PFC (Power Factor Correction) to emulate a purely resistive load, knowing that its operation in mode discontinuous has an intrinsic function of PFC. An exhaustive study was developed in order to design the control in the converter to protect against possible disturbances and to comply with the IEC 61000-3-2 standard. These measurements ensured system operation with power factor above 0,98 and total harmonic distortion close to zero.

**Resumo:** No Brasil, a iluminação pública consome cerca de 97 bilhões de kWh por ano, apresentando lâmpadas com baixa eficácia luminosa. Para diminuir o consumo, uma das soluções é aumentar o uso de lâmpadas com maior eficácia luminosa, como as lâmpadas LED (Light Emitting Diode). Para seu acionamento, é necessário um processo de conversão CA-CC para retificação na tensão da rede, o que acarreta alguns problemas de qualidade de energia, como uma distorção da corrente da rede e um baixo fator de potência. Para solucionar esses efeitos, este trabalho utiliza-se de métodos de correção ativa do fator de potência, através de um conversor buck-boost como PFC (Power Factor Correction) para emular uma carga puramente resistiva, sabendo que sua operação em modo descontínuo tem função intrínseca de PFC. Foi desenvolvido um estudo exaustivo a fim de projetar controle no conversor para proteção contra possíveis perturbações e que atendessem à norma IEC 61000-3-2. Essas medidas garantiram uma operação do sistema com fator de potência acima de 0,98 e distorção harmônica total próxima a zero.

**Keywords:** Power Electronics. Lighting – LED. Rectifiers. Control. Power Factor Correction. Power Quality. Buck-boost.

**Palavras-chaves:** Eletrônica de Potência. Iluminação – LED. Retificadores. Controle. Correção do Fator de Potência. Qualidade de Energia. Buck-boost.

### 1. INTRODUÇÃO

No cenário atual, a iluminação pública brasileira ainda apresenta desatualização de sua tecnologia. São encontradas muito mais lâmpadas vapor de sódio, vapor de mercúrio e mistas de alta intensidade. Sendo as lâmpadas vapor de sódio em alta pressão (HPS, do inglês, *high pressure sodium*) as mais usadas, de acordo com os dados da Eletrobras em 2012, mostrados graficamente na Figura 1 e, numericamente, na Tabela 1 (Casagrande (2016)).

Porém, nos últimos anos, as lâmpadas LEDs (*Light Emitting Diode*) vêm ganhando seu espaço ao oferecer muitas vantagens. São elas: elevada vida útil, baixa produção de

Tabela 1. Tipos de lâmpadas instaladas na iluminação pública no Brasil em 2012.

Tipo de lâmpada	Quantidade absoluta	Percentual
Vapor de Sódio	11414217	71,05%
Vapor de Mercúrio	3799133	23,65%
Mista	283346	1,76%
Multivapores Metálicos	201218	1,25%
Incandescentes	188459	1,17%
Fluorescentes	160405	0,99%
Outros	17337	0,13%
Total	16064115	100%

calor, emissão de raios ultravioleta e infravermelho nula, dimerização facilitada, elevada eficiência luminosa, robu-

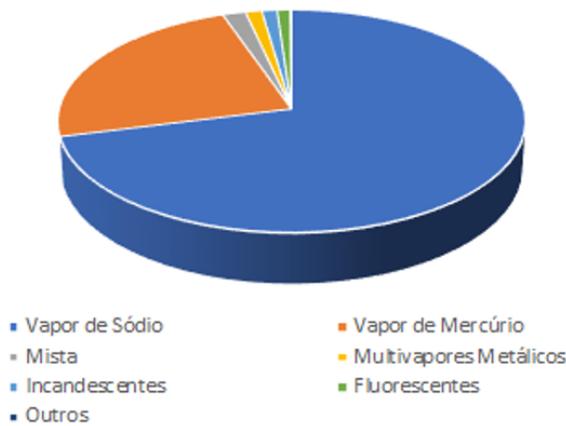


Figura 1. Panorama da iluminação pública no Brasil em 2012.

tez e ausência de vapor de mercúrio (e outros gases nocivos à saúde humana) (Motta (2017)).

Esta tecnologia de iluminação, criada em 1962, tem por principal característica sua alta eficácia. Esta tem crescido constantemente, chegando a alcançar uma melhoria significativa (Bernitz et al. (2006)). Alguns LEDs já chegam a uma eficácia luminosa de mais de  $100 \text{ lm/W}$  (lúmens por watt) (U.S. Energy Information Administration (2016)).

Nessa busca por um aumento na eficácia, o LED se torna importante para a iluminação pública quando se depara que o consumo energético por esse segmento alcança 9,7 bilhões de  $kWh/ano$  (W. Schulz (2016)). Além disso, as pesquisas buscam desenvolver *drivers* de acionamento mais robustos, para acionar de LEDs com potências elevadas. Estes aspectos justificam a importância dessa tecnologia na área de iluminação atualmente.

### 1.1 Norma IEC 61000-3-2

Este trabalho tem como intuito obter um *driver* de acionamento que ofereça uma qualidade de energia elevada. Para isso, é necessário que atenda a norma 61000-3-2 da IEC (*International Electrotechnical Commission*). Esta apresenta os limites de presença das correntes harmônicas injetadas na rede pública. Esta norma separa esses limites de acordo com a classe do equipamento usado. As classes são divididas em A, B, C e D. A maioria dos dispositivos de iluminação são encontrados na classe C, como lâmpadas incandescentes e LEDs. Alguns sistemas de iluminação também podem estar inseridos na classe D, de acordo com a potência da lâmpada (Santos (2007)). Como neste caso o equipamento é um *driver* de acionamento de LED, encaixa-se na classe C.

Os limites para esta classe são apresentados na Tabela 2. Na primeira coluna estão relacionadas a ordem das harmônicas que se aplicam a esta norma, e a segunda coluna contém o percentual permitido para cada harmônica em relação a fundamental.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A alimentação de um LED deve ser feita através de tensão contínua. No acionamento conectado à rede CA (corrente

Tabela 2. Limites para emissão de harmônicos de corrente nos equipamentos da classe C.

Ordem do harmônico $n$	% da Fundamental
2	2
3	$30 \cdot FP$
5	10
7	7
9	5
$11 < n < 39$	3

alternada), é necessário que haja o processo de retificação. Esta etapa pode causar alguns problemas de qualidade de energia, como fator de potência baixo e THD (*Total Harmonic Distortion*) elevada. Logo, é necessário uma etapa de correção, que pode ser feita através da inclusão somente de componentes passivos (correção passiva) ou pela implementação de elementos ativos no circuito (correção ativa).

O método ativo de correção consiste em adicionar um ou mais conversores CC-CC ao retificador. Estes são chamados de estágios PFC (*Power Factor Correction*), no qual há um interruptor controlado, que é possível projetar para os modos de condução, como o contínuo e o descontínuo. Por conta disso, é possível alcançar o funcionamento de retificadores quase ideais (Almeida (2012)). Este estágio PFC evita também a injeção de correntes harmônicas na rede (Nogueira (2013)). As soluções ativas permitem conciliar o elevado fator de potência juntamente com o controle da corrente e da potência no arranjo de LEDs.

A correção ativa é interessante por sua corrente de entrada acompanhar a forma de onda da tensão da rede, juntamente com um *ripple* de alta frequência. O que gera uma substituição nas harmônicas de baixa frequência para as de alta frequência. Para se eliminar essas harmônicas, é utilizado um filtro EMI, que são menos volumosos que os filtros tradicionais. Então, além da correção ativa assumir um compromisso com a eficiência na correção, este tipo de correção em determinadas topologias apresenta menor volume dos indutores e, conseqüentemente, conversores mais compactos (Gonzalez (2011)).

Há diversas topologias de montagem do conversor, que varia de acordo com a necessidade do projeto. Neste trabalho, será utilizada a topologia *buck-boost*. Este que tem um reduzido número de componentes e tem sua operação como elevador ou abaixador de tensão, possibilitando acionar cargas de LED de maior ou menor tensão. Outro fato importante dessa topologia é que sua operação em DCM (*Discontinuous Conduction Mode*) tem a função intrínseca de PFC, que é quando o conversor opera como PFC mesmo em malha aberta, o que não ocorre em outros modos de condução.

Em determinados países, são encontrados diferentes valores de tensão nominal. E o equipamento ainda pode ficar exposto a condições energéticas precárias, sem haver dispositivos de proteção, ficando totalmente vulnerável a distúrbios. Para essas situações, é preciso utilizar uma correção ativa, adicionando um controle em malha fechada, aumentando a faixa de tensão para operar (Bang e Park (2018)).

### 3. DESENVOLVIMENTO

#### 3.1 Projeto do conversor

O LED a ser acionado apresenta as especificações descritas na Tabela 3, que foram identificadas através de um experimento de variação de tensão e identificação da curva característica de um LED.

Na mesma tabela são apresentados os valores do projeto do conversor para que opere em modo de condução descontinuo, sendo que a razão cíclica crítica do sistema é igual a 0,3 . Este projeto leva em consideração a tensão fornecida pela rede e a tensão exigida pelo LED para que ele opere dentro de suas especificações. Sendo assim, são apresentados os valores das grandezas de cada componente do conversor e, juntamente, os valores dos componentes do filtro EMI, desenvolvido no trabalho de Lopes (2020).

Tabela 3. Limites para emissão de harmônicos de corrente nos equipamentos da classe C.

Símbolo	Descrição	Valor
$V_G$	Tensão de pico da rede	180 V
$f$	frequência da rede	60 Hz
$V_{io}$	Tensão limiar do LED	63,59 V
$R_D$	Resistência Dinâmica	44,84 $\Omega$
$D$	Razão Cíclica	0,25
$f_s$	Frequência de comutação	50 kHz
$L$	Indutância do Conversor	436 $\mu H$
$C_o$	Capacitância de saída	296 $\mu F$
$L_f$	Indutância do filtro EMI	22,89 mH
$C_f$	Capacitância do filtro	768 nF

#### 3.2 Identificação do Sistema

A fim de se obter o modelo do sistema, foi feito um experimento para identificação do mesmo, inserindo uma perturbação na razão cíclica do conversor e observado o comportamento da corrente. A intenção de se utilizar uma identificação dessa forma, é devido ao frequente uso da técnica em diversas áreas da engenharia. Permitindo que elementos não projetados (como a capacitância parasita do MOSFET), possam ser inseridos na dinâmica do processo (Coelho e dos Santos Coelho (2016)). Com esses dados, foi feita a aproximação da resposta para um sistema de segunda ordem, por meio da *toolbox* do *MATLAB*, *System Identification*. Na Figura 2, é encontrada a aproximação do sistema juntamente com o comportamento real. Pode-se perceber que a aproximação é a curva do valor médio encontrado no sistema.

A equação dessa aproximação, que é a função de transferência do sistema, é apresentada abaixo.

$$G(s) = \frac{i_o(s)}{d(s)} = \frac{20190}{(s+94,34)(s+169,49)} \quad (1)$$

#### 3.3 Projeto dos controladores

Com o intuito de proteger o sistema contra possíveis surtos (como afundamento e sobrelevação de tensão), foi realizado um comparativo entre diversos tipos de controladores para definir a melhor resposta para o sistema.

Projetando os controladores pelo lugar das raízes, foram utilizados tempo de assentamento ( $T_{sp}$ ) igual 50 ms, que é

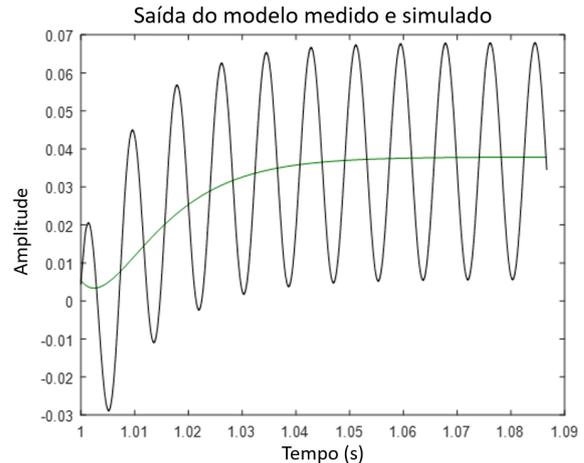


Figura 2. Aproximação do sistema.

o tempo simulado em malha aberta, e máximo sobressinal ( $UP\%$ ) de 15%. Deseja-se que a resposta não tenha erro de estado estacionário, por isso, foram descartados os controladores que não permitiam a anulação do erro. Outro ponto a se destacar, é que é necessário avaliar o desempenho do controlador no próprio circuito, para que observe se o controlador eleva a razão cíclica ao ponto do sistema operar em CCM (*Continuous Conduction Mode*) e os fatores de qualidade de energia, para assim, fazer a escolha do controlador.

Na Tabela 4 são apresentados os controladores projetados pelo lugar das raízes, juntamente com o tempo de assentamento, o máximo sobressinal e o erro percentual de estado estacionário referente a cada controlador para uma entrada em degrau.

Tabela 4. Controladores por Lugar das raízes.

Tipo	Função de Transferência C(s)	$T_{sp}$ (ms)	$UP\%$ (%)	Erro (%)
I	$\frac{20,7}{s}$	126	2,8	0
PI	$2 \cdot \frac{s+94,34}{s}$	45	40	0
PID	$0,017 \cdot \frac{(s+10)(s+164,79)}{s}$	296	0	0

Já para os projetos por resposta em frequência, foi projetado para uma margem de fase em  $50^\circ$ , que é referente a aproximadamente 15% de máximo sobressinal (Ogata (1985)). A Tabela 5 apresenta as funções de transferências dos controladores obtidos e seus parâmetros para análise com uma entrada em degrau.

Tabela 5. Controladores por Resposta em Frequência.

Tipo	Função de Transferência C(s)	$T_{sp}$ (ms)	$UP\%$ (%)	Erro (%)
I	$\frac{40,34}{s}$	136	18,17	0
PI	$\frac{s+94,38}{s}$	41,8	9,70	0
PID	$\frac{s^2+285,8 \cdot s+1586,4}{s}$	391,3	0	0

Foram selecionados um controlador de cada tipo das Tabelas 4 e 5 que apresentaram melhores resultados. Em seguida, foi feita uma análise gráfica das suas respectivas

respostas ao degrau do sistema controlado em malha fechada, mostradas na Figura 3.

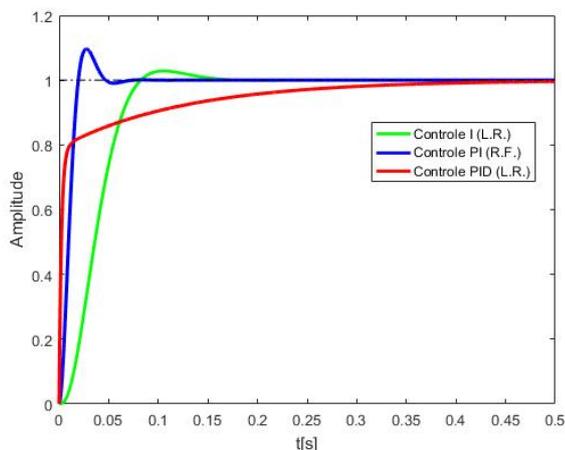


Figura 3. Resposta ao degrau dos controladores determinados.

Os controles analisados foram o integral e PID pelo método do lugar das raízes e o controle PI pelo método da resposta em frequência. Analisando os resultados apresentados, os sistemas com realimentação integral e com o controlador PI apresentaram as melhores performances em sua resposta ao degrau, apresentando baixo tempo de acomodação e máximo sobressinal dentro dos limites desejados. Portanto, para o restante do trabalho, serão utilizados esses dois controles para comparação dos resultados.

### 3.4 Análise de estabilidade

O próximo passo é analisar a estabilidade destes controladores através da observação do comportamento do sistema pela sua representação no lugar das raízes e analisando se o sistema controlado obedece o critério de estabilidade de Nyquist. Ambos os métodos são técnicas gráficas para determinar a estabilidade de um sistema dinâmico.

#### Análise da estabilidade pelo método do lugar das raízes

O Método do Lugar das Raízes permite a visualização da forma que os polos de um sistema em malha fechada se comportará quando o valor do ganho é alterado. Assim, é possível visualizar para quais intervalos de  $K$  o sistema manterá seus pólos no semiplano esquerdo, garantindo assim sua estabilidade.

A Figura 4 mostra o lugar das raízes para o sistema controlado com realimentação integral. Como indicado, os polos do sistema permanecerão no semiplano esquerdo para valores de ganho  $K$  menores que 9,84. Para valores maiores do que esse, o sistema apresentará polos no semiplano direito, trazendo instabilidade ao sistema.

Já para o sistema com controle PI, podemos observar através da Figura 5 que o zero do controlador projetado anulou o polo de característica mais lenta, trazendo para o sistema uma representação do lugar das raízes semelhante a representações para um sistemas com apenas dois polos. Pode-se perceber que agora o sistema apresenta um polo no zero e que para qualquer valor de  $K$ , os pólos do sistema permanecem no semi-plano esquerdo, garantindo que o sistema será estável para qualquer valor de  $K$ .

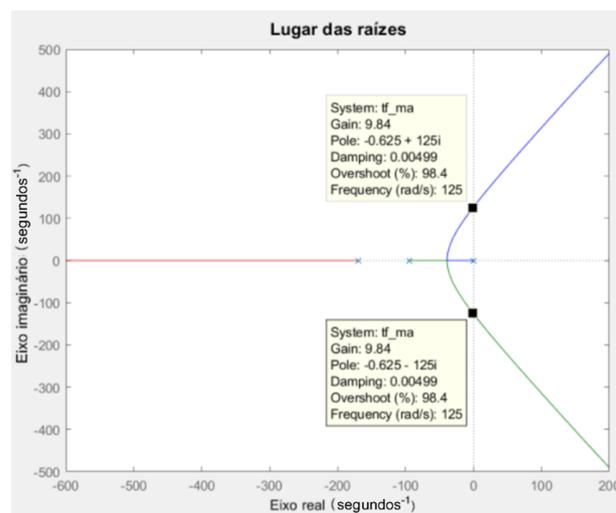


Figura 4. Representação do lugar das raízes para o sistema com controlador integral.

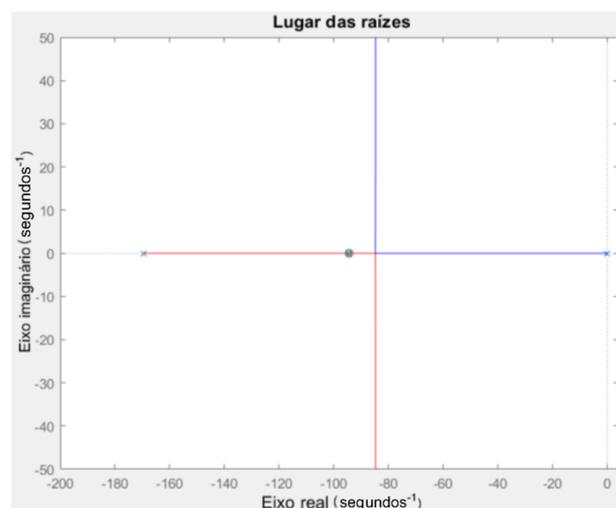


Figura 5. Representação do lugar das raízes para o sistema com controlador PI.

**Critério de estabilidade de Nyquist** O critério de estabilidade de Nyquist (Nyquist (1932)) diz que para um dado um contorno  $\Gamma_s$  de Nyquist, sejam  $P$  e  $Z$  o número de polos de  $G(s)$  e o número de polos do sistema realimentado englobados por  $\Gamma_s$ , respectivamente. Sabe-se que o contorno  $\Gamma_s$  irá circular  $N$  vezes o ponto  $(-1 + 0j)$  no sentido anti-horário, onde  $N=Z-P$ . Para que o sistema em análise seja considerado estável em malha fechada,  $Z$  deve ser zero. As voltas produzida em torno de  $(-1 + 0j)$  no sentido horário indicam que o sistema de controle irá se desestabilizar em malha fechada.

Para o sistema com o controlador integral aplicado, a função de transferência em malha aberta apresenta um integrador e dois polos reais no semi-plano esquerdo. O diagrama de nyquist segue a ideia geral mostrada na Figura 6, apresentando um semi-círculo de raio tendendo a infinito ao redor da origem no plano  $s$ , para  $\omega$  variando entre  $0^-$  e  $0^+$ .

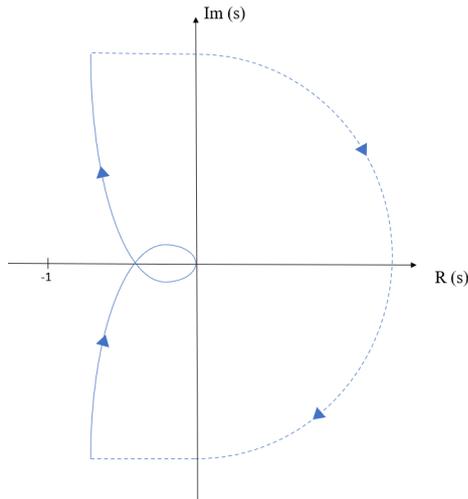


Figura 6. Diagrama de Nyquist para o sistema com controlador integral.

A simulação do diagrama de Nyquist para o sistema com controlador integral obtida através do MatLab é mostrado na Figura 7.

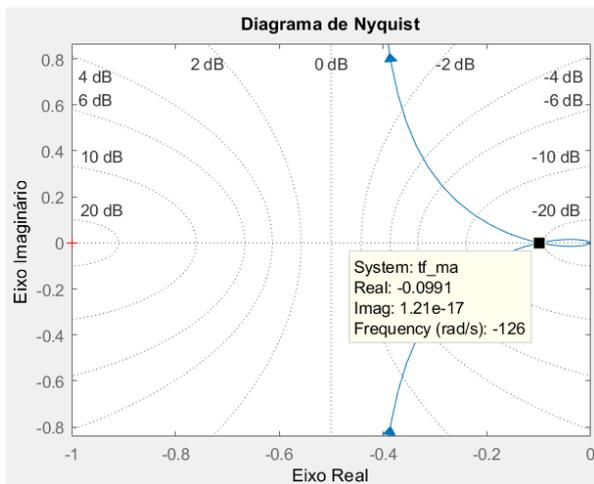


Figura 7. Simulação do diagrama de Nyquist para o sistema com controlador integral obtido através do MatLab.

Para checar se o sistema é estável, o número de polos de  $G(s)$  no semi-plano direito no planos é zero, portanto  $P = 0$ . Para o valor do ganho do sistema, o contorno do diagrama de Nyquist mostrado nas Figuras 6 e 7 cruza o eixo real no ponto  $(-0,0991 + j0)$ , não envolvendo o ponto  $(-1 + j0)$  então  $N=0$ , fazendo com que  $Z=N+P=0$ . Desta forma, não há zeros no semi-plano direito no planos e o sistema em malha fechada é estável.

Para o sistema com o controlador PI aplicado, a função de transferência em malha aberta apresenta um integrador e um polo real no semi-plano esquerdo. O diagrama de nyquist segue a ideia geral mostrada na Figura 8, apresentando um semi-círculo de raio tendendo a infinito ao redor da origem no plano  $s$ , para  $\omega$  variando entre  $0^-$  e  $0^+$ .

Para a simulação do diagrama de Nyquist mostrado na Figura 9 obtida através do MatLab, pode-se perceber que a região do contorno se apresenta no semiplano direito,

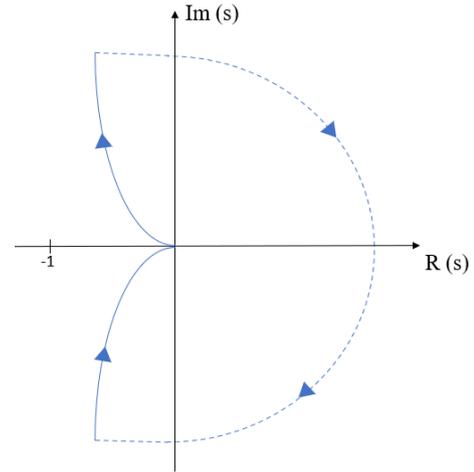


Figura 8. Diagrama de Nyquist para o sistema com controlador PI.

não envolvendo nenhum polo do sistema controlado, logo,  $P$  é igual a zero. Pode-se notar também que o número de envoltimentos do diagrama no ponto  $(-1 + j0)$  é zero. Assim, podemos concluir que o sistema em malha fechada é estável.

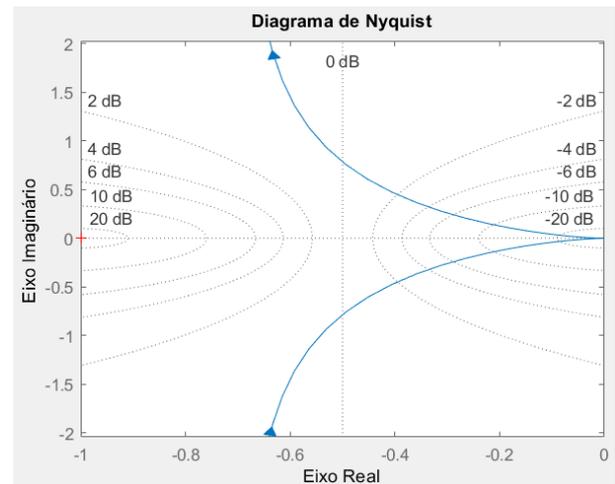


Figura 9. Simulação do diagrama de Nyquist para o sistema com controlador PI obtido através do MatLab.

#### 4. RESULTADOS

Nessa seção os controladores serão aplicados no circuito e serão analisadas suas respostas aos distúrbios. Na Figura 10 é apresentado o circuito simulado no *software PSIM*. Além disso, foi inserida a malha de controle para agir na variação da razão cíclica e fontes de degrau para adicionar perturbações na referência da corrente e na tensão de alimentação do circuito, simulando perturbações na tensão da rede.

Para as simulações, a curva em azul é o valor de referência, a curva em vermelho é o valor da corrente de saída e a curva em cor verde mostra o valor médio da corrente em cada ciclo. O primeiro experimento é na perturbação na referência do sistema e as Figuras 11 e 12 apresentam, as respostas dos controles integral e PI, respectivamente.

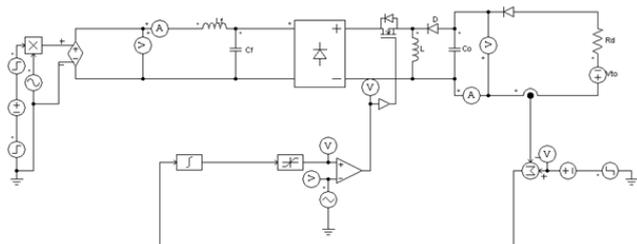


Figura 10. Circuito para simulação.

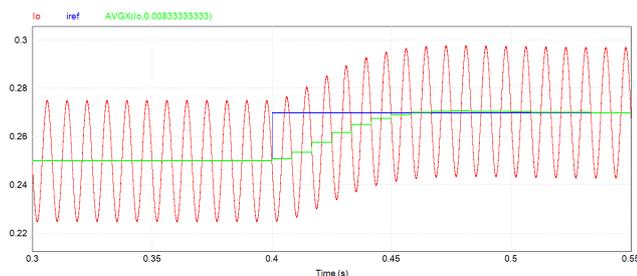


Figura 11. Resposta à troca de referência do sistema com controle integral.

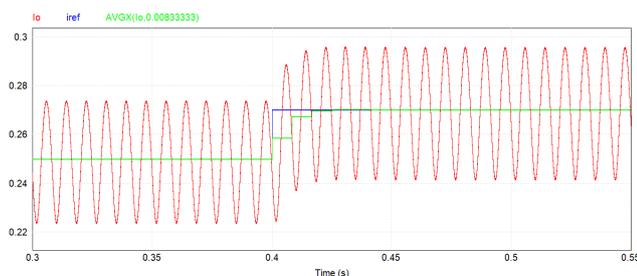


Figura 12. Resposta à troca de referência do sistema com controle PI.

No instante 0,4 s é alterada a referência, passando de 0,25 A para 0,27 A. Percebe-se que a resposta pelo controle PI leva 0,042 segundos enquanto a resposta do controlador integral demora 0,085 segundos. Embora a resposta do sistema com controlador PI seja mais rápida em comparação com o sistema com controle integral, as duas respostas a essa variação são satisfatórias.

Partindo para o distúrbio de elevação de tensão, que pode ocorrer em determinadas situações, é feito um experimento de elevar a tensão de alimentação em 10 % também no instante de 0,4 s.

Para o sistema com controle integral, são apresentadas as Figuras 13 e 14. Na Figura 13, mostra-se o comportamento da corrente de saída diante da perturbação inserida. Analisando o comportamento, percebe-se que o sistema estabiliza a saída sem a presença de erro. Na Figura 14, é mostrada a variação da razão cíclica diante desta perturbação. Para que a corrente mantenha-se controlada, há uma compensação aumentando a razão cíclica. Pode-se observar que a razão cíclica chega a um valor máximo de 0,254, não ultrapassando a razão cíclica crítica, permanecendo no modo de condução descontínuo.

Para o sistema com controle PI, são apresentadas as Figuras 15 e 16. Do mesmo modo que acontece no sistema com controle integral, o sistema estabiliza sem erro, porém

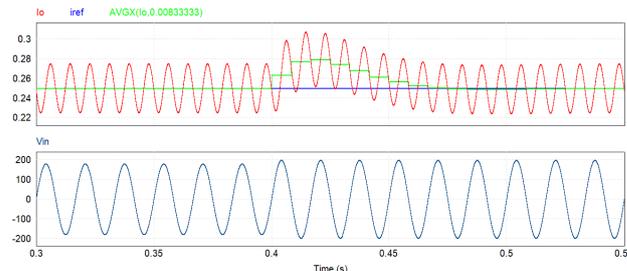


Figura 13. Resposta à perturbação na tensão de entrada do sistema com controle integral.

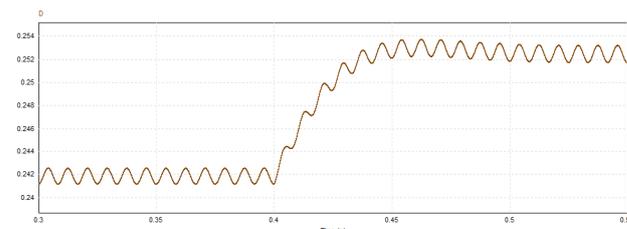


Figura 14. Variação da razão cíclica para o controle integral.

com uma velocidade maior. Na compensação através da razão cíclica, percebe-se que a amplitude em cada ciclo é maior que no caso anterior. Isso acontece devido a presença do ganho proporcional no sistema e acaba ocorrendo uma saturação, já que se utilizou um saturador no sistema para que não troque o modo de condução. Sendo assim, não há troca de modo de condução, ficando abaixo da razão cíclica crítica e permanecendo em modo de condução descontínuo.

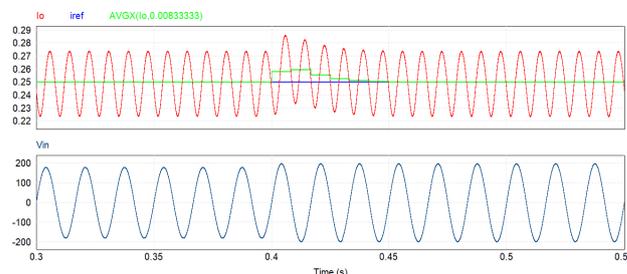


Figura 15. Resposta à perturbação na tensão de entrada do sistema com controle PI.

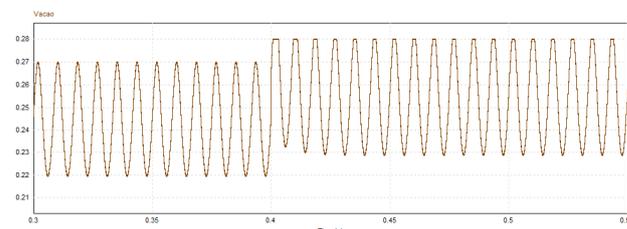


Figura 16. Variação da razão cíclica para o controle PI.

#### 4.1 Análise de conteúdo Harmônico

Observando essas respostas, não há diferenças significativas para se definir qual controlador atenderá melhor o projeto. Mas, visando a qualidade de energia, é necessário observar as variáveis que caracterizam uma boa qualidade. Entre

elas, estão o fator de potência (FP) e a distorção harmônica total (THD).

Na tabela 6, são apresentados esses valores referente aos sistemas com controles integral e PI.

Tabela 6. Variáveis sobre qualidade de energia.

	Integral	PI
FP	0,98	0,95
THD	0,5%	10,26%

Percebe-se que o sistema com controle integral apresenta um fator de potência próximo a 1 e uma THD muito baixa de 0,5%. Com esse controle, o sistema concentra quase toda sua energia na componente fundamental, como visto na Figura 17, onde intervalo de frequências analisados é entre 0 e 2000 Hz e nota-se que a concentração é apenas no primeiro harmônico.

Já o sistema com PI, apresenta uma distorção maior, chegando a 10,26%. Isso se deve a uma ação de controle elevada (por conta do ganho proporcional), o que faz aumentar a amplitude da razão cíclica, vista na Figura 16. Essa variação acarreta na injeção de alguns harmônicos na rede e um decréscimo no fator de potência, já que um PFC ideal trabalha com razão cíclica constante.

Na Figura 18, observa-se um pico de concentração de energia não somente na primeira harmônica, mas também nas harmônicas de terceira e quinta ordem. Esse gráfico mostra que apesar da primeira harmônica concentrar grande parte da energia, ainda assim há uma divisão dessa energia entre os harmônicos, diferentemente do que é apresentado na operação com controle integral.

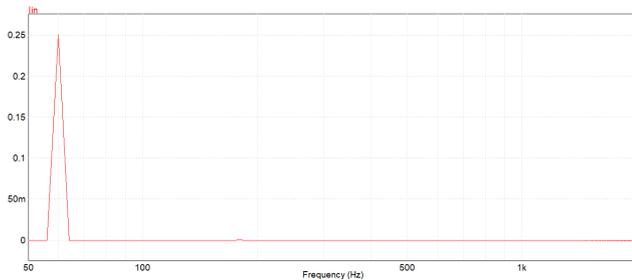


Figura 17. Conteúdo harmônico para o sistema com controle integral.

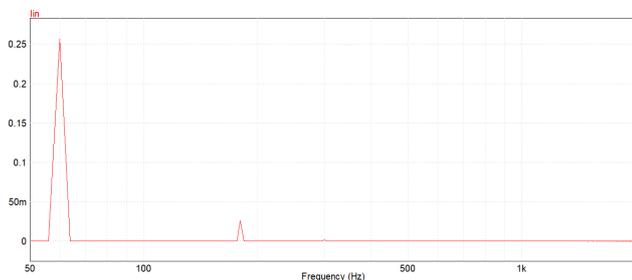


Figura 18. Conteúdo harmônico para o sistema com controle PI.

As Figuras 19 e 20 trazem a comparação dos valores obtidos anteriormente para os conteúdos harmônicos para comparação com a norma IEC 61000-3-2 para o sistema operando com controle integral e PI, respectivamente. As

colunas representadas em azul são os valores de energia obtidos do sistema em análise para os harmônicos e as colunas em laranja são os valores limites de energia em cada um dos harmônicos segundo a norma IEC 61000-3-2. Esta representação permite a comparação de forma gráfica da energia nos conteúdos harmônicos, avaliando se o sistema atende a norma ou não.



Figura 19. Norma IEC 61000-3-2 para sistema com controle integral.

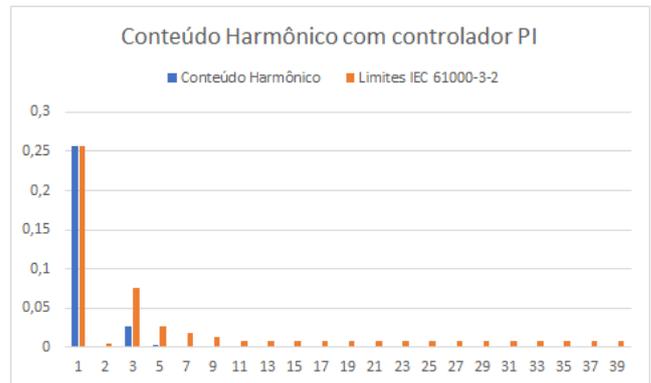


Figura 20. Norma IEC 61000-3-2 para sistema com controle PI.

Para os valores do controlador integral na Figura 19, a coluna azul está presente apenas no conteúdo harmônico fundamental e com valor dentro do limite da norma.

Já para os valores do controlador PI mostrado na Figura 20, pode-se notar na terceira harmônica a presença da coluna azul, indicando a energia correspondente a este harmônico e um pequeno valor de energia também presente na quinta harmônica. As colunas azuis do gráfico mostram que os valores de energia nestes harmônicos também apresentam valores que não extrapolam os valores limites correspondentes da norma.

Para a aplicação dos dois tipos de controladores, as análises realizadas são a garantia que há qualidade de energia de acordo com a norma IEC 61000-3-2 e o *driver* estaria dentro dos limites estabelecidos para implementação.

## 5. CONCLUSÕES

Pode-se perceber que os controladores integral e PI operam contra as perturbações simuladas, tanto quando a referência é alterada e com a adição de ruídos na tensão de entrada, apresentando funcionamento muito satisfatório.

As análises feitas previamente apresentaram um sistema estável e que apontava o controle PI como a melhor resposta para o sistema. Em termos de tempo de resposta, o controle PI apresentou uma maior eficiência em relação ao controle integral.

Ao analisar a qualidade de energia vemos que ambos os sistemas de controle conduzem o sistema a pontos de operação que atendem à norma IEC 61000-3-2. Entretanto, percebeu-se que o controle PI apresentou um decréscimo do fator de potência e um aumento da distorção harmônica, além de causar a saturação da razão cíclica, enquanto o sistema com controle integral apresentou termos qualitativos mais próximos do ideal.

Desta forma, como o trabalho visa definir um controle para o sistema com alta qualidade de energia, o melhor controle a ser utilizado nessas condições é o controlador integral. O controlador PI seria o mais indicado em uma abordagem que priorizasse um melhor controle da ondulação da corrente, uma vez que a utilização deste controle serviria de proteção contra o efeito de cintilação (“flicker”), consequência da variação de tensão de suprimento sobre o sistema de iluminação.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências de fomento FAPEMIG, CNPq, CAPES, assim como à UFJF, ao CEFET-MG e ao INERGE pelo suporte a este trabalho.

#### REFERÊNCIAS

- Almeida, P. (2012). *Conversor integrado SEPIC Buck-boost aplicado ao acionamento de LEDs de potência em iluminação pública*. Master's thesis, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil.
- Bang, T. e Park, J.W. (2018). Development of a zvt-pwm buck cascaded buck-boost pfc converter of 2 kw with the widest range of input voltage. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 65(3), 2090–2099.
- Bernitz, F., Schallmoser, O., e Sowa, W. (2006). Advanced electronic driver for power leds with integrated colour management. In *Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting*, 2604–2607. Tampa, EUA.
- Casagrande, C. (2016). *Desafios da Iluminação Pública no Brasil e Nova Técnica de Projetos Luminotécnicos Fundamentada na Fotometria Mesópica*. Ph.D. thesis, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil.
- Coelho, A.A.R. e dos Santos Coelho, L. (2016). *Identificação de sistemas dinâmicos lineares*. UFSC, Florianópolis, 2nd edition.
- Gonzalez, H. (2011). Controle adaptativo de um conversor para realização de pfc. Technical report, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Leopoldina, Brasil.
- Lopes, P.H. (2020). Retificador *Buck-boost* de elevado fator de potência para acionamentos de diodos emissores de luz. Technical report, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Leopoldina, Brasil.
- Motta, L. (2017). *Conversor de Único Estágio Baseado na Integração Charge-Pump Valley-Fill para acionamento*

- de LEDs de Potência*. Master's thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Brasil.
- Nogueira, F. (2013). *Avaliação Experimental de Luminárias Empregando LEDs Orientadas à Iluminação Pública*. Master's thesis, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil.
- Nyquist, H. (1932). Regeneration theory. *The Bell System Technical Journal*, 11(1), 126–147. doi:10.1002/j.1538-7305.1932.tb02344.x.
- Ogata, K. (1985). *Engenharia de Controle Moderno*. Prentice Hall do Brasil, Rio de Janeiro, 1st edition.
- Santos, F. (2007). Qualidade de energia - comparação das normas iec 61000-3-2 e ieee 519. Technical report, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- U.S. Energy Information Administration (2016). Commercial Buildings Energy Consumption Survey: Energy Usage Summary. Online. URL [www.eia.gov/consumption/commercial/reports/2012/energyusage/](http://www.eia.gov/consumption/commercial/reports/2012/energyusage/).
- W. Schulz (2016). Série de Cadernos Técnicos da Agenda Parlamentar: Iluminação Pública. Online. URL [www.crea-pr.org.br/ws/wp-content/uploads/2016/12/iluminacao-publica.pdf](http://www.crea-pr.org.br/ws/wp-content/uploads/2016/12/iluminacao-publica.pdf).