



Controlador PI discreto e sensoriamento por célula fotovoltaica aplicados ao controle automático de iluminação em ambientes internos

Discrete PI controller and photovoltaic cell sensing applied to automatic lighting control in indoor environments

Recebido em 03.07.2017. Aprovado em 01.12.2017



Álvaro Rafael Clementino do Nascimento *; Gabriel Bruzaca Cavalcante; Igor Forcelli Silva; Josué Dantas Rodrigues da Silva; Julierme Silva de Araújo
Instituto Federal da Paraíba |* rafaeleletronica@outlook.com

207

RESUMO

Este artigo tem como objetivo demonstrar o protótipo de um controlador de luminosidade Proporcional-Integral (PI), que fora desenvolvido visando proporcionar conforto e eficiência energética, tendo aplicação em diversos ambientes, seja residencial, escolar ou industrial. O sistema dinâmico deste projeto consiste numa caixa escura tendo como fonte de luz um LED de alto brilho, que ajusta sua luminosidade conforme a iluminância presente, tendo como sensor uma célula fotovoltaica que por sua vez fornece ao controle um valor de tensão correspondente à intensidade luminosa (lux). Sendo assim simulado um ambiente fechado no qual será estabelecida a quantidade de lux emitida pela fonte luminosa, e mesmo com perturbações a luminosidade será adaptada para que a quantidade de lux presente no ambiente permaneça no setpoint.

PALAVRAS-CHAVE: célula fotovoltaica, controlador de luminosidade, eficiência energética, PI.

ABSTRACT

This article aims to demonstrate the prototype of a proportional-integral (PI) luminosity controller, which was developed to provide comfort and energy efficiency, having application in various environments, for example residential, school or industrial. The dynamic system of this project consists of a dark box having as light source a high brightness LED, which adjusts its luminosity according to the present luminance, having as sensor a photovoltaic cell that provides for the control a voltage value corresponding to the luminous intensity (lux). Thus, a closed environment is simulated in which the quantity of lux emitted by the light source is established, and even with disturbances the luminosity will be adapted so that the amount of lux present remains in the environment in the setpoint.

KEYWORDS: brightness controller, energy efficiency, photovoltaic cell, PI.

INTRODUÇÃO

Desde a revolução industrial no século XVIII, quando foram criados os ambientes fabris, o homem passou a sentir desconfortos gerados pela fadiga muscular e também ocular. A criação das máquinas sanou a problemática corporal, que por sua vez melhorou a qualidade de vida do profissional. Porém, com a baixa iluminação do ambiente, o rendimento não era satisfatório. Desta problemática, surgirá a necessidade de sistematizar cientificamente o estudo da iluminação (Costa, 2006). Hoje já existem diversos estudos com resultados proveitosos, que contribuiram para o avanço desta linha de pesquisa, expandindo a área desde o ambiente industrial até o meio urbano e residencial, trazendo segurança e conforto.

Um sistema de controle consiste em subsistemas e processos (ou plantas) construídos com o objetivo de obter uma saída desejada com um desempenho relativo, dada uma entrada especificada (Nise, 2012). Por exemplo, no ambiente interno de uma biblioteca a luminosidade baixa irá interferir na leitura de livros, como também uma luminosidade excessiva poderá causar ofuscamento e/ou cegueira momentânea (LNA, 2017

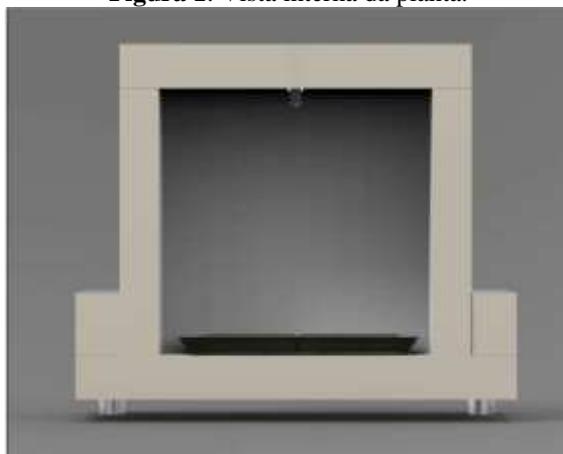
Controlador PI discreto e sensoriamento por célula fotovoltaica aplicados ao controle automático de iluminação em ambientes internos

p.2). No sistema de controle, a entrada especificada seria o nível de iluminação ideal para a leitura e a saída seria a eficiência da leitura do livro.

A variável abordada neste estudo possui tempo de atraso irrelevante, semelhante ao existente em uma lâmpada residencial em relação ao tempo de acionamento do interruptor e sua luminescência. Devido esta característica de instantaneidade, o tipo de controlador aplicado foi o PI na topologia paralela. De acordo com as funções modeladas, resultantes das análises do estudo de caso, aplicou-se a regra de Skogestad. Este tipo de controlador é uma junção do tipo P com o tipo I. A resposta do sistema controlada pelo tipo P é mais rápida, sendo esta uma de suas características. Já o controlador do tipo I tem como principal característica zerar o erro de estado estacionário.

A estrutura física do estudo de caso, visível na Figura 1 através de um corte transversal, consiste em uma caixa na cor branca com medições de 10x10x10 centímetros, que simulará um ambiente fechado. Como fonte de luz artificial, foi utilizado um LED (Light Emitter Diode) de 5mm, com cor branca e de alto brilho, posicionado no centro da parte superior da caixa. Está ainda contém uma célula fotovoltaica com dimensões aproximadas a base do interior da caixa, que por sua vez será responsável pela medição de lux contidas no ambiente. Para simular as perturbações vinda da parte externa desta câmara escura foi feito um orifício circular, ao lado do local onde o LED encontra-se instalado.

Figura 1. Vista interna da planta.



Fonte: os autores

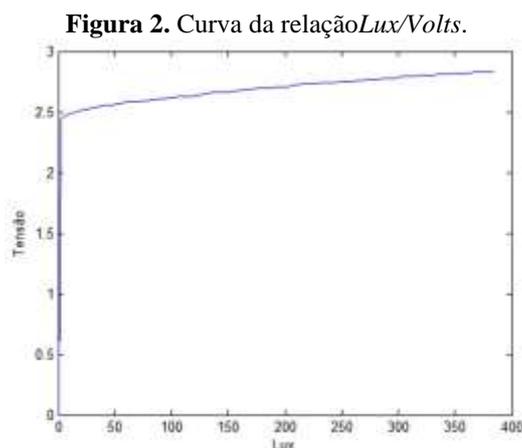
Após a construção do protótipo mostrado na Figura 1, foi efetuada a caracterização do sensor, fazendo a relação de lux medido por tensão aplicada ao LED. Assim foi possível estimular a planta e adquirir os dados com a placa 6008 (National Instrument). Em seguida aplicaram-se os modelos descritos na literatura para o desenvolvimento de modelagens matemáticas que foram validadas pelo índice RMSE (Relative Mean Squared Error), e as funções controladoras pelo índice ISE (Integral Square Error). Os resultados práticos obtidos foram comparados com os resultados oriundos de simulações computacionais.

2. PROPÓSITO

O consumo médio mensal de eletricidade nas residências brasileiras, atingiu o valor de 143,3 KWh no verão e 161,14KW no inverno. Deste total consumido, 7% destinam-se para iluminação (Fedrigoet al., 2009). Em relação à saúde e ao impacto social, é comprovado o efeito da poluição luminosa no aumento da incidência e desenvolvimento de alguns tipos de câncer. Afetando uma parcela mais ampla da população, a poluição luminosa pode promover cansaço visual, causando sonolência, dor de cabeça e stress (LNA, 2017, p.1). Estes dois casos apresentados, são problemáticas relacionadas à variável controlada abordada neste trabalho. Nestes casos, a dimerização manual ou automática é bastante recomendada. Referindo-se ao consumo, a dimerização tem por característica reduzir a tensão aplicada na lâmpada, que conseqüentemente reduz a potência consumida. Referindo-se a saúde, tal método reduz os riscos á saúde visual do ser humano, além de proporcionar maior conforto. Diante destas premissas, ressalta-se a importância do estudo do controle automático de iluminação.

3. MÉTODOS

A célula fotovoltaica fornece como resposta valores de tensão referentes à luminosidade local. A Figura 2 ilustra o levantamento da curva de resposta (lux/Volts) desta célula, aplicada no contexto do projeto como um sensor de luminosidade. De acordo com o levantamento da curva deste sensor, obteve-se a relação 10mV por lx.



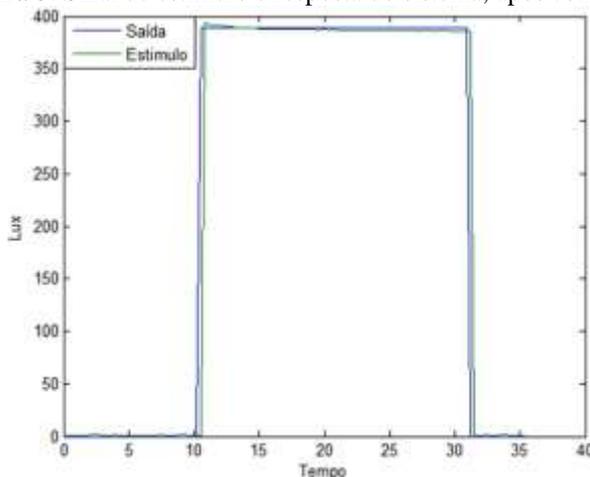
Fonte: os autores

Através dos dados obtidos com o levantamento da curva de resposta deste sensor, foi possível elaborar a Equação 1 que ao ser inserida no sistema supervisorio, converte automaticamente a leitura da célula fotovoltaica em lx. Esta equação serve como base para gerar o gráfico ressaltado na Figura 3, que

apresenta a resposta do sistema em unidade de iluminancia, possibilitando assim a aplicação dos métodos de modelagem.

$$L = (V_{\text{sensor}} - 391.765) / 1.171 \quad (1)$$

Figura 3. Sinal de estímulo e resposta do sistema, após conversão.

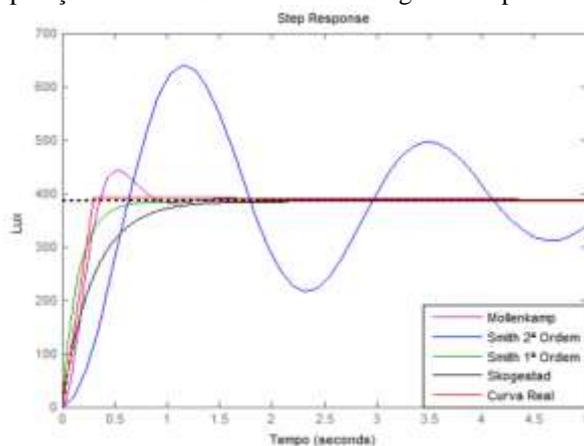


Fonte: os autores

Com a curva característica do sistema proposto, foram aplicadas as metodologias de modelagem de Smith de Primeira e Segunda Ordem, Mollenkamp e Skogestad (Visioli, 2006). Pelo fato do atraso ser desprezível, o mesmo não foi considerado em nenhuma modelagem, assim não efetuando a modelagem por Ziegler-Nichols.

A simulação destes métodos de modelagem usando ferramentas computacionais, possibilitou inferências relevantes no processo de definição do método com maior fidelidade à curva real do sistema. O gráfico da Figura 4 mostra a curva real sendo comparada com os métodos de modelagem citados anteriormente.

Figura 4. Comparação entre os métodos de modelagem e resposta real do processo.



Fonte: os autores

Para aumentar a confiabilidade na fase de inferência do melhor método a ser implementado, aplicou-se um índice quantitativo denominado RMSE (Relative Mean Squared Error).

A escolha do tempo de amostragem (t_a) adequado é fundamental para efetuar as discretizações. A faixa do tempo de amostragem, que é calculada com base no tempo em que se atinge 95% da amplitude do processo, deverá ser dividido por 15 e por 5, como mostra a Equação 2 de Izerman e Monchhof.

$$(95\%t)/15 < t_a < (95\%t)/5 \quad (2)$$

Antes de aplicar o índice quantitativo é necessário discretizar as modelagens obtidas. Este processo consiste em transformar o sinal contínuo no tempo (analogico) em um sinal discreto (digital), entendível para a máquina. Aplicou-se os métodos de discretização do ZOH (Zero Order Hold), Tustin e mapeamento por polos e zeros.

Após a utilização dos métodos de discretização, obteve-se um banco de dados com as funções já discretizadas. Em seguida aplicou-se o índice RMSE (Equação 3) para estabelecer uma análise quantitativa entre a curva modelada do sistema e a curva discretizada, fornecendo uma resposta numérica diretamente proporcional ao erro para cada modelo discretizado.

$$J_e(\%) = \frac{1}{l} \sum_{q=1}^l \left[\sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{val} (y_q(t) - \hat{y}_q(t))^2}{\sum_{t=1}^{val} y_q(t)^2}} \right] 100 \quad (3)$$

Depois das modelagens, discretização e equações de diferenças, são encontradas as duas funções que melhor representam o processo real, assim tornando possível a implementação de seus respectivos controladores.

Como ressaltado, o sistema apresenta atraso desprezível, logo a regra de Skogestad se mostra mais adequada para a sintonia dos controladores (ver Tabela 1), que para as respectivas funções de transferências o tempo derivativo é igual a zero, desta forma só será possível desenvolver um controlador PI.

Tabela 1. Tabela de sintonia para o PID por Skogestad.

Gp(S)	Kp	Ti	Td
K/S	1/(KT _c)	K ₁ T _c	0
K/TS+1	T/(KT _c)	Min[T, K ₁ T _c]	0
K/(TS+1)S	1/(KT _c)	K ₁ T _c	T
K/(T ₁ S+1)(T ₂ S+1)	T ₁ /(KT _c)	Min[T ₁ , K ₁ T _c]	T ₂
K/S ²	1/(4K(T _c) ²)	4 T _c	4 T _c

Fonte: CASTRUCCI, et all, 2011.

De acordo com as simulações realizadas os controladores projetados para as respectivas funções, aqueles que funcionaram com êxito, foram submetidos a aplicação do índice ISE (Integral Square Error) (ver Equação 4), que consiste em identificar qual saída experimental (controlada) se aproxima do modelo real do processo. Com base nos resultados fornecidos através do índice ISE, o melhor modelo de controlador foi escolhido para documentar os resultados experimentais.

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (4)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Concluídos os métodos de modelagem, foi aplicado o índice quantitativo RMSE, visando determinar o método discreto que mais se aproxima da resposta real do processo. Sendo o objetivo a aplicação de técnica discreta de controladores, faz-se necessário discretizar os modelos, observando-se a conformidade ao tempo de amostragem.

As Equações 5 a 8 representam o cálculo do tempo de amostragem conforme Yzerman e Monchhof. De acordo com a faixa de valores dada na equação, foi selecionado um valor que correspondesse a estabilidade do sistema. Assim o tempo selecionado para este trabalho foi de 0,04s.

$$95\% \rightarrow 385.1 \text{ Lux} = 365.845 \text{ Lux} \quad (5)$$

$$T = 10.7907 - 10.21 = 0.5807 \text{ segundos} \quad (6)$$

$$\frac{95\%t}{15} < t_a < \frac{95\%t}{5} \rightarrow 0.0387 < t_a < 0.11614 \quad (7)$$

$$t_a = 0.04 \text{ segundos} \quad (8)$$

De acordo com a Equação 3, foi desenvolvida uma rotina no software Matlab que possibilita a execução do índice MRSE. Os métodos foram classificados respectivamente em Skogestad, Smith de 1º ordem, Mollenkamp e Smith de 2º ordem. Com tal resultado foram escolhidos os dois melhores métodos. Utilizando a regra de Skogestad para a modelagem de Skogestad (Equações 9 a 14) visando o controle PI contínuo, foi obtido o resultado descrito na Equação 15.

$$G_{(s)} = 0.9902 / (0.3s + 1) \quad (9)$$

$$K_1 = 4 \quad (10)$$

$$T_c = T \times 0.7 \rightarrow 0.3 \times 0.7 \rightarrow T_c = 0.21 \quad (11)$$

$$T_i = \min\{T, K_1 \times T_c\} \rightarrow \min\{0.3, 4 \times 0.21\} \rightarrow T_i = 0.3 \quad (12)$$

$$K_p = T / (K \times T_c) \rightarrow K_p = 0.3 / (0.9902 \times 0.21) \rightarrow K_p = 1.443 \quad (13)$$

$$[[PI]]_((s)) = K_p (1 + 1 / (T_i s)) \rightarrow 1.443 (1 + 1 / 0.21s) \rightarrow [[PI]]_((s)) = (0.4329s + 1.443) / 0.3s \quad (14)$$

$$[[Gf]]_((s)) = ([[PI]]_((s)) \times G_((s))) / ([[1 + [[PI]]_((s))] \times G_((s))) \rightarrow [[Gf]]_((s)) = (0.4287s + 1.429) / (0.09s^2 + 0.7287s + 1.429) \quad (15)$$

Objetivando encontrar o controlador discreto utilizou-se o método de Tustin (Equações 16 a 19) para discretizar o segmento integrativo do controlador PI. A Equação 20 descreve a aplicação desta técnica.

$$[[PI]]_((s)) = (0.4329s + 1.443) / 0.3s \quad (16)$$

$$KC = K_p (1 - T / (2T_i)) \rightarrow 1.443 (1 - 0.04 / (2 \times 0.3)) \rightarrow KC = 1.3468 \quad (17)$$

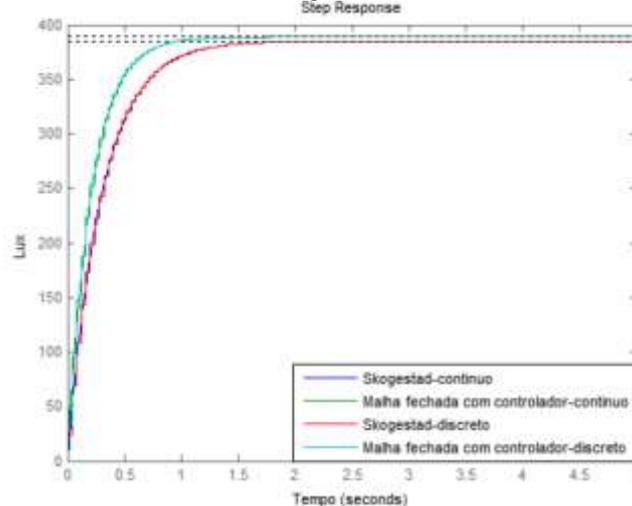
$$Ki = (K_p T) / T_i \rightarrow (1.443 \times 0.04) / 0.3 \rightarrow Ki = 0.1924 \quad (18)$$

$$[[PI]]_((z)) = KC + Ki \times z / (z - 1) \rightarrow 1.3468 + 0.1924 \times z / (z - 1) \rightarrow [[PI]]_((z)) = (1.5392z - 1.3468) / (z - 1) \quad (19)$$

$$[[Gf]]_((z)) = ([[PI]]_((z)) \times G_((z))) / ([[1 + [[PI]]_((z))] \times G_((z))) \rightarrow [[Gf]]_((z)) = (1.524z^2 + 0.1905z - 1.334) / (17.52z^2 - 29.81z + 12.67) \quad (20)$$

O degrau aplicado na Figura 5 é de 388,9 lux. Nesta é possível observar e comparar graficamente as curvas resultantes dos métodos apresentados nas Equações 15 e 20.

Figura 5. Comparação gráfica entre os modelos contínuo e discreto controlado e não controlado pela modelagem de Skogestad.



Fonte: os autores

Utilizando a regra de Smith de 1º ordem para a modelagem de Skogestad (Equações 21 a 25), obteve-se os dados descritos na Equação 26

$$K_1 = 4 \quad (21)$$

$$T_c = T \times 0.7 \rightarrow 0.15405 \times 0.7 \rightarrow T_c = 0.1078 \quad (22)$$

$$T_i = \min\{T, K_1 \times T_c\} \rightarrow \min\{0.15405, 4 \times 0.1078\} \rightarrow T_i = 0.15405 \quad (23)$$

$$K_p = T / (K \times T_c) \rightarrow K_p = 0.15405 / (0.9902 \times 0.1078) \rightarrow K_p = 1.4438 \quad (24)$$

$$[PI]_c(s) = K_p (1 + 1/(T_i s)) \rightarrow 1.4438(1 + 1/0.15405s) \rightarrow [PI]_c(s) = (0.2224s + 1.4438) / 0.15405s \quad (25)$$

$$[Gf]_c(s) = ([PI]_c(s) \times G_c(s)) / ([1 + [PI]_c(s)] \times G_c(s)) \rightarrow [Gf]_c(s) = (0.2202s + 1.43) / (0.02373s^2 + 0.3743s + 1.43) \quad (26)$$

O método de Tustin também foi aplicado para discretizar o segmento integrativo do controlador PI oriundo do método de Smith de 1º ordem (Equações 27 a 30). A Equação 31 descreve a aplicação da técnica ressaltada.

$$[PI]_d(z) = (0.2224s + 1.4438) / 0.15405s \quad (27)$$

$$KC = K_p (1 - T / (2T_i)) \rightarrow 1.4438(1 - 0.04 / (2 \times 0.15405)) \rightarrow KC = 1.2564 \quad (28)$$

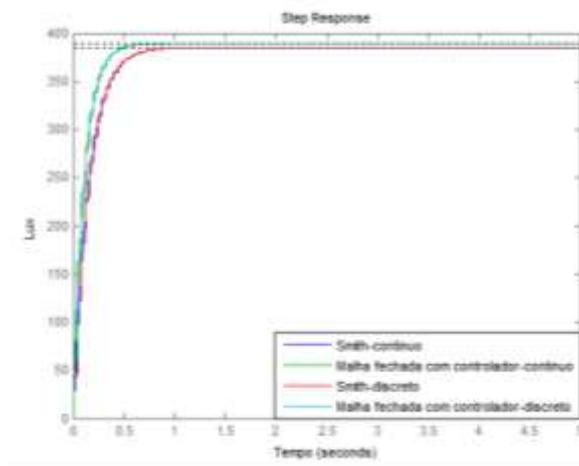
$$Ki = (K_p T) / T_i \rightarrow (1.4438 \times 0.04) / 0.15405 \rightarrow Ki = 0.3749 \quad (29)$$

$$[PI]_d(z) = KC + Ki \times z / (z - 1) \rightarrow 1.2564 + 0.3749 \times z / (z - 1) \rightarrow [PI]_d(z) = (1.6313z - 1.2564) / (z - 1) \quad (30)$$

$$[Gf]_d(z) = ([PI]_d(z) \times G_c(z)) / ([1 + [PI]_d(z)] \times G_c(z)) \rightarrow [Gf]_d(z) = (10.5z^2 + 2.413z - 8.087) / (67z^2 - 97.59z + 35.41) \quad (31)$$

O degrau aplicado na Figura 6 também foi de 388,9 lux. Nesta abordagem é possível observar e comparar graficamente as curvas resultantes dos métodos apresentados nas Equações 26 e 31.

Figura 6. Comparação gráfica entre os modelos contínuo e discreto controlado e não controlado pela modelagem de Smith de 1º ordem.

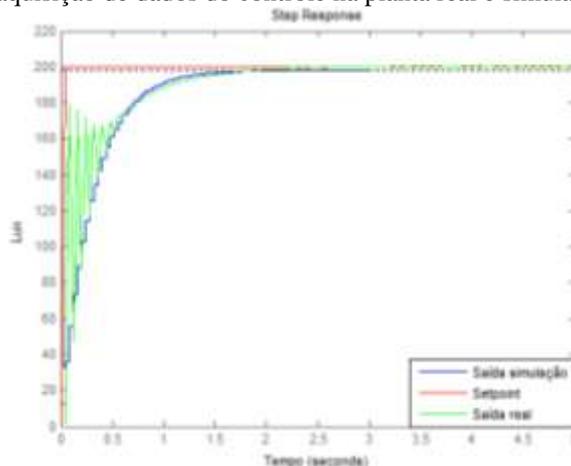


Fonte: os autores

Os dois métodos de modelagem discretizadas selecionados pelo índice RMSE (Skogestad e Smith de 1º ordem), obtiveram êxito em seus controladores com a sintonia de Skogestad, apresentando diferença de erro mínima segundo análise gráfica (ver Figuras 5 e 6). O fator diferença de erro permitiu escolher entre ambos. Diante deste fator, fez-se necessário aplicar o índice ISE. A Equação 4 foi utilizada para elaborar uma rotina no software Matlab, que possibilitou realizar a análise dos controladores. Este procedimento possibilitou inferir a sintonia do controlador de Skogestad com modelagem de Skogestad discretizada por Tustin como o melhor controlador a ser aplicado.

Como parte do estudo de caso, foi desenvolvido um sistema supervisorio com o auxílio do software LabView. Neste foram inseridos os valores de KC e KI do controlador PI paralelo cujo cálculo foi demonstrado nas Equações 16 a 20. Por meio do supervisorio, valores de setpoint distintos puderam ser aplicados e o comportamento de resposta do sistema de controle observado em tempo real. A Figura 7, apresenta a comparação entre o comportamento do sistema controlado simulado e real, no qual foi aplicado setpoint de 100 lx, com o intuito de verificar e demonstrar a eficácia do controlador.

Figura 7. Comparação entre a aquisição de dados do controle na planta real e simulada, aplicando degrau de 200 lux.



Fonte: os autores

5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos nos testes realizados no estudo de caso, constatou-se que é possível controlar a quantidade de lux presente em ambientes fechados tendo como base os métodos de modelagem, discretização e sintonia de controladores.

Foi verificado que, o tempo de atraso da variável controlada é desprezível. De acordo com a literatura, a regra aplicada ao sistema e as respostas encontradas nas modelagens caracterizam o desenvolvimento de um controlador PI. Dentre todos os métodos de modelagem e discretização, o índice MRSE apontou que a modelagem de Skogestad e Smith de 1º Ordem, ambos discretizados por Tustin, são os mais adequados para representar o sistema. Fazendo uso do índice ISE foi possível afirmar que dentre os

Controlador PI discreto e sensoriamento por célula fotovoltaica aplicados ao controle automático de iluminação em ambientes internos

métodos de Smith de 1º ordem e Skojestad para a sintonia de controle, o método de Skojestad se apresenta mais próximo da resposta real.

Com o estudo abordado neste trabalho conclui-se que o sensoriamento realizado por meio de células fotovoltaicas destinadas ao controle de luminosidade obteve êxito. Observou-se que outros estudos abordam o controle de luminosidade por meio de sensores LDR (Light Dependent Resistor), por exemplo, os trabalhos de Souza et al. (2017) e Paulin et al. (2008). Comparando este perfil de trabalho com a proposta abordada neste estudo observa-se que o sensor LDR possui maior taxa de variação, sendo necessária a aplicação de filtros capacitivos. Estes fatores implicam diretamente na precisão das medições.

Agradecimentos

Aos Doutores Walmeran Trindade e Alberdan Santiago pela assistência prestada quando ao fornecimento de material e auxílio intelectual, a Lucas Cardoso, Artur Medeiros, Davidson Maciel, José Gilsivan, e aos demais discentes do Curso Superior de Tecnologia em Automação Industrial pelo suporte intelectual e o acompanhamento das atividades e ao professor Ademar Júnior pela orientação técnica.

REFERÊNCIAS

CASTRUCCI, Plínio de Lauro; BITTAR, Anselmo; SALES, Roberto Moura. **Controle Automático**. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 470 p.

COSTA, Gilberto José Corrêa da. **Iluminação econômica cálculo e avaliação**. 4 Ed. Porto Alegre: EDIPUCRS.2006

FEDRIGO, Natália Sens; GONÇALVES, Guilherme; LUCAS, Paulo Figueiredo. **Usos Finais de Energia Elétrica no Setor Residencial Brasileiro**. 2009. 104 p. Relatório de Iniciação Científica (Departamento de Engenharia Civil Laboratório de Eficiência Energética em Edificações) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009. 1. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_ic/IC2009_Natalia.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2017.

LNA. Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA). **Aprendendo Mais Sobre Poluição Luminosa**. Disponível em: <<http://www.lna.br/lp/definicao.html>>. Acessado em: 01 de abril. 2017. p. 1

Nise, Norman S. **Engenharia de sistemas de controle**. 6 Ed. Rio de Janeiro: LTC.2012.

PAULIN, Luis Fernando Chaves; MORETTIN, Renato de Mesquita; SANTOS, Severino dos. **Controle de Luminosidade de uma Sala**. 2008. 5 p. Artigo Científico (Engenharia Elétrica) Universidade do Vale do Paraíba/FEAU, São José do Campos, 2008. 1. Disponível em: <http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2008/anais/arquivosINIC/INIC1328_01_A.pdf>. Acesso em: 03 abr. 2017.

SOUZA, Edilson Santanna de; MELO, Leandro Terra C.; RODRIGUES, Viviane Bicalho. **Projeto Desafio - Controle de Luminosidade de LED**. 2010. 10 p. Relatório Final (Laboratório de Controle e Automação 1).

Dossiê I JIPEEIS - Primeira Jornada Internacional de Pesquisa, Ensino, Extensão, Inovação e Sustentabilidade

Controlador PI discreto e sensoriamento por célula fotovoltaica aplicados ao controle automático de iluminação em ambientes internos

Universidade Federal de Minas Gerais, [S.I.], [..]. 1. Disponível em: <http://www.cpdee.ufmg.br/~palhares/relfinal_lab.pdf>. Acesso em: 03 abr. 2017.

VISIOLI, Antônio. Pratical **PID Control**. 1. ed. Londres: Springer, 2006. 314 p.