

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

MARCOS DINÍS LAVARDA

**MODELAMENTO DE UM SISTEMA DE ILUMINAÇÃO E PROPOSTA
DE CONTROLADOR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2015

MARCOS DINÍS LAVARDA

MODELAMENTO DE UM SISTEMA DE ILUMINAÇÃO E PROPOSTA DE CONTROLADOR

Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização, apresentado ao Curso de Especialização em Automação Industrial, do Departamento Acadêmico de Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Raimundo Erig Lima

CURITIBA
2015

AGRADECIMENTOS

À Deus por tornar tudo isso possível.

Aos meus pais Laídes Carlos Lavarda e Santa Terezinha Falcade Lavarda por tornarem possível a realização desta nova etapa.

À minha noiva Julia Maria Fernanda Machado Fernandes pelo companheirismo e apoio em todos os momentos, pela força, carinho, dedicação e conselhos.

Aos familiares, amigos e colegas por acreditarem e me apoiarem durante esta nova fase.

Agradeço ao Prof. Dr. Carlos Raimundo Erig Lima pela orientação e ensinamentos, desde a graduação até o presente trabalho de especialização.

Por fim, à banca examinadora pela participação no detalhamento e melhoria do estudo realizado.

RESUMO

LAVARDA, Marcos Dinís. **Modelamento de um sistema de iluminação e proposta de controlador**. 2015. 50 f. Monografia (Curso de Especialização em Automação Industrial), Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

O sistema de iluminação está entre os maiores consumidores da energia elétrica produzida no Brasil. Diversos fatores influenciam para este fato, entre eles a utilização de lâmpadas de baixa eficiência e pelo uso ininterrupto. O mercado e a sociedade de modo geral, carecem de novas tecnologias para minimizar estes custos e aproveitar a eletricidade de forma mais eficiente e sustentável. O consumo de eletricidade vem aumentando gradativamente nos últimos anos em todo o país devido à expansão da produção industrial e consumo de produtos eletro-eletrônicos. Ao mesmo tempo as fontes de geração de energia elétrica estão cada vez mais escassas e custosas, tanto para a economia quanto para o meio ambiente. Sendo assim, utilizar lâmpadas com tecnologias mais eficientes como LEDs, está sendo considerada como alternativa promissora para o futuro, por ser mais econômica e duradoura que outros sistemas. Baseado nisso, o presente trabalho faz uma análise de um sistema de iluminação baseado em lâmpadas de LEDs para escritórios residenciais, comerciais e industriais, de acordo com normas técnicas. Ainda, é realizado no estudo um modelamento matemático da resposta de um sistema a partir do método heurístico de Ziegler-Nichols, em um ambiente experimental e analisar com simulações o comportamento do sistema. Esta pesquisa propõe ainda o desenvolvimento de um controlador digital para sistema modelado, servindo de estudo inicial na elaboração de um circuito de controle para lâmpadas de LEDs. Estas lâmpadas apresentam entre outras vantagens, a possibilidade do emprego do controle da potência aplicada diretamente sobre os diodos emissores de luz, isso permite o desenvolvimento futuro de um produto autocontrolável que mantenha os níveis de iluminação de um ambiente de trabalho agradável e eficiente. O controle realizado é determinado pela quantidade de iluminação proveniente do ambiente, com o sensor posicionado na origem da fonte luminosa. Dessa forma, estima-se a manutenção da iluminância do ambiente, conforme estabelecido pelas normas técnicas para a realização de atividades de escritório, ajustando a potência de acordo com a interferência de outras lâmpadas ou pela iluminação natural, visando contribuir com este estudo para reduzir os custos com eletricidade e manutenção.

Palavras chave: Controle discreto. Modelamento de sistema contínuo. Iluminação LED. Iluminância em escritórios.

ABSTRACT

LAVARDA, Marcos Dinís. **Modeling a lighting system and proposal of controller.** 2015. 50 f. Monografia (Curso de Especialização em Automação Industrial), Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

The electricity costs in Brazil are mainly caused by lighting systems. Many factors influence for this, between them are lower effectiveness of systems and full time use. Thereby, market needs new technologies and innovations to minimize costs with illuminance, as well all the society must reduce the use of electricity, what can be done from improvements on effectiveness use of this resource. Spending with electricity has increased over the years in the country, at the same time the production is more expensive and the resources scarce, prejudicing the economy and the environmental. Therewith, using effectiveness illumination systems, based on LED technology, are one good solution to save money and maintenance. Thereby, this study analysis LED illumination systems for residential, commercial and industrial offices, respecting brazilian technical standards. Withal, was modeled step response of system by Ziegler-Nichols' method, developed on experimental room and analyzed simulations to prove method application. This research proposes development a digital controller, but it is an initial work with future produce of PCB and controller to LED lamps. These lamps, among other benefits, feature of control of power directly on diodes, enabling development an automatic controlled product in future works, keeping constant illuminance on offices. The control are accomplish by illumination intensity from ambient, where the sensor is attach on LED lamp. Thereby, is estimated that be possible keeping constant the illuminance on office, adjusting just power on LEDs in accordance with other luminous influences. Finally, it expected contribute to reduce the costs with electricity and maintenance with this proposed.

Keywords: Discrete Control. Modeling of continuous system. LED lighting. Illuminance in offices.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquemático do circuito de aquisição da iluminância do ambiente.....	19
Figura 2. Resposta do sensor resistivo e da tensão de saída com a variação da iluminância do ambiente.....	20
Figura 3. Resposta de um sistema de primeira ordem em malha.	21
Figura 4. Representação de um sistema contínuo com realimentação unitária.	22
Figura 5. Representação de um sistema discreto controlado em malha fechada.	24
Figura 6. Blocos internos de um controlador digital.....	24
Figura 7. Amostragem de um sinal analógico.	25
Figura 8. Experimento para coleta de dados no ambiente de estudo.	27
Figura 9. Método de coleta de dados experimentais com sensor na fonte luminosa.	28
Figura 10. Resposta da tensão de saída para o sensor posicionado na fonte luminosa em relação à bancada de trabalho.....	28
Figura 11. Experimento da resposta do sistema ao degrau de iluminância.	29
Figura 12. Resposta do sistema de aquisição ao degrau de iluminância.	30
Figura 13. Análise da resposta do sistema ao degrau pelo método heurístico de Ziegler-Nichols.	31
Figura 14. Resposta em malha aberta ao degrau do sistema modelado matematicamente.....	32
Figura 15. Análise da resposta simulada para os parâmetros reais.....	33
Figura 16. Sistema $G(s)$ em malha aberta e a resposta do sistema ao degrau.....	34
Figura 17. Sistema $G(s)$ em malha fechada e a resposta do sistema ao degrau.	34
Figura 18. Polos e zeros de $G(s)$ em malha fechada e a resposta do sistema.	35
Figura 19. Limite de estabilidade do sistema $G(s)$ em malha fechada.	35
Figura 20. Polos e zeros de $G(z)$ em malha fechada e a resposta do sistema.	36
Figura 21. Controlador PI em malha fechada e a resposta do sistema.....	38
Figura 22. Comparação do sistema em malha fechada após inserir o controlador PI.	39
Figura 23. Polos e zeros de $C(s)*G(s)$ em malha fechada e a resposta do sistema.	39
Figura 24. Resposta discretizada do sistema controlado ao degrau.	41
Figura 25. Raízes e resposta discretizada do sistema controlado.	42

Figura 26. Comportamento do sistema com distúrbios de iluminância.	42
Figura 27. Comportamento do sistema com ruído e mudanças de <i>Set point</i>	43
Figura 28. Atuação do sistema de controle discreto convertendo lux em volts.	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	TEMA.....	9
1.2	DELIMITAÇÃO DO ESTUDO	10
1.3	PROBLEMA.....	10
1.4	OBJETIVOS	11
1.4.1	Objetivo Geral.....	11
1.4.2	Objetivos Específicos	11
1.5	JUSTIFICATIVA.....	11
1.6	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	13
1.7	EMBASAMENTO TEÓRICO	13
1.8	ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1	NORMAS TÉCNICAS DE ILUMINAÇÃO.....	16
2.2	CIRCUITO DE AQUISIÇÃO	18
2.3	MODELAGEM MATEMÁTICA DE UM SISTEMA DE PRIMEIRA ORDEM ..	20
2.4	PARÂMETROS DE UM CONTROLADOR PID	21
2.5	DISCRETIZAÇÃO DE UM SISTEMA CONTÍNUO	24
2.6	DIGITALIZAÇÃO DE UM SISTEMA DISCRETO.....	26
3	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	27
3.1	COLETA DE DADOS.....	27
3.2	MODELAGEM DA PLANTA EM MALHA ABERTA.....	29
3.3	ANÁLISE SIMULADA DA PLANTA $G(s)$	32
3.4	ANÁLISE SIMULADA DA ESTABILIDADE DO SISTEMA EM MALHA FECHADA	34
3.5	DISCRETIZAÇÃO DA PLANTA $G(s)$	36
3.6	SINTONIA DO CONTROLADOR.....	37
3.7	ANÁLISE SIMULADA DO CONTROLADOR PI.....	38
3.8	ANÁLISE DA ESTABILIDADE DO SISTEMA CONTROLADO NO DOMÍNIO S	39

3.9	DISCRETIZAÇÃO DO CONTROLADOR PI C(s)	40
3.10	EQUACIONAMENTO DO SISTEMA DISCRETIZADO EM MALHA FECHADA	40
3.11	RESPOSTA DO SISTEMA CONTROLADO NO DOMÍNIO Z.....	41
3.12	ANÁLISE DA ESTABILIDADE DO SISTEMA CONTROLADO NO DOMÍNIO Z	41
3.13	PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR DIGITAL.....	43
4	CONCLUSÕES.....	47
	REFERÊNCIAS.....	49

INTRODUÇÃO

A sociedade contemporânea vêm gradativamente substituindo sistemas de iluminação menos eficientes por novas tecnologias em busca da redução de custos e aumento do rendimento energético de equipamentos e instalações (COPEL, 2005). Com base nisso, este trabalho será desenvolvido para sistemas de iluminação.

O presente capítulo apresenta inicialmente o tema e a delimitação do estudo que será realizado. A problemática envolvendo eficiência energética e de iluminação, os objetivos a serem alcançados com o trabalho e a justificativa são abordados em sequência. Os procedimentos metodológicos, o embasamento teórico e a estruturação do trabalho encerram o capítulo 1.

1.1 TEMA

A primeira fase da evolução das lâmpadas começou com Thomas Edison com filamentos que quando percorridos por corrente elétrica eram aquecidos e produziam luz. Este método, pouco eficiente, convertia somente 5% da energia elétrica em luz, o restante era perdido em forma de calor. A segunda fase surgiu nos anos 30 com a criação das lâmpadas fluorescente, sem filamento, utilizando mistura de gases, são mais econômicas e eficientes. Atualmente a sociedade vive uma transição com o aprimoramento da tecnologia LED, desenvolvida nos anos 60. Esta forma de iluminação é a terceira fase da evolução das lâmpadas e atual estado da arte (RANGEL, M. G.; et. al., 2009).

O LED (*Light Emission Diode*) é um diodo emissor de luz que está sendo atualmente utilizado na substituição de outras tecnologias de iluminação convencionais, entre elas a incandescente e a fluorescente (ESPECIALIZE, 2012). Tal fato está relacionado com as vantagens em comparação às outras tecnologias devido a: não emissão de raios ultravioletas (UV) nocivos à saúde; trabalhar em tensões seguras aos seres humanos; ter vida útil muito superior (até 50.000 horas); ser mais resistente à impactos e vibrações; e ser até 50% mais eficiente energeticamente, por desperdiçar menos energia em forma de calor (NOVICKI, J. M.; et. al., 2008).

Além de todas as vantagens abordadas, sistemas LED permitem a dimerização, ou seja, o controle da intensidade luminosa, o que permite reduzir

ainda mais o seu consumo, quando aplicado em ambientes que utilizam uma grande quantidade de lâmpadas.

Dessa forma, o tema a ser explorado pelo estudo é o modelamento matemático de um sistema de iluminação LED e a proposta de um controlador retroalimentado.

1.2 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

O modelamento matemático de um sistema será baseado em dados experimentais coletados em um ambiente que reproduz as características mínimas estabelecidas pelas normas técnicas em relação ao público alvo.

Estes ensaios, realizados utilizando um luxímetro, servem como base para determinar os níveis de iluminação adequados na aquisição de sinal pelo sensor resistivo sensível à luz, LDR (*light-dependent resistor*). Isso possibilita o desenvolvimento de um sistema de controle de baixo custo.

1.3 PROBLEMA

No contexto da redução do consumo de energia elétrica, o consumo de eletricidade apresenta nos últimos anos aumento gradativo pela sociedade brasileira. Associado a isso surge a necessidade da construção de novas usinas hidrelétricas e constante ativação das termelétricas, resultando em impactos ambientais e aumento no custo da produção de energia elétrica (SILVEIRA, R. M. C.; et. al., 2014).

Em grande parte dos estabelecimentos, boa parte da energia gasta em iluminação é subutilizada. Seja por ambientes sem a presença de usuários ou pelo constante emprego de potência máxima das fontes luminosas, não aproveitando a iluminação natural (SILVA, M. G.; et. al., 2014).

Tendo em vista estes problemas, uma alternativa para reduzir o consumo de eletricidade seria a utilização de sistemas mais eficientes, aproveitando melhor a capacidade produtiva do país.

Como melhorar o aproveitamento energético em ambientes de trabalho que necessitam constantemente de qualidade de iluminação?

Para responder à problematização será proposto um controlador de lâmpadas LEDs para manter os níveis de iluminação de um ambiente de trabalho adequado à

realização das tarefas nele desenvolvidas. Para isso, os detalhes estão apresentados nos próximos capítulos do trabalho.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Modelar matematicamente um sistema de iluminação de escritório e propor uma malha de controle.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Determinar os índices de luminosidade adequados para trabalhos em ambientes internos, a partir de normas técnicas.
- Modelar matematicamente a resposta de um sistema de iluminação LED.
- Propor um controlador digital para a iluminação do ambiente.
- Simular resultados e experimentos da malha de controle proposta.

1.5 JUSTIFICATIVA

No Brasil, os custos de iluminação representam 24% de todo o montante gasto com energia elétrica, sendo que 35% desse valor está concentrado nas residências, 41% no comércio, 19% na iluminação pública e 5% nas indústrias (ESPECIALIZE, 2012).

Um dos maiores objetivos em ambientes industriais, comerciais ou, até mesmo, residenciais, é alcançar o equilíbrio entre qualidade de iluminação, para garantir o rendimento máximo de trabalho ou conforto, com o custo.

Este custo pode ser relacionado tanto ao gasto de energia elétrica pelo sistema de iluminação, quanto pelo emprego de sistemas com tecnologias mais duradouras, baratas ou com menor manutenção (NOVICKI, 2008).

Uma das desvantagens observadas em lâmpadas convencionais incandescentes (obsoletas), mista, vapor de mercúrio e fluorescente é a baixa vida útil média (de 1000 a 15000 horas), além da necessidade de dispositivos externos como reatores para as duas últimas citadas (COPEL, 2005).

Ainda, a eficiência energética desses sistemas é baixa quando comparada às novas tecnologias baseadas em LED (RANGEL, 2009). Muitos produtos já estão

sendo desenvolvidos para substituir outros devido a sua eficiência e durabilidade (ESPECIALIZE, 2012).

Segundo Pinto (2008), a eficiência luminosa, medida em lúmens por Watt (lm/W), é a capacidade de emissão do fluxo luminoso com relação à sua potência, onde o fluxo luminoso representa a potência fornecida por uma fonte de luz, em lúmens (BARBOSA JUNIOR, 2012).

A tabela 1 ilustra um comparativo entre os diversos tipos de fontes luminosas e suas respectivas eficiências, sendo possível observar que a tecnologia LED está entre os sistemas mais eficientes e, devido ao seu tamanho reduzido associado à sua capacidade de coloração, está sendo implementado em sistemas de iluminação residenciais e comerciais.

Fonte Luminosa	Eficácia Luminosa (lm/W)
Incandescente	10 – 15
Halógenas	15 – 25
Mista	20 – 35
Vapor de Mercúrio	45 – 55
Fluorescente Tubular	55 – 75
Fluorescente Compacta	50 – 80
Vapor Metálico	65 – 90
Vapor de Sódio	80 – 140
LEDs	40 - 130

Tabela 1. Comparativo entre fontes de luz e sua eficiência.

Fonte: Pinto, 2008.

Portanto, é desejável, sempre que possível, substituir os sistemas de iluminação menos eficientes por novos com maior rendimento. Estas tecnologias buscam aproveitar a energia fornecida pela rede elétrica da melhor forma possível, transformando energia elétrica em luz com o mínimo de perdas em forma de calor.

Dessa forma, além de desenvolver novas tecnologias mais eficientes, é preciso estudar e propor ideias para reduzir os gastos com energia elétrica na iluminação com técnicas inovadoras, dispositivos inteligentes, configuráveis ou adaptativos.

1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A realização deste trabalho compreende algumas etapas de estudo, coleta de dados e análise, desenvolvimento do controle, simulação e resultados.

Inicialmente deve-se realizar um estudo das especificações técnicas quanto aos termos específicos da área e sua aplicabilidade, a partir de normas técnicas.

Para a etapa de coleta de dados é necessário selecionar um ambiente que apresente características similares aos ambientes de aplicação do sistema, estabelecidos de acordo com as normas técnicas, e fazer verificações de luminosidade. Realizar neste local a coleta de dados seguindo as orientações da NBR 5382 e comparar o resultado obtido com a variação da resistência do sensor de luminosidade resistivo (LDR).

Utilizando o LDR, elaborar um circuito que permita a aquisição do sinal de iluminação em níveis de tensão, para futura implementação em sistemas digitais.

Ainda na etapa de aquisição dos sinais, levantar a curva da resposta do sistema de aquisição a um degrau de luminosidade, de acordo com a intensidade determinada pela norma técnica e testes experimentais.

Os experimentos devem servir como base para o modelamento matemático do comportamento do sistema em malha aberta. Este deverá ser parametrizado e implementado discretamente em malha fechada.

Posteriormente, o sistema discreto receberá um controlador discreto para fazer o ajuste da intensidade do sinal de saída baseado nos níveis de entrada.

Para finalizar o estudo, será proposta a implementação deste sistema controlado discretamente para sistemas digitais.

1.7 EMBASAMENTO TEÓRICO

As normas técnicas a serem utilizadas na determinação da intensidade luminosa e parâmetros para realização dos experimentos são: determinação dos termos e siglas pela NBR 5461 (TB 23) – Iluminação; os instrumentos e técnicas de medição de luminosidade, pela norma técnica NBR 5382 - Verificação de iluminância de interiores; e os cálculos da intensidade de iluminação adequada para os ambientes de estudo deste trabalho, a partir da norma técnicas NBR 5413 - Iluminância de interiores.

Para a coleta dos dados será utilizado um luxímetro. Segundo a NBR 5382, utilizando os métodos de análise a iluminância descritos pela norma, este equipamento é a ferramenta adequada na determinação dos parâmetros de iluminância de ambientes.

Para se modelar matematicamente a função de transferência de um sistema em malha aberta, podem-se utilizar vários métodos (DUARTE FILHO, M., 2014). A parametrização da resposta transitória de um sistema de primeira ordem pode ser obtida aplicando um degrau na entrada do sistema e observando característica da curva como tempo de atraso na resposta (tempo morto), tempo de subida (constante de tempo) e a relação entre a amplitude do degrau e da resposta (ganho do processo).

A análise da resposta do sistema, bem como a sintonia do controlador podem ser realizados empiricamente pelo método heurístico de Ziegler-Nichols (OGATA, 2007), visto sua ampla aplicação no modelamento matemático de sistemas contínuos industriais (MARIN, J. A.; et. al., 2008).

A utilização das transformadas de Laplace, integrada aos cálculos de controle contínuo, são essenciais para interpretar e desenvolver o controlador para o sistema em malha fechada. Durante o processo de discretização é utilizada a transformada Z e um tempo de amostragem compatível com a resposta do sistema.

Por fim, para implementar digitalmente o sistema pretendido, aplica-se a transformação do domínio Z para equações de diferenças, relacionando as amostras que o sistema digital verifica na entrada e a saída atual do sistema.

1.8 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho será composto de cinco capítulos. O capítulo 1 contextualiza a aplicação do trabalho, a problemática, os objetivos, as justificativas e sua estrutura.

No capítulo 2 é composto pela fundamentação teórica na análise da iluminação de ambientes, experimentação e parametrização de sistemas de primeira ordem, sintonia de controladores, discretização e projeto de sistemas digitais.

O capítulo 3 apresenta os resultados obtidos com os experimentos na coleta dos dados pelo luxímetro no ambiente para realizar a experimentação; a elaboração do modelamento da planta em malha aberta, aplicando o método de Ziegler-Nichols e a discretização da planta no domínio Z; a sintonia do controlador PID e a

discretização do controlador no domínio Z; e a proposta de implementação do sistema controlado discretizado para sistemas digitais, como microcontroladores.

O capítulo 4 encerra o trabalho apresentando as conclusões acerca dos resultados obtidos e objetivos alcançados no desenvolvimento do trabalho, bem como uma discussão e trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica utilizada no desenvolvimento do trabalho, essencial na obtenção dos resultados e para atingir os objetivos do trabalho.

2.1 NORMAS TÉCNICAS DE ILUMINAÇÃO

A primeira etapa do trabalho é contextualizar os termos, métodos e parametrizações estabelecidas pelas normas técnicas de iluminação. Este item é essencial para determinar os pontos de partida na escolha do ambiente de estudo, dos níveis adequados de iluminação e quais métodos de aquisição dos dados experimentais devem ser adotados.

Pela norma técnica NBR 5461 – Iluminação, é possível obter as definições de termos técnicos relacionados à iluminação, bem como suas formas de cálculo.

O termo iluminância, segundo a NBR 5461, é definida como a razão entre o fluxo luminoso incidente em uma superfície com relação à sua área. A unidade de medida utilizada é o lux ($lx = lm/m^2$). Este termo será utilizado ao longo dos próximos capítulos e servirá de base na determinação da intensidade luminosa adequada ao ambiente.

No presente trabalho pretende-se estabelecer qualidade na iluminação de uma bancada de trabalho esteja próxima à fonte luminosa. Dessa forma, a norma técnica NBR 5382 – verificação de iluminância de interiores, apresenta a metodologia para aquisição e análise dos dados relacionados provenientes da iluminação geral.

Para realizar-se o experimento é preciso um luxímetro na medição da iluminância resultante no ambiente. A norma NBR 5382 determina que as medições em um ambiente devem ser realizadas à 0,8 m do piso, com exposição à iluminância pretendida por um período de 5 a 10 minutos, para estabilizar a leitura do equipamento.

A terceira norma utilizada é a NBR 5413 – iluminância de interiores. Nela estão previstos parâmetros para determinação dos níveis adequados de iluminância para diversos ambientes.

Tendo em vista que a aplicação do presente trabalho são escritórios residenciais, comerciais e industriais, a partir da tabela 2 foi estabelecido

inicialmente a iluminância adequada à realização de atividades nos ambientes de aplicação do estudo.

Classe	Iluminância (lux)	Tipo de atividade
A Iluminação geral para áreas usadas interruptamente ou com tarefas visuais simples	20 - 30 - 50	Áreas públicas com arredores escuros
	50 - 75 - 100	Orientação simples para permanência curta
	100 - 150 - 200	Recintos não usados para trabalho contínuo; depósitos
	200 - 300 - 500	Tarefas com requisitos visuais limitados, trabalho bruto de maquinaria, auditórios
B Iluminação geral para área de trabalho	500 - 750 - 1000	Tarefas com requisitos visuais normais, trabalho médio de maquinaria, escritórios
	1000 - 1500 - 2000	Tarefas com requisitos especiais, gravação manual, inspeção, indústria de roupas.
C Iluminação adicional para tarefas visuais difíceis	2000 - 3000 - 5000	Tarefas visuais exatas e prolongadas, eletrônica de tamanho pequeno
	5000 - 7500 - 10000	Tarefas visuais muito exatas, montagem de microeletrônica
	10000 - 15000 - 20000	Tarefas visuais muito especiais, cirurgia

Tabela 2. Iluminâncias por classe de tarefas visuais.

Fonte: adaptado de NBR 5413.

Para a aplicação pretendida no estudo os parâmetros obtidos pela seleção na tabela 2 são:

- Classe B – Iluminação geral para área de trabalho;
- 2º item – Tarefas com requisitos visuais normais, trabalho médio de maquinaria, escritórios;
- Faixas de Iluminância adequada – 500 - 750 - 1000 lux.

Para o presente estudo, considerando a aplicação para ambientes de trabalho comerciais e industriais, com requisitos visuais normais, a classe B de iluminância é a mais adequada, representando iluminância na ordem de 500 a 1000 lux.

De acordo com a norma NBR5413, a iluminância adequada pode sofrer alteração de classe baseada nos fatores determinantes da iluminância adequada, descritos pela tabela 3, a partir das características da tarefa a ser realizada no ambiente e do observador.

Características da tarefa e do observador	Peso		
	-1	0	1
Idade	Inferior a 40 anos	40 a 55 anos	Superior a 55 anos
Precisão	Sem importância	Importante	Crítica
Refletância do fundo da tarefa	Superior a 70%	30 a 70%	Inferior a 30%

Tabela 3. Fatores determinantes da iluminância adequada.

Fonte: Adaptado de NBR5413.

Considerando os pesos de cada fator, a soma resultante indica se a seleção da faixa de iluminância adequada deve ser uma classe superior (para soma igual ou superior a 2), ou inferior (para soma igual ou inferior a -2).

Sendo assim, o público estimado para utilizar os espaços, em sua maioria, será composta por observadores de zero a 55 anos. Já a velocidade de resposta do sistema e a precisão são importantes na atuação da malha de controle. E a refletância do fundo da tarefa a ser considerada não deverá ser inferior a 30%.

De forma geral, a soma resultante dos fatores determinantes da iluminância adequada, considerando as características citadas, apresenta valor total compreendido entre zero e -1, eventualmente -2. Portanto, a classe selecionada não sofrerá alteração de faixa de iluminância, mantendo os 500 - 750 - 1000 lux à 0,8 m do chão.

Entre os diversos ambientes citados pela norma NBR5413, a seleção de um entre os três valores determinados pela classe (500, 750, 1000 lux) é determinado de acordo com vários fatores, onde, em sua maioria, apresentam valores de 500 lux com máximos de 750 lux.

Para as aplicações propostas por este trabalho, tanto 500 lux quanto 750 lux contemplam a maioria das aplicações, portanto, será considerado o valor de 750 lux como *set point* de controle do sistema, garantindo, assim, uma margem de erro aceitável para as variações das características dos ambientes.

2.2 CIRCUITO DE AQUISIÇÃO

O sensoriamento da iluminação do ambiente é importante para todas as próximas etapas do trabalho. Sendo assim, será utilizado um semiconductor fotoresistivo (LDR), sensível à variação da intensidade de irradiação eletromagnética

do espectro visível, modificando sua resistência interna (FARIA, I. A. C., 2012; SILVEIRA, R. M. C. et. al., 2014). Tal componente apresenta variação da resistência de forma não linear à variação da intensidade luminosa.

Dessa forma, para obter tensão (V_{saida}) como sinal de leitura e linearizar resposta é preciso utilizar a configuração de meia ponte resistiva, ilustrada pela figura 1, ou ponte de Wheatstone na obtenção de melhores resultados. A figura 1 ilustra o esquemático elaborado para o circuito de aquisição, por apresentar resultado satisfatório para a aplicação desejada.

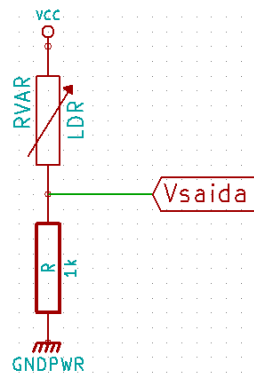


Figura 1. Esquemático do circuito de aquisição da iluminância do ambiente.

Fonte: autoria própria.

Considerando que o sinal a ser discretizado utiliza um sensor LDR resistivo de 5 mm, configurado em meia ponte para linearização da tensão de saída, o divisor de tensão com a parte inferior da ponte apresenta um resistor R_1 de *pull-down* de 1k Ω . Com isso, o esquema de ligação ilustrado pela figura 1, apresenta na tensão de saída uma fração da tensão de alimentação (V_{CC}), no caso 3,3 V, onde a tensão de saída é obtida a partir da equação 1.

$$V_{saida} = \frac{R}{LDR+R} * V_{CC} \quad (1)$$

A partir de experimentos utilizando o luxímetro foram obtidas as curvas de resistência (em azul) e tensão de saída do circuito de aquisição (em cinza) pela iluminância, ilustrados na figura 2, onde a tensão de saída apresenta um comportamento aproximadamente linear em relação à iluminância do ambiente.

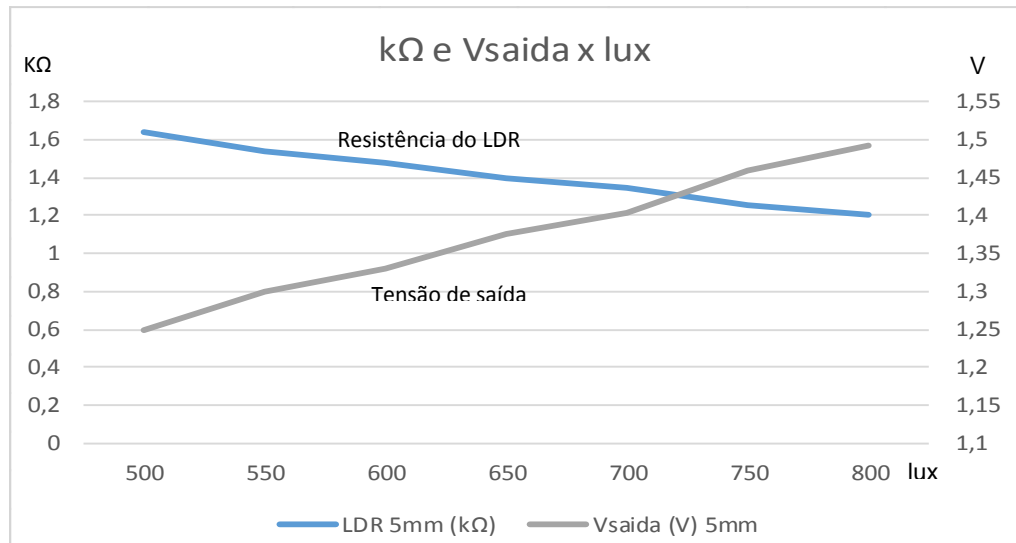


Figura 2. Resposta do sensor resistivo e da tensão de saída com a variação da iluminação do ambiente.

Fonte: autoria própria.

A iluminação aplicada neste experimento seguiu as especificações das normas técnicas, aproveitando uma parcela considerável dos limites da escala (0 a 3,3 V). Isso permite a correta aquisição por um sistema digital para a implementação do controle discreto sem saturar o conversor analógico digital (AD) do microcontrolador.

2.3 MODELAGEM MATEMÁTICA DE UM SISTEMA DE PRIMEIRA ORDEM

A determinação da função de transferência de um sistema de primeira ordem em malha aberta pode ser determinado por diversos métodos presentes na literatura. Neste estudo será aplicado o método heurístico de Ziegler-Nichols, devido a sua simplicidade no levantamento da função de transferência e aplicação na indústria (SARAIVA, S. A., 2011).

Neste método, os parâmetros da função de transferência de uma planta são determinados de forma empírica e equacionados no domínio de Laplace, domínio S.

Sabe-se que a função de transferência de uma planta é uma relação da resposta obtida na saída do sistema com relação à sua entrada no tempo.

A parametrização do método consiste em aplicar um degrau unitário à entrada de uma planta e verificar a resposta deste sistema (OGATA, 2007), conforme ilustrado pela figura 3.

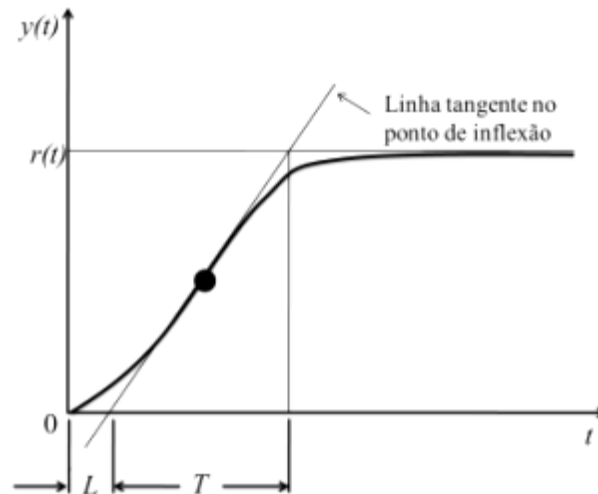


Figura 3. Resposta de um sistema de primeira ordem em malha.

Fonte: adaptado de Ogata, 2007.

Onde:

- L = tempo morto. Tempo de atraso que o sistema leva para começar a responder ao degrau no sinal de entrada.
- T = tempo de subida. Tempo de transição da resposta do sistema.
- r = nível do sinal em regime permanente.

Estudos recentes demonstram a aplicabilidade da equação 2, proposta por Ziegler-Nichols para sistemas de primeira ordem com tempo morto, na representação da resposta dinâmica da planta para um sistema em malha aberta, devido à sua eficiência no modelamento até os dias atuais (SILVA, F. T., 2005; DUARTE FILHO, M., 2014).

$$G(s) = \frac{k_p}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \quad (2)$$

2.4 PARÂMETROS DE UM CONTROLADOR PID

Existem diversas formas de controlar um sistema, entre eles o controlador Proporcional-integral e derivativo (PID) é um dos mais utilizados na indústria para o controle de processos (SILVA, F. T., 2005; DUARTE FILHO, M., 2014). Sua vantagem é a possibilidade de implementação tanto contínua quanto discreta.

Sabe-se que um sistema dinâmico $G(s)$, contínuo, linear e invariante no tempo, apresenta um sinal de saída $X(s)$ a partir da conversão do sinal de entrada $U(s)$, conforme ilustrado na figura 4.

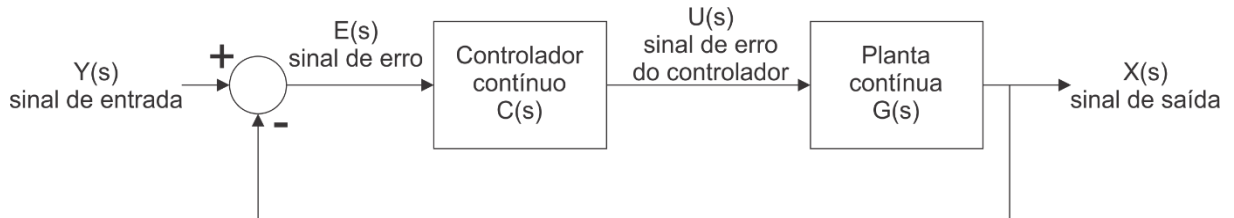


Figura 4. Representação de um sistema contínuo com realimentação unitária.

Fonte: adaptado de Ogata, 2007.

As funções de transferência resultantes das etapas deste sistema podem ser obtidas a partir das equações 3 e 4.

$$G(s) = \frac{X(s)}{U(s)} \quad (3)$$

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} \quad (4)$$

Para tais efeitos será utilizada a seguinte notação:

- $u(t)$ = sinal de saída do controlador, domínio contínuo do tempo.
- $e(t)$ = sinal de erro na entrada do controlador, no domínio contínuo do tempo.
- $u[k]$ = sinal de saída do controlador, no domínio discreto, quando $t = k$.
- $e(k)$ = sinal de erro na entrada do controlador, no domínio discreto, quando $t = k$.
- K_p = constante de proporcionalidade associada ao termo proporcional.
- K_i = constante de proporcionalidade associada ao termo integral.
- K_d = constante de proporcionalidade associada ao termo derivativo.

Segundo Ogata (2007), o funcionamento deste controle consiste-se em aplicar um ganho ao sinal aplicado à entrada da planta (ganho de malha), a fim de alterar as características transitórias e estáticas de controle para atender as especificações de projeto. Dessa forma, quando a saída do sistema for menor que o

valor de referência o sinal de controle deverá ser positivo, caso contrário, o sinal de controle será negativo. A equação da constante proporcional é dada pela equação 5.

$$u(t) = K_p e(t) \quad (5)$$

Em muitos casos, onde há erro na saída do sistema, apenas o recurso do ganho não é o suficiente. Nesses casos, aplica-se então a ação integral, a fim de anular o erro em regime permanente. Esta ação causa modificações no tipo do sistema com diferentes entradas de degrau unitário, indo pelo menos para o tipo 1, onde o erro em regime é nulo para aplicação de degrau na entrada.

Dessa forma, um termo integrativo ao controlador pode ser obtido aplicando a equação 6, onde T_i é o tempo integral ou *reset-time*.

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} = \frac{1}{T_i s} \quad (6)$$

Por fim, a ação derivativa tem característica antecipativa, ou preditiva, das ações do sistema, visando acelerar a resposta ao erro, não atuando em regime permanente estável. Quanto maior for a inclinação na variação da entrada, maior será o ganho derivativo. Essa ação pode causar instabilidade no sistema em que há ruído. A equação 7 apresenta como determinar o termo derivativo para o controlador.

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_d s = T_d s \quad (7)$$

O controlador PID apresenta a função de transferência de acordo com a equação 8, onde, os parâmetros que serão sintonizados são K_p , k_i e k_d .

$$U(s) = K_p E(s) + \frac{K_i}{s} E(s) + K_d s E(s) \quad (8)$$

Dessa forma, o controlador digital pode ser obtido, a partir de aproximação *backward*, pelos termos da equação 9, onde T é o período de amostragem do sistema:

$$C(z) = \frac{(K_p + T K_i + \frac{K_d}{T}) z^2 - (K_p + \frac{2K_d}{T}) z + \frac{K_d}{T}}{z(z-1)} \quad (9)$$

2.5 DISCRETIZAÇÃO DE UM SISTEMA CONTÍNUO

O presente trabalho pretende demonstrar o desenvolvimento de um sistema de controle discreto para o sistema ilustrado pela figura 5.

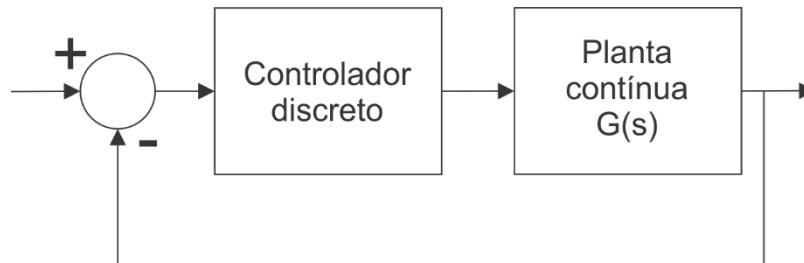


Figura 5. Representação de um sistema discreto controlado em malha fechada.

Fonte: adaptado de Ogata, 2007.

Os blocos internos do controlador podem ser representados conforme ilustrado pela figura 6, contendo um amostrador, conversor analógico-digital (AD), computador para processamento das informações, conversor digital-analógico (DA) e um grampeador para controlar o tempo amostral de saída (OGATA, 2007).

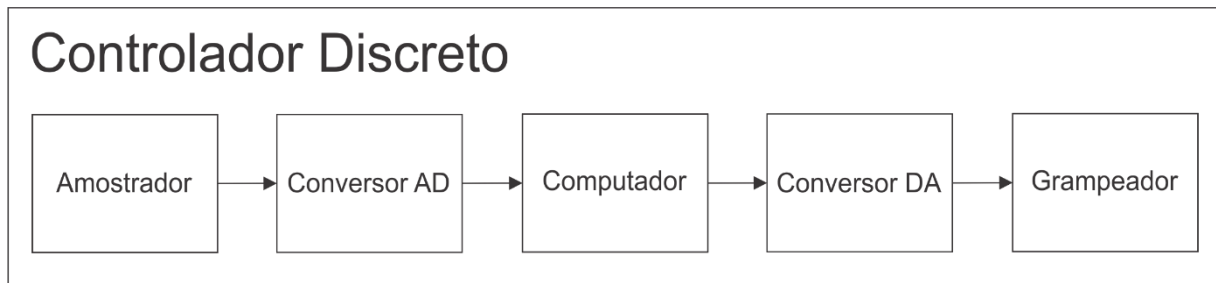


Figura 6. Blocos internos de um controlador digital.

Fonte: adaptado de Ogata, 2007.

Este controlador é composto por um bloco de amostragem dos sinais de entrada que determina o tempo amostral do sistema; uma etapa para conversão do sinal analógico em digital, quantizando a tensão analógica em níveis dentro de uma escala; posteriormente a etapa de processamento dos dados realiza a lógica de controle; passando ao conversor digital para analógico que transforma o resultado do processamento em um nível de tensão; este nível de tensão deverá então atuar na planta contínua dentro de um tempo amostral estabelecido.

A etapa de amostragem, em termos práticos, deve periodicamente efetuar leituras dos níveis de iluminação ao longo do tempo $e(t)$, obtidos pelo sensor, que serão armazenados em uma sequência de amostras $e[k]$.

Já a etapa de grameamento realiza o processo oposto ao da amostragem, garantindo que o sinal fornecido para o sistema periodicamente $u[k]$ seja compatível com a aplicação contínua $u(t)$.

A etapa de discretização deve seguir o teorema de Shannon/Nyquist, o qual deve coletar a sequência de amostras com uma frequência pelo menos duas vezes maior que a frequência de oscilação do sinal de entrada. Isso é necessário para evitar que dados essenciais na interpretação do comportamento da variável a ser controlada sejam perdidos, o que prejudicaria a lógica de controle do processo.

Da mesma forma, a saída do sistema deve ter frequência de amostragem de reprodução de pelo menos o dobro da frequência dos sinais a serem reproduzidos.

Sendo assim, a figura 7 ilustra a entrada de um sistema de controle discreto, no domínio da Transformada Z, utilizada na formulação da equação de diferenças, amostrada em k e embarcada na lógica de controle dos sistemas digitais.

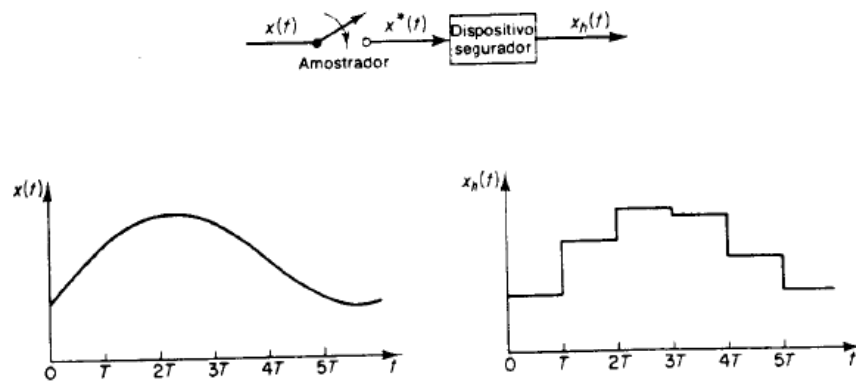


Figura 7. Amostragem de um sinal analógico.

Fonte: adaptado de Ogata, 2007.

Este procedimento é realizado de forma inversa na saída do sistema de controle, resultando em um sinal aproximadamente analógico, quanto menor for o tempo de amostragem.

2.6 DIGITALIZAÇÃO DE UM SISTEMA DISCRETO

O sistema capaz de realizar o controle discreto pode utilizar equações obtidas pelas funções de transferência a partir da Transformada Z, ou por equações discretas ou de diferença.

Para o presente estudo será considerado que o sistema é linear (onde as saídas do sistema são resultantes das combinações das entradas) e invariante no tempo (quando a resposta $x[k]$ do sistema independe do momento da entrada $u[k]$). Ainda, a representação das amostras da variável discreta $x[k]$ de sucessivas amostras será representado por $x[k-n]$, $x[k-1]$, $x[k]$, $x[k+1]$, $x[k+n]$, onde $x[k]$ é a amostra atual (OGATA, 2007).

Em um sistema discreto, a saída $y[k]$ é o resultado da associação das amostras passadas e atual de entrada, $u[k]$, $u[k-1]$, $u[k-2]$, $u[k-n]$, ou seja, uma função em que $y[k]=f[u[k]]$. Este sistema pode também depender ou não das próprias saídas geradas anteriormente, $y[k-1]$, $y[k-2]$, $y[k-n]$, etc., sendo denominado sistema recursivo - quando a saída atual depende de saídas anteriores – ou não recursivo – quando a saída atual não depende de saídas anteriores.

3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo estão apresentados os resultados dos experimentos feitos para coletar os dados no ambiente de estudo; o modelamento da planta em malha aberta e sua discretização no domínio Z; a sintonia do controlador PID e a discretização do controlador no domínio Z; e a proposta de implementação do sistema controlado discretizado utilizando equações de diferenças em sistemas digitais microcontrolados.

3.1 COLETA DE DADOS

Considerando que a aplicação proposta no presente estudo será para ambientes de escritórios comerciais, residenciais ou industriais, no qual os níveis de iluminância, segundo a norma NBR 5413, devem estar compreendidos entre 500 e 750 lux, estabeleceu-se uma altura para o pé direito do ambiente em aproximadamente 2,70 m, no qual a fonte luminosa encontra-se à 2,60 m do piso.

Para fins de cálculo, de acordo na norma NBR 5382, as medições de iluminância devem ser realizadas utilizando um luxímetro à 0,80 m do piso, obtendo-se o resultado final média aritmética de quatro pontos em áreas de 0,5 m x 0,5 m.

Como o sistema de controle contará com o sensor LDR, anexo à fonte luminosa, será considerado que o ambiente de aplicação apresenta refletância mínima superior a 30%, comum em escritórios, possibilitando obter os resultados de resposta do sistema de controle por meio experimental.

Dessa forma, aplicou-se experimentalmente em um ambiente com as características alvo fontes luminosas artificiais, sem interferência externa de outras fontes, respeitando as dimensões selecionadas, conforme ilustrado na figura 8 abaixo:

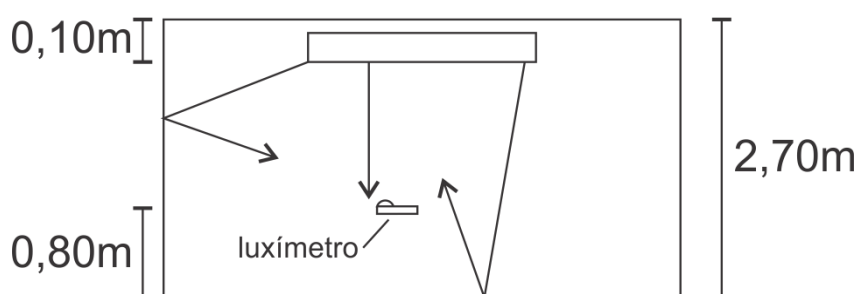


Figura 8. Experimento para coleta de dados no ambiente de estudo.

Fonte: autoria própria.

A partir dos valores de 500 a 750 lux obtidos com o luxímetro, efetuou-se a medição da iluminância posicionado o luxímetro na fonte luminosa, e posteriormente o sensor de controle, no mesmo local do luxímetro, conforme ilustrado pela figura 9.

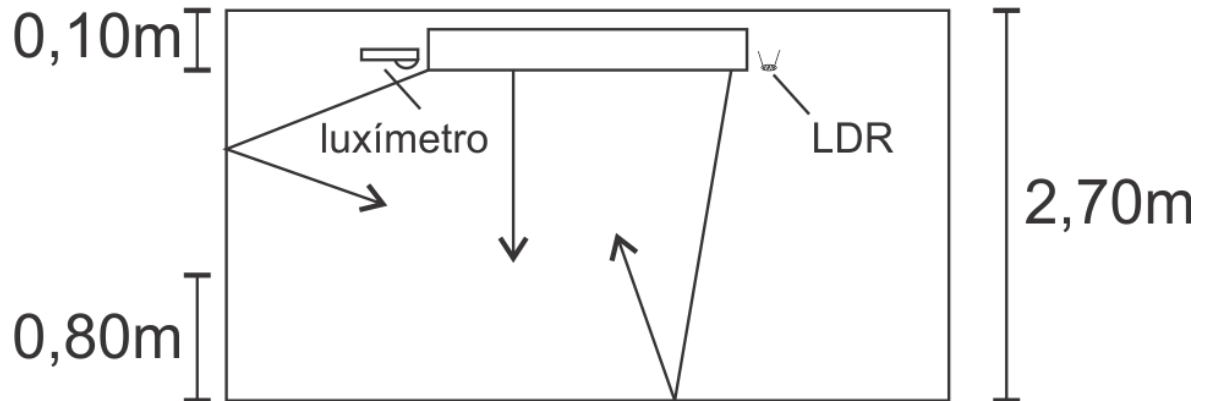


Figura 9. Método de coleta de dados experimentais com sensor na fonte luminosa.

Fonte: autoria própria.

Dessa forma, foi possível determinar a intensidade luminosa recebida pelo sensor em um ambiente de aplicação com características similares à aplicação pretendida. Os resultados estão apresentados no gráfico da figura 10.

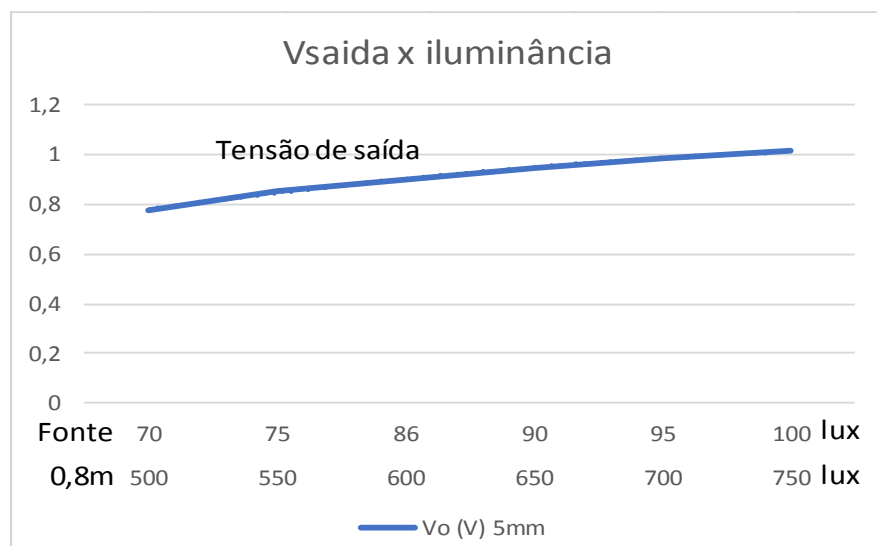


Figura 10. Resposta da tensão de saída para o sensor posicionado na fonte luminosa em relação à bancada de trabalho.

Fonte: autoria própria.

A tensão de saída do sistema de aquisição corresponde ao primeiro valor de iluminância do eixo x, de 70 a 100 lux. Esta iluminância obtida foi observada da fonte, tanto pelo luxímetro quanto pelo sensor. Para cada valor obtido da fonte o

sistema de iluminação proporcionava à 0,8m do piso a segunda escala de iluminância, de 500 a 750 lux.

Além das interferências sofridas por fontes luminosas artificiais, é possível que outras fontes de iluminação incidam sobre o ambiente nas aplicações práticas do sistema, como a iluminação natural do sol através de janelas de vidro.

3.2 MODELAGEM DA PLANTA EM MALHA ABERTA

Para verificar qual é a resposta do sistema em malha aberta foi montado um experimento sem interferências externas em laboratório, conforme a figura 11 ilustra.

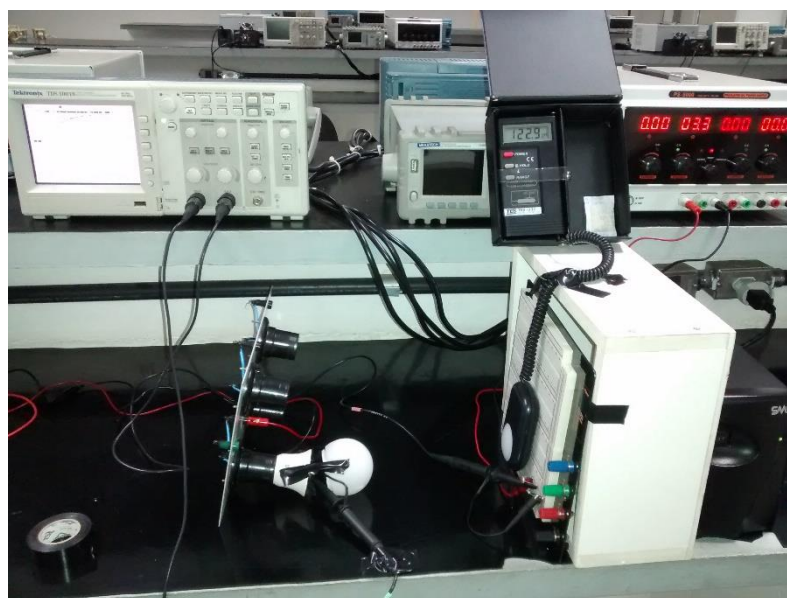


Figura 11. Experimento da resposta do sistema ao degrau de iluminância.

Fonte: autoria própria.

No experimento, o sistema foi isolado de interferências externas de iluminação, sendo colocado o sensor e o luxímetro recebendo um degrau de iluminação de 100 lux, aproximadamente, seguindo a metodologia das normas técnicas.

Dessa forma, obteve-se o resultado do osciloscópio utilizando dois canais, ilustrado pela figura 12. Nele, o sinal superior (canal 1) é o degrau de entrada, referente à tensão aplicada pela fonte da lâmpada (37,2 V) aos LEDs, enquanto o sinal inferior (canal 2) corresponde à resposta do sensor ao degrau (976mV em regime permanente).

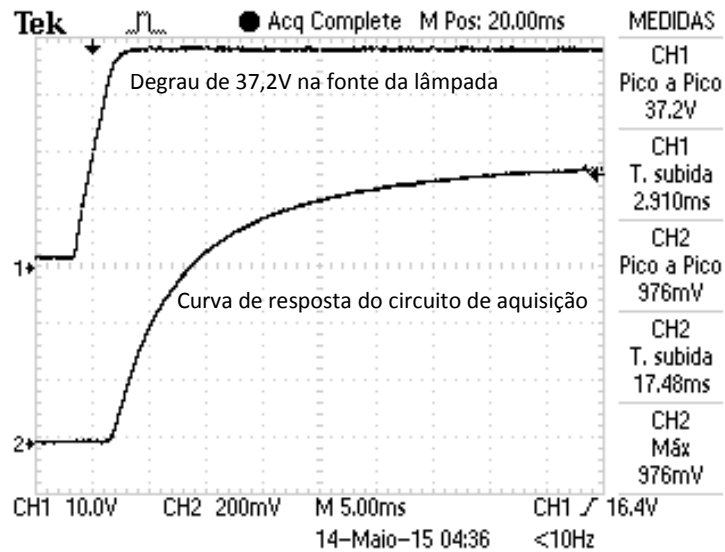


Figura 12. Resposta do sistema de aquisição ao degrau de iluminância.

Fonte: autoria própria.

Para o experimento foram utilizados os seguintes parâmetros de configuração do circuito, obtendo-se os seguintes dados:

- Tensão de alimentação do circuito 3,3 V.
- Resistor de *pull-down*: 1k Ω .
- Iluminância no luxímetro antes do experimento: 0,00 lux;
- Tensão de saída do circuito de aquisição antes do experimento: 0m V;
- Iluminância no luxímetro após a aplicação do degrau: ~100 lux;
- Tensão de saída do circuito de aquisição após aplicação do degrau: 976m V;

Existe diversos métodos heurísticos para a análise da resposta ao degrau em um processo em malha aberta. O método escolhido para o modelamento do sistema foi o de Ziegler-Nichols (1942), devido à sua aproximação ao valor de *set-point* em com controle PID ser muito próximo ao ideal em regime, contendo apenas algum atraso quanto à estabilização do sistema.

Para se obter a função de transferência pelo método de Ziegler-Nichols é preciso aplicar um degrau na entrada do sistema e analisar o tempo que o sistema leva para responder ao degrau, conhecido como tempo morto (Θ), o tempo de subida, pela constante de tempo (τ), e o ganho k , relação entre a variação na tensão de saída (Δy) pela variação na tensão de entrada (Δu), ou seja, $k = \Delta y / \Delta u$.

Dessa forma, os dados necessários para o modelamento pelo método de Ziegler-Nichols está ilustrado pela figura 13.

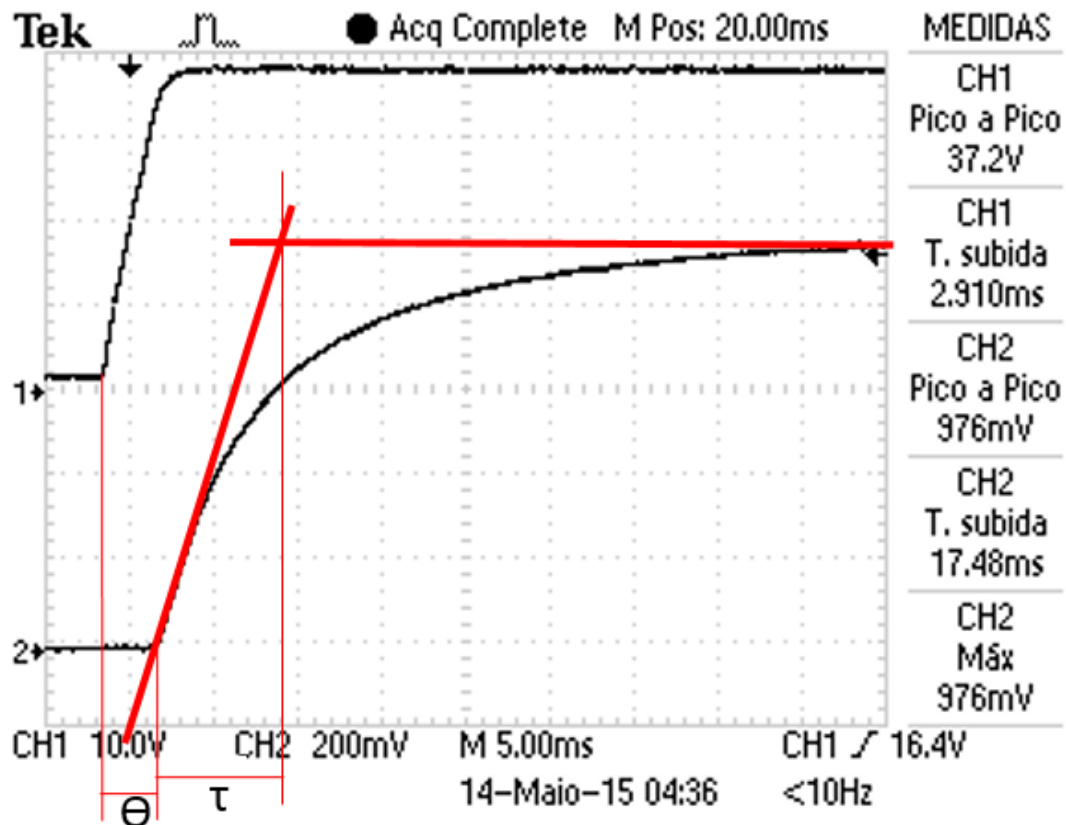


Figura 13. Análise da resposta do sistema ao degrau pelo método heurístico de Ziegler-Nichols.

Fonte: autoria própria.

Os resultados obtidos empiricamente pelo gráfico da resposta do sistema ao degrau foram:

- Tempo morto: $\theta = 3,2\text{m s}$;
- Tempo de subida: $\tau = 7,5\text{m s}$;
- Variação da saída: $\Delta y = 0,976$;
- Variação da entrada: $\Delta u = 37,2$; e
- Relação saída/entrada: $k = 0,02624$.

A partir dos resultados dos cálculos e medições realizadas no gráfico de resposta ao degrau é possível determinar a função de transferência pelo método de Ziegler-Nichols, considerando a existência de tempo morto e o sistema sendo de

primeira ordem, a partir da equação 2 é possível obter a função de transferência $G(s)$, pela transformada de Laplace no domínio S .

$$G(s) = \frac{0,02624}{7,5 * 10^{-3}s + 1} * e^{-3,2*10^{-3}s}$$

3.3 ANÁLISE SIMULADA DA PLANTA $G(s)$

Aplicando-se a função de transferência obtida na análise de degrau em malha aberta no software matemático Matlab®, utilizando o código a seguir, obteve-se o gráfico da resposta do sistema em função do tempo, ilustrado pela figura 14.

```
s = tf('s') %declaração de 's' como variável da função de
transferência
Gs=0.02624/(7.5*10^(-3)*s+1)*exp(-3.2*10^(-3)*s) %func transf G(s)
figure()
step(37.2*Gs) %plota a resposta de G(s) ao degrau no tempo
```

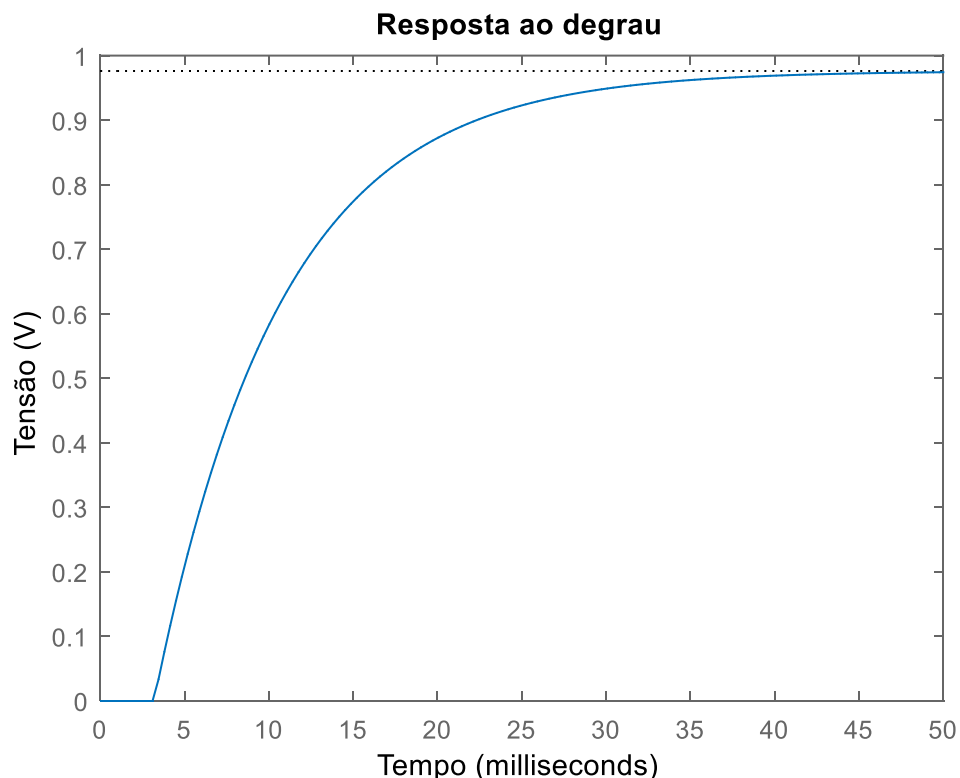


Figura 14. Resposta em malha aberta ao degrau do sistema modelado matematicamente.

Fonte: autoria própria.

Aplicando a mesma análise de Ziegler-Nichols, feita para o sistema real, para a resposta simulada, obtém-se o gráfico ilustrado pela figura 15.

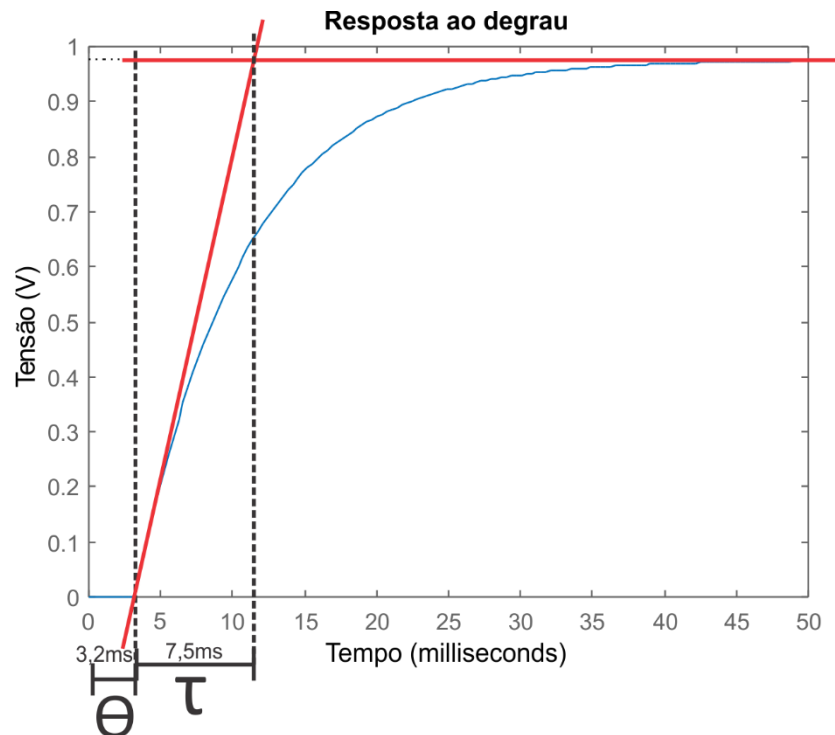


Figura 15. Análise da resposta simulada para os parâmetros reais.

Fonte: autoria própria.

É possível observar a proximidade dos valores reais com os valores esperados com o modelamento matemático do sistema ilustrados pelo tempo morto e constante de tempo na figura 15. Ao ser aplicado 37,2V na fonte luminosa, obtém-se 976mV na saída do circuito de aquisição, complementando a resposta do ganho.

Sabe-se que este método proposto por Ziegler-Nichols é aplicado em estudos preliminares na determinação de modelamentos matemáticos, analogamente a outros métodos da literatura, identificando características e equacionando a partir de observações realizadas empiricamente.

Dessa forma, este método resulta em uma análise inicial para equacionar um modelo do sistema, que, por muitas vezes precisa ser modificado para se obter exatamente o comportamento da planta estudada, variando o tamanho do degrau aplicado, trabalhando por equacionamentos por faixas de escala, entre outros.

A mesma resposta foi obtida por simulação na ferramenta Simulink do Matlab®, conforme ilustrado pela figura 16, análise do sistema para aplicação do degrau em um sistema de malha aberta.

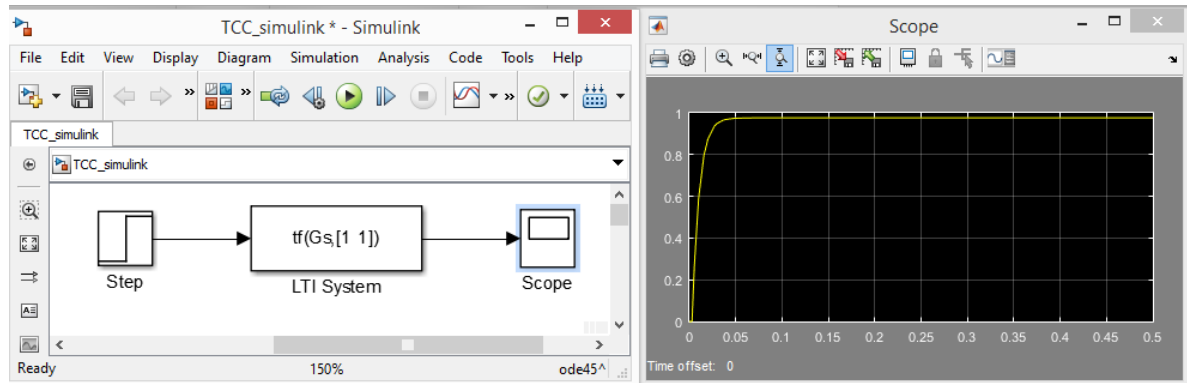


Figura 16. Sistema $G(s)$ em malha aberta e a resposta do sistema ao degrau.

Fonte: autoria própria.

Dessa forma, foi possível determinar que a modelagem matemática do sistema, pelo método de Ziegler-Nichols para sistemas de primeira ordem com tempo morto, apresenta de forma simplificada uma representação matemática satisfatória para representar aproximadamente o comportamento do sistema real.

3.4 ANÁLISE SIMULADA DA ESTABILIDADE DO SISTEMA EM MALHA FECHADA

Considerando uma realimentação unitária, é possível obter a resposta ilustrada pela figura 17.

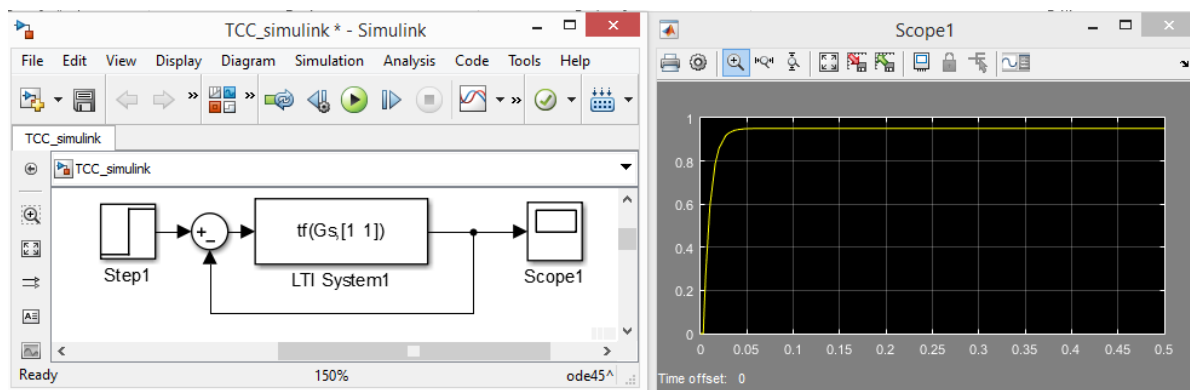


Figura 17. Sistema $G(s)$ em malha fechada e a resposta do sistema ao degrau.

Fonte: autoria própria.

Utilizando a ferramenta Sisotool do Matlab© foi possível analisar os polos e zeros do sistema com realimentação unitária e sua resposta para diversos valores de ganho, obtido a partir do código a seguir, conforme ilustra a figura 18.

sisotool (Gs)

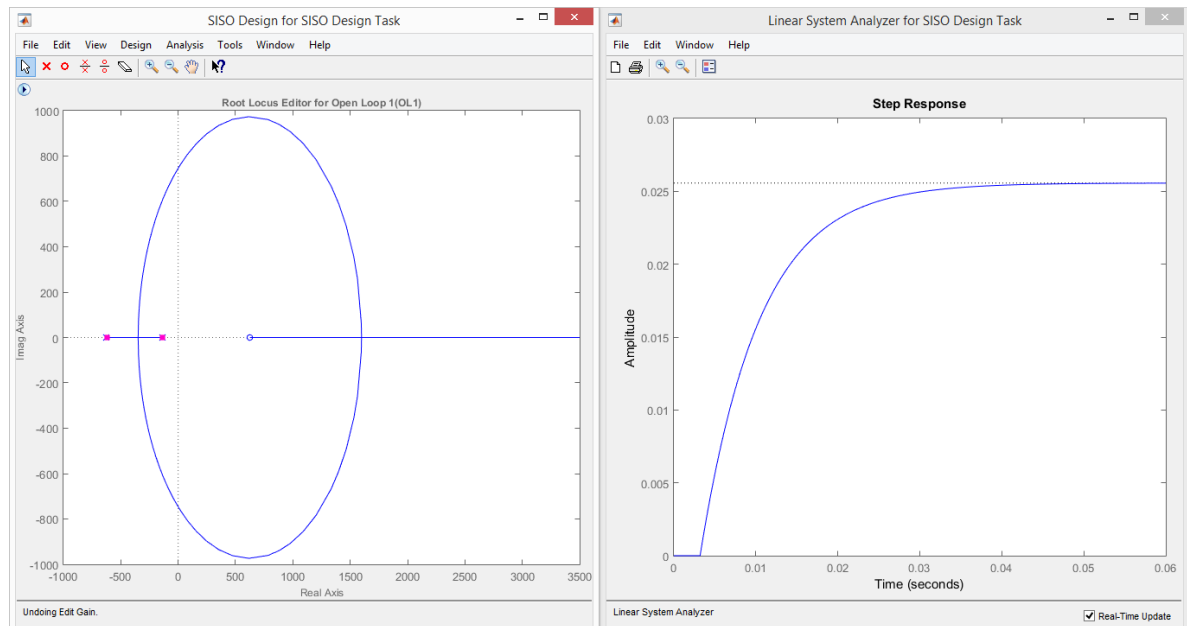


Figura 18. Polos e zeros de $G(s)$ em malha fechada e a resposta do sistema.

Fonte: autoria própria.

Dessa forma, pode-se observar que o sistema em malha fechada é estável para ganho de valores iguais ou inferiores a 164. Pois, com o aumento do ganho, a velocidade de resposta do sistema aumenta e conseqüentemente seu sobressinal até a instabilidade. O limite da estabilidade pode ser observada na figura 19.

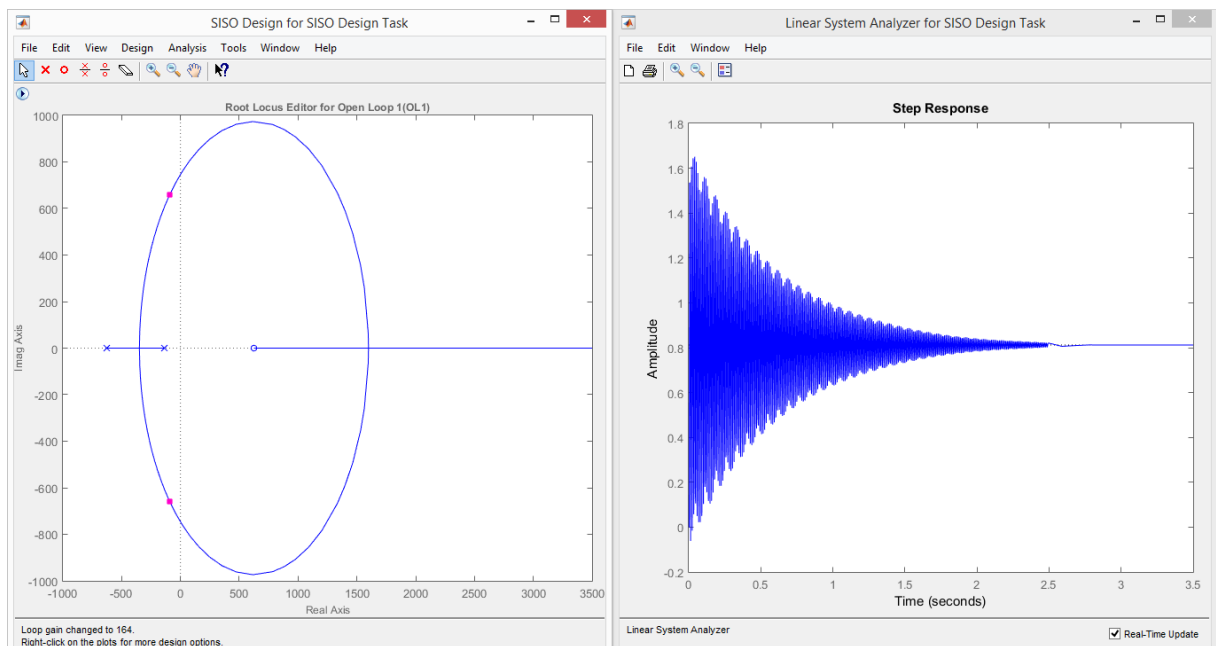


Figura 19. Limite de estabilidade do sistema $G(s)$ em malha fechada.

Fonte: autoria própria.

3.5 DISCRETIZAÇÃO DA PLANTA $G(s)$

A discretização do sistema pode ser obtida pelo Matlab© utilizando um segurador de ordem zero (*zero order hold* - ZOH), correspondente ao comportamento prático a ser implementado ao *firmware* do microcontrolador. A função de transferência no domínio Z, para um período de amostragem de 0,01 s, é possível ser obtida conforme o trecho de código.

```
Gz = c2d(Gs,0.01,'zoh') %conversão de G(s) para G(z) por segurador de
ordem zero e taxa de amostragem de 10m s.
```

A partir disso, pode-se obter a função de transferência $G(z)$.

$$G(z) = \frac{0.01564 z + 0.003681}{z(z - 0.2636)}$$

A figura 20 ilustra a discretização do sistema com realimentação unitária pelo Sisotool, obtida pelo código a seguir, apresentando a resposta discretizada, os polos e zeros.

```
sisotool(Gz)
```

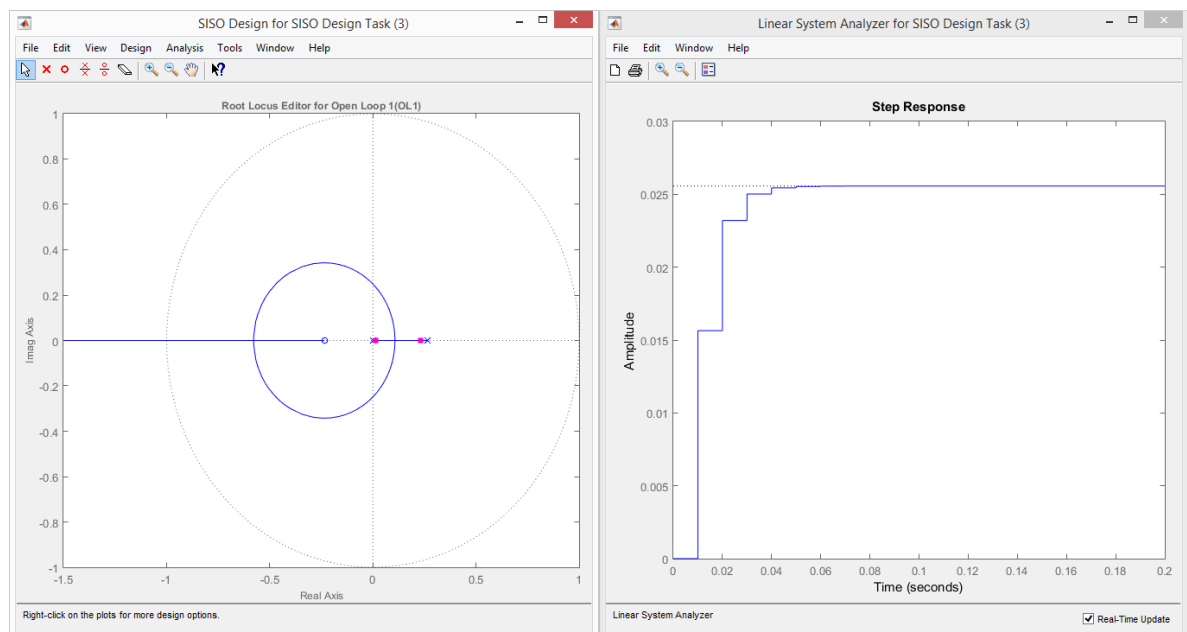


Figura 20. Polos e zeros de $G(z)$ em malha fechada e a resposta do sistema.

Fonte: autoria própria.

3.6 SINTONIA DO CONTROLADOR

Para ser realizar a sintonia dos parâmetros PID existem vários métodos, entre os quais pode-se utilizar o método de Ziegler-Nichols e aproveitar os valores já observados durante o modelamento matemático do sistema.

Um dos fatores de escolha deste método está a minimização da integral do erro, mantendo o valor de saída dentro do valor estabelecido na entrada (*set-point*), controle rápido, evitar sobressinais e rejeitar efeitos de perturbações que afetem o comportamento do sistema (OGATA, 2007).

Para o presente estudo, um controlador PI será implementado, devido a necessidade de modificar o ganho do sistema e minimizar o erro, sem a necessidade de predição.

Dessa forma, devido às variações de iluminação natural serem na ordem dos segundos, enquanto a resposta do sistema ser na ordem dos mili segundos não será utilizada a ação derivativa. Portanto, o controlador do sistema será um proporcional-integrativo (PI).

Visando a implementação de um controlado proporcional-integral, obtém-se a função de transferência adequada ao controlador PI a partir da equação 8. Pelo método de Ziegler-Nichols em um controlador PI é necessário determinação dos parâmetros k , T_i , apresentados na equação:

$$PI(s) = k\left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)$$

Onde:

$$k = \frac{\tau}{\theta}$$

$$T_i = 2\theta$$

Como $\tau = 7,5\text{m s}$ e $\theta = 3,2\text{m s}$, então $k = 2,34375$ e $T_i = 0,0064$. Portanto:

$$PI(s) = 2,34375\left(1 + \frac{1}{0,0064s}\right)$$

Com este método espera-se resultado com velocidade de resposta satisfatória e erro nulo, precisando apenas de pequenos ajustes na implementação prática para evitar sobressinal, caso seja necessário. Para o presente trabalho será

considerado uma tolerância de até 10% de sobressinal, não sendo um fator limitante deste projeto. Inicialmente os parâmetros determinados pela sintonia do método serão mantidos.

3.7 ANÁLISE SIMULADA DO CONTROLADOR PI

A partir das funções de transferência do controlador PI e da planta modelada é possível obter a malha, ilustrada pela figura 21, no controle do sistema utilizando a ferramenta Simulink do Matlab®.

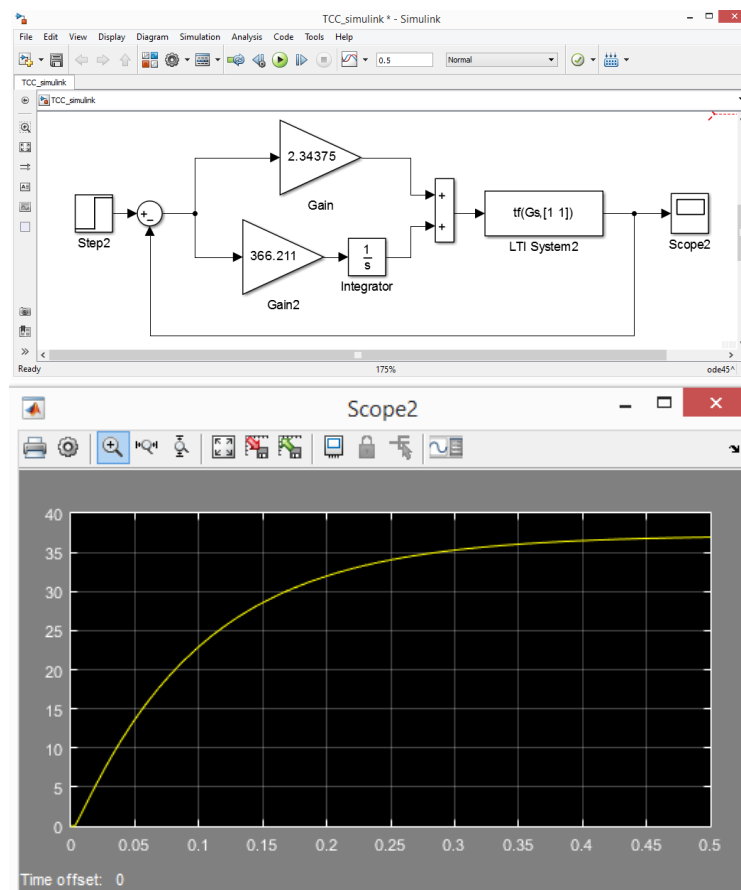


Figura 21. Controlador PI em malha fechada e a resposta do sistema.

Fonte: autoria própria.

Conforme ilustra a figura 21, o tempo de estabilização é maior em relação ao sistema sem controlador da figura 17, porém o erro em regime foi anulado. Essa relação é facilmente identificada na ilustração da figura 22, onde a curva em amarelo representa o sistema apenas com realimentação unitária e a curva roxa o controlador PI.

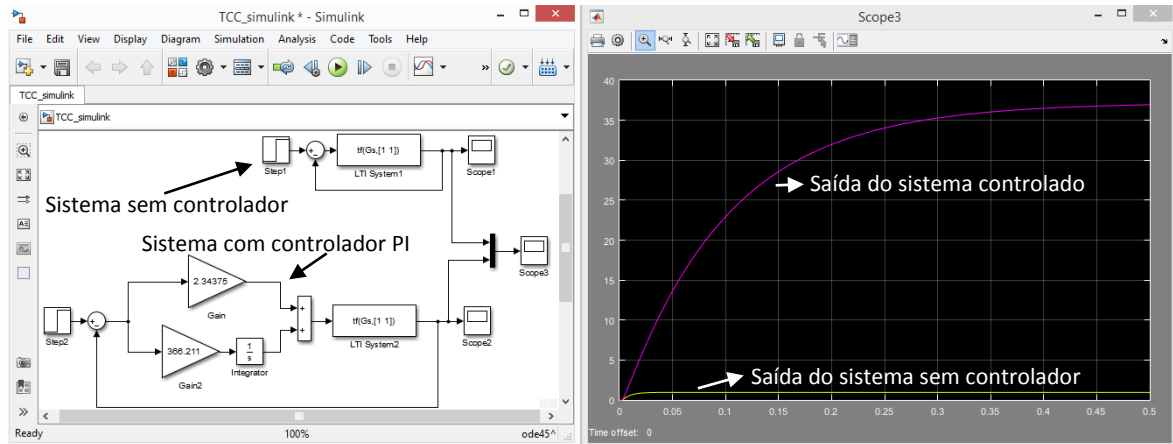


Figura 22. Comparação do sistema em malha fechada após inserir o controlador PI.

Fonte: autoria própria.

3.8 ANÁLISE DA ESTABILIDADE DO SISTEMA CONTROLADO NO DOMÍNIO S

A análise da estabilidade do sistema controlado pode ser realizada a partir do método do lugar das raízes, verificado pela ferramenta Sisotool do Matlab®, utilizando o código a seguir pode-se obter os gráficos ilustrados pela figura 23.

```
s = tf('s') %declaração de 's' como variável da função de
transferência
Gs=0.02624/(7.5*10^(-3)*s+1)*exp(-3.2*10^(-3)*s) %func transf G(s)
Cs=2.34375*(1+1/(0.0064*s)) %func transf do controlador PI C(s)
sisotool(Cs*Gs) %ferramenta sisotool para o sistema
```

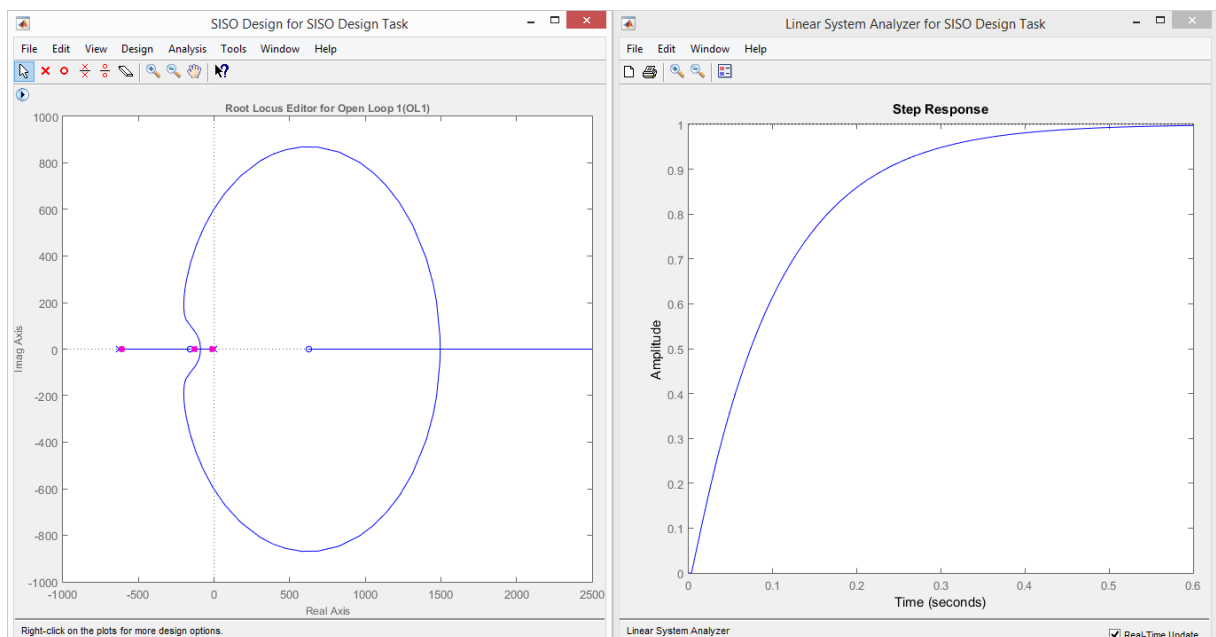


Figura 23. Polos e zeros de $C(s)*G(s)$ em malha fechada e a resposta do sistema.

Fonte: autoria própria.

A estabilidade de um sistema pode ser realizada pela análise dos polos e zeros da função de transferência. Em controladores PI indica-se utilizar um zero o mais próximo possível da origem, a fim de melhorar a resposta ao erro em regime permanente.

Na figura 23 pode-se notar que foi inserido ao sistema um polo na origem, a partir do termo integrador, podendo com isso anular o erro em regime. Também, é possível obter melhoria na velocidade de resposta do sistema ao modificar-se o ganho do sistema.

Como o resultado obtido é satisfatório para a aplicação desejada, além de não apresentar sobressinal, os parâmetros serão mantidos conforme determinados pelo método de sintonia de Ziegler-Nichols.

3.9 DISCRETIZAÇÃO DO CONTROLADOR PI C(s)

A discretização do controlador PI pode ser obtida de forma similar ao G(z), conforme o trecho de código a seguir, por segurador de ordem zero e taxa de amostragem 0,01 s.

```
Cs = 2.34375*(1+1/(0.0064*s)) %func transf do controlador PI C(s)
Cz = c2d(Cs,0.01,'zoh') %conversão de C(s) para C(z) por segurador de
ordem zero e taxa de amostragem de 10m s.
```

Obtendo-se o controlador discreto C(z):

$$C(z) = \frac{2.344z + 1.318}{z - 1}$$

3.10 EQUACIONAMENTO DO SISTEMA DISCRETIZADO EM MALHA FECHADA

O sistema discretizado pode ser representado conforme a relação da saída pela entrada do sistema conforme a equação 10 (OGATA, 2007) para sistema em malha fechada com realimentação unitária.

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{C(z)*G(z)}{1+C(z)*G(z)} \quad (10)$$

Substituindo na equação 10 as equações do controlador e da planta discretizados, obtém-se na saída Y(z) do sistema em malha fechada o seguinte resultado:

$$Y(z) = U(z) * \frac{0.03666z^2 + 0.02925z + 0.004853}{z^3 - 1.227z^2 + 0.2928z + 0.004853}$$

Fatorando os polinômios do numerador é possível obter os polos do sistema, enquanto os termos do denominador representam as raízes mesmo:

$$Y(z) = U(z) * \frac{0.03666 * (z + 0.562556)(z + 0.2353)}{(z - 0.003955)(z - 1.1057)(z + 1.10967)}$$

3.11 RESPOSTA DO SISTEMA CONTROLADO NO DOMÍNIO Z

Como resultado do sistema discretizado proposto, é possível analisar a resposta do sistema ao degrau em malha fechada obtida pelo Simulink, conforme a ilustração da figura 24.

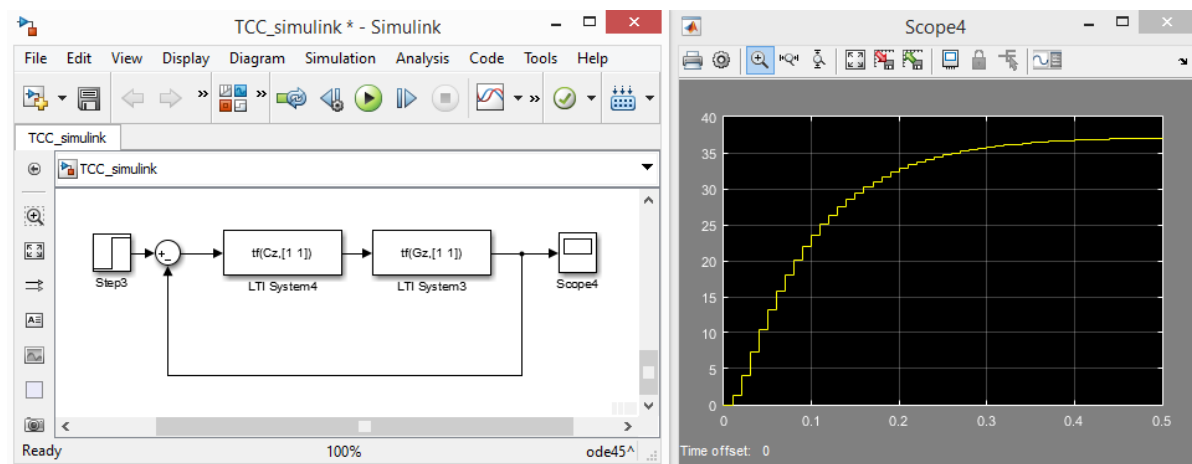


Figura 24. Resposta discretizada do sistema controlado ao degrau.

Fonte: autoria própria.

Nota-se que após a discretização o sistema controlado manteve as características aproximadas ao sistema contínuo. Caso fosse utilizado uma taxa de amostragem menor poderia resultar na instabilidade da resposta do sistema.

3.12 ANÁLISE DA ESTABILIDADE DO SISTEMA CONTROLADO NO DOMÍNIO Z

Observa-se que a partir do lugar das raízes no domínio Z, o sistema está trabalhando dentro da estabilidade, além de apresentar um tempo de resposta similar ao obtido pelo sistema contínuo, conforme ilustrado pela figura 25 obtido pelo trecho de código a seguir:

```
sisotool(Cz*Gz)
```

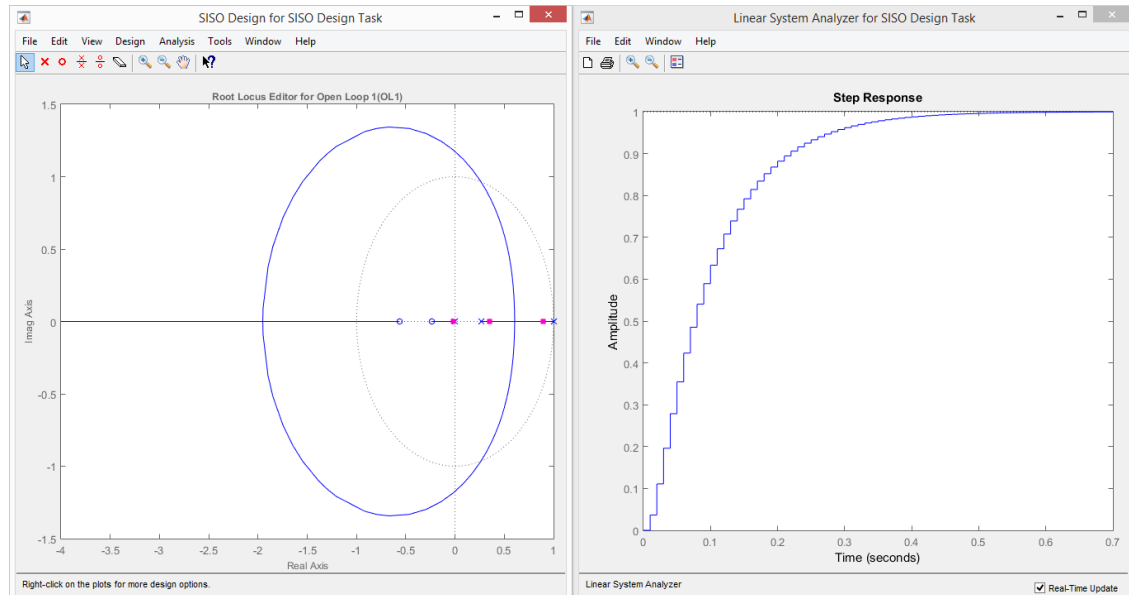


Figura 25. Raízes e resposta discretizada do sistema controlado.

Fonte: autoria própria.

Inserindo degraus de iluminância no sistema controlado, simulando a abertura de portas e janelas ou acendimento de outros sistemas de iluminação, é possível analisar ao longo do tempo que o sistema mantém a saída de tensão estável em 37,2V, de acordo com o bloco de conversão de iluminância para tensão, conforme estabelecido no *Set Point* (nível desejado para o controle de iluminância na saída do sistema).

A figura 26 ilustra o comportamento estável da saída do sistema (curva em amarelo) com a inserção de degraus de iluminância (curva em ciano) ao longo do tempo e o comportamento do controlador (curva em roxo).

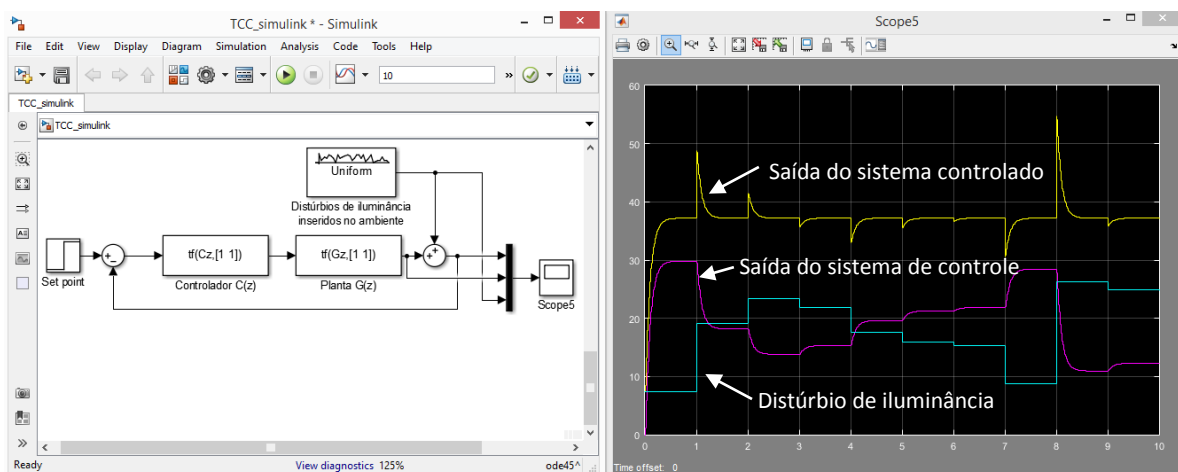


Figura 26. Comportamento do sistema com distúrbios de iluminância.

Fonte: autoria própria.

A análise da estabilidade do sistema também pode ser verificada com a inserção de ruídos externos, simulando o balançar de cortinas e persianas com o vento, modificando a iluminância do ambiente.

Apresenta também a modificação do *Set point* ao longo do tempo, simulando uma configuração do usuário para diminuir ou aumentar a iluminância total do ambiente. A figura 27 ilustra o comportamento do sistema controlado com ruído no ambiente (curva em amarelo), as mudanças no *Set point* (curva em ciano) e a saída do ganho do sistema controlado (curva em roxo).

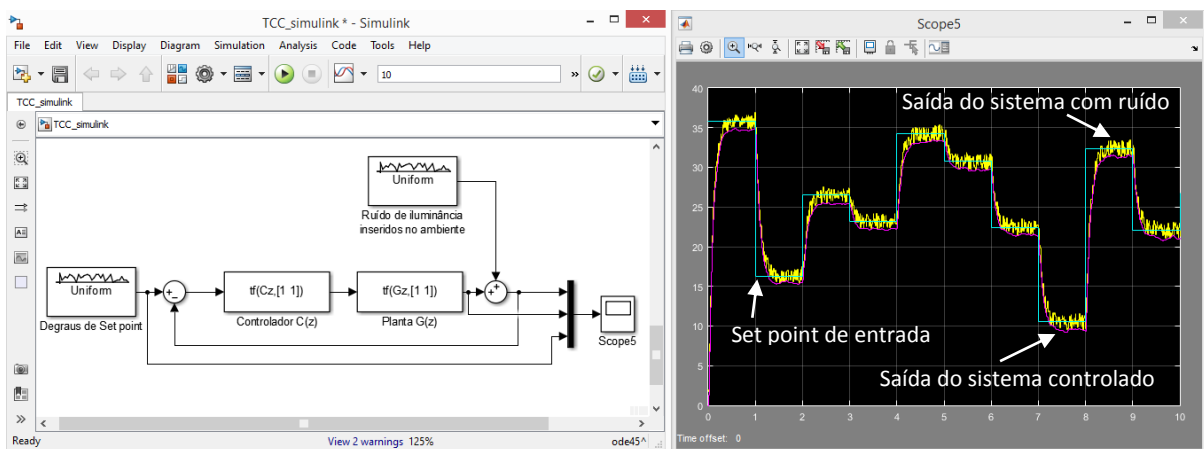


Figura 27. Comportamento do sistema com ruído e mudanças de *Set point*.

Fonte: autoria própria.

3.13 PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR DIGITAL

A etapa de implementação do código de controle em um microcontrolador deve seguir os princípios de amostragem determinados pelo projeto do sistema de controle. Como o sistema controlado pode ser representado por um bloco para controlar a iluminância de um ambiente, sensoriando a leitura em valores de tensão, a saída do sistema também utiliza tensão que é convertida em iluminância para o ambiente, conforme ilustrado pela figura 28.

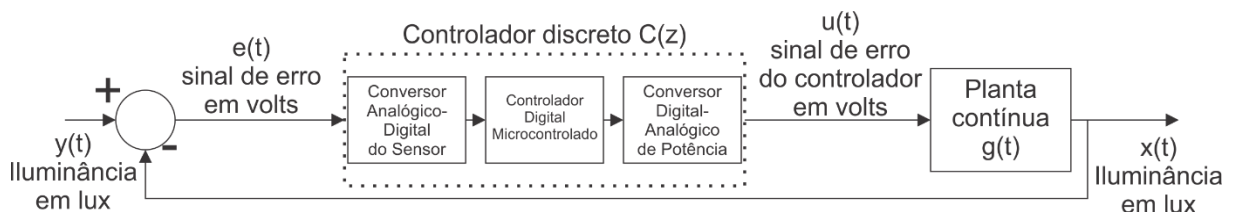


Figura 28. Atuação do sistema de controle discreto convertendo lux em volts.

Fonte: autoria própria.

Dessa forma, é necessário primeiramente implementar uma interrupção periódica do sistema para fazer aquisição do sinal do sensor, comparar o sinal de entrada e realizar o equacionamento para o novo sinal de saída. Este período a ser implementado na interrupção deve ser de 10ms, conforme estabelecido pelo equacionamento do sistema no domínio Z.

Para que seja possível implementar o controlador no sistema digital é preciso transformar a equação de controle discretizada do domínio Z para equações de diferenças.

Conforme a figura 4, em que o controlador é inserido no sistema e representado pela equação 4, sua notação no domínio Z pode ser apresentado da seguinte forma:

$$C(z) = \frac{E(z)}{U(z)} = \frac{2.344z + 1.318}{z - 1}$$

Onde, E(z) é o erro da saída do controlador e U(z) é a entrada do erro discretizado no controlador. Dessa forma, a saída do controlador E(z) pode ser obtida pela seguinte expressão.

$$\begin{aligned} E(z) &= U(z) * \frac{2.344z + 1.318}{z - 1} \\ E(z)(z - 1) &= U(z)(2.344z + 1.318) \\ zE(z) - E(z) &= 2.344zU(z) + 1.318U(z) \end{aligned}$$

Transformando do domínio Z para equações de diferenças obtém-se:

$$e[k + 1] - e[k] = 2.344u[k + 1] + 1.318u[k]$$

Devido ao sistema ser não causal, ou seja, depender apenas do valor da amostra atual e das passadas, não é possível trabalhar com amostras futuras como [k+1], [k+2], [k+n]. Dessa forma, é preciso manipular a equação para obter somente [k-n], para n ≥ 0, nos termos que formam o sinal de saída, conforme segue:

$$e[k] - e[k - 1] = 2.344u[k] + 1.318u[k - 1]$$

Como a relação entre transformada Z e equação de diferenças relaciona amostras do sinal no período da taxa de amostragem adotada em Z, armazenando

as amostras em um vetor k , a saída atual do sistema deve ser representada por $u[k]$, resultando na equação de diferenças final a ser implementada no sistema digital, conforme segue:

$$\begin{aligned} e[k] - e[k - 1] &= 2.344u[k] + 1.318u[k - 1] \\ 2.344u[k] &= e[k] - e[k - 1] - 1.318u[k - 1] \\ u[k] &= 0.4266e[k] - 0.4266e[k - 1] - 0.5623u[k - 1] \end{aligned} \quad (11)$$

A partir dos valores lidos na entrada do sistema por $e[k-n]$ e saídas passadas por $u[k-n]$, é possível processar a saída atual em $u[k]$.

Sendo assim, é necessário implementar dois vetores para armazenar as variáveis de saída $u[2]$ e entrada $e[2]$, cada um com 2 posições. As amostras deverão ser deslocadas dentro do vetor sempre que uma nova interrupção do sistema ocorrer, descartando a variável mais antiga e substituindo pela atual.

Sempre que uma nova amostra for obtida, o sistema realiza a equação para um novo $u[k]$ do sinal de saída, permanecendo constante até a próxima interrupção e aquisição de nova variável.

Dessa forma, a equação de diferenças pode ser implementada diretamente a um microcontrolador para fazer o controle do sistema desejado, o qual deverá utilizar uma interrupção para aquisição do sinal do sensor a cada período de tempo de 10ms, conforme a taxa de amostragem estabelecida no domínio Z.

É muito importante que para que o sistema seja controlado de forma eficiente, tanto as amostras de entrada quanto as de saída trabalhem em valores normalizados de escala. Sendo assim, é possível implementar este controlador proposto em qualquer sistema microcontrolado que utilize a mesma configuração do sensor de aquisição, onde os valores de saída serão a porcentagem da potência do sistema de iluminação utilizado.

Para este estudo, estima-se que uma possível aplicação em sistemas digitais possa utilizar o sinal analógico da entrada do controlador com uma tensão analógica de 0 a 3,3V, a qual pode ser amostrada a cada 10ms, convertida por um AD de 10 bits e processada digitalmente em um microcontrolador de 16 bits, a tensão de saída gerada por um conversor de modulação por largura de pulso (PWM – *Pulse-Width Modulation*) pode servir de referência analógica ao circuito de potência para a lâmpada LED.

Estima-se que para que seja viabilizada a aplicação prática deste equipamento, o sensor LDR não possa sofrer influências diretas da fonte luminosa em que está anexado. Também, é necessário que o sistema apresente minimamente, com o sistema de iluminação adotado, a iluminância adequada para que o controle da malha desenvolvida trabalhe em regime, evitando saturações.

4 CONCLUSÕES

O presente capítulo apresenta as conclusões quanto aos resultados obtidos e objetivos alcançados no desenvolvimento do estudo e propostas de trabalhos futuros.

Vários métodos são cotidianamente utilizados nas indústrias para modelar matematicamente sistemas contínuos, baseando-se em parametrizações experimentais, tornando possível de serem aplicadas na determinação da função de transferência de sistemas contínuos.

Outros trabalhos apresentados nos capítulos anteriores utilizam o método de Ziegler-Nichols tanto no modelamento e parametrização do sistema, quanto para sintonia do controlador PID. Estes trabalhos demonstram que este método é eficiente até os dias atuais, servindo para obter uma análise preliminar do modelamento final do comportamento da malha em estudo.

No presente trabalho foi possível verificar a simplicidade e coerência na utilização do método de modelamento de Ziegler-Nichols. As respostas do modelamento matemático simulado, apresentado pela figura 15, em comparação com a figura 13 extraída do experimento, demonstra que os resultados obtidos diretamente pelo método são satisfatórios, seja para os valores de tempo morto ou constante de tempo.

Na etapa de sintonia do controlador PI, outros trabalhos apresentados também fazem o uso dos parâmetros do método de Ziegler-Nichols. Da mesma forma, estes resultados são preliminares e precisam ser testados na prática para se obter a resposta ótima do sistema. Para este estudo, tanto os resultados obtidos pelo modelamento como a capacidade do método de sintonia em anular o erro do sistema em regime permanente estão de acordo com o esperado.

A resposta do sistema controlado, em comparação com o sistema sem o controlador, observada pela ilustração da figura 22, onde o sistema controlado não apresenta erro em regime permanente, tendendo ao *Set point* de 37,2V do degrau, atingindo assim um dos objetivos propostos.

A partir da transformada Z foi possível discretizar tanto a função de transferência da planta quanto do controlador sintonizado. A resposta do sistema de forma simulada apresentou coerência quando comparado com a simulação do

sistema contínuo, visto a utilização do segurador de ordem zero e taxa de amostragem dentro do mínimo estabelecido pelos critérios de Nyquist.

Esse fator foi observado quanto à estabilidade do sistema controlado após a discretização, ilustrada pela figura 24, permanecendo com características semelhantes ao sistema contínuo, ilustrado pela figura 21, sem apresentar instabilidade, fato que ocorreria para taxas de amostragem baixas.

A estabilidade do sistema proposto foi analisada por simulação no Simulink de duas formas. A primeira, inserindo degraus de distúrbio de iluminação, simulando a abertura e fechamento de portas e janelas, bem como acendimento de outros sistemas de iluminação, demonstrou pela figura 26 que o sistema estabiliza no *Set point* de 37,2V após 0,5s aproximadamente. A segunda forma, foi realizada pela inserção de ruído no ambiente, simulando o balançar de cortinas e persianas em um ambiente, modificando a iluminância no sensor do sistema, bem como a alteração do *Set point* configurado pelo usuário para valores inferiores à 37,2V, ou seja, iluminância inferior à 750 lux na bancada de trabalho sob a fonte luminosa equipada com o sensor. Dessa forma, o resultado ilustrado pela figura 27 demonstra que o sistema é capaz de se aproximar do *Set point* sem instabilizar o sistema mesmo com o ruído do ambiente, mantendo suas características para diversos valores de *Set point*.

Dessa forma, o controlador elaborado, após transformar a função de transferência do sistema discreto no domínio Z em equações de diferenças, pela equação 11 pode ser implementado diretamente em sistemas digitais microcontrolados quem tenham a capacidade de amostrar e atualizar um ciclo do sistema com taxa de amostragem de pelo menos 10m s.

Para que a implementação em trabalhos futuros seja viabilizada, é necessário que o sistema de iluminação do ambiente em questão, escritórios residenciais, comerciais ou industriais, apresentem a iluminância mínima estabelecida pelas normas técnicas, permitindo que o sistema efetue o controle de forma efetiva, evitando saturações de potência máxima nas lâmpadas.

Portanto, os objetivos propostos por este trabalho foram alcançados conforme o esperado, tanto no modelamento matemático do sistema quanto na proposta de malha de controle discreto, permitindo aplicações futuras em testes práticos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5382**: Verificação de iluminância de interiores. Rio de Janeiro - RJ. abr. 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5413**: Iluminância de interiores. Rio de Janeiro - RJ. abr. 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5461**: Iluminação. Rio de Janeiro - RJ. dez. 1991.

BARBOSA JÚNIOR, I. de S.; SILVA, J. L.; FERREIRA, L. C. B.; HERM, M.; OLIVEIRA, A. G. de. **Luminotécnica**. Universidade Federal do Piauí - UFPI. Teresina, 2012.

COPEL. **Manual da eficiência energética na indústria**. Curitiba, nov. 2005.

DUARTE FILHO, M. **Síntese de controlador PID para controle de PH em um reator com otimização via algoritmos genéticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos dos Goytacazes – RJ. 2014.

ESPECIALIZE. **LEDs versus lâmpadas convencionais: viabilizando a troca**. Revista on-line. Pós-graduação em iluminação e design de interiores. mai. 2012.

FARIA, I. A. C. **Desenvolvimento de um controlador PI aplicado ao controle da intensidade luminosa de um LED**. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto – MG. 2012.

MARIN, J. A.; CASTILLO, I. I. L.; RAMÍREZ, E. **Sintonización de un PID Digital aplicado a un Sistema de Nivel de líquido**. Encuentro de Investigación en Ingeniería Eléctrica. Zacatecas-Zac. 2008.

NOVICKI, J. M.; MARTINEZ, R. **Leds para Iluminação Pública**. Universidade Federal do Paraná – Curitiba-PR. 2008.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall. 798p. 2007.

PINTO, R. A. **Projeto e implementação de lâmpadas para iluminação de interiores empregando diodos emissores de luz (LEDs)**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria - RS. 2008.

RANGEL, M. G.; SILVA, P. B.; GUEDE, J. R. A. **Led – Iluminação de Estado Sólido**. São José dos Campos - SP. 2009.

SARAIVA, F. de A. **Métodos de sintonia em controladores PID**. Monografia (Engenharia de Telecomunicações) – Centro Universitário La Salle. Canoas – RS. 2011.

SILVA, F. T. da. **Simulated annealing aplicado ao problema de sintonia de parâmetros de controladores PID**. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto – MG. 2005.

SILVA, M. G.; TASCETTO, L. T. **Projeto de um sistema automático de controle de luz artificial com base na iluminação natural para a redução do consumo de energia**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Curitiba-PR. 2014.

SILVEIRA, R. M. C.; COSTA, A. M. S.; SANTOS M. R. dos S.; SILVA, L. C. de O. **Controle de iluminação ambiente utilizando microcontroladores**. V Jornada de Informática do Maranhão. Universidade Federal do Maranhão – São Luiz – MA. 2014.