

LUCAS PEREIRA ROCHA

**DESENVOLVIMENTO DE EXPERIMENTOS USANDO O MÓDULO EB-109
(MOTORES E GERADORES) PARA A DISCIPLINA DE CONTROLE LINEAR**

LUCAS PEREIRA ROCHA

**DESENVOLVIMENTO DE EXPERIMENTOS USANDO O MÓDULO EB-109
(MOTORES E GERADORES) PARA A DISCIPLINA DE CONTROLE LINEAR**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Antonio Lotufo

R672d	Rocha, Lucas Pereira Desenvolvimento de experimentos usando EB-109 (motores e geradores) para a disciplina de controle linear / Lucas Pereira Rocha. – Guaratinguetá, 2017. 53 f : il. Bibliografia: f. 51
	Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017. Orientador: Prof. Dr. Francisco Antonio Lotufo
	1. Controle de processos. 2. Modelagem de processos. 3. Identificação de sistemas. I. Título CDU 658.5

LUCAS PEREIRA ROCHA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. FRANCISCO ANTONIO LOTUFO
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. AGNELO MAROTTA CASSULA
UNESP-FEG


Prof. Dr. JOSÉ FELICIANO ADAMI
UNESP-FEG

Novembro de 2017

Dedico este trabalho aos meus pais, Bento e Maria, que se dedicaram e me ajudaram nessa caminhada, sempre se preocupando e tendo fé de que concluiria o curso.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a *Deus*, que através da Sua Graça me deu tudo o que tenho, ao meu pai, *Bento*, que me deu todo o suporte financeiro nesses 22 anos e sempre se dedicou para que eu tivesse o melhor,

à minha mãe, *Maria*, e aos demais familiares, pelo apoio em todos os momentos,

ao meu orientador, *Prof. Dr. Francisco Antonio Lotufo*, pelo acolhimento e apoio que me deu nesse ano,

ao meu orientador de Bolsa PIBIC, *Prof. Dr. Rafael Sfair*, que me amparou nos anos mais difíceis do curso, nos quais estava apertado financeiramente, oferecendo trabalhos que me deram experiência acadêmica e financiamento,

a todos os *professores do Departamento de Engenharia Elétrica da FEG*, que me prepararam para os desafios da profissão e se dedicaram, criando dificuldades que me ajudaram a crescer como pessoa,

a todos os *professores* que me deram aula no ensino médio e no ensino fundamental e acreditaram no meu futuro,

à minha namorada *Amanda*, que tem me dado muito carinho e amor nesses últimos três anos,

aos meus amigos de escola, *Hércules* e *Juan*, que me deram o companheirismo que precisava nos anos mais difíceis da minha adolescência,

aos meus *colegas de República Sinagoga e Moradia*, que me proporcionaram momentos marcantes e me auxiliaram nas dificuldades da vida acadêmica.

“Aquele que nem mesmo a seu próprio Filho poupou,
antes, o entregou por todos nós, como nos não dará
também com ele todas as coisas?”

Apóstolo Paulo

RESUMO

Neste trabalho os experimentos que formam o Módulo EB-109 (Motores e Geradores) da DEGEM SYSTEMS são revisados com o intuito de utilizá-lo no curso de Engenharia Elétrica do Campus da FEG. Além disso, são apresentados de forma simples os aspectos teóricos que envolvem os componentes da placa do Módulo EB-109 e uma resumida teoria relacionada com controle de processos. Também, um novo experimento que compreende princípios da área de identificação e modelagem de sistemas é proposto. Esse novo experimento se utiliza da própria placa do EB-109 e de simuladores computacionais como o MatLab e o Simulink. Por meio das análises feitas, salienta-se que o Módulo EB-109 pode ser utilizado no curso de Controle Linear do Departamento de Engenharia Elétrica no Campus de Guaratinguetá, e o experimento proposto apresenta resultados satisfatórios, podendo ser acrescentado ao material do Módulo EB-109 como mais um experimento.

PALAVRAS-CHAVE: Controle de processos. Modelagem de processos. Identificação de sistemas.

ABSTRACT

In this work the experiments that form the EB-109 Course (Motors and Generators) of DEGEM SYSTEMS are reviewed in order to employ it in the course of Electrical Engineering of the Campus of the FEG. Each experiment was repeated using the equipment present at the Campus and the problems related to the course were identified. In addition, the theoretical aspects involving the components of this board and a small theory related to process control are presented in a simple way. A new experiment that includes principles of the area of system identification and modeling is proposed as well. This new experiment uses the EB-109 board and computational simulators such as MatLab and Simulink. By means of the analyzes, it is pointed out that the EB-109 Course can be used in the course of Linear Control of electrical engineering Department of Guaratinguetá Campus, and that the proposed experiment presents satisfactory results and can be added to the EB-109 Course material.

KEYWORDS: Process control. Process modeling. Systems identification.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – O Módulo EB-109.....	14
Figura 2 – Corte transversal esquemático de uma máquina síncrona trifásica de dois polos com polos salientes.....	17
Figura 3 – Corte transversal esquemático de uma máquina CC de comutador com dois polos	18
Figura 4 – Circuito equivalente de um motor CC e de um gerador CC.....	19
Figura 5 – Circuito retificador simples com apenas um diodo.....	20
Figura 6 – Circuito retificador de meia onda com filtro e sua forma de onda na saída.....	20
Figura 7 – Circuito amplificador de corrente para acionamento do motor.....	21
Figura 8 – Circuito detector e amplificador de diferença.....	22
Figura 9 – Circuito defasador de fase com ganho unitário.....	23
Figura 10 – Diagrama de blocos de sistema de controle.....	23
Figura 11 – Princípios para a construção de um modelo matemático.....	25
Figura 12 – Respostas típicas ao degrau em malha aberta.....	26
Figura 13 – Método de Ziegler-Nichols usado para a modelagem de processos de primeira ordem.....	27
Figura 14 – Sistema em malha fechada genérico.....	28
Figura 15 – Configurações típicas de polos e zeros e o lugar das raízes correspondentes.....	29
Figura 16 – Modelo de controle PID de uma planta e a resposta ao degrau unitário de uma planta.....	31
Figura 17 – Curva de resposta ao degrau unitário em forma de S.....	31
Figura 18 – Circuito para medição da velocidade do motor CC.....	33
Figura 19 – Diagrama de conexões para análise do efeito produzido por cargas elétricas.....	34
Figura 20 – Diagrama para montagem do sistema motor CA/gerador CC.....	35
Figura 21 – Circuito para o controle em malha fechada da velocidade do motor CC.....	36
Figura 22 – Diagrama de conexões para o controle por ciclo de trabalho variável.....	37
Figura 23 – Sistema submetido à entrada degrau e sua montagem elétrica.....	42
Figura 24 – Entrada e saída do sistema ensaiado vistas no osciloscópio.....	43
Figura 25 – Diagrama de blocos do sistema da placa em malha fechada.....	44
Figura 26 – Lugar geométrico das raízes do sistema em malha fechada ensaiado.....	45
Figura 27 – Diagrama de blocos no Simulink do sistema ensaiado com controle PID.....	46

Figura 28 – Resposta do sistema em malha fechada simulado no MatLab e Simulink de acordo com os três ajustes do método de Ziegler-Nichols.....	46
Figura 29 – Entrada e saída do sistema simulado em MatLab e Simulink fazendo-se ajustes finos nos parâmetros do controlador PI.....	47
Figura 30 – Comportamento da entrada (curva em amarelo) e da saída (onda em azul) do sistema do Módulo EB-109 em malha fechada com ganho proporcional igual a 2.....	48
Figura 31 – Saída do sistema em diagrama de blocos das Figuras 25 e 27 com ganho proporcional igual a 2 quando submetido a uma onda quadrada.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada na resposta ao degrau unitário da planta.....	32
Tabela 2 – Resultados do experimento 7 para o ganho 2	36
Tabela 3 – Resultados do experimento 7 para o ganho 20	39
Tabela 4 – Resultados do experimento 7 para o ganho 200	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
FEG	Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
PI	Proporcional e Integral
PID	Proporcional, Integral e Derivativo
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	O MÓDULO EB-109: ASPECTOS TEÓRICOS.....	16
2.1	MOTOR E GERADOR CA SÍNCRONO.....	16
2.2	MOTOR E GERADOR CC	17
2.3	TRANSDUTOR DE VELOCIDADE ANGULAR: TACÔMETRO.....	19
2.4	RETIFICADOR COM FILTRO PASSA BAIXAS.....	20
2.5	AMPLIFICADOR DE CORRENTE.....	21
2.6	CIRCUITO DE GANHO PROPORCIONAL E CIRCUITO DEFASADOR DE FASE.....	21
2.7	CONTROLE EM MALHA FECHADA.....	23
3	TÓPICOS ESSENCIAIS EM CONTROLE	25
3.1	IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS USANDO O TESTE DA RESPOSTA DO DEGRAU.....	25
3.2	MÉTODO DO LUGAR GEOMÉTRICO DAS RAÍZES.....	27
3.3	CONTROLADOR PID.....	29
3.3.1	Ajuste de controlador PID segundo a regra de sintonia Ziegler-Nichols.....	30
4	APRESENTAÇÃO DO MÓDULO EB-109: LISTA DE EXPERIÊNCIAS. 33	
4.1	RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS.....	37
4.1.1	Exemplo de experimento.....	37
4.1.2	Problemas encontrados nas medições e ajuste da correia do EB-109.....	40
4.2	CONCLUSÃO DOS EXPERIMENTOS E FINALIDADE.....	41
4.3	PROPOSTA DE NOVO EXPERIMENTO.....	41
4.3.1	Métodos empregados e resultado.....	42
4.3.2	Verificação do modelo aproximado obtido.....	48
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	50
	REFERÊNCIAS.....	51
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	52
	ANEXO – AJUSTE DA CORREIA DO EB-109.....	53

1 INTRODUÇÃO

O estudo experimental dos fenômenos elétricos tem fundamental importância na formação de profissionais do setor elétrico ou de áreas relacionadas. Do eletromagnetismo até a eletrônica digital, todas as áreas de conhecimento do ramo elétrico devem propiciar a seus futuros profissionais o conhecimento experimental adequado para a fixação de conceitos teóricos. Essa ciência experimental, tão importante, já possuía destaque em meados do século XIII:

O raciocínio leva a uma conclusão e nos compele a aceitá-la, mas não torna a conclusão segura, nem remove a dúvida para que a mente possa descansar na intuição da verdade, a não ser que a mente encontre a certeza pelo caminho da experiência. Muitos têm argumentos sobre o que pode ser conhecido, mas, por não terem tido experiência, eles negligenciam os argumentos e não evitam o que é danoso, nem seguem o bom caminho. (BACON, 1268).

Sendo assim, em um curso de engenharia elétrica espera-se que os alunos formados possuam notável competência a nível tanto teórico quanto experimental. Para isso, a instituição de ensino responsável pelo curso deve proporcionar as ferramentas necessárias para as aulas de laboratório, como circuitos didáticos, componentes elétricos e eletrônicos, máquinas e aparelhos de medição. Ainda, para possibilitar a realização das práticas de laboratório com exatidão e segurança, são necessárias revisões constantes dos equipamentos e instrumentos em uso.

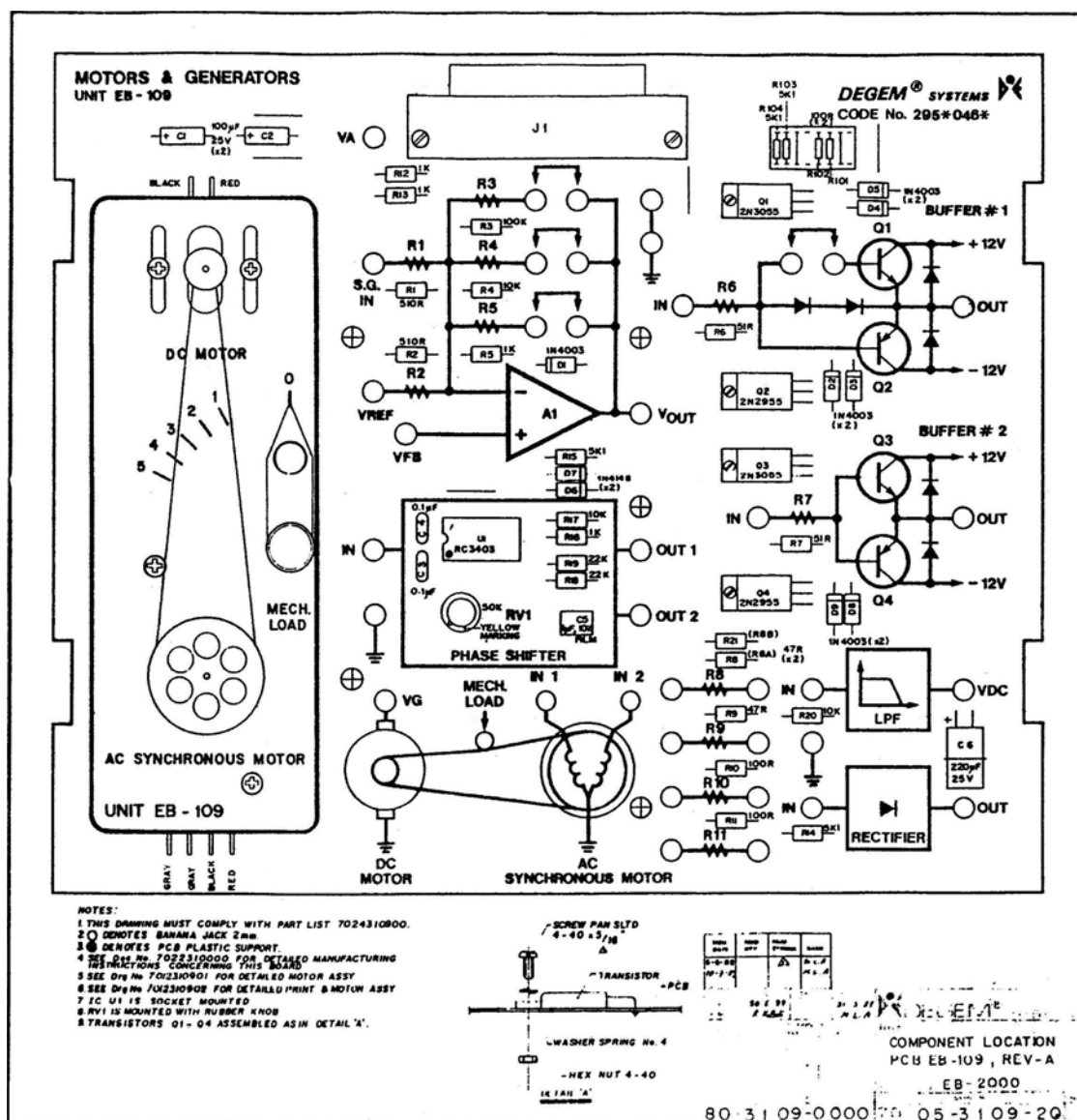
Cada disciplina do curso de engenharia elétrica exigirá dispositivos diferentes para suas aulas experimentais. Contudo, algumas disciplinas, por serem de cunho interdisciplinar, demandarão circuitos e equipamentos comuns. Desse modo, os experimentos relacionados a algumas disciplinas podem servir para a assimilação dos conceitos das outras, o que, pelo ponto de vista pedagógico, é bastante proveitoso.

Após os argumentos anteriores, constata-se, além do caráter essencial do ensino experimental, a importância de equipamentos e circuitos didáticos que reúnam dispositivos comuns a várias disciplinas. Considerando esse aspecto, o Módulo EB-109 da Degem Systems (1988) constitui uma ferramenta de aprendizagem, uma vez que apresenta, experimentalmente, aspectos de máquinas CA e CC, eletrônica básica e controle.

O Módulo EB-109 é composto por duas máquinas CA e CC e diversos circuitos eletrônicos, como mostra a Figura 1. Esse módulo oferece dez experimentos que apresentam princípios fundamentais para o estudante de engenharia elétrica, tais como o funcionamento de máquinas elétricas e controle em malha fechada. Desses experimentos, apenas um é

impossível de realizar, uma vez que o sistema microprocessado responsável pela experiência foi desabilitado.

Figura 1 – O Módulo EB-109.



Fonte: Degem Systems (1988)

Além dos experimentos propostos pela Degem Systems, é possível montar, ainda, novas experiências a partir das que já existem no módulo, aproveitando os dispositivos e circuitos que se encontram na placa. Desse modo, otimiza-se o uso dessas placas e insere-se novas experiências para o ensino de engenharia elétrica.

Tendo em vista o que já foi exposto, este trabalho pretende analisar o Módulo EB-109, diagnosticando falhas nos experimentos e revisando de forma geral o material do curso. Além

do mais, a fim de aproveitar ainda mais a placa, propôs-se um experimento extra ao curso, no qual se explora aspectos da área de identificação de sistemas.

De início, neste trabalho, são abordados os aspectos relacionados ao funcionamento dos componentes presentes no Módulo EB-109 e princípios de controle de sistemas lineares. Depois disso, um breve resumo sobre cada experimento do Módulo EB-109 e uma perspectiva a respeito dos resultados desses experimentos são mostrados. Por último, é apresentada uma proposta de novo experimento a ser inserido no módulo.

2 O MÓDULO EB-109: ASPECTOS TEÓRICOS

O Módulo EB-109 apresenta experimentos com motores e geradores elétricos para o ensino em cursos de nível técnico e superior. Esse módulo apresenta conceitos básicos da área de motores e geradores CA e CC, além de princípios de controle em malha fechada. Na apostila que acompanha o módulo, antes mesmo de abordar os experimentos, são apresentados fundamentos básicos da teoria de motores e geradores. São indicados apenas princípios simples, porém, essenciais para a compreensão e execução dos experimentos. Esses princípios e outros mais são apresentados de forma resumida nas seções seguintes.

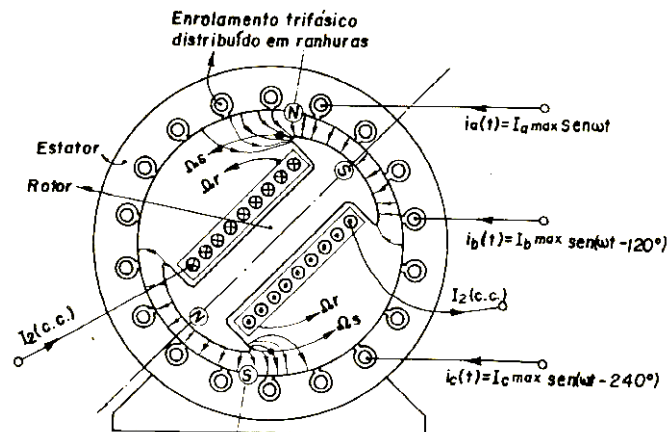
2.1 MOTOR E GERADOR CA SÍNCRONO

O funcionamento de uma máquina CA síncrona depende da interação entre os fluxos produzidos pelo indutor e pelo induzido da máquina. Na configuração motor o fluxo de potência se dá do estator para o rotor, gerando energia mecânica. Na configuração gerador o fluxo de potência se inverte, entrando energia mecânica e saindo energia elétrica.

A máquina síncrona possui dupla excitação, mantendo uma excitação com corrente contínua no indutor e um enrolamento polifásico no induzido, normalmente trifásico, que, quando excitado por um sistema de correntes polifásicas, simétrico e equilibrado, produz uma distribuição quase senoidal de força magnetomotriz no entreferro, distribuição essa que se desloca continuamente com velocidade angular constante. (FALCONE, 1985).

As máquinas CA síncronas podem ser de dois tipos: polos salientes e polos lisos. Via de regra, máquinas síncronas com polos salientes são empregadas em aplicações que exigem baixa velocidade rotórica, como em hidrogeração, enquanto máquinas com polos lisos são encarregadas de trabalhar em alta rotação. Também há máquinas constituídas de rotores com ímãs permanentes, sendo majoritariamente utilizadas em aplicações de baixa potência. Na Figura 2 é mostrado o corte transversal de uma máquina síncrona de polos salientes com apenas dois polos em corte.

Figura 2 – Corte transversal esquemático de uma máquina síncrona trifásica de dois polos com polos salientes.



Fonte: Falcone (1985)

Uma condição de funcionamento da máquina CA síncrona é que esta não possui conjugado caso a velocidade angular do eixo, ou rotórica, seja diferente da velocidade angular de campo imposta pelo induzido. Desse modo, caso o motor CA síncrono seja submetido a um torque motor no qual não consiga manter a velocidade síncrona de rotação no eixo, o mesmo parará de girar, isto é, ou o motor mantém a velocidade síncrona ou fica parado.

Ressalta-se ainda que a velocidade de giro da máquina síncrona depende diretamente da frequência da tensão CA no induzido, como mostra a Equação (1):

$$N_s = \frac{60 f}{pp} \quad (1)$$

em que N_s é a velocidade síncrona no rotor em rpm, f é a frequência da tensão no induzido em Hz e pp é o número de pares de polos da máquina. É notório ainda informar que a velocidade dessa máquina não tem relação com a amplitude da tensão no induzido.

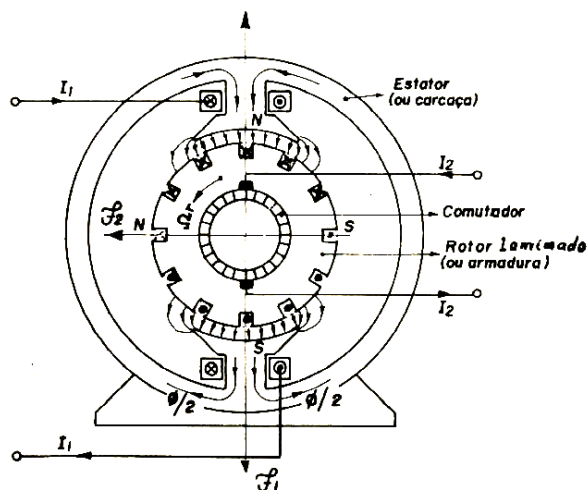
No Módulo EB-109 a máquina CA síncrona empregada é bifásica e, como condição de operação de máximo fornecimento de potência, essa máquina funciona com tensões em seus dois enrolamentos defasadas de 90 graus elétricos. Mesmo sendo bifásica, para a máquina síncrona da placa, valem as considerações já feitas até aqui.

2.2 MOTOR E GERADOR CC

A máquina de corrente contínua também apresenta dupla excitação, sendo ambas em corrente contínua e injetadas no estator e no rotor da máquina. Cada corrente produz fluxos

magnéticos que, pela disposição das bobinas na máquina, formam campos cruzados. Tal condição é essencial para a produção de conjugado na máquina, sendo 90 graus elétricos o ângulo que proporciona máximo torque. Na Figura 3 é mostrada em corte uma máquina CC de dois polos.

Figura 3 – Corte transversal esquemático de uma máquina CC de comutador com dois polos.



Fonte: Falcone (1985)

O comutador, mostrado na Figura 3, tem a função de controlar o sentido de circulação da corrente pelos condutores da armadura, invertendo o sentido de circulação da corrente quando for necessário. A tensão de entrada se conecta ao comutador por meio de escovas, geralmente feitas de carbono (DEGEM SYSTEMS, 1988).

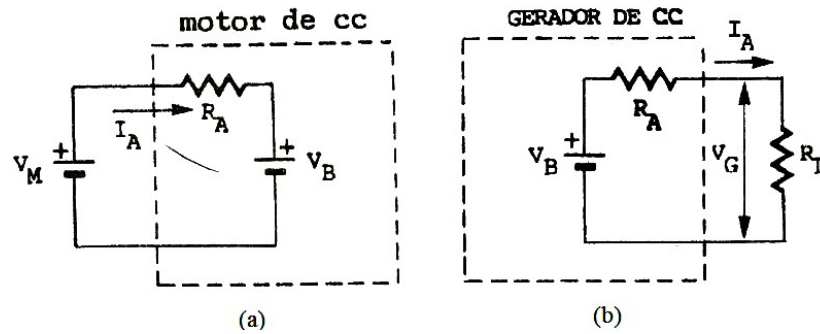
O conjugado da máquina CC é proporcional à corrente que circula por seus condutores. Sendo assim, espera-se que o motor CC gire mais depressa à medida que se aumenta a tensão aplicada. Além disso, existe uma tensão interna, chamada força contraeletromotriz, que se opõe à tensão de entrada na armadura dessas máquinas quando operadas como motor. Tal tensão é proporcional à velocidade de giro da máquina, como mostra a Equação (2):

$$V_b = K \cdot N_d \quad (2)$$

em que V_b é a força contraeletromotriz, N_d é a velocidade de rotação da máquina e K é uma constante de proporcionalidade em V/rpm.

Na Figura 4a é mostrado o circuito equivalente de um motor CC e a Figura 4b ilustra o circuito equivalente de um gerador CC. Nos dois circuitos o papel da força contraeletromotriz é diferente, agindo como consumidora de potência no primeiro caso e como produtora no segundo.

Figura 4 – Circuito equivalente de um motor CC (a) e de um gerador CC (b).



Fonte: Degem Systems (1988)

A máquina CC utilizada no Módulo EB-109 é de ímã permanente, ou seja, o campo magnético produzido pelo estator não é gerado por uma bobina com corrente, como mostra a Figura 3. Contudo, com exceção desse detalhe, as observações feitas aqui são válidas para a máquina da placa.

2.3 TRANSDUTOR DE VELOCIDADE ANGULAR: TACÔMETRO

O tacômetro é um dispositivo capaz de converter energia mecânica de um movimento de rotação em energia elétrica, e vice-versa. São muito úteis na medição de velocidades angulares, já que, quase sempre são construídos para fornecerem na saída uma tensão elétrica proporcional a essa grandeza. Em especial, existem os tacômetros de tensão alternada, também chamados de alternadores tacométricos, e os de tensão contínua, chamados de dínamos tacométricos (FALCONE, 1985).

A relação tensão de saída/velocidade angular de eixo é uma constante no tacômetro de tensão alternada, desde que o fluxo magnético por polo seja constante também, como mostra a Equação (3)

$$\frac{E}{\Omega} = K \quad (3)$$

em que E é a tensão de saída eficaz do tacômetro, Ω é a velocidade angular imposta ao eixo do tacômetro e K é a constante de conversão do tacômetro, dada em V/rpm.

O tacômetro de tensão contínua é semelhante ao alternador tacométrico, porém, sua saída é em tensão contínua, não precisando de retificação. A Equação (3) também vale para esse tipo de tacômetro.

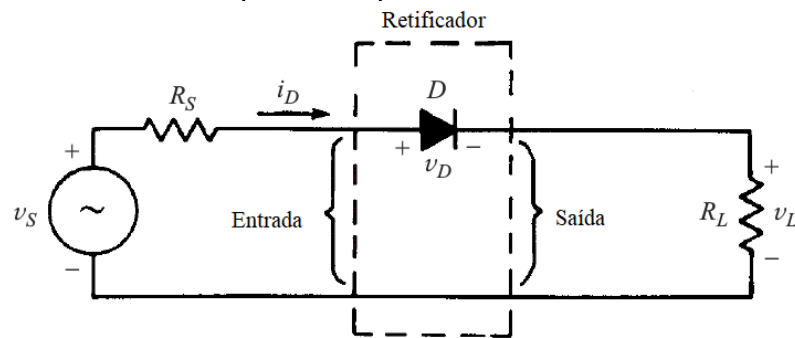
No Módulo EB-109 ambas as máquinas, CA e CC, são utilizadas, alternadamente, como motor e tacogerador. As máquinas estão acopladas mecanicamente na placa e, sendo

assim, conforme uma delas atua como motor, a outra proporciona a medição da velocidade do conjunto.

2.4 RETIFICADOR COM FILTRO PASSA BAIXAS

Um circuito retificador é capaz de transformar um sinal CA em CC. O circuito mais simples que realiza essa finalidade é o retificador de meia onda mostrado na Figura 5.

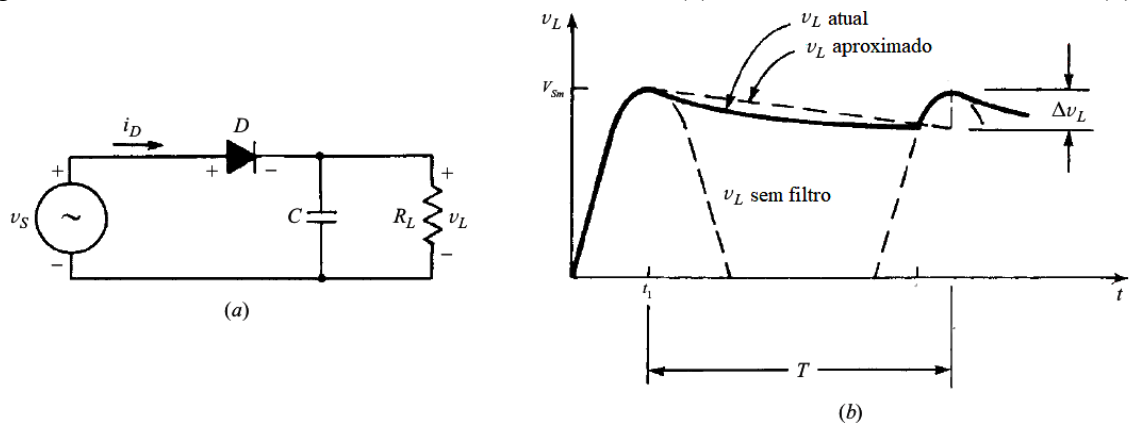
Figura 5 – Circuito retificador simples com apenas um diodo.



Fonte: adaptado de Cathey (2002)

Contudo, a presença do retificador não é suficiente para uma retificação satisfatória. Assim sendo, acrescenta-se um filtro passa baixas à saída do retificador. Tal filtro pode ser feito com um capacitor em paralelo com a carga e em série com o diodo, como apresentado na Figura 6a. É notável, pela forma de onda da Figura 6b, que o capacitor atenua as componentes harmônicas do sinal retificado, preservando a componente CC da saída.

Figura 6 – Circuito retificador de meia onda com filtro (a) e sua forma de onda na saída (b).



Fonte: adaptado de Cathey (2002)

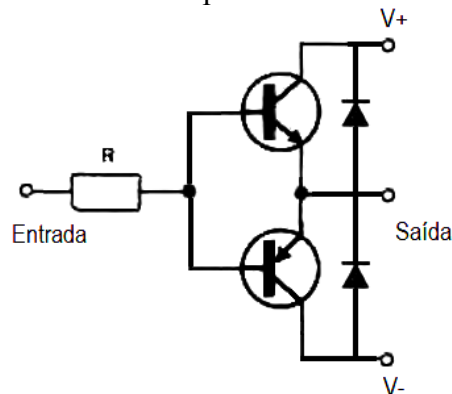
A saída de um sinal retificado, como o mostrado na Figura 6b, é proporcional à entrada CA do circuito e dependente da constante de tempo $R_L C$ do próprio circuito.

A placa EB-109 possui um circuito retificador, que realiza o mesmo processo mostrado na Figura 6, contudo, para tal, utiliza um retificador com amplificador operacional. Tal circuito retifica o sinal proveniente do gerador CA, transformando-o em um sinal pronto para o uso em outros pontos da placa.

2.5 AMPLIFICADOR DE CORRENTE

Para o acionamento dos motores CA e CC na placa EB-109, os geradores de sinal (contínuo e alternado) que existem não fornecem corrente suficiente para a solicitação de potência devida. Desse modo, necessita-se de um amplificador de corrente com ganho de tensão unitário entre a fonte de sinal e o motor, como o mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Circuito amplificador de corrente para acionamento do motor.



Fonte: O autor

Notar que o circuito da Figura 6 possui alta impedância de entrada, assegurando o bom funcionamento das fontes de sinal que vierem a ser utilizadas. Além disso, vale ressaltar que este circuito amplifica tanto sinais CC quanto CA, servindo para o acionamento dos dois motores da placa.

2.6 CIRCUITO DE GANHO PROPORCIONAL E CIRCUITO DEFASADOR DE FASE

Alguns experimentos do Módulo EB-109 reproduzem o controle da planta formada pelo conjunto motor CC e o gerador CA. Tal controle é feito por meio de um simples

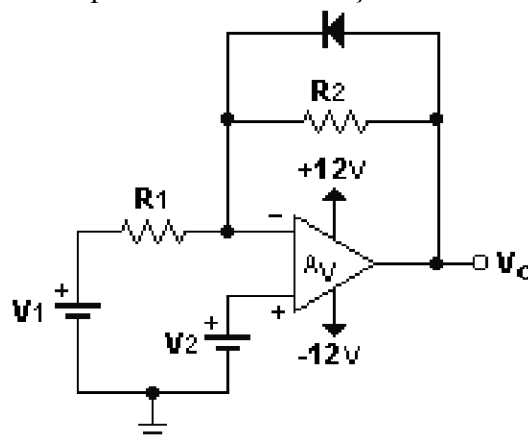
controlador proporcional feito com um amplificador operacional na configuração amplificador de diferença.

Na Figura 8 é mostrada a configuração amplificador de diferença, utilizada na placa para o ganho proporcional. O ganho de tensão proporcionado por esse circuito é apresentado na Equação (4)

$$A_V = \frac{-R_2(v_1 - v_2)}{R_1} \quad (4)$$

em que A_V é o ganho de tensão do circuito. Importante notar que, para o cálculo desse ganho, considerou-se a resistência de R_1 é muito menor que a resistência de R_2 .

Figura 8 – Circuito detector e amplificador de diferença.



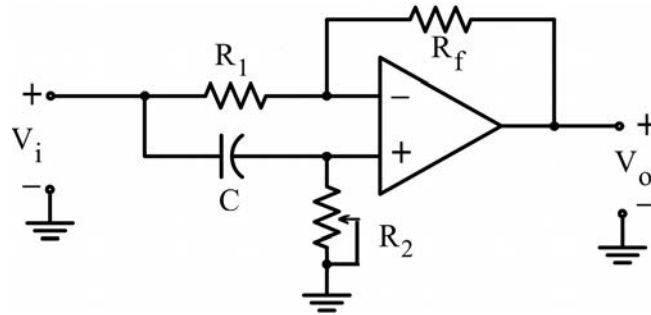
Fonte: Degem Systems (1988)

O amplificador operacional que se encontra na placa, pela Figura 8, é alimentado com fontes simétricas, +12 V e -12 V, o que limita a saída v_o a esses níveis de tensão. Além disso, vale lembrar que o diodo conectado entre a saída e a entrada inversora do amplificador operacional tem por finalidade impedir que a tensão de saída chegue a 0,7 V.

O amplificador operacional utilizado para fazer esse circuito de ganho pertence a um CI onde existem outros três amplificadores iguais. Um deles é usado no circuito retificador e os outros dois em um circuito defasador de fase.

O circuito defasador de fase da placa é empregado no acionamento do motor CA, recebendo o sinal do gerador de funções e produzindo dois sinais defasados de 90 graus. A defasagem entre as tensões pode ser controlada mediante um potenciômetro e o sinal de saída precisa também de amplificação de corrente. No caso do defasador da placa, o circuito apresenta ganho de tensão, diferente do circuito defasador mostrado como exemplo na Figura 9, que possui ganho unitário.

Figura 9 – Circuito defasador de fase com ganho unitário.



Fonte: Adaptado de Karris (2008)

Considerando ainda o circuito da Figura 9, o ganho de tensão proporcionado pode ser definido, no domínio da frequência, segundo a Equação (5).

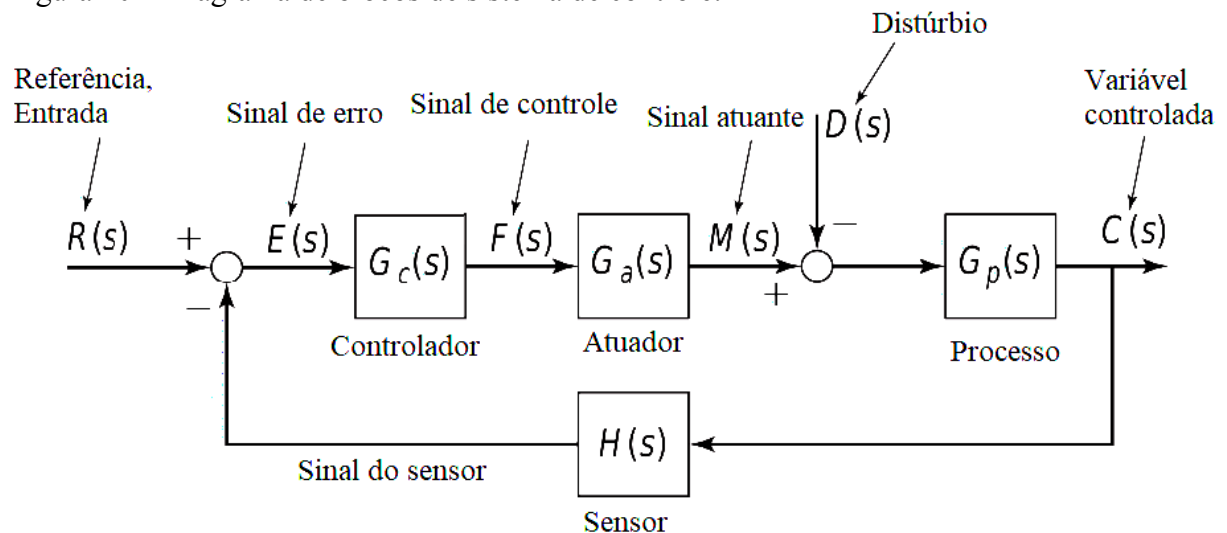
$$A_v(s) = \frac{sR_2C - 1}{sR_2C + 1} \quad (5)$$

É válido notar, a partir do ganho de tensão, que tal circuito é um filtro passa tudo, alterando apenas a fase do sinal de entrada.

2.7 CONTROLE EM MALHA FECHADA

A melhor forma de representar um sistema de controle é através de diagramas de blocos. Na Figura 10 é mostrado um diagrama de blocos que representa boa parte dos sistemas reais em engenharia.

Figura 10 – Diagrama de blocos de sistema de controle.



Fonte: adaptado de Palm III (2010)

O componente que se deseja controlar no sistema é o processo. É ela quem produz a variável controlada e, no caso, modifica-se o seu sinal de entrada a fim de se obter um comportamento desejado e adequado na sua saída. Para um controle robusto, o sistema deve resistir a distúrbios que o processo possa sofrer. Além disso, o sistema deve ser capaz de perceber a variável controlada e alterar, se for o caso, o sinal de controle e o sinal atuante através do controlador e do atuador.

Fica nítida, portanto, a necessidade do sistema comparar a variável controlada e o sinal de referência na entrada para se obter um comportamento satisfatório do processo. Para isso, precisa-se de um sensor capaz de medir a variável de saída e comparar tal informação com a entrada, criando uma realimentação e completando o sistema. Se fôssemos fazer uma analogia com o corpo humano, o cérebro seria o controlador; os braços, mãos e pernas seriam a planta; os músculos dos braços seriam o atuador; e os órgãos de sentido seriam os sensores (PALM III, 2010).

Contudo, para o projeto de sistemas de controle em malha fechada, deve-se ter em mente que um mesmo sistema pode apresentar comportamentos bem diferentes em malha aberta e em malha fechada. Desta forma, critérios, como estabilidade, magnitude do erro em regime permanente, sensibilidade e outros, são muito importantes na análise e controle desses sistemas.

No Módulo EB-109 são apresentadas duas formas de controlar em malha fechada o sistema da placa: controle de velocidade do motor CC; e controle de tensão do gerador CA. Pelas duas formas verificam-se melhorias, principalmente com relação à sensibilidade reduzida às variações das características do sistema.

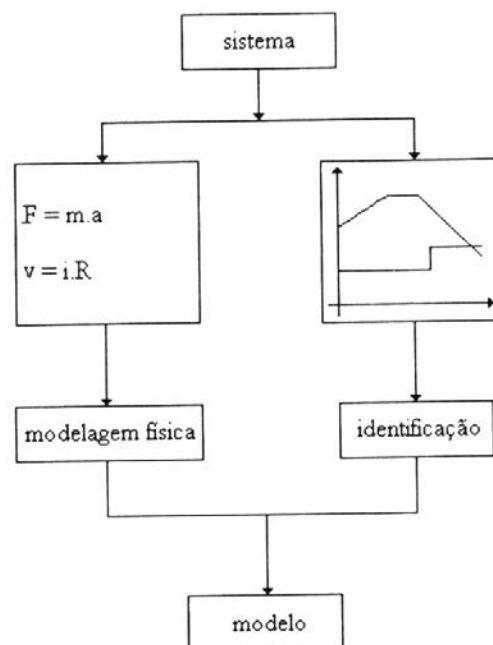
3 TÓPICOS ESSENCIAIS EM CONTROLE

Os sistemas lineares e invariantes no tempo podem ser representados por funções de transferência em diagramas de blocos, como o mostrado na Figura 10. Daí surgem técnicas que matematicamente verificam a estabilidade e proporcionam o ajuste de controladores. A seguir são apresentados alguns métodos de análise de sistemas que foram aplicados ao sistema do Módulo EB-109.

3.1 IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS USANDO O TESTE DA RESPOSTA AO DEGRAU

A identificação de sistemas consiste em determinar o modelo matemático de um sistema que representa satisfatoriamente os seus aspectos para uma utilização particular. Usualmente, existem duas formas de modelar um sistema, ambas mostradas na Figura 11: modelagem física e identificação.

Figura 11 – Princípios para a construção de um modelo matemático.



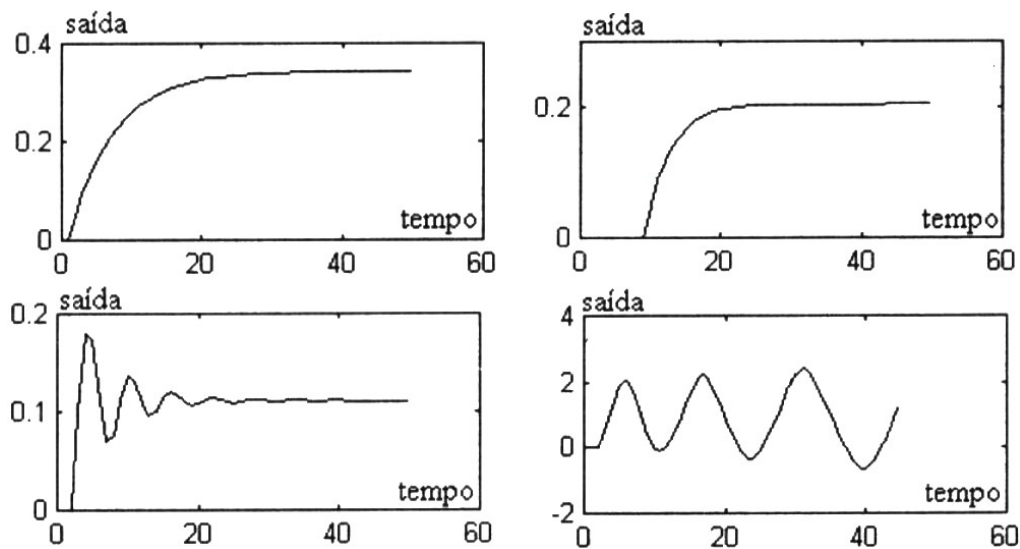
Fonte: Coelho (2004)

Estes procedimentos propiciam a obtenção de modelos que representam a dinâmica do processo. Tais modelagens, assim sendo, geram equações matemáticas que podem ser utilizadas para responder questões sobre o sistema sem a realização de experimentações (COELHO, 2004).

A análise teórica de um sistema fornece a estrutura de sua função de transferência, expressa pelo número de polos e de zeros e a existência ou não de atraso. Os valores numéricos dos coeficientes da função de transferência por vezes têm claro significado físico e estão disponíveis a partir da própria análise teórica. Porém, muitas vezes isso não ocorre, pois os parâmetros físicos podem ter valores muito incertos, difíceis de determinar e variar significativamente com o desgaste do equipamento. Nesses casos os valores numéricos mais corretos para os coeficientes da função de transferência devem ser determinados a partir de resultados experimentais obtidos do processo (BAZANELLA, 2005).

Diferentes procedimentos são utilizados na determinação experimental de modelos de sistemas, sendo um dos mais utilizados a identificação pelo teste de resposta ao degrau. Tal método consiste em submeter o processo (planta) a uma mudança abrupta na variável de entrada, como em um chaveamento. A saída do processo (reação da planta), então, sendo devidamente registrada, pode assumir alguns dos exemplos mostrados na Figura 12.

Figura 12 – Respostas típicas ao degrau em malha aberta.



Fonte: Coelho (2004)

Há vários métodos baseados na resposta ao degrau que produzem resultados coerentes. Contudo, aqui será apresentado apenas o teste de Ziegler-Nichols para processos de primeira ordem, que se fundamenta em determinar a função de transferência do processo no formato mostrado na Equação (6)

$$G_p = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \quad (6)$$

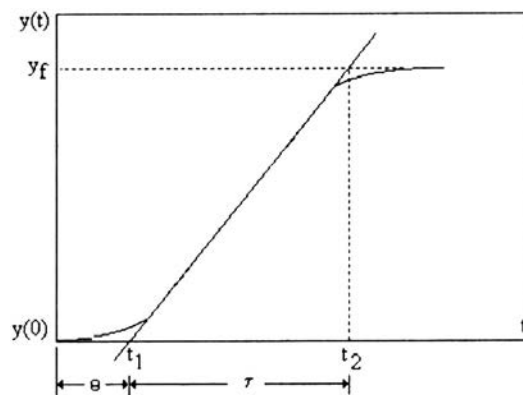
em que K é o ganho estático, τ é a constante de tempo e θ , o atraso de transporte.

Em tal método calcula-se os parâmetros K , τ e θ conforme é ilustrado na Figura 13. A reta traçada corresponde à tangente no ponto de inflexão da curva de reação. O atraso θ é calculado pelo intervalo de tempo entre a aplicação do degrau na entrada do processo e o instante t_1 em que a reta tangente toca a reta $y(t) = y(0)$. A constante τ , por sua vez, é determinada pelo intervalo de tempo entre o instante t_1 e o instante t_2 , em que a reta tangente toca a reta $y(t) = y_f$. O parâmetro K é calculado pela Equação (7), ou seja,

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (7)$$

onde Δy e Δu são, respectivamente, as variações na saída do processo e na entrada deste entre o início e o final do teste (COELHO, 2004).

Figura 13 – Método de Ziegler-Nichols usado para a modelagem de processos de primeira ordem.



Fonte: Coelho (2004)

3.2 MÉTODO DO LUGAR GEOMÉTRICO DAS RAÍZES

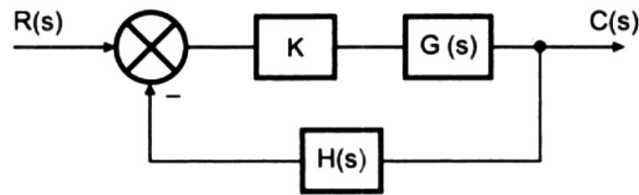
A característica básica da resposta transitória de um sistema de malha fechada está intimamente relacionada à localização dos polos de malha fechada. Se o ganho de malha do sistema for variável, então a localização dos polos de malha fechada dependerá do valor do ganho de malha escolhido. É importante, então, que o projetista saiba como os polos de malha fechada se movem no plano s , à medida que o ganho de malha varia (OGATA, 2010).

Considerar a Figura 14, que mostra um sistema de controle genérico. A equação característica em malha fechada desse sistema é representada pela Equação (8)

$$1 + KG(s)H(s) = 0 \quad (8)$$

Tal equação define os polos em malha fechada do sistema, indicando, por consequência, a estabilidade do mesmo.

Figura 14 – Sistema em malha fechada genérico.



Fonte: Bakshi (2009)

Fica claro que, alterando-se o ganho, as raízes da equação característica do sistema mudam também, como mostra a Equação (8). Caso se desejasse calcular tais raízes, seria necessário calcular essa mesma equação para vários valores de K , o que é trabalhoso. Todavia, um método simples desenvolvido por W. R. Evans permite mapear a localização dos polos da função de transferência em malha fechada com as variações de K , facilitando as análises. Tal método chama-se método do lugar geométrico das raízes ou, em inglês, *Root Locus*.

O *Root Locus* produz mapeamentos como os ilustrados na Figura 15. Resumidamente, as regras para o seu traçado são listadas abaixo, segundo Lotufo (2017):

1. Os ramos do *Root Locus* começam nos polos de $G(s)H(s)$, dos quais $K \rightarrow 0$. Os ramos terminam nos zeros de $G(s)H(s)$, nos quais $K \rightarrow \infty$.
2. As regiões do eixo real à esquerda de um número ímpar de polos e zeros de $G(s)H(s)$ pertencem ao *Root Locus*.
3. Quando K se aproxima do infinito, os ramos do *Root Locus* tendem a assíntotas com inclinação

$$\theta = \frac{2i+1}{n_p - n_z} 180^\circ, i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

em que n_p é o número de polos e n_z é o número de zeros de $G(s)H(s)$.

4. O ponto de partida das assíntotas é o centro de gravidade (CG) da associação de polos e zeros:

$$CG = \frac{\sum \text{polos} - \sum \text{zeros}}{n_p - n_z}$$

5. Os pontos nos quais os ramos do *Root Locus* deixam ou entram no eixo real são determinados a partir das raízes de

$$\frac{dK}{ds} = 0$$

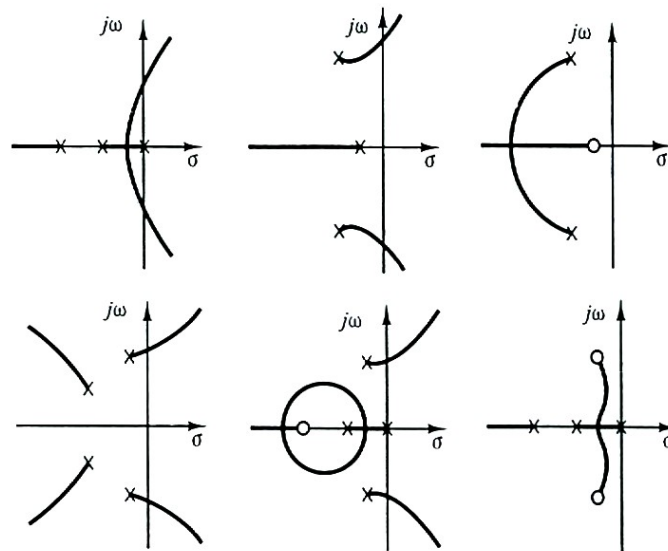
apenas se o valor de K no ponto encontrado for real e positivo.

6. Para um raio muito pequeno, a fase no ponto s é dada pela contribuição dos polos (contribuição negativa) e dos zeros (contribuição positiva) de $G(s)H(s)$ considerando a condição de fase

$$\angle(G(s)H(s)) = (2i+1)180^\circ$$

7. Os ângulos de saída (ou chegada) de polos (ou zeros) são determinados a partir da condição geral de ângulo.
8. A intersecção do *Root Locus* com o eixo imaginário pode ser determinada empregando o critério de *Routh-Hurwitz*.

Figura 15 – Configurações típicas de polos e zeros e o lugar das raízes correspondente.



Fonte: Ogata (2010)

Vale lembrar ainda que, nos pontos onde o traçado do *Root Locus* pertence ao semiplano direito do plano s , há instabilidade no sistema em malha fechada.

3.3 CONTROLADOR PID

A combinação das ações proporcional, integral e derivativa para gerar um só sinal de controle dá origem ao chamado controlador proporcional, integral e derivativo ou PID. Essas três ações presentes no controlador permitem emular, matematicamente, o comportamento da mente do operador ao controlar um processo manualmente (BAZANELLA, 2005).

Considerar a Figura 10, onde se encontra um sistema de controle convencional. O controlador da ilustração é o bloco que trata o sinal de erro $E(s)$ e produz o sinal de controle

$F(s)$. Esse tratamento de sinal que acontece dentro do controlador pode ser modelado no regime do tempo pela ação PID conforme mostra a Equação (9)

$$f(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (9)$$

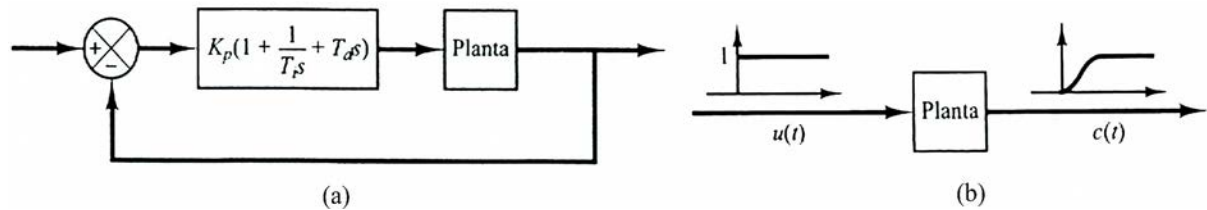
em que K_p é chamado de ganho proporcional (ação proporcional), T_i é o tempo integral (ação integral) e T_d é o tempo derivativo (ação derivativa). Na prática, o sinal de controle proveniente do controlador PID pode ser visto como a soma dos 3 sinais oriundos de cada uma das ações do controlador sobre o sinal de erro.

É interessante assinalar que mais da metade dos controladores industriais em uso nos dias atuais utiliza estratégias de controle PID ou PID modificadas. A maioria dos controles analógicos é hidráulica, pneumática, elétrica e eletrônica, ou resulta de uma combinação destes tipos. Correntemente, muitos deles são transformados em digitais por intermédio dos microprocessadores. A utilidade dos controladores PID, por sua vez, reside na sua aplicabilidade geral à maioria dos sistemas de controle. No campo dos sistemas de controle de processos contínuos, é fato conhecido que as estruturas de controle PID e PID modificadas provaram sua utilidade ao proporcionar controle satisfatório, embora não possam fornecer o controle ótimo em muitas situações específicas (LOTUFO, 2017).

3.3.1 Ajuste de controlador PID segundo a regra de sintonia Ziegler-Nichols

Na maioria dos casos, os parâmetros do controlador PID são ajustados em campo e, sendo assim, existem diferentes regras de sintonia na literatura. Cada regra de sintonia atende à sua maneira as especificações do regime transitório e do regime permanente do sistema de malha fechada. Contudo, devido a sua importância e aplicabilidade para a análise dos experimentos de Controle Linear, apenas um dos métodos de sintonia de Ziegler-Nichols, baseado na resposta experimental do processo a uma entrada degrau unitário, será apresentado neste trabalho. Considerar inicialmente a Figura 16.

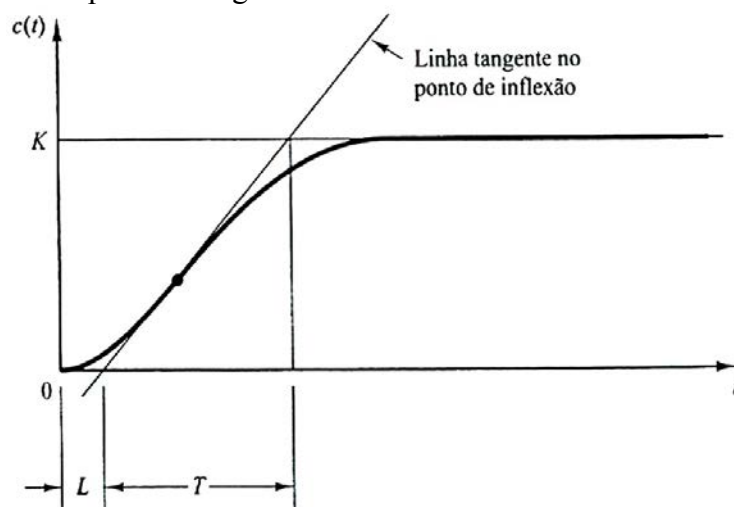
Figura 16 – Modelo de controle PID de uma planta (a) e a resposta ao degrau unitário de uma planta (b).



Fonte: Ogata (2010)

O método de Ziegler-Nichols consiste em submeter uma planta a ser controlada em malha fechada com controle PID, como mostra a Figura 16a, a um degrau unitário e mapear sua saída, ilustrada na Figura 16b, de modo a sintonizar o controlador. Esse método é aplicável caso a curva de resposta ao degrau unitário tenha o formato de “S”, como indica a Figura 17. Isso acontece quando a planta não possui integradores ou polos complexos conjugados dominantes. A curva com formato de “S” pode ser caracterizada por duas constantes: o atraso L e a constante de tempo T . O atraso e a constante de tempo são determinados desenhando-se uma linha tangente no ponto de inflexão da curva com formato em S e determinando-se a intersecção da linha tangente com o eixo dos tempos e a linha horizontal $c(t) = K$, como também é exemplificado na Figura 17 (OGATA, 2010).

Figura 17 – Curva de resposta ao degrau unitário em forma de S.



Fonte: Ogata (2010)

Tendo em vista a curva de resposta ao degrau, Ziegler e Nichols sugeriram a escolha dos parâmetros K_p , T_i e T_d de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 – Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada na resposta ao degrau unitário da planta.

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0,5 L$

Fonte: Ogata (2010)

É importante lembrar ainda que os parâmetros obtidos por esse método podem ser reajustados por meio de uma série de sintonias finas caso a resposta do sistema em malha fechada não atinja um resultado satisfatório. Efetivamente, métodos como esse são úteis apenas por fornecerem estimativas iniciais para o controle PID, devendo ser consideradas como pontos de partida nesse ajuste.

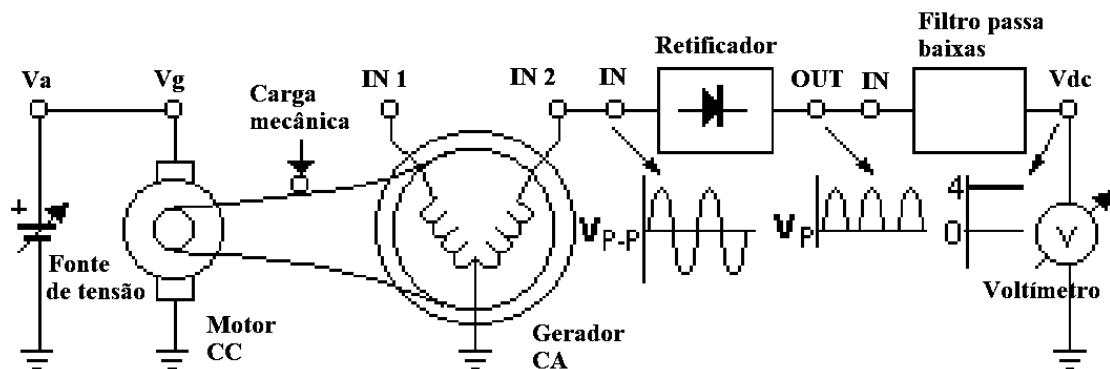
4 APRESENTAÇÃO DO MÓDULO EB-109: LISTA DE EXPERIÊNCIAS

Existem nove experimentos disponíveis no Módulo EB-109, sendo que quatro envolvem princípios de motor CC e gerador CA, dois compreendem aspectos de motor CA e gerador CC e três tratam do controle em malha fechada com as duas máquinas da placa EB-109. A seguir são apresentados de forma resumida cada experimento proposto no módulo.

Experimento 1: Medida de velocidade do motor CC

Neste experimento a velocidade do motor CC é medida empregando o motor síncrono CA como tacogenerador. Utiliza-se, para isso, o circuito mostrado na Figura 18.

Figura 18 – Circuito para medição da velocidade do motor CC.



Fonte: Degem Systems (1988)

O gerador CA, no circuito, se encarrega de produzir uma onda senoidal de frequência proporcional à sua velocidade de rotação. Tal onda de tensão é retificada, gerando um sinal CC proporcional à sua frequência. Por fim, existe uma relação de transmissão entre as máquinas acopladas que é igual a 1:5,3. Desse modo, encontra-se a velocidade do motor CC por meio de várias relações de proporção no circuito a partir da tensão CC na saída.

Experimento 2: Força contraeletromotriz de um motor CC

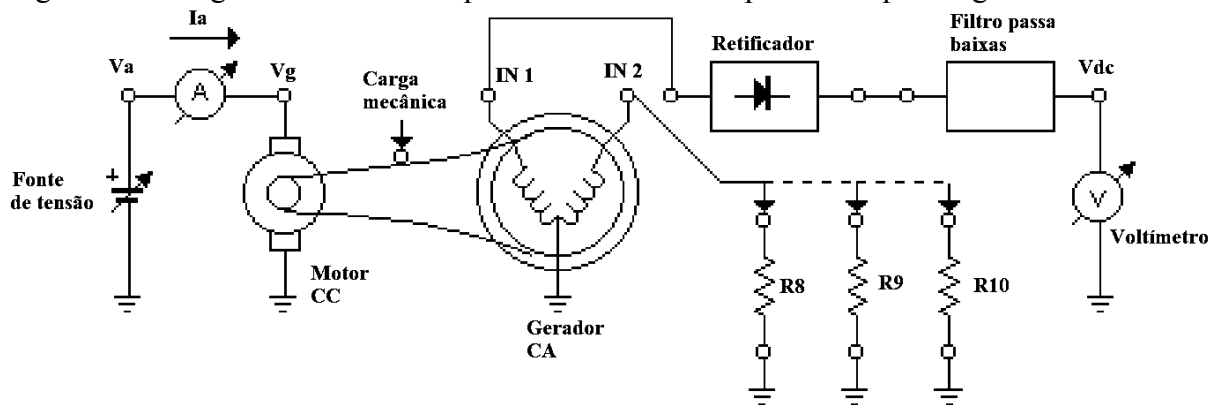
Nesta prática determina-se a resistência do motor CC e o efeito da força contraeletromotriz na velocidade do mesmo. O circuito de medição dessa experiência é o mesmo do experimento 1, mostrado na Figura 18. Diversas medições são realizadas de modo a demonstrar a proporcionalidade que existe entre a força contraeletromotriz do motor CC e sua velocidade e, também, entre a corrente elétrica e o torque desenvolvido no motor. Tal

proporção é percebida quando se verifica o comportamento do sistema para vários valores de tensão em V_a .

Experimento 3: Carga no motor CC

O objetivo desse experimento é compreender o efeito causado pelo aumento de carga sobre o sistema. Para esse fim, empregou-se tanto cargas mecânicas quanto cargas elétricas e mediu-se a corrente e a velocidade do motor CC. O circuito utilizado nessa experiência na verificação do impacto de cargas elétricas é mostrado na Figura 19.

Figura 19 – Diagrama de conexões para análise do efeito produzido por cargas elétricas.



Fonte: Degem Systems (1988)

Constatou-se que os dois tipos de carga afetam da mesma forma o funcionamento do motor CC, uma vez que, pelo acoplamento mecânico que existe entre as duas máquinas, as cargas elétricas são vistas como mecânicas pelo motor CC.

Experimento 4: Regulação de velocidade, eficiência, torque e potência

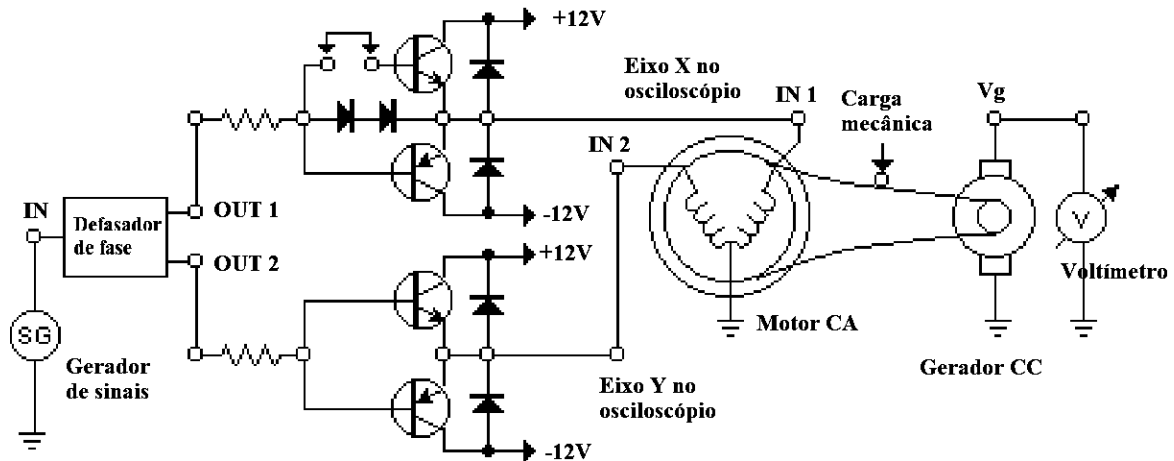
Nesta experiência verifica-se a relação que existe entre o torque e a potência em ambas as máquinas. Além disso, calcula-se a regulação de velocidade do motor CC, variando-se a resistência acoplada ao gerador CA, e mede-se a eficiência da combinação motor CC e gerador CA por meio da determinação das potências de entrada e de saída. O circuito empregado nessa prática é o mesmo mostrado na Figura 19, no qual são empregadas, sobretudo, cargas elétricas no sistema.

Experimento 5: Motor CA e gerador CC

Neste experimento inverte-se a função das duas máquinas: o gerador CA se torna motor e o motor CC se converte em tacogerador. Dessa forma, fica mais intuitivo

compreender o efeito do torque na máquina CA e a relação que existe entre a velocidade, a amplitude da tensão e a frequência do sinal de entrada no mesmo. Na Figura 20 é mostrado o circuito utilizado nesse experimento.

Figura 20 – Diagrama para montagem do sistema motor CA/gerador CC.



Fonte: Degem Systems (1988)

Importante nessa prática é assimilar que a velocidade do motor síncrono CA não é proporcional à magnitude da tensão de entrada, diferente do motor CC. Entretanto, também é essencial concluir que, dependendo da frequência de operação do motor, o mesmo exigirá maiores amplitudes de tensão para se manter girando na velocidade síncrona.

Experimento 6: Carga no motor CA e potência do gerador CC

Nesta prática analisa-se o efeito que produzem as cargas elétricas e mecânicas sobre a velocidade do motor CA. O diagrama de conexões dessa experiência é o mesmo ilustrado na Figura 20. O objetivo é constatar que a máquina mantém sua velocidade constante, não importando a carga, e que, caso o torque resistente da carga seja muito alto, o motor CA para de girar. Além disso, determina-se a eficiência do sistema em várias condições de operação, comparando-se as potências de entrada e saída em cada caso. A potência máxima de saída do gerador CC também é medida.

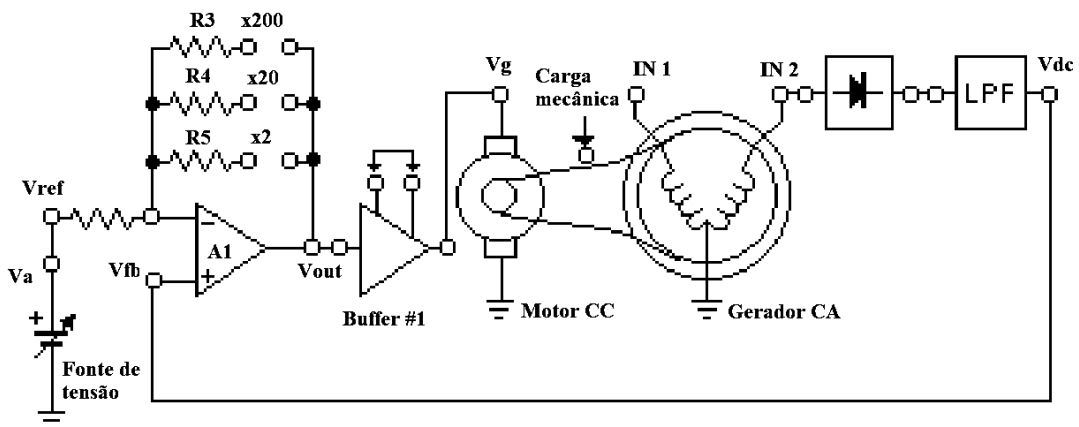
Experimento 7: Controle de velocidade do motor CC em malha fechada

O propósito desse experimento é compreender o funcionamento do motor CC operando em malha fechada e os efeitos dessa operação no controle da velocidade do mesmo motor com carga mecânica variável. Além do mais, observa-se a utilidade do circuito de

amplificação, que, além de produzir o sinal de erro necessário para o controle em malha fechada, tem a função de controlador proporcional em malha fechada. O diagrama de conexões desse experimento é mostrado na Figura 21.

Fica nítido, a partir das medições, que a regulação de velocidade do motor CC fica melhor conforme o ganho do circuito amplificador aumenta. Isto é, ganhos mais elevados proporcionam um controle de velocidade com menor erro em regime permanente.

Figura 21 – Circuito para o controle em malha fechada da velocidade do motor CC.



Fonte: Degem Systems (1988)

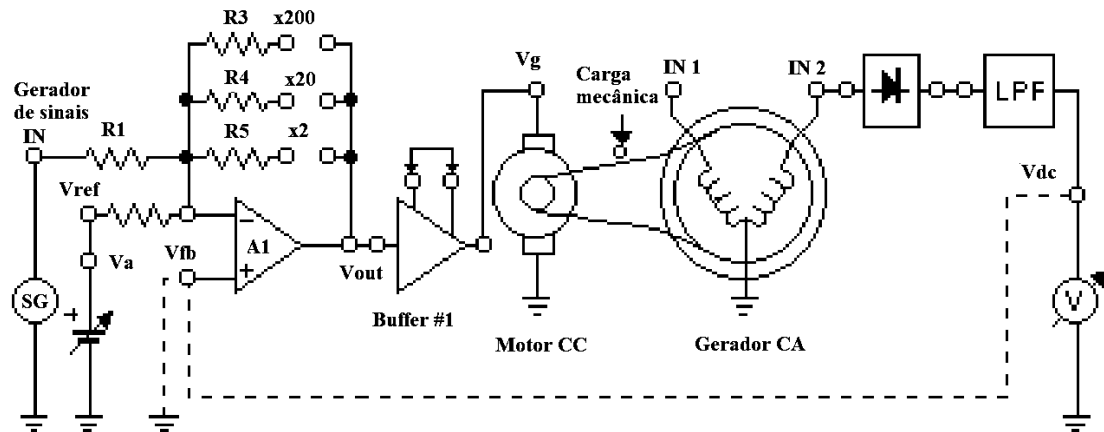
Experimento 8: Controle em malha fechada da tensão no gerador CA

No experimento anterior a malha fechada é utilizada para manter constante a velocidade do motor CC. Neste experimento, entretanto, a malha fechada é usada para manter constante a tensão de saída do gerador CA. A tensão se manterá constante devido ao aumento da velocidade do gerador CA e, naturalmente, pelo aumento da velocidade do motor CC. O circuito empregado nessa prática é o mesmo ilustrado na Figura 21, com a adição de resistências elétricas ligadas ao gerador CA. O controle da tensão é notado conforme se alteram as condições de operação do sistema, tais como ganho do circuito de ganho e alteração das cargas elétricas conectadas ao gerador CA.

Experimento 9: Controle de velocidade do motor CC por ciclo de trabalho variável

Nesta experiência descobre-se um outro método de se controlar a velocidade do motor CC baseado na variação do ciclo de trabalho da fonte de alimentação. Com essa técnica a eficiência do circuito de controle é aumentada e problemas com aquecimento são evitados. O circuito utilizado nessa prática é ilustrado na Figura 22.

Figura 22 – Diagrama de conexões para o controle por ciclo de trabalho variável.



Fonte: Degem Systems (1988)

Para que se tenha o controle por modulação por largura de pulso (PWM), é necessário ajustar uma onda dente de serra na fonte *SG*. Desse modo, obtém-se em V_{out} uma onda quadrada que fará o motor CC chavear entre ligado e desligado. É importante destacar que são testadas a malha aberta e a malha fechada nesse experimento, sendo que, obviamente, a malha fechada apresenta melhores resultados no controle da velocidade do motor CC frente a variações da carga mecânica.

4.1 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS

O Módulo EB-109 apresenta um gabarito com os valores corretos das medições de cada experimento. Esses valores, em geral, se mostraram iguais aos encontrados durante a revisão da placa, com exceção de algumas medidas, nas quais os motores trabalhavam no limiar de operação.

Adiante é exemplificado um dos experimentos propostos no curso e as divergências encontradas no funcionamento da placa.

4.1.1 Exemplo de experimento

O experimento 7 (controle de velocidade do motor CC em malha fechada) e sua solução serão mostrados a seguir. Os demais experimentos seguem o mesmo modelo.

CONTROLE DE VELOCIDADE DO MOTOR CC EM MALHA FECHADA

a) PROCEDIMENTO

- Realizar as conexões indicadas na Figura 20;
- Utilizar os conectores nas pontes de forma a ajustar o ganho do amplificador para 2;
- Ajustar apropriadamente a escala do multímetro e do osciloscópio;
- Ajustar a fonte de tensão para obter 1,5 V em V_{DC} na condição sem carga mecânica e anotar V_{REF} na Tabela 2;
- Medir e preencher a Tabela 2 para todas as posições de carga mecânica;
- Ajustar o ganho do amplificador para 20 e repetir a mesma metodologia, preenchendo a Tabela 3;
- Ajustar o ganho do amplificador para 200 e repetir a mesma metodologia, preenchendo a Tabela 4.

b) RESULTADOS

Inicialmente, é necessário calcular a constante C que relaciona a tensão CC na saída do retificador e a velocidade do motor CC. Na experiência 1 é esclarecido que essa relação é linear. O valor dessa constante é calculado na própria experiência 1 ou por meio de um método ilustrado na apostila do módulo. Nessa prática considerou-se C igual a 948,7 rpm/V.

Com base no procedimento deste experimento e possuindo o valor da constante C , preenche-se as Tabelas 2, 3 e 4. Sabe-se que V_{REF} é a tensão de referência na malha de controle, V_{DC} é a tensão de saída do sistema, V_G é a tensão no motor CC e N_d é a velocidade do motor CC.

Tabela 2 – Resultados do experimento 7 para o ganho 2.

Posição da carga mecânica	V_{REF} (V)	V_{DC} (V)	V_G (V)	N_d (rpm)
0 (vazio)	5,76	1,55	6,04	1470,5
1	5,76	1,51	6,17	1432,5
2	5,76	1,44	6,37	1366,1
3	5,76	1,36	6,63	1290,2
4	5,76	1,27	7,00	1204,8
5	5,76	1,15	7,65	1091,0

Fonte: O autor

Tabela 3 – Resultados do experimento 7 para o ganho 20.

Posição da carga mecânica	V _{REF} (V)	V _{DC} (V)	V _G (V)	N _d (rpm)
0 (vazio)	2,00	1,51	5,92	1432,5
1	2,00	1,51	6,00	1432,5
2	2,00	1,50	6,40	1423,1
3	2,00	1,48	6,85	1404,1
4	2,00	1,48	7,47	1404,1
5	2,00	1,44	8,35	1366,1

Fonte: O autor

Tabela 4 – Resultados do experimento 7 para o ganho 200.

Posição da carga mecânica	V _{REF} (V)	V _{DC} (V)	V _G (V)	N _d (rpm)
0 (vazio)	1,60	1,51	5,90	1432,5
1	1,60	1,51	5,95	1432,5
2	1,60	1,51	6,25	1432,5
3	1,60	1,51	6,65	1432,5
4	1,60	1,51	7,10	1432,5
5	1,60	1,51	7,70	1432,5

Fonte: O autor

A partir das tabelas, calcula-se a regulação de velocidade para os diferentes ganhos:

- Ganho 2:

$$Reg_{velocidade} = \frac{N_{d(vazio)} - N_{d(plenacarga)}}{N_{d(vazio)}} \times 100 = \frac{1470,5 - 1091,0}{1470,5} \times 100 = 25,8 \%$$

- Ganho 20:

$$Reg_{velocidade} = \frac{1432,5 - 1366,1}{1432,5} \times 100 = 4,64 \%$$

- Ganho 200:

$$Reg_{velocidade} = \frac{1432,5 - 1432,5}{1432,5} \times 100 = 0 \%$$

4.1.2 Problemas encontrados nas medições e ajuste da correia do EB-109

Algumas inconformidades foram detectadas no Módulo EB-109. Dentre elas, destaca-se um procedimento errado descrito na experiência 5, no qual pede-se para ajustar o gerador de sinais de forma a obter uma onda senoidal de 40 Hz e 8 V_{pp} no mesmo. O que é ignorado nessa instrução é que o defasador de fase (ver circuito mostrado na Figura 20) apresenta ganho de tensão maior que a unidade. Desse modo, ao se colocar uma onda senoidal de 8 V_{pp} na entrada desse circuito, acontece a saturação do sinal. Além disso, mesmo colocando uma onda com 8 V_{pp} na entrada do motor, o mesmo não opera. A operação do motor, contudo, acontece em tensões maiores, como 18 V_{pp}. O correto seria ajustar o gerador de sinais de modo a obter uma onda senoidal em V_{in1} e V_{in2} com amplitude não inferior a 16 V_{pp} nas frequências solicitadas.

Outro problema encontrado foi a faixa de frequências proposta nos experimentos 5 e 6, onde é solicitado variar a frequência de operação do motor CA entre os valores de 40 e 100 Hz. Neste caso, verificou-se que o motor CA não opera nas frequências acima de 50 Hz, não importando a amplitude da tensão imposta. Uma faixa de frequências coerente para esses experimentos é de 20 a 50 Hz, posto que, nas frequências abaixo de 20 Hz, a tensão na entrada do motor CA apresenta distorções.

Os circuitos da placa também apresentaram falha nos casos em que a carga mecânica era alta ou a resistência de carga no gerador CA era baixa. Isso aconteceu nos experimentos 3, 4, 6, 7, 8 e 9. Aparentemente, o motor CC, com exceção do experimento 6, não conseguia superar o torque resistente do sistema em plena carga. A maioria das falhas ocorreu quando o gerador CA operava com a carga de 23,5 Ω. O mesmo também acontecia nos momentos em que, em malha fechada, se colocava um ganho igual a 200, como é solicitado nos experimentos 7 e 8. Como solução, sugere-se a troca dos resistores que proporcionam estresse no sistema, o que é fácil de executar em uma placa com circuitos em solda. No caso, os resistores R3 (100 kΩ) e R8 (23,5 Ω), mostrados na Figura 1, poderiam ser trocados, respectivamente, por resistores de 20 kΩ e 39 Ω. Além do mais, é necessário identificar se o

que sobrou do circuito microprocessado responsável pelo experimento retirado do módulo não interfere na placa de modo indevido nas ocasiões destacadas aqui.

O ajuste da correia que acopla as duas máquinas da placa também é algo considerável, uma vez que esse acoplamento interfere diretamente nas medições. Esse ajuste pode ser feito por meio da folga dos parafusos de encaixe do motor CC para posterior regulação da distância entre as máquinas. No Anexo (ao final deste trabalho) é ilustrado esse ajuste de forma detalhada.

4.2 CONCLUSÕES DOS EXPERIMENTOS E FINALIDADE

Por meio dos experimentos do Módulo EB-109, foi possível melhor compreender conceitos fundamentais, tais como o funcionamento da máquina síncrona e a função da realimentação em sistemas de controle. Ficou claro, do mesmo modo, a proporcionalidade que existe nos tacogeradores na medição da velocidade, o efeito causado pelo aumento de carga nos motores, o papel da força contraeletromotriz na máquina CC, a economia de energia possibilitada pela operação *on/off* dos transistores no amplificador de corrente, dentre outros aspectos muito importantes em Engenharia Elétrica.

Os valores encontrados nas medições não foram todos de acordo com o gabarito da Degem Systems, o que é natural, visto que a precisão dos aparelhos de medição envolvidos são distintos, cada placa possui ajustes de correia diferentes, os motores apresentam desgastes variados, entre outras coisas. Efetivamente, os experimentos servem para ensinar e provar conceitos e, sendo assim, desvios nas medidas não são relevantes.

Ao final de cada prática, o Módulo EB-109 propõe questões de revisão. Tal questionário é bastante eficaz, uma vez que conduz o estudante às conclusões do experimento. Os objetivos do circuito e das medidas, dessa maneira, ficam muito claros e o aprendizado torna-se mais fácil.

4.3 PROPOSTA DE NOVO EXPERIMENTO

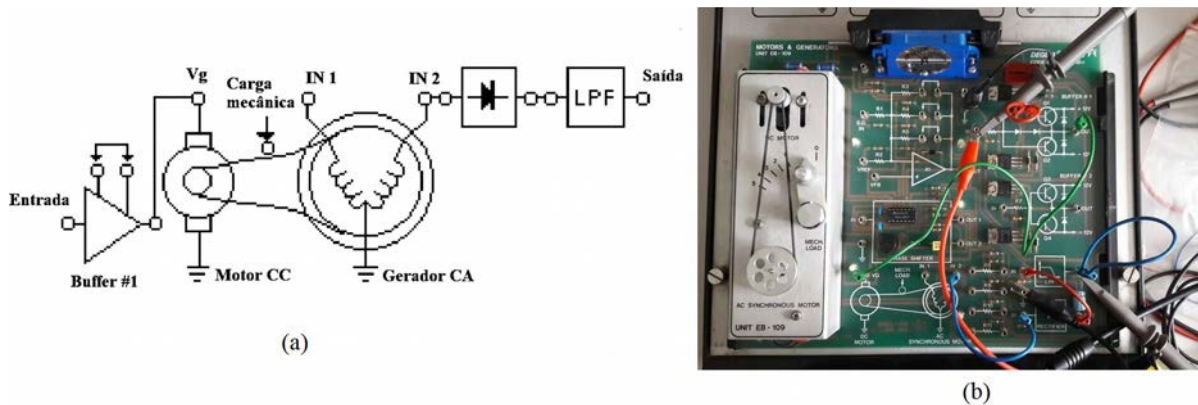
Tendo em vista os experimentos que já existem no Módulo EB-109, foi proposta uma nova experiência que envolve modelagem de processos, análise da estabilidade de sistemas em malha fechada e controle PID. A seguir são mostrados esses princípios e os resultados obtidos.

4.3.1 Métodos empregados e resultado

Para modelar o sistema de controle formado pelas máquinas e circuitos eletrônicos associados na placa, é necessário empregar uma metodologia conveniente. Devido à facilidade e à razoabilidade, aplicou-se o método de identificação de sistemas proposto nesse trabalho, que tem por base a teoria de identificação de sistemas de Ziegler-Nichols.

Por conseguinte, injetou-se uma onda quadrada de frequência na faixa de mili-hertz de modo a se obter um degrau na entrada do circuito amplificador de corrente ligado ao motor CC e mediu-se a saída de tensão após o retificador com filtro. Cabe destacar que a planta em questão é formada pelo circuito *buffer*, motor CC, correia, gerador CA e retificador com filtro. A tensão de entrada foi ajustada em 6 V CC e no mesmo não havia carga mecânica. A Figura 23a ilustra o diagrama de conexões usado no ensaio e a Figura 23b mostra a montagem desse mesmo circuito na placa.

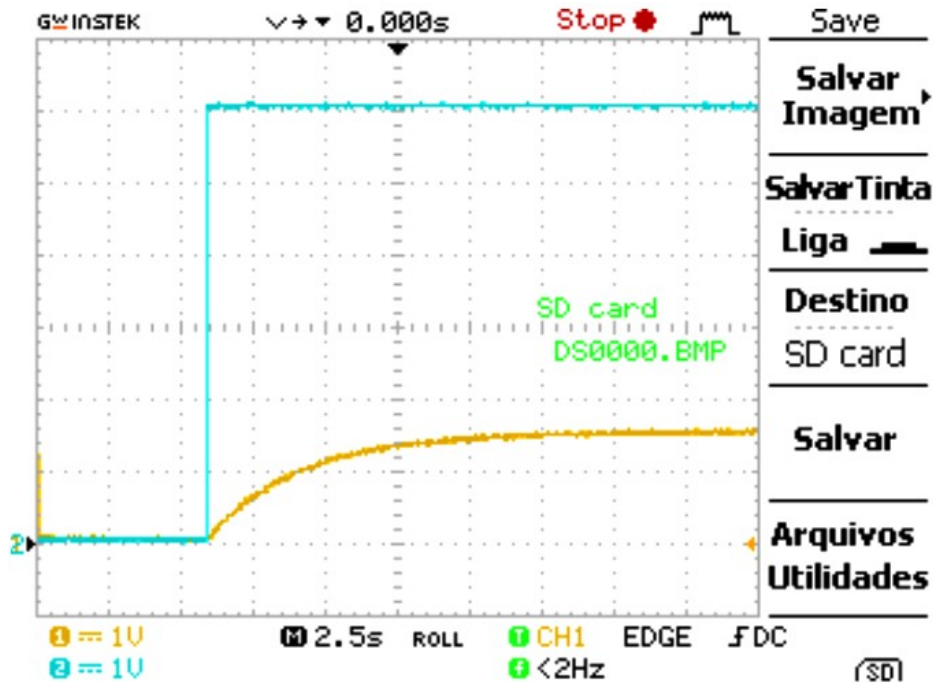
Figura 23 – Sistema submetido à entrada degrau (a) e sua montagem elétrica (b).



Fonte: O autor

O resultado obtido nesse ensaio é mostrado na Figura 24, onde é ilustrada a entrada degrau (curva em azul) e a resposta do sistema (curva em amarelo).

Figura 24 – Entrada e saída do sistema ensaiado vistas no osciloscópio.



Fonte: O autor

Como é possível ver, o comportamento desse processo é típico de um sistema de primeira ordem e pode ser modelado no domínio da frequência segundo a Equação (6). Considerando ainda a Figura 13, obtém-se a função de transferência aproximada dessa planta, que é mostrada na Equação (10).

$$G_p(s) = \frac{0,25 e^{-0,09s}}{3,55s + 1} \quad (10)$$

Fica claro que esse sistema é estável em malha aberta e, para alguns valores de ganho, instável em malha fechada devido ao atraso de transporte. Em malha fechada, esse mesmo sistema é utilizado nos experimentos 7, 8 e 9 do Módulo EB-109. Sua ilustração pode ser vista na Figura 21.

Uma vez encontrada a função de transferência que representa o sistema, pode-se encontrar os limites para o ganho proporcional. O método empregado na obtenção desses limites é o *Root Locus*, o qual considera o limiar de estabilidade do sistema. Para fazer o desenho do lugar das raízes, basta seguir o passo a passo mostrado na seção 3.2 deste trabalho e considerar a aproximação de Padé (BAKER JR., 1975), que trata do atraso de transporte, como ilustra a Equação (11).

$$H(s) = e^{-\theta s} = \frac{1 - \frac{\theta s}{2} + \frac{(\theta s)^2}{8} - \frac{(\theta s)^3}{48} + \dots}{1 + \frac{\theta s}{2} + \frac{(\theta s)^2}{8} - \frac{(\theta s)^3}{48} + \dots} \quad (11)$$

Se a aproximação de Padé for truncada no segundo termo da série, chega-se à Equação (12).

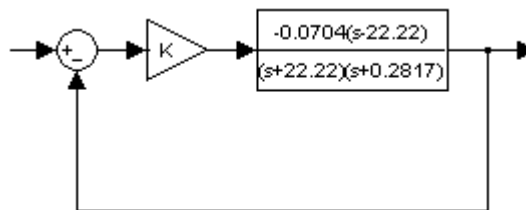
$$H(s) = e^{-\theta s} = \frac{2 - \theta s}{2 + \theta s} \quad (12)$$

Aplicando a Equação (12) na Equação (10), obtém-se uma nova função de transferência com um polo no semiplano esquerdo e um zero no semiplano direito, como mostra a Equação (13).

$$G_p(s) = \frac{0,25}{3,55s + 1} \frac{2 - 0,09s}{2 + 0,09s} = \frac{-0,0225s + 0,5}{0,3195s^2 + 7,19s + 2} = \frac{-0,0704(s - 22,22)}{(s + 22,22)(s + 0,2817)} \quad (13)$$

A Figura 25 mostra o diagrama de blocos equivalente do sistema da Figura 21, já utilizando a função de transferência da Equação (13).

Figura 25 – Diagrama de blocos do sistema da placa em malha fechada.



Fonte: O autor

O *Root Locus* correspondente desse sistema é apresentado na Figura 26. É importante notar que a função de transferência da Equação (13) representa um sistema de fase não-mínima. Sendo assim, algumas regras envolvidas no desenho do *Root Locus*, para esse sistema, são invertidas ou mudadas. No caso, as regras 2, 3 e 6, apresentadas nesse trabalho, devem ser modificadas conforme apresentado a seguir:

Regra 2: As regiões do eixo real à esquerda de um número par de polos e zeros de $G(s)H(s)$ pertencem ao *Root Locus*.

Regra 3: Quando K se aproxima do infinito, os ramos do *Root Locus* assintotam retas com inclinação

$$\theta = \frac{i}{n_p - n_z} 360^\circ, i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

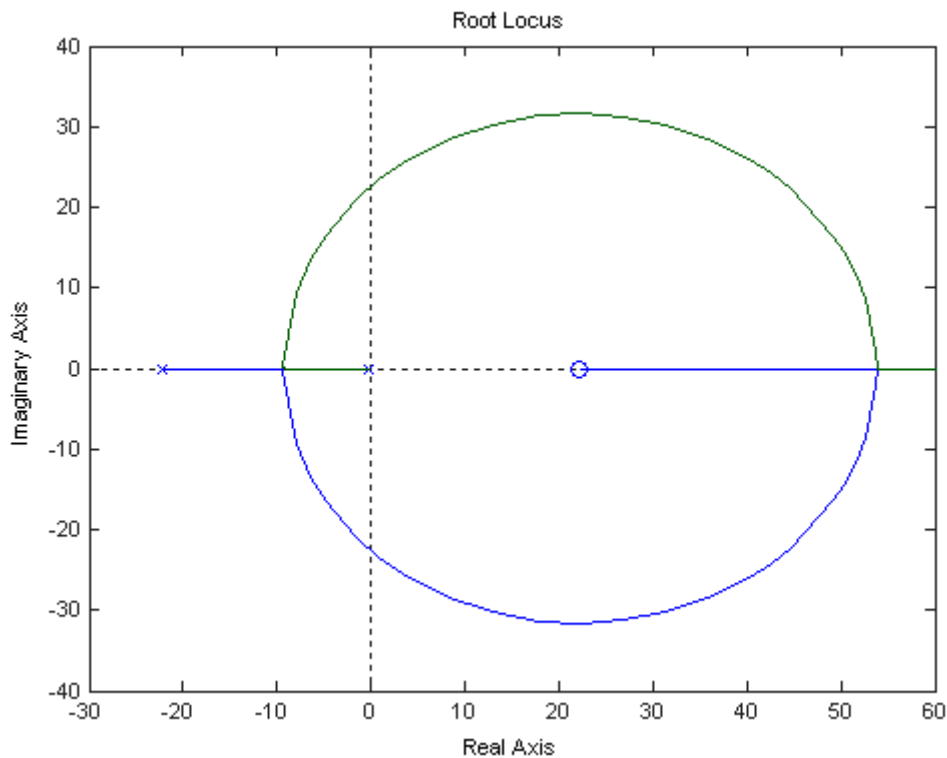
em que n_p é o número de polos e n_z é o número de zeros de $G(s)H(s)$.

Regra 6: Para um raio muito pequeno, a fase no ponto s é dada pela contribuição dos polos (contribuição negativa) e dos zeros (contribuição positiva) de $G(s)H(s)$ considerando a condição de fase

$$\angle(G(s)H(s)) = i.360^\circ$$

As demais regras de traçado do *Root Locus* permanecem as mesmas.

Figura 26 – Lugar geométrico das raízes do sistema em malha fechada ensaiado.



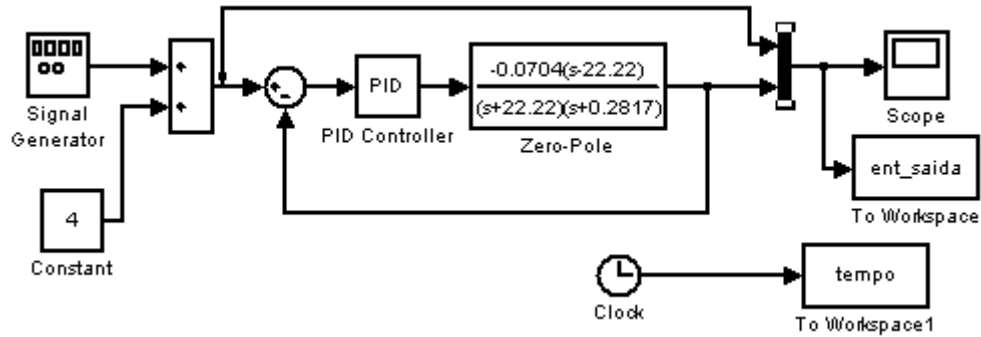
Fonte: O autor

De acordo com o critério de estabilidade de Routh-Hurwitz, aliado ao *Root Locus*, o ganho do controlador não pode ultrapassar 319 para assegurar a estabilidade. Em $K = 319$ os polos do sistema em malha fechada se posicionam sobre o eixo imaginário, tornando o sistema marginalmente estável. Se a função de transferência obtida for satisfatória, fica claro que o sistema não atingirá a instabilidade na placa, visto que os ganhos possíveis são 2, 20 e 200.

É possível ainda, através de métodos computacionais como o MatLab e o Simulink, simular o sistema com os controladores PID propostos na Tabela 1 através do método de Ziegler-Nichols. Dessa forma, consegue-se ver o efeito causado no sistema pelos ganhos integral e derivativo, ao invés do simples controle proporcional que existe na placa. A Figura 27 mostra o sistema em questão em diagrama de blocos no Simulink. Nesse diagrama, a

entrada do sistema é uma onda quadrada ajustada com frequência igual a 0,2 Hz, nível CC igual a 4 V e amplitude de 1 V de pico.

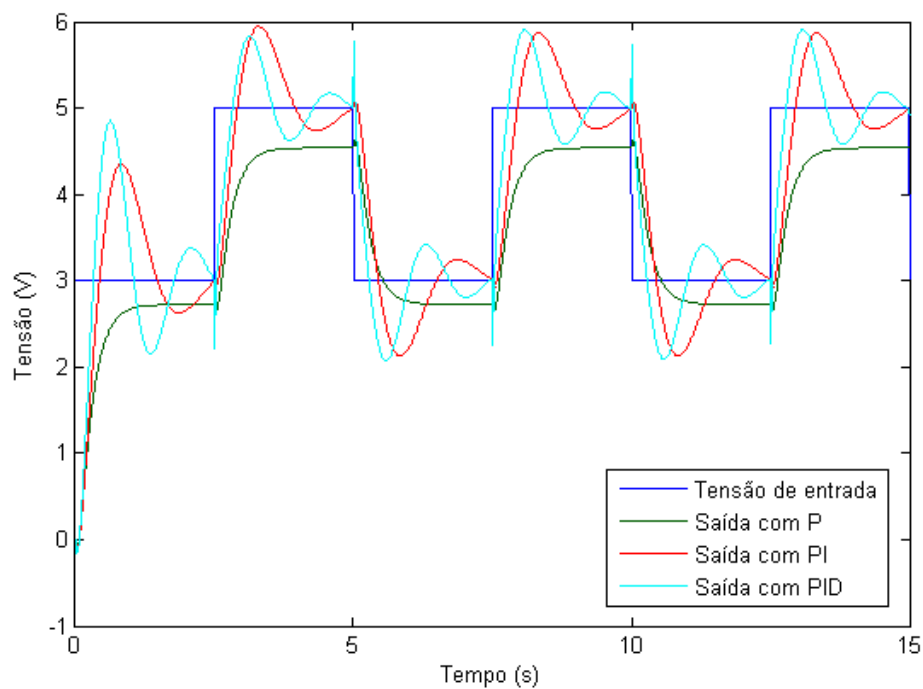
Figura 27 – Diagrama de blocos no Simulink do sistema ensaiado com controle PID.



Fonte: O autor

Simulando o sistema da Figura 27, com a entrada degrau descrita anteriormente, obtêm-se as respostas para cada tipo de controlador proposto na Tabela 1, conforme ilustra a Figura 28. Para o cálculo dos ganhos proporcional, integral e derivativo do controlador PID simulado, é importante considerar a Equação (9), a Figura 17 e que os valores de L e T valem, respectivamente, 0,09 s e 3,55 s.

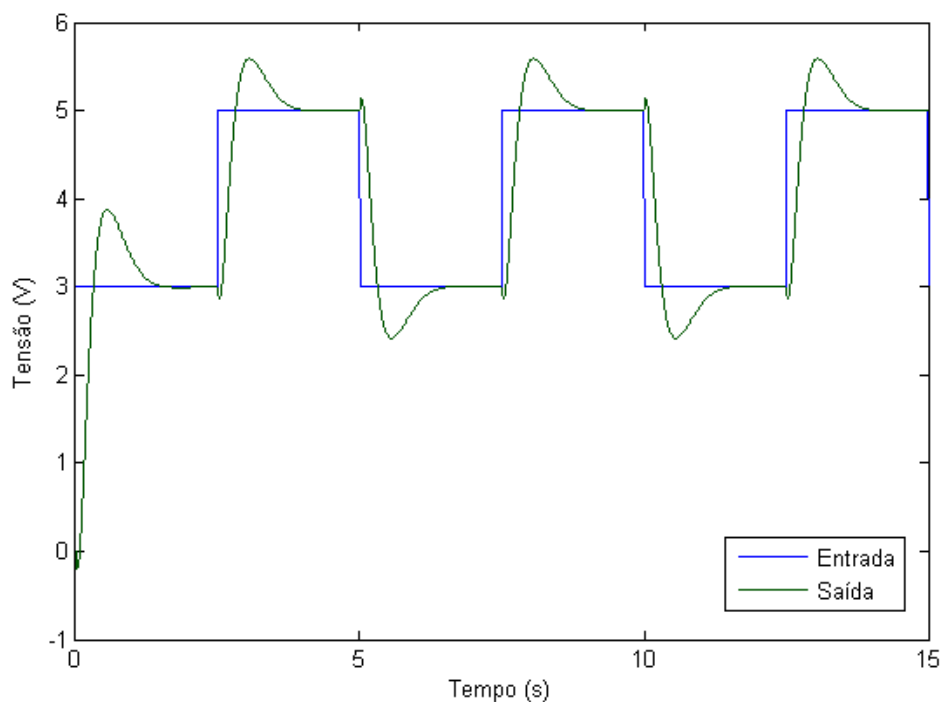
Figura 28 – Resposta do sistema em malha fechada simulado no MatLab e Simulink de acordo com os três ajustes do método de Ziegler-Nichols.



Fonte: O autor

É fácil perceber que ainda são necessário ajustes finos nos controladores PID propostos. Por exemplo, com relação ao controle PI, alterando-se o ganho K_p de 35,5 para 65 e o parâmetro T_i de 0,333 para 0,481, obtém-se um resultado bem mais satisfatório para a resposta do sistema. Tal resultado é apresentado na Figura 29.

Figura 29 – Entrada e saída do sistema simulado em MatLab e Simulink fazendo-se ajustes finos nos parâmetros do controlador PI.



Fonte: O autor

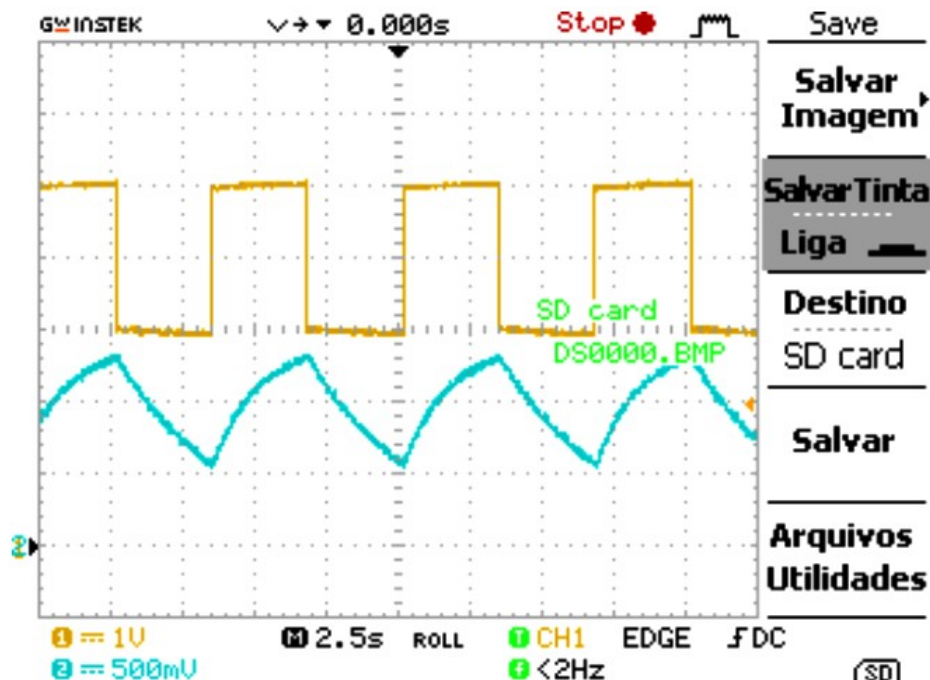
O ajuste fino do controlador PID não foi feito devido à dificuldade de se ajustar o ganho derivativo. Essa situação é muito comum no projeto de controladores a nível industrial, onde, em geral, opta-se por controladores PI nos processos envolvidos. O controlador proporcional simples também é evitado, já que este, dentre outras coisas, não é capaz de anular o sinal de erro.

O melhor ajuste obtido para o controle PI desse processo é mostrado na Figura 29, onde o erro é anulado e a saída acompanha satisfatoriamente a entrada. Além disso, o sobressinal na saída, ou *overshoot*, com os ajustes feitos, se mostrou melhor, sendo igual a 10%. O tempo de *overshoot*, igual a 50% do meio período, também foi bom.

4.3.2 Verificação do modelo aproximado obtido

Para comprovar se o sistema da Figura 21 pode ser aproximado pelo modelo em diagrama de blocos da Figura 25, realizou-se um ensaio simples no qual se injeta uma onda quadrada de amplitude e nível CC correspondente à faixa de operação dos componentes da placa EB-109 nos dois sistemas, o físico (EB-109) e o simulado (MatLab e Simulink), e comparou-se as saídas obtidas. Por conveniência, da mesma forma que nos ajustes do controlador PID, tal onda quadrada foi posta com 4 V de nível CC e 1 V de pico. Como no Módulo EB-109 existe apenas o ganho proporcional, o valor de K nesse teste foi escolhido igual a 2. A Figura 30 ilustra o comportamento da saída do sistema da Figura 21 quando excitado pela onda quadrada em foco.

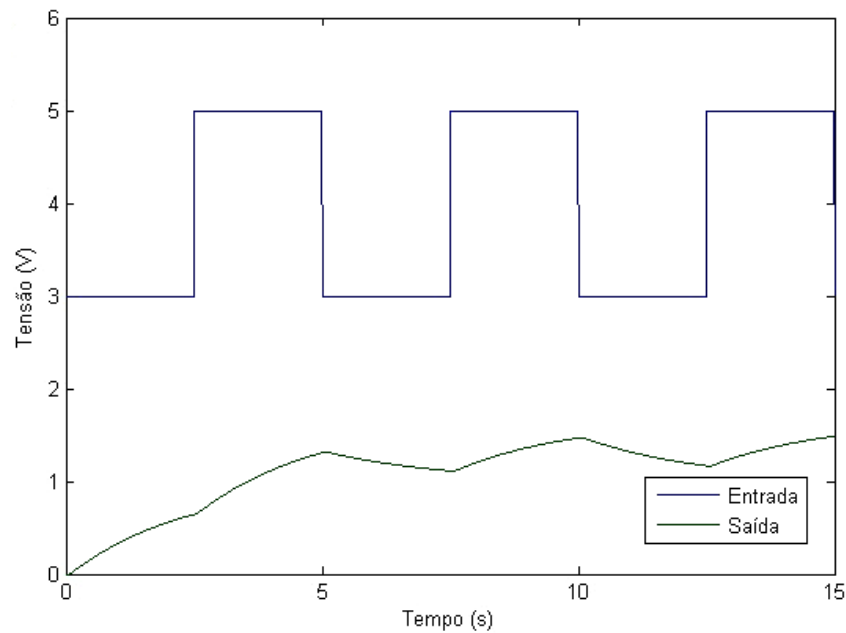
Figura 30 – Comportamento da entrada (curva em amarelo) e da saída (onda em azul) do sistema do Módulo EB-109 em malha fechada com ganho proporcional igual a 2.



Fonte: O autor

Simulando-se no MatLab e Simulink o sistema da Figura 25 com a mesma onda quadrada, obtém-se o comportamento mostrado na Figura 31.

Figura 31 – Saída do sistema em diagrama de blocos das Figuras 25 e 27 com ganho proporcional igual a 2 quando submetido a uma onda quadrada.



Fonte: O autor

Comparando-se as Figuras 30 e 31, observam-se semelhanças entre a resposta do sistema real do Módulo EB-109 e a resposta do sistema simulado em MatLab e Simulink. Entre as semelhanças destacam-se a forma dos sinais e os valores máximos das curvas. É importante considerar que as escalas escolhidas são diferentes nas duas figuras e que o sistema da Figura 31 foi simulado partindo do repouso (em $t = 0$ a saída é zero).

Assim sendo, o sistema real do Módulo EB-109, ilustrado na Figura 23, se mostrou próximo ao modelo aproximado, visto na Equação (10), na condição testada. Contudo, conhecendo-se o sistema, sabe-se que, dependendo do teste, divergências no comportamento dos sistemas real e simulado são esperadas. Isso decorre de fatores operacionais do processo, como não linearidades no funcionamento das máquinas, a inércia das máquinas e, sobretudo, o efeito de atenuação das altas frequências proporcionado pelo filtro passa baixas.

Cabe lembrar também que os métodos de identificação de sistemas não são muito precisos quando analisam plantas que possuem mais de um polo ou zeros em sua função de transferência, uma vez que oferecem aproximações de modelos de primeira e segunda ordem. Contudo, o sistema aproximado encontrado e as análises feitas podem servir de base para novas avaliações desse sistema (no sentido de reajustar o sistema proposto) e para estudos na área de identificação de sistemas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Módulo EB-109, como foi apresentado, constitui uma ferramenta muito relevante para o ensino em Engenharia Elétrica. Seus experimentos tratam de vários aspectos do ramo de eletroeletrônica e mecatrônica e, sem dúvida, servirão para auxiliar os alunos de Controle Linear e outros no sentido de esclarecer princípios fundamentais relacionados ao curso.

Os experimentos, em geral, se mostraram úteis com relação ao ensino e aprendizado e, apesar da idade dos componentes da placa e dos pequenos problemas encontrados, a placa apresentou performance admissível e pode ser aproveitada no laboratório do curso de engenharia elétrica do Campus.

Com relação à regulagem da correia que acopla as duas máquinas, o fato de existir instruções para esse ajuste é vantajoso e propício para a utilização do módulo. Algumas correias vistas nas placas apresentam sinais de desgaste e podem, com a ajuda dessas instruções de manutenção, serem devidamente trocadas e ajustadas. O mesmo pode ser obtido de outros componentes da placa através de processos empíricos, o que pode servir para criar um manual de manutenção da placa.

O novo experimento sugerido aqui, que fomenta o estudo de tópicos importantes em Controle, pode ter sua utilidade junto aos demais experimentos. O mesmo propõe a análise dos fenômenos vistos na placa através de medições e simulações com *softwares* como MatLab e Simulink. Além disso, são tratados, nesse experimento, aspectos pouco abordados em Controle Linear, como identificação de sistemas e projeto de controlador PID. Assim sendo, o aluno assimila conceitos importantes da área de Controle e interage tanto com os instrumentos de medição elétrica quanto com simuladores computacionais, aprendendo e experienciando aspectos de ambos.

Para trabalhos futuros propõe-se uma identificação mais apurada das inconformidades identificadas no módulo, calibrando e trocando os componentes existentes na placa. Além disso, como proposta, sugere-se, em novos trabalhos, implementar no módulo os controladores PID propostos neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- BACON, R. **Sobre a ciência experimental**. Tradução feita para o curso de Teoria do Conhecimento e Filosofia da Ciência I pelo Prof. Osvaldo Pessoa Jr. São Paulo: FFLCH-USP, 2010. 2 p.
- BAKER JR., G. A. **Essentials of Padé approximants**. New York: Academic Press, 1975. 318 p.
- BAKSHI, U. A.; BAKSHI, V. U. **Principles of control systems**. Pune: Technical Publications, 2009. 725 p.
- BAZANELLA, A. S.; SILVA JR, J. M. G. **Sistemas de controle: princípios e métodos de projeto**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005. 299 p.
- CATHEY, J. J. **Electronic devices and circuits**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2002. 310 p.
- COELHO, A. A. R.; COELHO, L. S. **Identificação de sistemas dinâmicos lineares**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2004. 181 p.
- DEGEM SYSTEMS. **Curso EB-109: motores y generadores**. Buenos Aires: Inter Training Systems Ltd, 1988. 121 p.
- FALCONE, A. G. **Máquinas elétricas rotativas**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1985. vol 1.
- KARRIS, S. T. **Electronic devices and amplifier circuits**. 2. ed. Fremont: Orchard Publications, 2008. 660 p.
- LOTUFO, F. A. **Controle linear**. Guaratinguetá: UNESP/FEG/DEE, 2017. 189 p. Apostila
- OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: 2010. 796 p.
- PALM III, W. J. **System dynamics**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2010. 834 p.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Electronic devices and circuit theory**. 11. ed. Upper Saddle River: Pearson Education, 2013. 906 p.

CARTER, B.; BROWN, T. R. **Handbook of operational amplifier applications**. Dallas: Texas Instruments, 2001. 94 p.

FITZFERALD, A. E.; KINGSLEY JR, C.; UMANS, S. D. **Electric machinery**. 6. ed. New York, 2003. 694 p.

LALOND, D. E.; ROSS, J. A. **Experiments in electronic devices and circuits**. New York: Delmar Publishers Inc, 1994. 310 p.

SANTOS, R. H. F. **Retrofit sistema de iluminação de estacionamento**: estudo de caso. 2016. 52 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

ANEXO – AJUSTE DA CORREIA DO EB-109

Para o ajuste da correia do Módulo EB-109, seguir os passos:

- Colocar o amperímetro entre os pontos V_A e V_G (+ em V_A);
- Ajustar V_G em 4 V CC;
- Ajustar a correia de modo que a corrente no motor CC seja de no máximo 50 mA e a tensão no gerador CA (V_{in1} e V_{in2}) em relação ao terra seja de no mínimo 1,3 V (diferença aceitável entre as entradas é de 7%).