

## UM PROJETO COM ABORDAGEM MULTIDISCIPLINAR NA FORMAÇÃO DO PROFISSIONAL DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

João Victor Bonella Lopes – jovblopes@hotmail.com  
Instituto Federal do Espírito Santo  
Rodovia ES 010 km 6,5 Manguinhos  
29173-087 – Serra – Espírito Santo

Dirceu Soares Júnior – dirceu.s@ifes.edu.br  
Instituto Federal do Espírito Santo  
Rodovia ES 010 km 6,5 Manguinhos  
29173-087 – Serra – Espírito Santo

Saul da Silva Munareto – saul@ifes.edu.br  
Instituto Federal do Espírito Santo  
Rodovia ES 010 km 6,5 Manguinhos  
29173-087 – Serra – Espírito Santo

**Resumo:** Como a Indústria 4.0 já é uma realidade segundo Bloem (2014) e David (2018), o perfil de engenheiro procurado pelas indústrias está se tornando cada vez mais o de um profissional multifuncional. Praticar trabalhos comuns ao ambiente industrial durante a graduação é extremamente benéfico ao aluno quando o mesmo adentrar em um ambiente real de produção. Este artigo aborda um projeto onde foi possível integrar matérias fundamentais do escopo da Engenharia de Controle e Automação em um trabalho de conclusão de curso. São apresentadas a integração dos equipamentos utilizados e as técnicas de controle aplicadas. Os resultados obtidos validam o sucesso do projeto.

**Palavras-chave:** controle, feedforward, multidisciplinaridade, engenharia.

### 1 INTRODUÇÃO

Com o advento de tecnologias cada vez mais avançadas e de baixo custo foi possível proporcionar a crescente automatização de processos industriais, o qual desenha um cenário cada vez mais comum nas fábricas ao redor do mundo. A chamada Indústria 4.0 (relacionada à quarta revolução industrial) é um conceito recentemente proposto em que há a interoperabilidade de sistemas, dispositivos e pessoas, onde existe imensa quantidade de informação digitalizada e novas estratégias de inovação (Bloem, 2014).

Além de ser consequência natural da digitalização e das novas tecnologias, a introdução da Indústria 4.0 está também relacionada com o fato de que muitas das possibilidades de aumentar o lucro na produção industrial estarem quase esgotadas e, portanto, novas alternativas devem ser encontradas. De acordo com Bauernhansl (2016), a Indústria 4.0 pode resultar na redução dos:

- Custos de produção em 10-30%,
- Custos logísticos em 10-30%,
- Custos de gestão de qualidade em 10-20%.

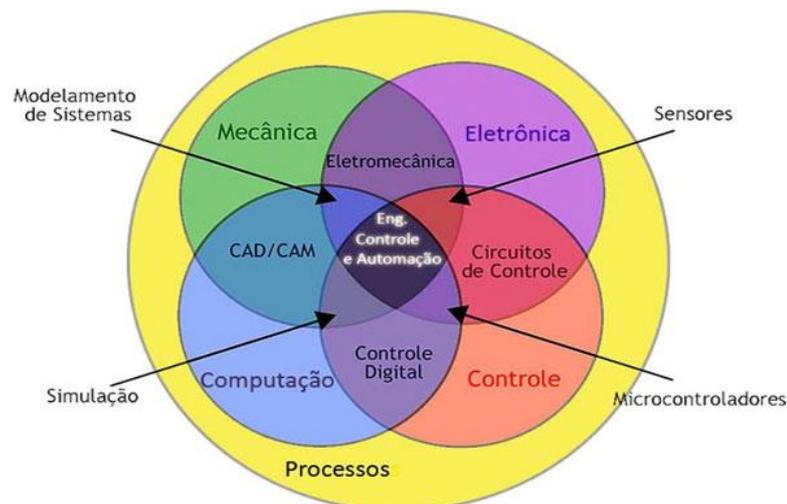
Há também uma série de outras vantagens e razões para a adoção deste conceito, incluindo: menor tempo de comercialização de novos produtos, melhor resposta do cliente, permitindo uma produção em massa personalizada sem aumento dos custos globais de produção, ambiente de trabalho mais flexível e mais amigável e uso mais eficiente de recursos naturais e energia. (ROJKO, 2017)

Assim, mediante um cenário cada vez mais diversificado, há uma procura por parte das indústrias por um perfil de profissional de engenharia cada vez mais multidisciplinar que seja capaz de trabalhar na convergência de áreas de informação, eletrônica, tecnologia e hardware.

### 1.1 O profissional de engenharia de controle e automação na indústria

O aluno formado em Engenharia de Controle e Automação ocupa diversas posições num processo produtivo automático devido a sua formação multidisciplinar. É necessário que esse profissional tenha uma visão global do processo, combinando conhecimentos que abrangem disciplinas de elétrica, mecânica, eletrônica e computação, como pode ser visto na Figura 1. Sua atuação está desde o início da instalação da planta industrial e seus sensores, passando pela modelagem e controle da mesma, até as tomadas de decisões futuras, leitura de dados e integração dos processos, como proposto no projeto de implantação do curso (IFES, 2012). Diante desse fato, vê-se a importância desse aluno ter, além de um embasamento teórico de qualidade, um contato com projetos e laboratórios de desenvolvimento de atividades práticas que abranjam mais de uma área de conhecimento de uma vez.

Figura 1 - Diagrama da Automação



Fonte: Página do curso de Engenharia de Controle e Automação da UFSC

### 1.2 O projeto multidisciplinar

Um dos caminhos para exercitar a multidisciplinaridade é abordar projetos no trabalho de conclusão de curso. Apesar de não requerer uma carga horária semanal definida pelo projeto do curso de Engenharia de Controle e Automação da instituição, foi estabelecido no seu planejamento entre os orientadores e o aluno, de forma a atender uma rotina semanal de atividades, com horários definidos, durante dois dias da semana, com no mínimo três horas por dia, totalizando com isso uma carga horária presencial de pelo menos 6 horas por semana.

A partir da importância de um projeto que contemple vários conteúdos da engenharia e que ainda tenha aplicação real, foi então definido um processo típico na indústria para que o aluno trabalhe sua implementação em um ambiente didático integrado. Nesse contexto, o objetivo estabelecido foi de implementar um controlador PID com feedforward para o controle de velocidade de um motor de indução trifásico com acionamento escalar V/Hz, visto que, segundo Krarti (2017), sistemas de motores elétricos contribuem para aproximadamente 45% de toda energia elétrica consumida no mundo.

## 2 OS MEIOS E REQUISITOS

O desenvolvimento do trabalho contemplou na sua etapa inicial um nivelamento dos conhecimentos na forma de treinamento prático aplicado nas principais ferramentas e componentes do projeto, sobretudo o software do ambiente de programação do CLP (Controlador Lógico Programável), e noções introdutórias na configuração dos equipamentos como o inversor de frequência e ajustes de diversos componentes da bancada. Esta etapa de nivelamento proferida pelo próprio orientador, foi acompanhada de materiais didáticos e fontes diversas, como manuais, exemplos de softwares, aplicativos e artigos. O presente trabalho teve o suporte de dois professores, atuando como orientadores, com especialidades nas áreas de Máquinas e Acionamentos elétricos, CLP e Controle de Processos, cobrindo assim os conhecimentos multidisciplinares abrangidos no projeto. A partir daí, no intuito de desenvolver a capacitação do aluno na busca do conhecimento e do desenvolvimento de habilidades cognitivas, foi de relevante destaque a evolução do conhecimento do aluno para aplicação dos recursos fundamentais ao cumprimento dos requisitos do projeto, a seguir descritos:

- Abordagem interdisciplinar priorização da formação requerida para um profissional atuante em engenharia de controle e automação;
- Proximidade com a realidade do ambiente industrial e suas aplicações mais relevantes em termos quantitativos, mas sobretudo qualitativamente, para atender as necessidades deste tipo de mercado de trabalho;
- Desenvolvimento da capacidade de planejamento e de competências relacionadas ao gerenciamento da rotina e aos métodos para solução de problemas;
- Integração de conhecimentos auferidos ao longo do curso, contextualizados em uma situação prática, de forma a propiciar a consolidação de habilidades correlatas.

### 2.1 Multidisciplinaridade e competências

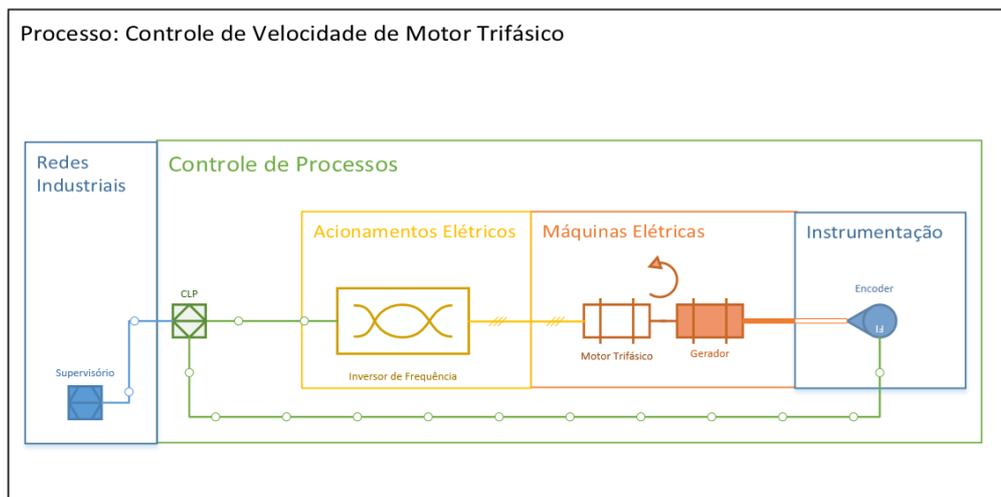
Durante todo o projeto foi necessário por parte do aluno estar em contato com diversas competências desenvolvidas durante o curso de Engenharia de Controle e Automação. Na Figura 2, é possível identificar o esboço do sistema a ser controlado, bem como as disciplinas envolvidas em cada parte do processo, sendo elas e suas aplicabilidades:

- Máquinas Elétricas: presente no sistema motor-gerador, para o qual o aluno deve possuir conhecimentos fundamentais na área de máquinas rotativas a fim de analisar o acoplamento entre ambas, pois a carga mecânica obtida no eixo do motor é função da carga elétrica aplicada no circuito do gerador.
- Acionamentos Elétricos: para acionar e controlar o motor trifásico, é necessário utilizar um inversor de frequência. O aluno tem que reconhecer o tipo de ligação trifásica a ser utilizada baseada nos dados de placa do motor e na rede elétrica do laboratório e atuar em parâmetros

do equipamento, como o modo de controle do inversor (vetorial x escalar) e definições de escorregamento, tempos de aceleração/desaceleração, limites de corrente e velocidades, dentre outros.

- Instrumentação: com o intuito de controlar a velocidade do motor, é necessário que haja um equipamento que meça ativamente essa variável. No caso deste projeto, o aluno foi responsável por escolher qual o melhor instrumento para tal, bem como a sua instalação eletromecânica e interpretação dos seus dados.
- Controle de Processos: a disciplina de controle entra diretamente na convergência das outras três, para que haja uma harmonia no processo inteiro. Foi necessário modelar o sistema motor-gerador e escolher uma técnica de controle mais adequada ao projeto, bem como validar as escolhas feitas por meio de simulações em softwares confrontando-as com os resultados reais obtidos *in loco*.
- Redes Industriais: para realizar a supervisão e coleta de dados do sistema, foi necessário projetar um sistema de monitoramento em tempo real que se comunique diretamente com o CLP utilizando um protocolo de rede industrial. Toda a leitura de dados e histórico de valores (utilizados na modelagem e validação) foi possível devido a essa implementação.

Figura 2 – Disciplinas envolvidas no Projeto



Fonte: Elaborada pelo autor

### 3 O PROJETO DO CONTROLADOR PID COM FEEDFORWARD

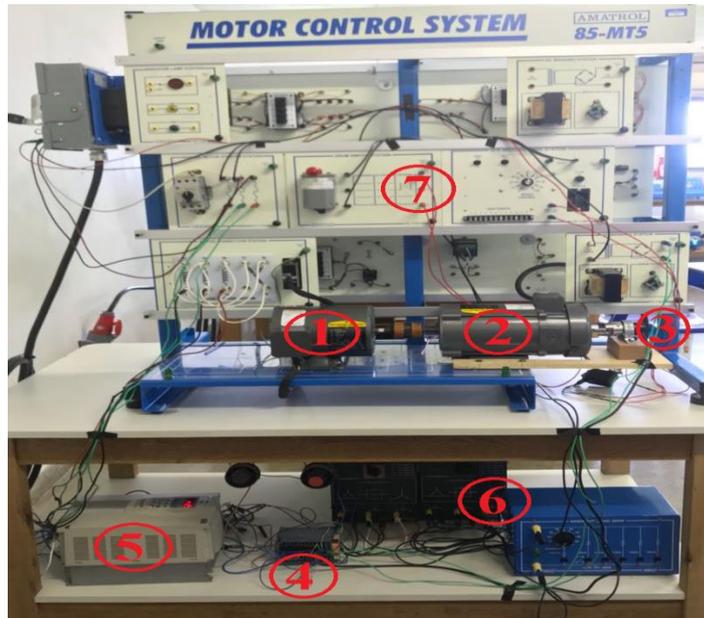
Durante 9 meses o aluno desenvolveu o projeto no laboratório de máquinas elétricas nas etapas que correspondem desde a montagem mecânica e elétrica do sistema, até os testes e validação das técnicas de controle propostas. Na Figura 3, é possível identificar os equipamentos utilizados ao longo do trabalho, sendo eles:

1. Motor de Indução Trifásico Reliance M3104 0.33Hp 1725RPM
2. Gerador de Corrente Contínua Reliance CDP3310 0.25Hp 1750RPM
3. Encoder Rotary 500 PPR
4. CLP Siemens SIMATIC família S7-1200, CPU 1214-DC-DC-DC
5. Inversor de Frequência WEG modelo CFW09
6. Cargas Resistivas

7. Bancada de alimentação elétrica, com fontes AC e DC, dispositivos de proteção e conexão elétrica.

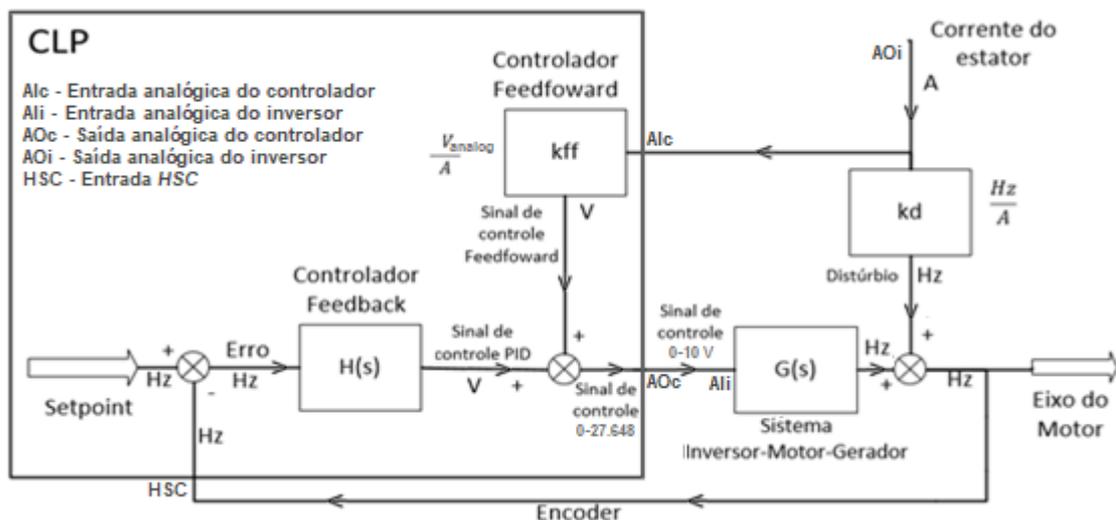
Além desses equipamentos, foram utilizados softwares de supervisão e comunicação da própria Siemens para o CLP em questão, *STEP7* e *TIA Portal*, e *Matlab*, para propiciar a criação de gráficos e análise de dados obtidos nas simulações. O diagrama de blocos do projeto a ser implementado está representado na Figura 4.

Figura 3 - Bancada de Máquinas



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 4 - Diagrama de blocos do projeto



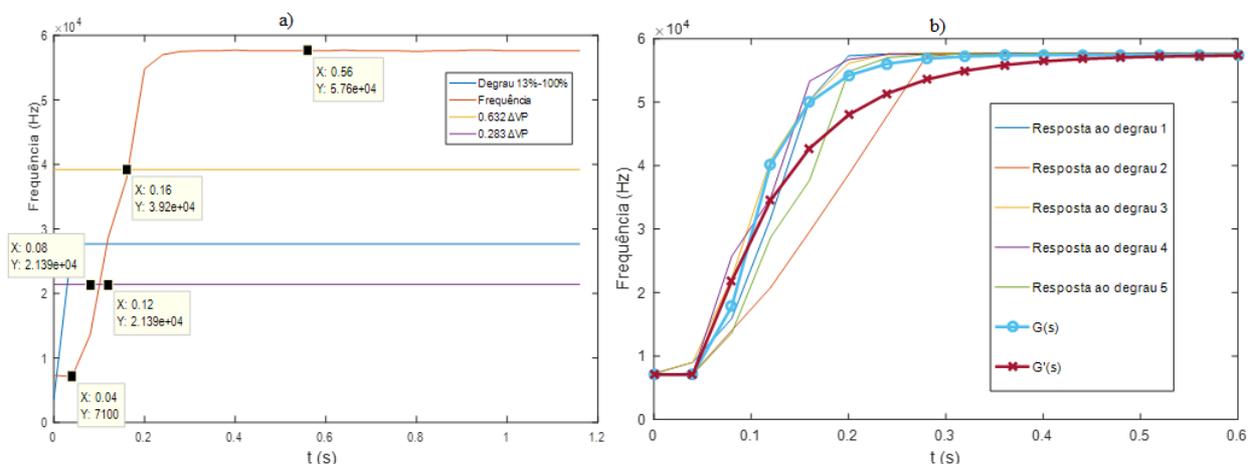
Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.1 Modelagem do sistema

Segundo Smith (1997), o ajuste ideal do controlador depende do processo a ser controlado e do critério de ajuste. Todo controlador deve ser ajustado especificamente para o processo que ele controla. Consequentemente, para ajustar um controlador, devemos primeiro entender as características, ou comportamento, do processo a ser controlado. Assim, primeiro faz sentido obter as características do processo e, em seguida, ajustar o controlador ou adaptar as “características do controlador” à do processo. Se isso for feito corretamente, o sistema completo de controle de malha fechada, processo mais controlador, funcionará conforme desejado. Dessa forma, foram feitos testes ao degrau para identificar o processo em questão. Utilizando o método proposto por Cecil L. Smith em Smith (1997), para eliminar a dependência da linha tangente na modelagem do processo de primeira ordem com atraso, representado na Figura 5.a, é possível obter uma função de transferência aproximada da planta,  $G'(s)$ . Após ajustes utilizando um software matemático para validar a função de transferência obtida anteriormente, mostrado na Figura 5.b, foi definida uma nova função de transferência com os termos ajustados para um resultado mais próximo aos testes em malha aberta, fazendo com que:

$$G(s) = \frac{2.094e^{-0.0684}}{0.048s + 1} \quad (1)$$

Figura 5 – Teste ao degrau e método de Smith (a) e ajuste da função de transferências com a resposta ao degrau (b)



Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.2 Projeto do controlador PID

O controlador PID é de longe a forma de controle por feedback mais predominante atualmente. Segundo Åström (2001), quase noventa por cento de todas as malhas de controle utilizam o controlador PID. Na verdade, majoritariamente PI, pois a ação derivativa não é usada com muita frequência. Com uma estratégia simples, baseada em ações integral, proporcional e derivativa, no que se referem no tempo a ações no presente (P), passado (I) e futuro (D), é possível resolver a maioria dos problemas envolvendo malhas de controle. O controlador PID é, portanto, a primeira solução a ser tentada quando a técnica de feedback é utilizada. Dessa forma, utilizando a função de transferência, Equação (1), o método de síntese de controladores proposta por Dahlin, em Smith (1997), e uma constante de tempo  $\tau_c = 0.5s$  desejada para malha fechada, tem-se os valores das ações P, I e D:

$$k'_p = 0.0403283 \quad T'_i = 0.048 \quad T'_d = 0.024 \quad (2)$$

Os coeficientes da Equação (2) são para um controlador do tipo série. As equações características do PID paralelo e série são:

$$\text{Paralelo: } k_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad \text{Série: } k'_p (1 + T'_d s) \left( 1 + \frac{1}{T'_i s} \right) \quad (3)$$

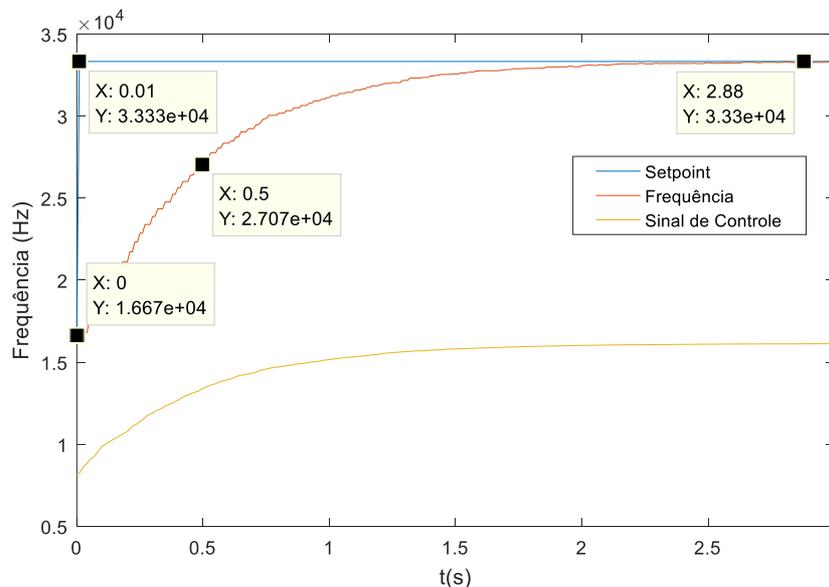
Como o controlador implementado no CLP utilizando no trabalho é do tipo paralelo, utiliza-se a conversão proposta em Massa (2006) de um PID série para paralelo, logo:

$$k_p = 0.06049245 \quad T_i = 0.072 \quad T_d = 0.016 \quad (4)$$

### 3.3 Validação do controlador PID

Para validar o controlador proposto anteriormente, foi realizado um teste ao degrau em malha fechada, Figura 6, onde o setpoint de frequência foi alterado em uma velocidade que corresponde no eixo a alteração de 500RPM para 1000RPM.

Figura 6 - Teste de resposta do sistema em malha fechada com PID



Fonte: Elaborada pelo autor

Como esperado, o resultado prático foi de acordo com os cálculos matemáticos, nos quais o processo seguiu a referência de setpoint atingindo seu valor de 63.2% da variação da referência na constante de tempo definida anteriormente,  $\tau_c = 0.5s$ .

### 3.4 Projeto do controlador feedforward

Sempre que houver uma perturbação que possa ser medida antes que isso afete a saída do processo, é possível combinar o controle feedforward com o controle de feedback para possibilitar uma melhora significativa no desempenho em comparação ao controle com feedback simples. Na situação mais ideal, o controle feedforward pode eliminar quase que totalmente o efeito da

perturbação na saída do processo. Mesmo quando há erros de modelagem, o controle feedforward pode frequentemente reduzir o efeito da perturbação na saída de uma forma bem melhor do que seria alcançada pelo controle de feedback sozinho. O controle feedforward é sempre utilizado junto com o controle por feedback, onde o primeiro não é capaz de rastrear mudanças de setpoint, sendo utilizado para suprimir especificamente perturbações do processo (Seborg, 1989).

Neste projeto, foi definido como perturbação a carga exercida no eixo do motor. Como o torque no eixo do motor é expresso por  $T_{eixo} = \frac{P_{eixo}}{\omega_m}$ , a potência no eixo reflete, através do rendimento do motor, na sua potência elétrica de entrada, que é função direta da corrente medida no estator  $I_1$ :  $P_e = \sqrt{3} \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \theta$ , sendo  $V_1$  a tensão de linha e  $\cos \theta$  o fator de potência (Fitzgerald, 2006). Dessa forma, pode-se implementar um controlador feedforward estático baseado na variação da corrente do estator do motor.

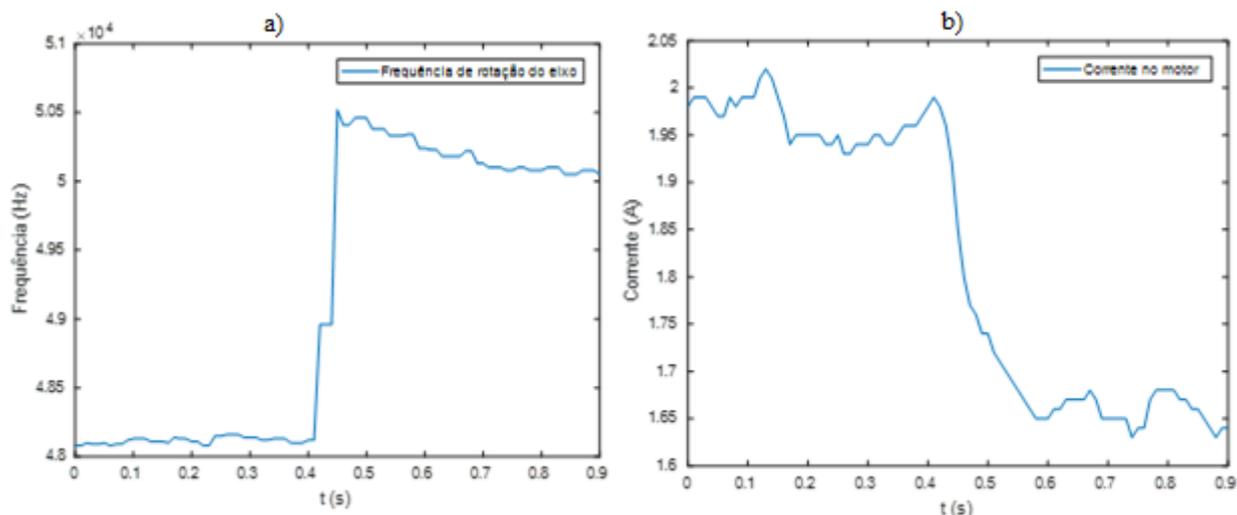
Relacionando a variação de corrente com a frequência induzida por uma perturbação, Figura 7.a e 7.b, foi possível sintetizar um ganho estático entre essas duas variáveis:

$$k_d = \frac{\Delta \text{frequência}}{\Delta \text{corrente}} \cong -5500 \frac{\text{Hz}}{\text{A}} \quad (5)$$

Assim, segundo Smith (1997), o ganho do controlador feedforward está descrito na Equação (6), onde a unidade  $V_{analog}$  representa a variável analógica de saída do CLP, de 0-10V, que internamente assume valores de 0-27.648 antes de ser convertida em um conversor D/A para seu valor correspondente de tensão.

$$k_{ff} = -\frac{kd}{k_{G(s)}} \quad \therefore \quad k_{ff} \cong 2700 \frac{V_{analog}}{\text{A}} \quad (6)$$

Figura 7 - Curva de frequência x tempo (a) e corrente x tempo (b)

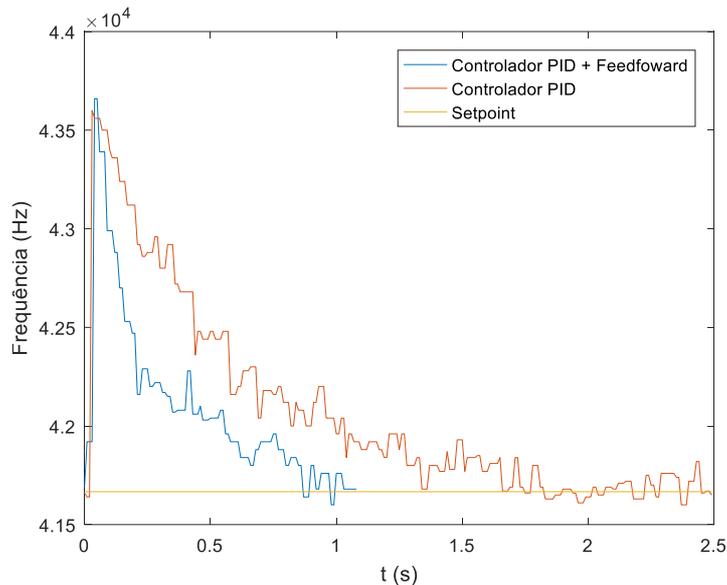


Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.5 Teste do controlador Feedforward + PID

Como o controlador feedforward é direcionado ao tratamento de distúrbios, é válido analisá-lo comparando a resposta do controlador com feedback puro e a resposta de ambos controladores trabalhando juntos para um dado distúrbio no eixo do motor. Dessa forma:

Figura 8 - Comparação entre os controladores



Fonte: Elaborada pelo autor

Como esperado, analisando a Figura 8, que representa a resposta do sistema após um distúrbio no processo, a ação antecipatória do controlador feedforward somada ao controlador PID estabilizou o sistema muito antes, comparado à ação pura somente do PID. Benefícios desse controle antecipatório incluem a minimização no desgaste dos equipamentos com conseqüente ganho de vida útil, menores custos de manutenção, maior confiabilidade e uma substancial redução na histerese, mas sobretudo um menor impacto na variação da velocidade do processo, que é muitas vezes preponderante para a operação do processo em si e para a qualidade do produto envolvido.

## 4 CONCLUSÃO

Durante o desenvolver do projeto, foi requerido do aluno um conhecimento amplo em várias disciplinas referentes ao seu curso, visto que o processo em questão envolve conceitos das diversas competências da engenharia, sendo todas na convergência de áreas de informação, eletrônica, tecnologia e hardware. Além disso, a proximidade do projeto com a realidade industrial provê ao aluno uma experiência prática muito valiosa e também necessária para a consolidação das capacidades requeridas na formação de um profissional da área de engenharia de controle.

Como o perfil de engenheiro está se tornando cada vez mais a de um profissional multidisciplinar por questões de avanços tecnológicos e busca contínua pela melhoria do processo industrial, esse projeto complementa a formação de um aluno para um mercado de trabalho altamente competitivo e exigente, uma vez que o discente se incumbiu não só do planejamento de suas ações de trabalho, como também da escolha de equipamentos a serem utilizados e das técnicas de controle mais adequadas.

## REFERÊNCIAS

ÅSTRÖM, Karl; HÄGGLUND, Tore. The Future of PID Control. **Control Engineering Practice**. Lund, v.9, n.11, p. 1163-1175, 2001.



- BAUERNHANSL, Thomas. **WGP-Standpunkt Industrie 4.0**. Frankfurt: WGP. 2016.
- BLOEM, Jaap. **The Fourth Industrial Revolution: Things to Tighten the Link Between IT and OT**, Groningen: Sogeti VINT, 2014.
- DAVID, Jeanne; HI KIM, Suk. The Fourth Industrial Revolution: Opportunities and Challenges. **International Journal of Financial Research**. v.9, n.90, 2018.
- KRARTI, Moncef. **Energy-Efficient Electrical Systems for Buildings**, Nova York: CRC Press, 2017.
- MASSA, Mario Cesar; TEIXEIRA, Hebert. **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.
- INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO (IFES). **Projeto de implantação do curso em engenharia de controle e automação**. Serra, 2012. Disponível em: [https://www.ifes.edu.br/images/stories/files/cursos/graduacao/Serra/ppc\\_ceca\\_10-03-2012\\_reconhecimento\\_29-3.pdf](https://www.ifes.edu.br/images/stories/files/cursos/graduacao/Serra/ppc_ceca_10-03-2012_reconhecimento_29-3.pdf). Acesso em 03 jul. 2018.
- ROJKO, Adreja. Industry 4.0 Concept: Background and Overview. **International Journal of Interactive Mobile Technologies**. v.11, n.5, p. 77-90, 2017.
- SEBORG, D. E. **Process Dynamics and Control**, Nova York: John Wiley & Sons, 1989.
- SMITH, Carlos; CORRIPIO, Armando. **Principles and Practice of Automatic Process Control**. Segunda edição, Nova York: John Wiley & Sons, 1997.
- FITZGERALD, A. E. et al. Tradução Anatólio Laschuk – **Máquinas Elétricas: Com introdução a eletrônica de potência**. 6ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- FRANCHI, Claiton Moro. **Inversores de frequência: teoria e aplicações**. Editora Érica Ltda, 2ª edição, São Paulo, 2008.

## **A PROJECT WITH A MULTIDISCIPLINARY APPROACH IN THE TRAINING OF THE CONTROL AND AUTOMATION ENGINEERING PROFESSIONAL**

**Abstract:** *As Industry 4.0 is already a reality according to Bloem (2014) and David (2018), the profile of the engineer sought by industries is increasingly becoming that of a multifunctional professional. Practicing jobs common to the industrial environment during graduation is extremely beneficial to the student when he or she enters a real production environment. This article discusses how it was possible to integrate fundamental subjects of the scope of Control and Automation Engineering in an undergraduate thesis. It's presented the integration of the equipment used and the control techniques applied. The results obtained validate the success of the project.*

**Key-words:** *control, feedforward, multidisciplinary, engineering.*