

Estudo Comparativo da Função PID aplicada em Controle de Corrente em Fornos a Arco Elétrico.¹

*RIBEIRO, Thiago Garcia*²
Centro Universitário Academia - UniAcademia
*JÚNIOR, Dalmo Cardoso da Silva*³
Centro Universitário Academia - UniAcademia

RESUMO

Este trabalho consiste no estudo comparativo entre dois controladores lógicos programáveis (CLP) que aplicam a função PID no controle da corrente elétrica em fornos a arco elétrico submerso. O sistema estudado tem como principal componente um controlador *Multi-Loop Smar CD 600 Plus* que executa um programa desenvolvido em diagramas de blocos e faz uma interface por meio de um supervisor que controla o processo. Para que exista uma maior eficiência e confiabilidade no controle da variável da corrente elétrica, fundamental para a operação de fornos elétricos, faz-se necessário a discussão se a atual arquitetura do controlador entrega o melhor desempenho frente aos distúrbios apresentados pelo processo. A partir disso, será feito um aprofundamento no estudo da estrutura de *hardware* e *software* dos controladores a serem comparados, com o propósito de definir qual a melhor malha de controle para o monitoramento do processo de produção. Foi realizada uma programação a partir da lógica de blocos funcionais para analisar os efeitos externos no desempenho do sistema. Com isso, os resultados observados foram satisfatórios a fim de determinar o controlador com a melhor performance.

Palavras-chave: Controle PID, CLP, Forno a Arco Elétrico, Lógicas de Controle.

¹ Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Universitário Academia - UniAcademia, como requisito parcial para a conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

² Graduando em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário Academia - UniAcademia.

³ Professor do curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário Academia - UniAcademia.

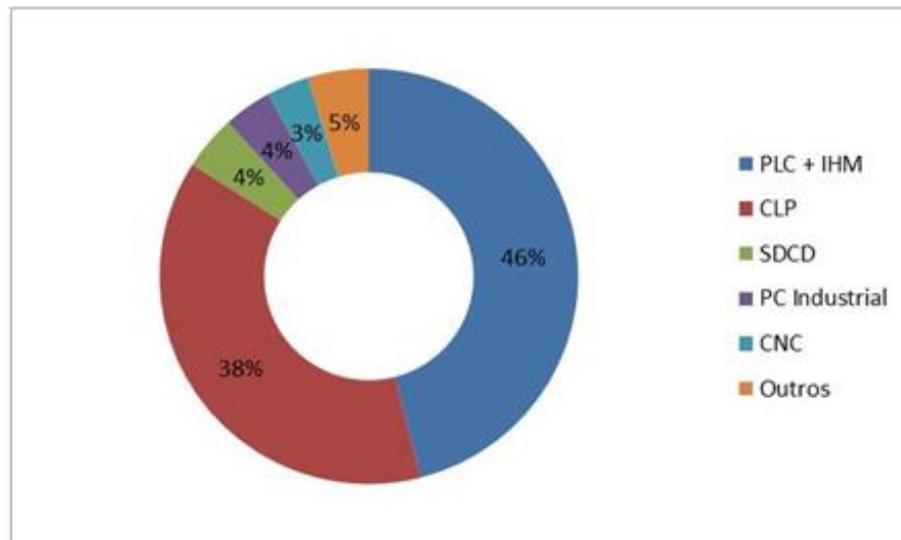
1 INTRODUÇÃO

Nos dias atuais indústrias não sobrevivem sem o uso de algum nível de automação em seu processo industrial, principalmente quando se define um processo como uma operação artificial ou voluntária, que evolui progressivamente e se constitui por uma série de ações controladas ou movimentos sistematicamente dirigidos objetivando um particular resultado ou meta. É por essa definição que se vê a ampla necessidade da aplicação de microcontroladores ou controladores lógicos programáveis (CLPs). Com esse equipamento, é possível obter resultado através de um controle automático de processos, ou seja, ter um mecanismo de atuação própria, que faça uma ação requerida em tempo determinado ou em resposta a certas condições (SILVEIRA; LIMA, 2003).

A demanda de mercado fez com que a Automação Industrial evoluísse veementemente no século passado, com origens históricas ainda nos séculos anteriores. Então, o surgimento dos Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) em meados do século passado, financiados pela empresa americana General Motors, fez com que as indústrias entrassem em um novo modelo de produção em larga escala, intensificando ainda mais o conceito de Linha de Produção, idealizado por Henry Ford. Os CLPs, nada mais são do que pequenos computadores dedicados, implementados estruturalmente na Arquitetura de Von Neumann (SILVEIRA; LIMA, 2003).

A constante evolução e exigências do mercado intensificaram a aplicação dos CLP's, ao passo que, em pesquisa realizada pela empresa *MURRElektronik*, em 2016, respondida por 216 profissionais das regiões de São Paulo, Rio Grande do Sul e Paraná, verifica-se que, 84% dos entrevistados utilizam CLP, dos quais 46% também utilizam IHM (Interface Homem-Máquina). O gráfico exposto na Figura 1 apresenta maiores detalhes sobre esses dados:

Figura 1 - Tipos de Controladores mais usados.



Fonte: Murrelektronik e Revista IPESI, 2016.

1.1 HISTÓRICO DOS CONTROLADORES

Não é tão fácil apontar o advento da Automação Industrial, no entanto, etimologicamente⁴ falando, para que haja automação industrial é, antes de tudo, preciso que haja indústria, e ainda processos automáticos autocontroláveis. Portanto pode-se marcar como o início da Automação Industrial o século XVIII, com a criação inglesa da máquina a vapor, aumentando a produção de artigos manufaturados, à época da Revolução Industrial (SILVEIRA; LIMA, 2003).

No início do século XX, embora o conceito de indústria já estivesse bastante estabelecido, os ambientes fabris ainda desfrutavam de processos de automação muito rudimentares. E com isso, os mesmos pensamentos que fizeram com que surgisse a Revolução Industrial, como o aumento de produtividade, de lucro, de qualidade, assim como novos conceitos de produção em escala começaram a serem esboçados.

Em 1909, Henry Ford teve a grande ideia que mudou o pensamento da indústria contemporânea, propagando-se até os dias de hoje. Henry Ford (1863-1947), da General Motors, idealizou algo que ele chamou de Linha de Montagem, e talvez esse seja o real gatilho para o grande desenvolvimento industrial e uma boa marca de início da

⁴ Etimologicamente: Palavra cuja classe gramatical é o advérbio e tem por significado estar de acordo com as regras da etimologia, sendo esta a ciência que investiga a origem das palavras. Fonte: Dicionário Online de Português, lexicógrafa responsável Débora Ribeiro.

automação industrial. A indústria da época foi revolucionada com a aplicação da ideia de Henry em que, novos conceitos surgiram na indústria, como: produção em massa, pontos de montagem, estoques intermediários, etc. Em meados daquele século a GM já produzia automóveis em larga escala, e nos anos que seguiram a morte de Henry, a GM já possuía máquinas automatizadas por relés.

Nesse contexto de evolução industrial, surgiram pela primeira vez os CLP's, projeto motivado a eliminar o alto custo envolvido na manutenção e substituição dos complexos sistemas de controle de máquinas baseado na lógica a relé.

Desta forma, algumas empresas propuseram arquiteturas baseadas no Digital Equipment Corp. DEC PDP-8, o minicomputador amplamente usado na época.

Em 1968, conforme a Figura 2, a empresa de Dick Morley, Bedford Associates, em Massachusetts - USA, foi contratada para desenvolver um dispositivo eletrônico que substituísse os relés. O MODICON 084 (*Modular Digital Controller*) trouxe o primeiro PLC do mundo para a produção comercial, tornando o sistema muito mais flexível econômico e eficiente (LANDER, 2019).

Figura 2 - Richard Morley, Tom Boissevain, Mike Greenberg, George Schwenk e Jonas Landau, mostrando o Modcon 084 para a GM.



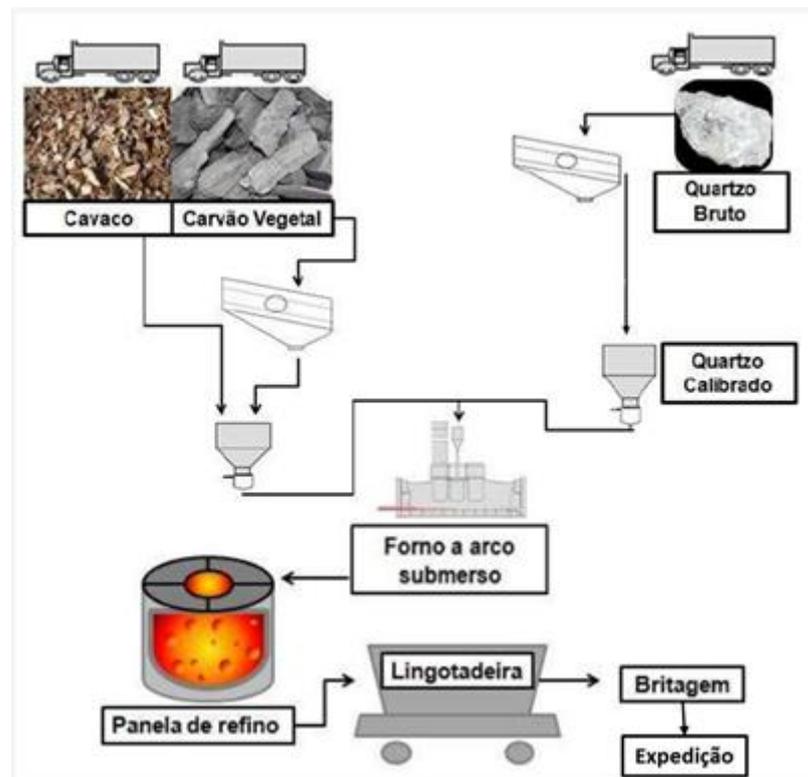
Fonte: <<https://new.engineering.com/story/programmable-logic-controllers-the-evolution-of-a-disruptive-technology>>. Acesso em 17/10/2020.

Desde então, um crescimento lento e constante permitiu que as indústrias de manufatura e de controle de processo aproveitassem as vantagens dessa nova

tecnologia e implementassem melhorias contínuas em toda a cadeia produtiva, automatizando processos e ampliando a capacidade de tomada de decisão.

Nesse contexto, com a indústria metalúrgica não foi diferente, o Forno a Arco Elétrico (FEA) teve o início do seu desenvolvimento no século XIX e, há pouco mais de 100 anos, em 1909, Paul Heroult criou o primeiro FEA trifásico de carcaça circular que ainda hoje serve de base para o design dos fornos modernos. Os FEA destinados à produção de Si-Metálico são usualmente compostos por três eletrodos que, ligados a uma fonte de energia elétrica, geram uma descarga elétrica formando o arco elétrico que é convertido em calor (FEAM, 2010). O processo produtivo indicado pelo fluxograma da Figura 3 aborda de forma sucinta a obtenção do Silício Metálico por meio da fusão dos materiais citados.

Figura 3 – Representação Esquemática da Produção de Silício Metálico.

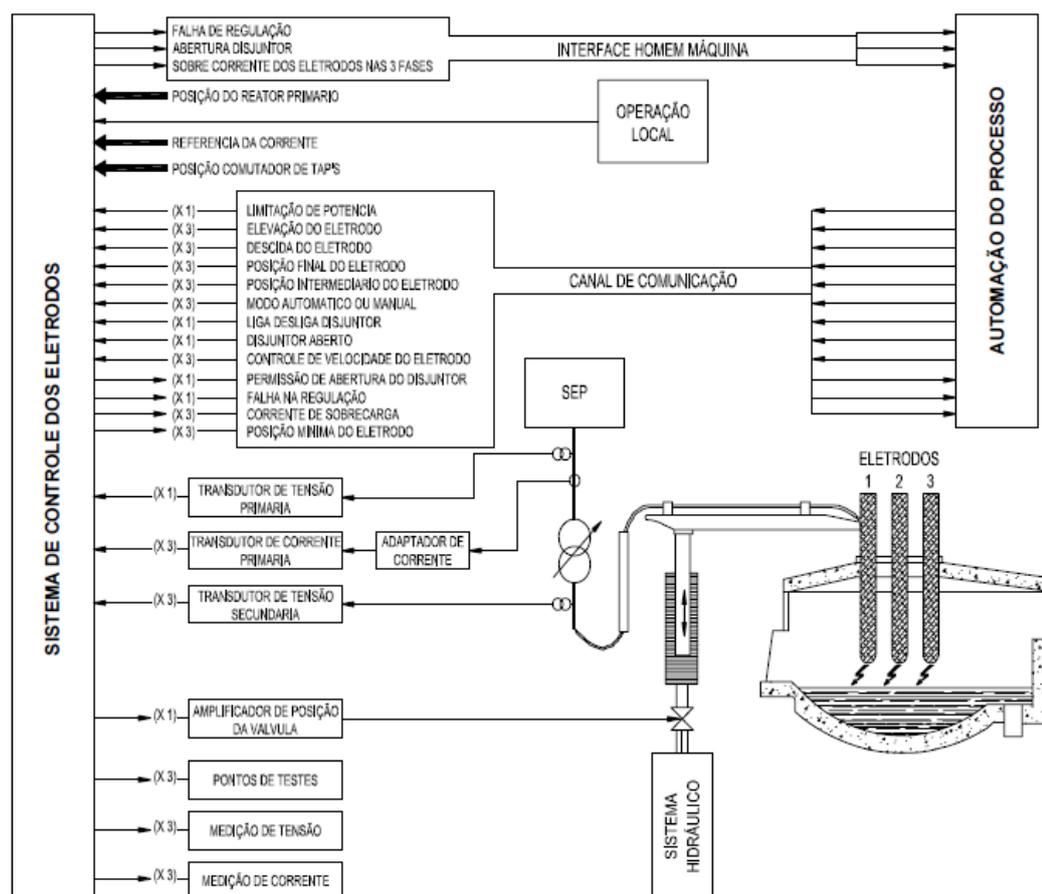


Fonte: Adaptado de ISABEX, 2014.

Os sistemas de controle dos fornos a arco modernos possuem reguladores de eletrodos cuja função principal é manter um determinado valor de corrente, ajustada pelo operador, para se obter a máxima potência de operação e o melhor rendimento.

A Figura 4 ilustra todo o sistema de regulação para um forno a arco industrial, sendo a principal variável de controle e objeto de estudo desse trabalho a corrente elétrica. Essa grandeza elétrica é medida por um TC (transformador de corrente) inserido na bucha primária do transformador do forno e que se conecta a um transdutor de corrente primária responsável por enviar na saída, um sinal de 4-20 mA linearizado à escala proposta. Por conseguinte, a modulação dessa escala chega ao controlador que de acordo com seu “setpoint” de operação e a malha de controle definida em projeto, atua as saídas lógicas para subir ou descer a coluna de eletrodo, mantendo a variável no valor desejado.

Figura 4 – Sistema de Controle de Eletrodos.



Fonte: M.R. Cândido. Aplicação da transformada wavelet na análise da qualidade de energia em fornos a arco elétrico, 2008.

1.2 – OBJETIVO

O objetivo geral desse trabalho visa realizar a comparação entre dois controladores PID embarcados em microcontroladores para o controle de correntes em eletrodos de fornos a arco elétrico. Para perseguir esse objetivo geral, foram elencados os seguintes itens:

- Revisar as características técnicas de cada controlador;
- Comparar as funções de controle PID dos controladores;
- Extrair a função de transferência da planta a ser controlada;
- Analisar os parâmetros PID aplicados à planta por meio de simulações;
- Discutir os resultados e propor o controle do processo mais eficiente para o sistema.

1.3 – ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. Após a introdução do assunto, é apresentado um capítulo que aborda as características principais dos controladores em estudo: revisão da literatura. Neste capítulo, os principais componentes e modo de funcionamento do controlador serão apresentados. Em seguida, ainda no mesmo capítulo, uma abordagem bastante detalhada das funções de controle PID de cada controlador é feita.

No terceiro capítulo, é apresentada a metodologia usada neste trabalho, onde os controladores serão comparados quanto às suas características de hardware e software, explicando suas funcionalidades e particularidades aplicadas ao controle PID utilizado no caso real.

No quarto capítulo, é mostrada finalmente a análise e discussão dos resultados obtidos na seção anterior, destacando qual controlador atingiu a melhor performance no controle da variável estudada.

Por fim, o último capítulo apresenta uma conclusão geral do trabalho, destacando as dificuldades enfrentadas, pontos positivos e pontos negativos e sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os controladores lógicos programáveis são dispositivos amplamente utilizados em plantas industriais que desempenham funções de controle de processos. Vale comentar que a principal diferença entre um CLP e um computador pessoal é a robustez. Esses controladores são projetados para suportar altas variações de temperatura, ruídos elétricos, impactos mecânicos e vibração, isto é, características encontradas em ambientes industriais e impróprias para o bom funcionamento de um computador comum.

Um CLP é composto basicamente, por uma unidade de processamento (CPU), memória, fonte e seção de entradas e saídas. Esses componentes podem estar todos presentes em um único bloco, caracterizando um CLP compacto, ou em módulos separados, caracterizando um CLP Modular.

2.1. CARACTERÍSTICAS DOS CONTROLADORES

Os controladores abordados neste trabalho são o *Smar CD600 Plus* e o *Micrologix 1400* da *Rockwell Automation*. O primeiro é um controlador dedicado que possui a capacidade de simultaneamente controlar oito PIDs (quatro deles com controle adaptativo avançado) e mais de 125 blocos de controle avançado. Já o segundo, possui em sua memória um registro de dados de até 128kB o que permite uma máxima expansão de 144 pontos de E/S discretas e 28 canais de analógico. A seguir, serão apresentadas detalhadamente as principais características técnicas de cada controlador.

2.1.1. Fonte

Esse componente é responsável pela conversão da tensão alternada para uma tensão contínua, geralmente em 24 V, garantindo uma operação normal do controlador diante das flutuações de tensão provenientes de distúrbios elétricos. A Tabela 1 aborda as especificações técnicas de alimentação e consumo do controlador *Smar*.

Tabela 1 – Consumo de Potência.

Modelo	Tensão de Alimentação	Consumo Máximo
CD600plus A	85 – 264 Vac / 50 – 60Hz	16 VA @ 110 Vac / 10 VA
CD600plus D	20 – 30 Vdc	22.7 W @ 24 Vdc / 23 W @ 30 Vdc

Fonte: Manual do Usuário Controlador *Multi-loop CD600 Plus*, 2011.

Enquanto a Tabela 2, para o mesmo controlador, indica as condições para se obter uma operação estável e confiável do sistema, sendo indispensável que o suprimento de energia seja de alta qualidade devendo atender aos requisitos da tabela abaixo:

Tabela 2 – Requisitos para a Alimentação.

Tensão de Alimentação	Parâmetros Elétricos	Valores
85 – 264 Vac / 47 -65 Hz	Variação de Tensão	85 – 264 Vac
	Variação de Frequência	48 – 64 Hz
	Máx. período interrupção energia	14 ms (100 Vac)
24 Vdc	Variação de Tensão	20 – 30 Vdc
	Máx. período interrupção energia	14ms (24 Vdc)

Fonte: Adaptado manual do Usuário Controlador *Multi-loop CD600 Plus*, 2011.

Já no CLP *Micrologix 1400*, durante a inicialização, a fonte de alimentação permite uma breve irrupção de corrente para carregar os capacitores internos. Muitas linhas de energia e transformadores de controle podem fornecer corrente de pico por um breve período. Se a fonte de alimentação não pode fornecer esta corrente de pico, a tensão da fonte pode cair momentaneamente. Na Tabela 3, observa-se a “inrush current”, corrente de energização dos controladores da série *Micrologix 1400*.

Tabela 3 – Especificações de alimentação *Micrologix* 1400.

Parâmetros Elétricos	Modelos Série <i>Micrologix</i> 1400		
	1766-L32AWA	1766-L32BWA	1766-L32BWB
Tensão de Alimentação	100 – 240 Vac		24 Vdc
Variação de Frequência	47 – 63 Hz		
Corrente de energização	120 Vac: 25 A / 8 ms		24 Vdc: 15 A / 20 ms
	240 Vac: 40 A / 4 ms		
Potência Consumida	100 VA	120 VA	50 W
	130 VA (Série C)	150 VA (Série C)	7.5 W

Fonte: Adaptado manual Controlador Programável *Micrologix* 1400.

2.1.2. CPU e memória

O processador (CPU) é o “cérebro” de um CLP e consiste, geralmente, em um microprocessador, para a implementação lógica e controle das comunicações entre os módulos, e requer uma memória para armazenar os resultados das operações lógicas executadas pelo microprocessador. As memórias EPROM⁵ ou EEPROM⁶ somadas à memória RAM⁷ também são necessárias para o programa. A CPU controla todas as atividades e é projetada de modo que o usuário possa introduzir a programação desejada. O programa do CLP é executado como parte de um processo repetitivo referido como varredura ou exploração (scan), no qual a CPU faz uma leitura do estado (ligado ou desligado) das entradas e, depois de completada a execução do programa, executa o diagnóstico interno e as tarefas de comunicação. Em seguida, o estado das saídas é atualizado, e esse processo é repetido continuamente enquanto o CLP estiver no modo de funcionamento (RUN) (PETRUZELLA, 2014).

A memória é o elemento que armazena informação, programas e dados em um CLP. A memória do usuário de um CLP inclui espaço para o programa do usuário, bem como as posições (locações) endereçáveis da memória do dado armazenado. Os dados

⁵ EPROM: Memória de leitura-escrita programável que pode ser apagada. Elas são projetadas para oferecer um nível de segurança de modo que o dado nela armazenado possa ser lido, mas não alterado facilmente sem um equipamento especial.

⁶ EEPROM: Memória de leitura e escrita programável e que pode ser apagada eletronicamente, é uma memória não volátil, não requer baterias para cópias e ainda oferece a mesma flexibilidade de programação da RAM.

⁷ RAM: Memória de acesso aleatório, também referida como memória de leitura-escrita (R/W). Ela é volátil e utilizada como uma memória de armazenagem temporária de dados que precisam ser alterados rapidamente.

são armazenados nas posições de memória por um processo chamado de escrita e são obtidos de volta pelo que chamamos de leitura (PETRUZELLA, 2014).

O controlador *SMAR* abordado neste estudo possui em suas características físicas um microprocessador *Intel 80C196*, 16bits e 40MHz de velocidade de operação. Sua memória de armazenamento é composta de 4Mbytes (FLASH) mais 64Kbytes (NVRAM⁸) e seu ciclo de controle é ajustável de 100 a 200 ms.

Por outro lado, o controlador da *Rockwell Automation*, utiliza uma CPU *RISC Freescale Coldfire MCF5275*, cuja velocidade de processamento é de 164.50MHz, a memória de armazenamento de receita trabalha com até 64Kbytes (SRAM⁹) e 16Kbytes de programação do usuário, sendo 10Kbytes configurável.

2.1.3. Entradas e saídas

A seção de E/S de um CLP é o local em que os dispositivos de campo são conectados e onde é fornecida a interface entre eles e a CPU. As entradas e saídas são embutidas em um CLP fixo, enquanto o tipo modular usa módulos de E/S que são plugados no CLP (PETRUZELLA, 2014).

O sistema de E/S fornece uma interface entre as conexões dos componentes no campo e a CPU. A interface de entrada permite que a informação do estado relativa ao processo seja comunicada à CPU e, portanto, permite que esta comunique os sinais da operação pela interface de saída para os dispositivos do processo sob seu controle (PETRUZELLA, 2014).

A interface de E/S analógica do *CD600 Plus* é caracterizada pelas especificações que seguem à Tabela 4. Já as especificações de E/S discretas estão na Tabela 5.

⁸ NVRAM: Memória não volátil. O dado armazenado na memória é obtido com uma bateria embutida. É uma bateria não recarregável, fabricada de lítio e em operação normal tem no mínimo 10 anos de armazenagem de dados.

⁹ SRAM: Memória de acesso aleatório estática é um tipo de RAM que armazena dados usando um método estático, no qual os dados permanecem constantes desde que a energia elétrica seja fornecida ao chip de memória.

Tabela 4 – Especificações E/S Analógicas Smar CD600 Plus.

	Quant	Tipo	Impedância/Carga	Precisão
Entrada Analógica	8	4-20 mA / 0-20 mA	250 Ω	±0,010 V
		1-5 V / 0-5 V	1 MΩ	
Saída em Corrente	4	4-20 mA / 0-20 mA	Max. 750 Ω	±0,050 mA
Saída em Tensão	4	1-5 V / 0-5 V	Min. 1,5 KΩ	±0,015 V

 Fonte: Manual do Usuário Controlador *Multi-loop CD600 Plus*, 2011.

Tabela 5 – Especificações E/S Discretas Smar CD600 Plus.

	Quant	Tipo	Frequência	Precisão	Proteção	Tensão Auxilia
Entrada Discreta	8	Contato Seco	0-10 KHz	0,05% (10 Hz < f < 10 KHz)	Óptica - 5KV	20-30 Vdc
		Tensão		0,3% (1 Hz < f < 10 Hz)		
Saída Discreta	8	Coletor Aberto	-	-	Diodo Reverso	Max.Vext = 30 Vdc
						I _{max.} = 400 mA

 Fonte: Manual do Usuário Controlador *Multi-loop CD600 Plus*, 2011.

As características elétricas das E/S analógicas do *Micrologix 1400* encontra-se abordado na Tabela 6 e as E/S discretas seguem na Tabela 7.

Tabela 6 – Especificações E/S Analógicas Micrologix 1400.

	Quantidade	Tipo	Impedância	Resolução
Entrada Analógica	4	4 – 20 mA	275 Ω	15 bits
		-10 – 10 Vdc	200 KΩ	
Saída Analógica	4	0 – 21 mA	0 – 500 Ω	12 bits
		0 – 10 Vdc	> 1 KΩ	

 Fonte: Manual Controlador Programável *Micrologix 1400*.

Tabela 7 – Especificações E/S Discretas *Micrologix* 1400.

	Quantidade	Tipo	Frequência	Impedância Nominal	Vxl Energizado
Entrada Discreta	20	Tensão	47-63 Hz	10 k Ω	79-132 Vca
					I _{max.} = 250 mA
Saída Discreta	12	Relé	100 Hz (10 ms Max)	-	Max.Vext = 240 Vca
					I _{max.} = 0,75 A

 Fonte: Manual Controlador Programável *Micrologix* 1400.

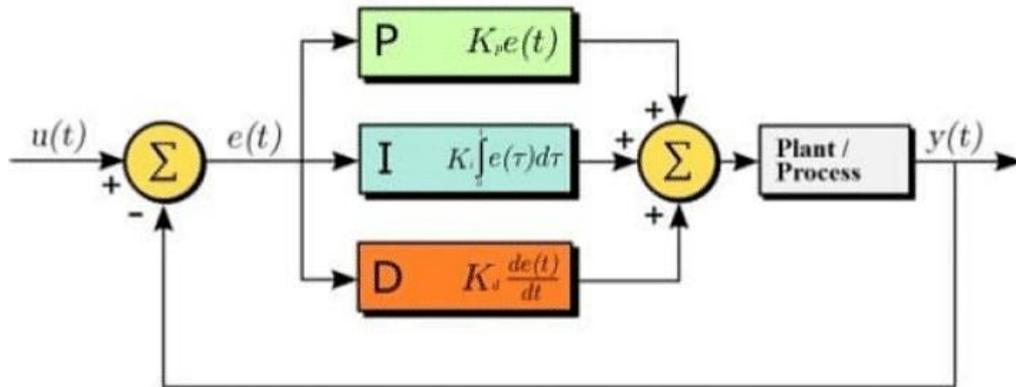
2.2. CONTROLE PID

O controle proporcional integral derivativo (PID) é o mais utilizado na indústria e está presente em mais da metade das aplicações de controle de processos, seja na sua versão clássica ou em alguma versão modificada. Esta popularidade se deve ao fato de que o controle PID é aplicável à maioria dos sistemas de controle, resultando em um controle robusto e eficiente. Além disso, como o controle PID não necessita que se tenha a modelagem matemática do processo a ser controlado, ele normalmente surge como primeira opção de método de controle (OGATA, 2011).

Desta forma, devido a sua grande praticidade e facilidade de sintonização quando comparado com outros métodos de controle que exigem um projeto analítico do processo e do controlador, o controle PID também é muitas vezes sintonizado automaticamente, através de algoritmos de sintonização, e o ajuste fino é feito manualmente após a primeira sintonização (OGATA, 2011).

O motivo pelo qual o controlador PID não necessita de um projeto analítico para funcionar é que ele trata o erro do processo em malha fechada, de forma que apenas o ajuste dos parâmetros do controlador já são o suficiente, na maioria dos casos, para se conseguir um controle eficiente, sem que seja necessário avaliar a resposta em frequência ou as raízes da função de transferência do processo. A Figura 5 apresenta o desenho esquemático do funcionamento do controle PID e evidencia que o erro entre o sinal de referência e a saída do processo é realimentado no controlador, que calcula o sinal de controle e atua sobre o processo. A cada ciclo, espera-se que o erro diminua até que se torne nulo ou muito pequeno.

Figura 5 – Fluxograma de um sistema de controle em malha fechada usando o PID.



Fonte: <<https://embarcados.com.br/pid-digital-metodo-de-calculo-numerico/>>. Acesso em 11/10/2020.

Com isso, a estrutura de um controle PID é constituída de uma ação proporcional, K_p , que tem como função acelerar a resposta da variável do processo, reduzindo o tempo de subida, o erro estacionário, e levando a saída do processo a se aproximar da referência. Porém, o ganho proporcional aumenta o sobressinal da resposta do processo. A relação de um controlador apenas com a ação proporcional é definida matematicamente por (1):

$$y(t) = K_p \cdot e(t) \quad (1)$$

sendo que K_p é a sensibilidade proporcional ao ganho.

O termo integral é capaz de eliminar completamente o erro estacionário, fazendo com que a saída atinja exatamente o valor de referência, mas para isso ele aumenta o tempo de estabilização da resposta. Nesse caso, a ação de controle integral é definida por (2)

$$y(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2)$$

sendo K_i uma constante ajustável.

Por fim, o termo derivativo consegue antecipar futuros erros, diminuir o sobressinal e o tempo de estabilização, tornando a resposta mais rápida e com amplitudes de oscilação menores. Este tipo de ação nunca poderá ser utilizado sozinho,

pois sua ação depende da presença das ações proporcional ou integral e ser apenas efetiva durante intervalos de tempo transitórios.

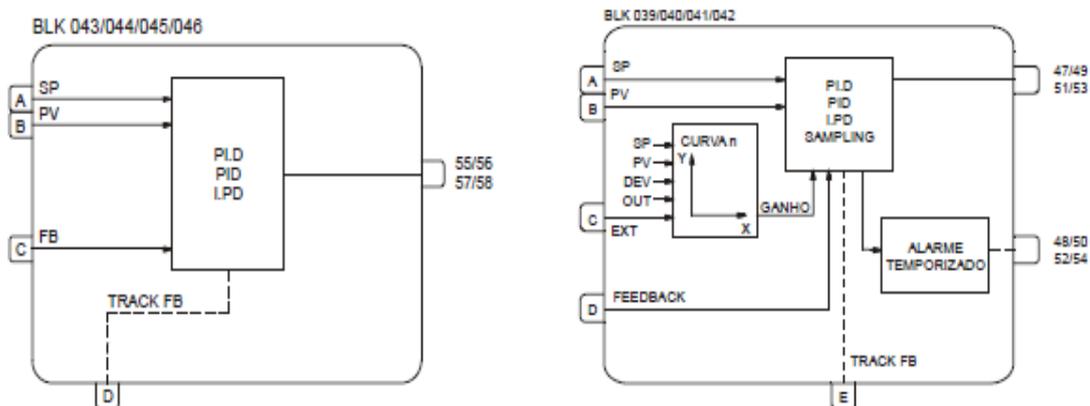
Portanto, sendo um controlador PID a combinação dos três tipos de ações corretivas, a relação de seu sinal de saída $y(t)$ com o erro atuante $e(t)$ é dada em (3)

$$y(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

Nesta expressão, K_p , T_i e T_d são as constantes que ajustam o comportamento do controlador PID. Cada uma delas tem uma função importante no comportamento do sinal e precisam ser sintonizadas adequadamente para que o controle atenda as especificações de projeto, principalmente no que se refere ao sobressinal máximo, tempo de acomodação e erro estacionário.

A Figura 6 ilustra, no controlador *Smar*, dois tipos de controle PID, o simples e o avançado, onde a diferenciação está na função PID avançado, pois o bloco permite a seleção dos tipos de controle, *PI-Sampling*, Erro Quadrático, GAP e Ganho Adaptativo.

Figura 6 – Bloco PID simples e avançado.



Fonte: Adaptado do manual do Usuário Controlador *Multi-loop CD600 Plus*, 2011.

O *CD 600 Plus* oferece dois algoritmos de controle do PID, algoritmo paralelo ideal e algoritmo não interativo ou ISA, eles são expressos, respectivamente, por (4) e (5)

$$MV(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

$$MV_{(t)} = K_p \cdot [e_{(t)} + \frac{1}{T_i} \int_0^t e_{(t)} dt + T_d \cdot \frac{d e_{(t)}}{dt}] \quad (5)$$

No entanto, o controlador da *Rockwell*, geralmente utiliza a instrução de PID com um controle em malha fechada de entradas analógicas fornecendo um sinal de saída à um canal analógico. É possível também, converter esse sinal analógico de saída em um proporcional de tempo para acionar uma saída discreta (“on/off”).

A instrução de PID pode ser operada no modo tempo ou *Selectable Time Interrupt (STI mode)*. No modo de tempo, a instrução atualiza sua saída periodicamente a uma taxa selecionável pelo usuário. No modo STI, a instrução deve ser inserida em uma sub-rotina de interrupção STI e todas as vezes que essa sub-rotina é verificada o controle atualiza sua saída. O intervalo de tempo STI e a taxa de atualização da malha de controle PID, devem ser os mesmos para que a equação seja executada corretamente.

O algoritmo utilizado no bloco de função PID do *Micrologix* é dada por (6):

$$Output = K_c \cdot [e_{(t)} + \frac{1}{T_i} \int_0^t e_{(t)} dt + T_d \cdot \frac{d(PV)}{dt}] + bias \quad (6)$$

O valor de retroalimentação, conhecido na literatura como (*feed foward* ou *bias*), pode ser adicionado à saída do controle como uma compensação. Também é possível observar, pela Tabela 8, a faixa de atuação das constantes de ganho padrão nesse controlador.

Tabela 8 – Constantes de ganho padrão.

Termo	Faixa (Min. – Max)	Referência
K_c	0.01 – 327.67 (adimensional)	Proporcional
$1/T_i$	327.67 – 0.01 (minutos por repetição)	Integral
T_d	0.01 – 327.67 (minutos)	Derivativo

Fonte: Adaptado manual Controlador Programável *Micrologix* 1400.

Após o referencial técnico e/ou teórico dos principais parâmetros elétricos e dos algoritmos PID adotados pelos controladores estudados nesse trabalho, objetiva-se na seção 3 descrever a metodologia aplicada ao controle PID, tendo em vista alcançar as

melhores respostas para a correção dos distúrbios externos oriundos do controle da corrente elétrica em Fornos a Arco Elétrico.

3 METODOLOGIA

Este estudo foi feito baseado em procedimentos, adaptação de linguagem, softwares e componentes da empresa *Rockwell Automation* e *Smar Technology Company*. Esta escolha foi motivada devido à popularidade das desenvolvedoras no mercado e pelo fato do atual sistema de controle já usar um dos controladores dos fabricantes citados, o *Smar CD600 Plus*.

Também foram abordados diversos passos de configuração que devem ser realizados na implementação real do controle de corrente em fornos a arco elétrico, objetivando recriar os procedimentos utilizados pelo programador original do projeto.

3.1 MODELAGEM MATEMÁTICA

Um sistema é uma combinação de componentes que atuam conjuntamente e realizam certo objetivo. Em termos gerais, um sistema é um objeto no qual variáveis de diferentes tipos interagem e produzem sinais observáveis (OGATA, 1997; LJUNG, 1999).

Sob o ponto de vista da modelagem matemática, os sinais observáveis de interesse podem ser classificados como os sinais de saída do sistema, sinais de entrada ou de excitação do sistema e os distúrbios, os quais podem ser observados diretamente através de medições ou apenas pela influência que exercem nas saídas (LJUNG, 1999).

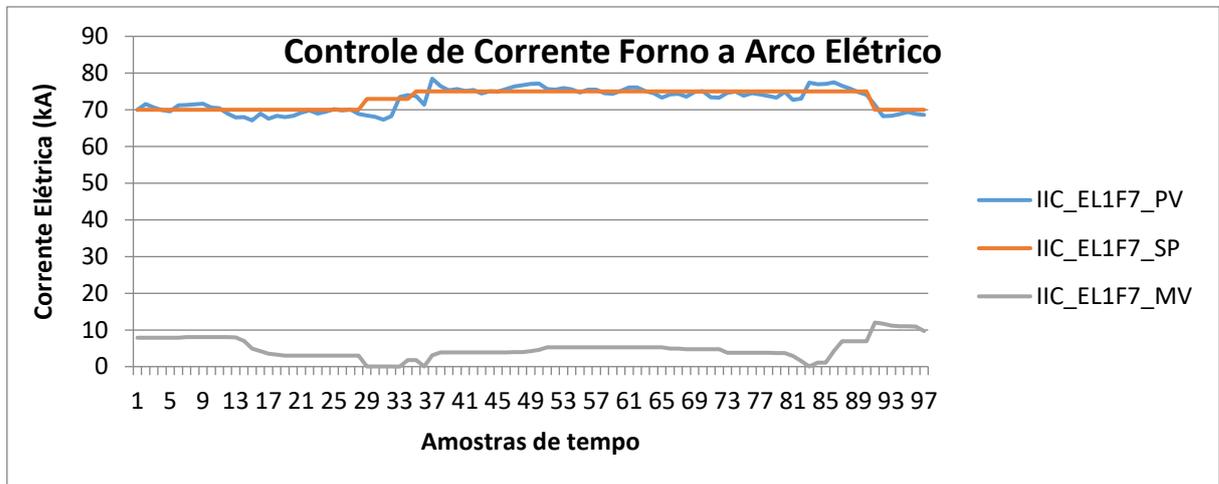
Um sistema pode ser modelado através de várias técnicas que podem ser classificadas de várias formas, como por exemplo, modelagem baseada na física do processo e a modelagem através de técnicas de identificação de sistemas. A modelagem pela física do processo é realizada a partir de conhecimento das leis físicas que regem o comportamento do sistema, requerendo um conhecimento detalhado de todo o processo, tarefa que se torna cada vez mais difícil à medida que os sistemas tornaram-se cada vez mais complexos (LJUNG, 1999; AGUIRRE, 2004).

Como uma alternativa, as técnicas de identificação de sistemas tratam do desenvolvimento de modelos através da observação de dados de entrada e saída, sem necessariamente, envolver as leis físicas do processo. A identificação de sistema é, normalmente, preferida quando há pouco ou nenhum conhecimento a respeito do sistema a ser modelado ou quando a modelagem pela física do processo torna-se muito complexa (LJUNG, 1999; AGUIRRE, 2004).

Desta forma, a modelagem matemática do comportamento da corrente no forno elétrico a arco, se dará levando em consideração o sistema como sendo uma caixa preta, utilizando somente os dados de entrada e saída da planta. Como a carga desse processo tem características fortemente não linear e dependente de variáveis e parâmetros aleatórios de difícil acesso para medição, fez-se necessário um levantamento de dados em campo para obter os parâmetros de “*setpoint*” (SP), “*process value*” (PV) e “*manipulated variable*” (MV) já utilizadas pelo controlador existente, *Smar CD600 Plus*, com o fim de aplica-las ao Matlab para estimar a função de transferência desse processo.

Assim, é possível perceber dada a Figura 7, o comportamento da corrente elétrica durante o processo de regulação automática de corrente no eletrodo. O gráfico foi extraído da coleta de dados e estudo de caso realizado pelo autor, no qual aborda três parâmetros, a variável do processo expressa pela curva em azul, as excitações em degraus pela curva laranja e a variável manipulada após a correção na curva de cor cinza.

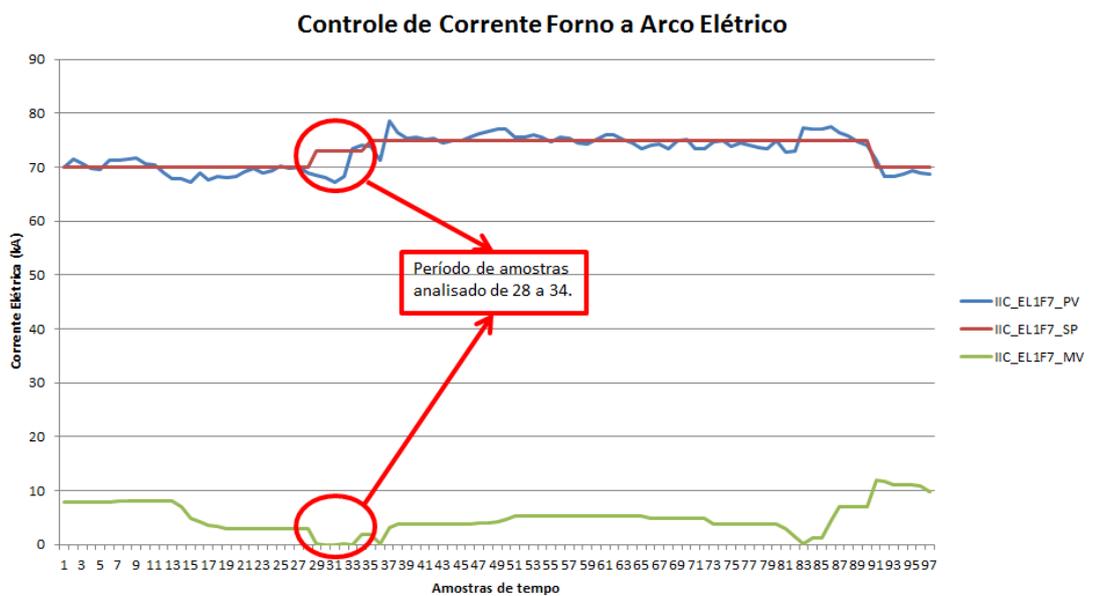
Figura 7 – Gráfico extraído do comportamento da corrente no processo.



Fonte: Autor

Como a amostragem dessa curva é realizada pelo supervisor a cada 30 segundos, proporcionando um total de 97 amostras, extrai-se parte delas para analisar a resposta do processo ao degrau gerado na mudança do *setpoint*. A Figura 8 aborda esse período de análise.

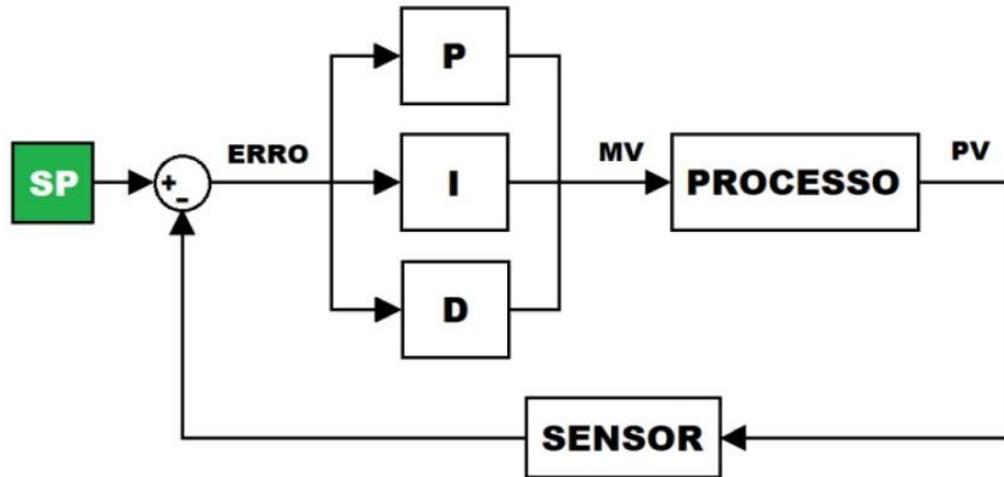
Figura 8 – Período de amostragem analisado.



Fonte: Autor.

Com o proposito de extrair a função de transferência de um forno a arco elétrico, tomou-se por base a análise dos parâmetros MV e PV, sendo estes, respectivamente, entrada e saída do bloco de processo, abordada na Figura 9.

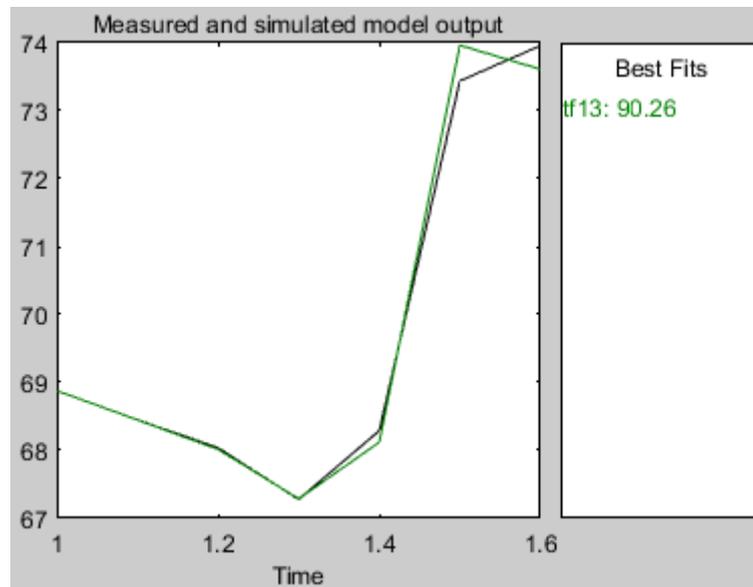
Figura 9 – Diagrama em bloco de um controle PID.



Fonte: <<https://novus.com.br/blog/artigo-controle-pid-rompendo-a-barreira-do-tempo/>> Acesso em 11/11/2020.

Os dados de MV e PV importados ao Matlab como vetores e tratados por uma função de identificação de sistemas, proporcionou uma função de transferência da planta com parametrização de seis polos e dois zeros e assertividade na estimativa do processo de 90,26% como apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Assertividade na identificação da FT da planta.



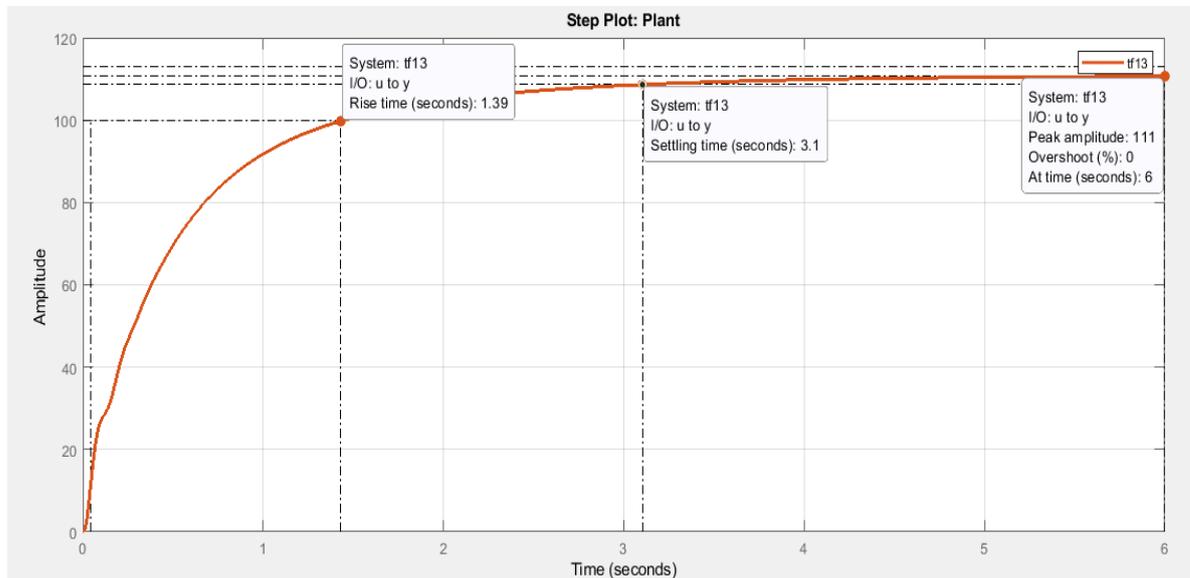
Fonte: Autor.

Conhecida a FT extraída do processo por (7)

$$FT = \frac{PV}{MV} = \frac{7.425e08 s^2 + 2.23e10 s + 2.24e10}{s^6 + 110.6 s^5 + 4.965e04 s^4 + 1.418e06 s^3 + 9.898e07 s^2 + 3.215e08 s + 2.024e08} \quad (7)$$

que ao ser excitada por um degrau unitário responde em malha aberta como na curva da Figura 11, tem-se que a resposta no tempo se assemelha à uma exponencial crescente de elevado erro de regime, sem ultrapassagem em relação ao pico máximo da estabilização, com tempo de subida de 1,39 segundos e um tempo de acomodação de 3,1 segundos. Com isso, fica claro a necessidade de um controle em malha fechada que seja mais rápido, robusto, que diminua os tempos acima indicados, bem como também, o erro de regime.

Figura 11 – Resposta estimada do processo.



Fonte: Autor

Logo, a próxima seção dedica-se a analisar, criteriosamente, a aplicação dos controladores estudados nesse trabalho, com a planta estimada, comparando qual deles é capaz de otimizar o desempenho do processo, proporcionando um controle ágil e sólido diante das perturbações.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No capítulo anterior, foi estudada uma modelagem matemática que possibilitou a identificação da função de transferência, bem como também, a resposta da planta em malha aberta.

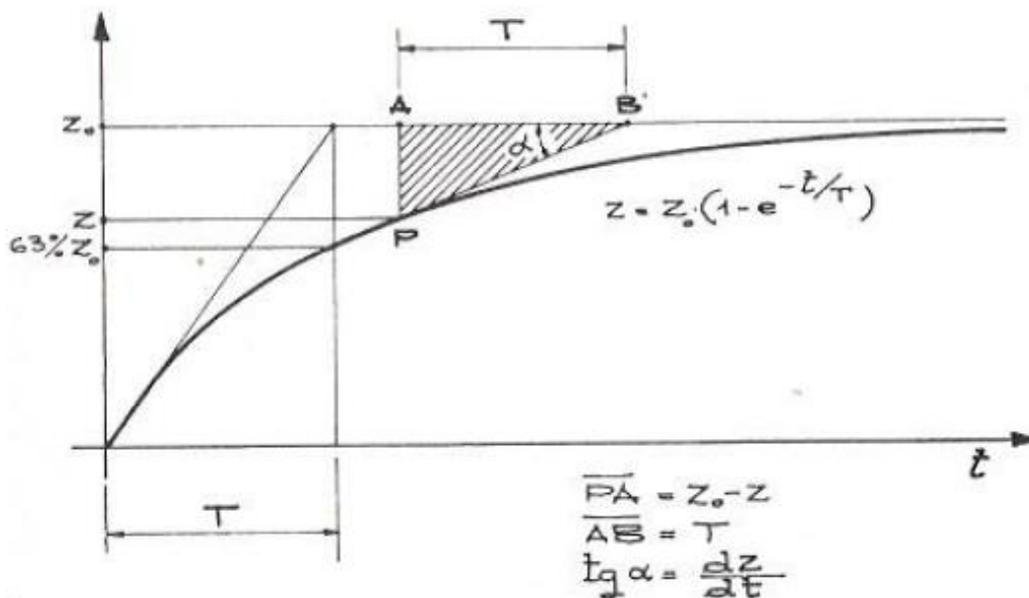
Com isso, faz-se necessário aplicar essa FT encontrada em (7) nos algoritmos de controle (4) e (6), que respectivamente representam as funções PID dos controladores *Smar CD600 Plus* e *Micrologix 1400*, objeto do presente estudo.

4.1 COMPARAÇÃO DOS CONTROLADORES

Segundo (STASI, 1981), um circuito de regulação de corrente elétrica em fornos a arco elétrico, pode ser caracterizado por:

- sensibilidade, que é a capacidade do regulador de acompanhar as pequenas variações;
- tempo de resposta, que é o tempo empregado pelo regulador para efetuar sobre o órgão regulado um afastamento que elimine uma perturbação. Uma vez que, tal afastamento se realiza no tempo segundo uma curva exponencial dada pela Figura 12, fala-se de constante de tempo T , que é o tempo utilizado para eliminar 63% da perturbação;
- estabilidade, que é a propriedade do sistema de regulação de apresentar a grandeza regulada em um valor de regime depois de uma perturbação, com ou sem oscilações.

Figura 12 – Curva exponencial de resposta de um regulador



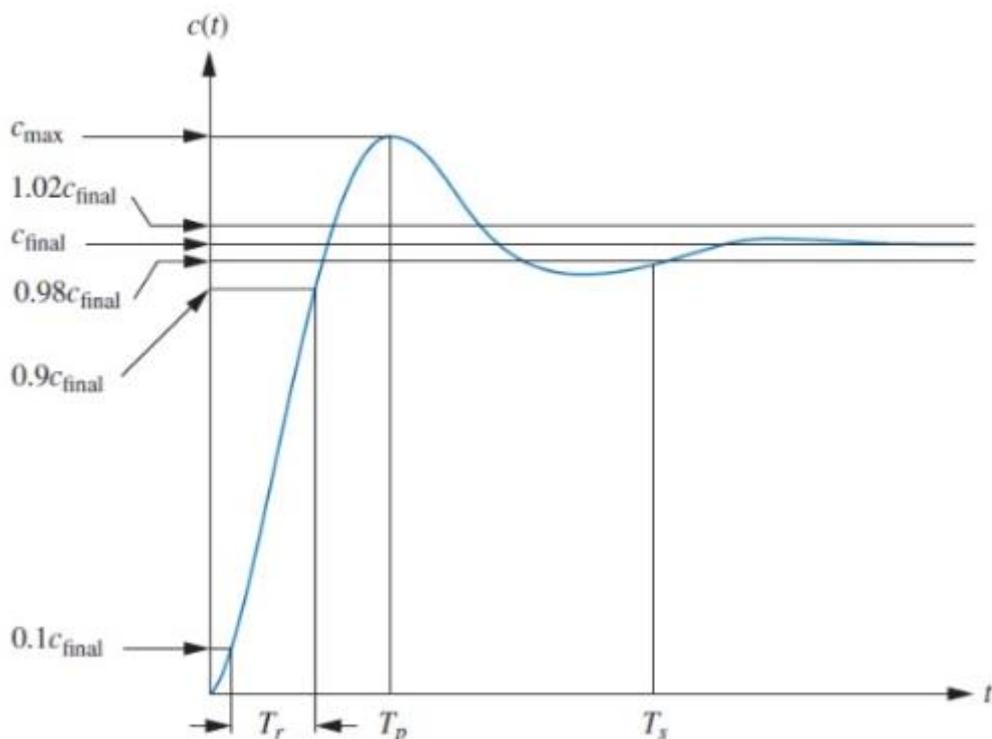
Fonte: (STASI, 1981)

Em muitos casos práticos, as características de desempenho desejadas de sistemas de controle são frequentemente especificadas em termos e grandezas no domínio do tempo, neste caso, em termos da resposta transitória para uma entrada degrau unitário, pois esta entrada é fácil de gerar e é suficientemente severa (OGATA, 1985).

A resposta transitória de um sistema de controle na prática, geralmente, apresenta oscilações amortecidas antes de alcançar o estado ou regime estacionário. Ao especificar as características de resposta transitória de um sistema de controle para uma entrada degrau unitário, os seguintes parâmetros são definidos e apresentados graficamente na Figura 13.

- tempo de atraso, t_d , é o tempo necessário para a resposta alcançar pela primeira vez a metade do valor final.
- tempo de subida, t_r , tempo para a resposta passar de 10% a 90%.
- instante de pico, t_p , tempo para a resposta alcançar o primeiro pico do sobressinal.
- sobressinal máximo (percentual), M_p , é o máximo valor de pico da curva de resposta medido a partir do valor final.
- tempo de acomodação, t_s , tempo para a curva de resposta alcançar e permanecer dentro de uma faixa em torno do valor final, normalmente 5% ou 2% (OGATA, 1985).

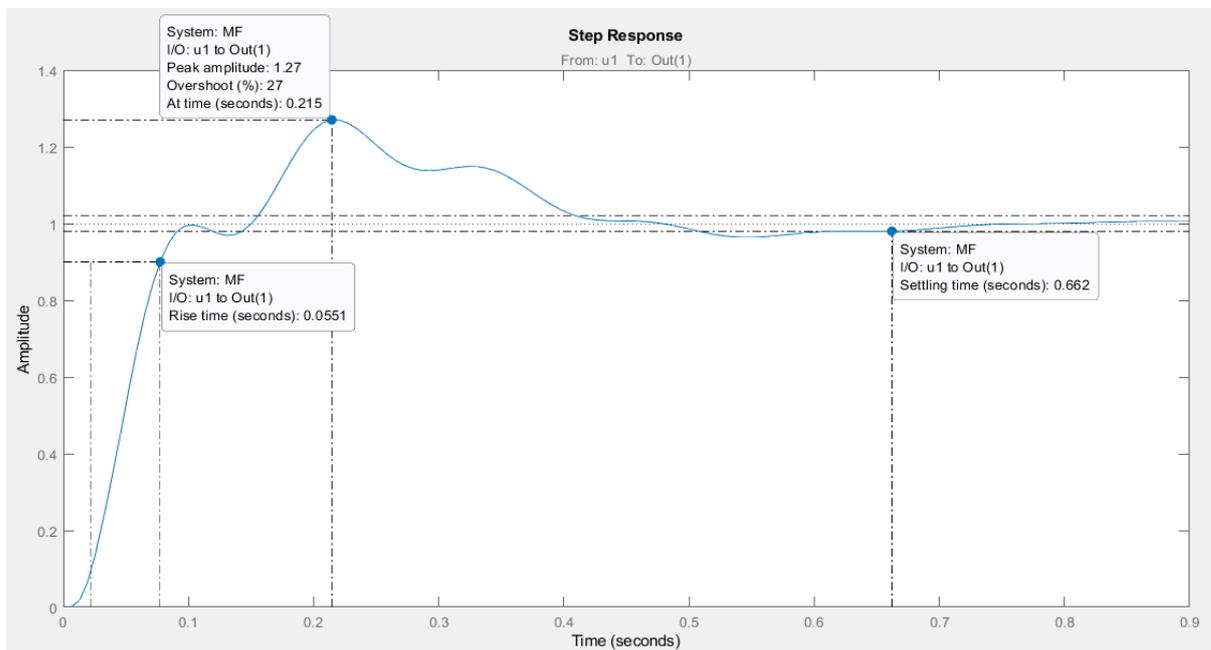
Figura 13 – Curva de resposta a degrau unitário apresentando t_d , t_r , t_p , M_p e t_s .



Fonte: Nise, Norman S.

Assim, aplicando os parâmetros, $K_p = 0,03$ e $K_i = 0,6$, de sintonia do controlador PID existente ao processo, SMAR CD600 PLUS, à FT (7) estimada pelo Matlab, tem-se uma resposta ao degrau caracterizada na Figura 14, onde o sobressinal foi 27%, o tempo de pico 215 ms e o tempo de assentamento 662 ms.

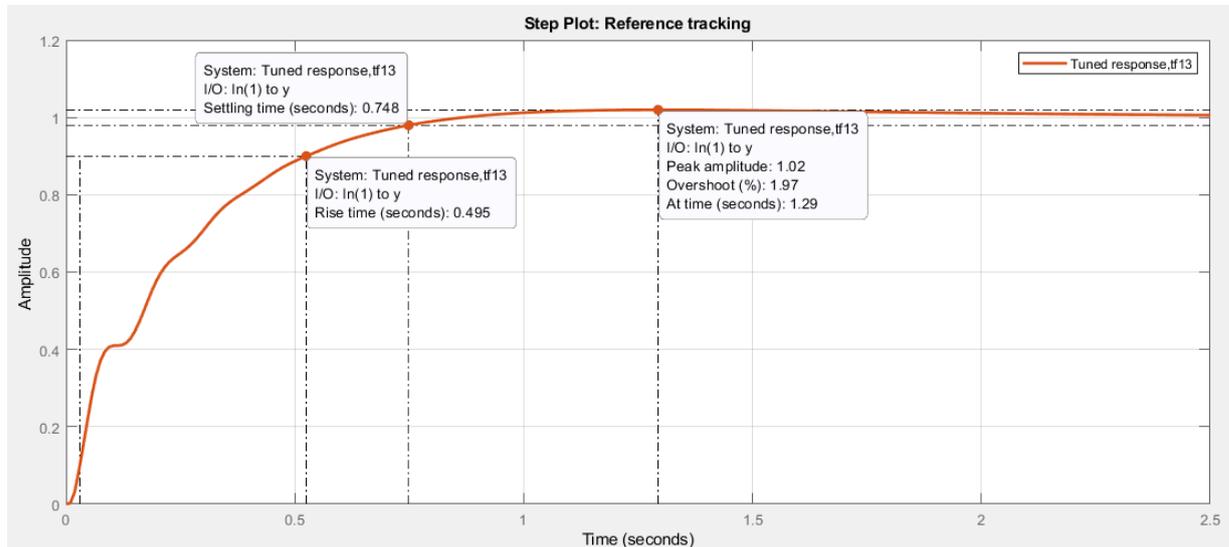
Figura 14 – Resposta ao degrau do controlador existente.



Fonte: Autor.

Logo, se a mesma metodologia for adotada, ou seja, aplicar o algoritmo de controle (4) na planta estimada por uma FT (7), a curva de controle expressa pela Figura 15 caracteriza a sintonia dessa malha fechada.

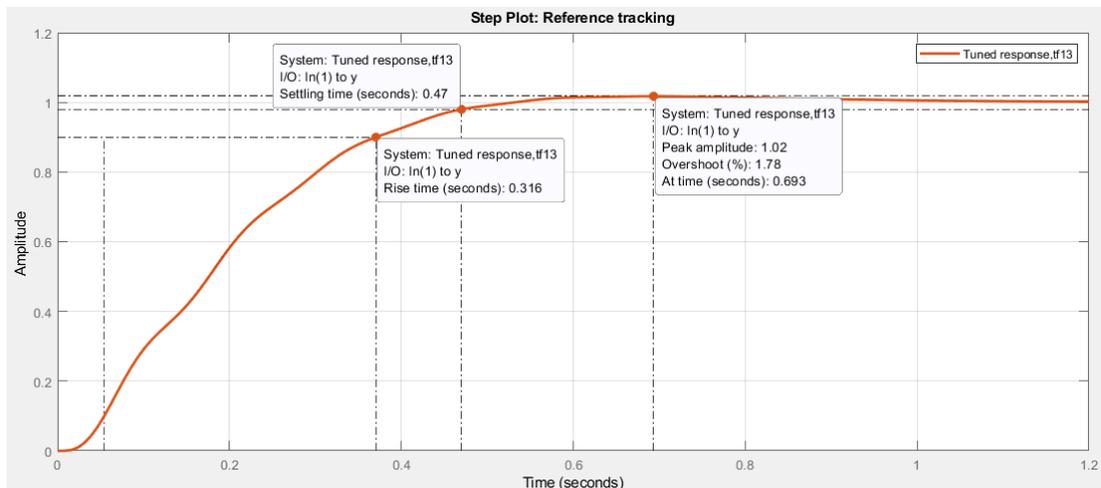
Figura 15 – Sintonia da MF com algoritmo de controle (4).



Fonte: Autor.

Analisando os parâmetros destacados na curva da Figura 16, planta em malha fechada, com a curva da Figura 11, planta em malha aberta, nota-se uma redução drástica do erro de regime, o tempo de acomodação e o tempo de pico, respectivamente, 76% e 78,5% menores que a planta, indica uma melhora significativa no controle do processo.

Se o algoritmo de controle (6) que possui dois graus de liberdade for excitado a um degrau unitário na FT (7), à planta estudada responde conforme a Figura 16, tendo a sintonia de seu controle expressa por um tempo de acomodação de 470 ms, tempo de pico de 693 ms e um sobressinal de 1,78%, ou seja, um desempenho mais ágil e robusto em relação ao primeiro algoritmo.

Figura 16 – Sintonia de MF com algoritmo de controle (6).


Fonte: Autor.

Assim a Tabela 9 reuni os parâmetros de comparação entre os controladores e a planta, possibilitando uma análise dinâmica de qual controle desempenha-se melhor nesse processo.

Tabela 9 – Comparação do desempenho dos controladores entre si e em relação à planta.

Controlador	Controle	Parâmetros de Resposta Transitória			
		t_r	t_p	%UP	t_s
SMAR CD600 PLUS	PI Existente	55,1 ms	215 ms	27%	662 ms
SMAR CD600 PLUS	PI Re-sintonizado	495 ms	1,29 s	1,97%	748 ms
MICROLOGIX 1400	PI_2DOF	316 ms	693 ms	1,78%	470 ms
FT PLANTA		1,39 s	6 s	0%	3,1 s

Fonte: Autor.

Por fim, interpretando os dados obtidos na Tabela 9 é possível perceber que todos os tipos de controle melhoram, expressivamente, o tempo de resposta da planta. Contudo, pelos parâmetros apresentados, pelo comportamento do processo em operação e a resposta do atual controle, destaca-se o controlador *Micrologix 1400*, uma vez que, o algoritmo utilizado por ele, possibilita um tempo de assentamento melhor,

bem como também, menor percentagem de sobressinal, haja visto, que em comparação com a planta houve redução de aproximadamente 77% no tempo de subida, 88% no tempo de pico e 85% no tempo de acomodação.

5 CONCLUSÃO

A abordagem sobre as principais características do controlador *Smar CD600 Plus* e do *Micrologix 1400*, pode ser destacada como primeiro ponto positivo do trabalho, já que as tabelas apresentadas ao longo do estudo explicitam de forma objetiva o desempenho de cada *hardware*.

No entanto, o controlador já existente no processo, apesar de se apresentar eficiente, simples e robusto por sua programação e para o tipo de trabalho realizado (produção de silício metálico por meio de fornos a arco elétrico), mostrou-se defasado com relação a recursos de simulação, monitoramento e velocidade no tempo de resposta. Isso se deve ao desenvolvimento de equipamentos mais modernos e tecnologias mais avançadas de controle e programação.

Desta forma, por toda análise desenvolvida na seção de referencial teórico, evidenciava-se melhor desempenho no controlador *Micrologix*, justo pela sua capacidade de expansão de *hardware* e do algoritmo de controle PID mais eficaz, permitindo uma performance da planta mais estável em relação aos distúrbios do processo.

Durante o desenvolvimento do estudo, a principal dificuldade encontrada foi obter uma função de transferência que representasse com fidedignidade o processo controlado. Neste caso, o controle de corrente em fornos a arco elétrico. Todavia, como o método de identificação de sistemas adotado no trabalho fora através da observação de dados de entrada e saída, foi possível estimar com uma assertividade de 90,26% a função de transferência (FT) da planta.

Os diversos conceitos abordados no decorrer do trabalho servem como base de estudos futuros que objetivam aplicar a metodologia das leis físicas do processo, para encontrar a função de transferência de uma planta tão complexa e de caráter não linear, a um controlador PID ou de natureza mais sofisticada.

Ao final deste trabalho, foi possível adquirir ainda mais conhecimento na ferramenta matemática Matlab, a qual proporcionou todas as simulações que levaram ao projeto final do controle mais eficaz para o processo analisado.

ABSTRACT

This work consists of a comparative study between two programmable logic drivers (PLC) that apply the PID function to control the electric current in submerged electric arc furnaces. The studied system has as main component a Multi-Loop Smar CD 600 Plus controller that executes a program developed in block diagrams and makes an interface through a supervisory that controls the process. In order for there to be greater efficiency and reliability in the control of the electric current variable, fundamental for an electric furnace operation, it is necessary to discuss whether the current controller architecture delivers the best performance in the face of the disturbances generated by the process. From this, a deepening will be done in the study of the hardware and software structure of the drivers to be compared, with the purpose of defining the best control loop for monitoring the production process. Programming was carried out using the logic of defined blocks to analyze the external effects on the system performance. Thus, the observed results were satisfactory in order to determine the controller with the best performance.

Keywords: PID Control, PLC, Electric Arc Furnace, Control Logics.

REFERÊNCIAS

AGUIRRE, L. A. **Introdução à Identificação de Sistemas – Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistema Reais**. Editora UFMG, Belo Horizonte, MG, 2004.

ALLEN-BRADLEY. **Instruções de Instalação: Controladores Programáveis Micrologix 1400. 2009**. Disponível em: <http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/in/1766-in001_-mu-p.pdf>. Acesso em: 17 out. 2020.

CÂNDIDO, Marcos Rogério. **Aplicação de Transformada Wavelet na Análise da Qualidade de Energia em Fornos Elétricos a Arco**. Orientador: Prof. Dr. Luiz Cera Zanetta Jr. 2008, 151f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2008.

LANDER, Arnold. **Programmable Logic Controllers: The Evolution of a Disruptive Technology**. Enginnering.com, Deutsch, 11 mar. 2019. Disponível em: <<https://new.engineering.com/story/programmable-logic-controllers-the-evolution-of-a-disruptive-technology>>. Acesso em: 17 out. 2020.

LEITE, Matheus Vinícius Morais. **Automação de uma Máquina Envasadora: Estudo, Simulação e Desenvolvimento de uma Interface Homem-Máquina**. Orientador: Prof. Dr. Fabrício Gonzalez Nogueira. 2014, 107f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

LJUNG, L. **System Identification, Theory for the User**. Prentice Hall, New Jersey, 1999.

NISE, Normam S.. **Engenharia de sistemas de controle. [Control systems engineering, 6th ed. (inglês)]**. Tradução e revisão técnica de Jackson Paul Matsuura. 6 ed. reimpr. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. Prentice-Hall do Brasil, Rio de Janeiro, RJ, 1985.

PETRUZELLA, Frank D. **Programmable Logic Controllers**. 4. ed. McGraw-Hill, Nova Iorque, 2010.

SILVEIRA, Leonardo; LIMA, Q. Weldson. **Um breve histórico conceitual da Automação Industrial e Redes para Automação Industrial**. Universidade Federal Rio Grande do Norte, RN, 2003.

SIQUEIRA, Renan Victor Donalson. **Projeto de Controle em uma Destilação Alcoólica de cana-de-açúcar utilizando controlador PID**. Orientador: Maíra Martins da Silva. 2017, 46f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

SMAR. **Manual do Usuário Controlador Multi-Loop CD600 Plus**. 1. ed. Sertãozinho, SP, 2011, 196 p.

SOUSA, João Paulo Machado. **Aplicações das Técnicas de Identificação de Sistemas Não-Lineares à Modelagem de Fornos Elétricos a Arco**. Orientador: Prof^a. Dra. Zélia Myriam Assis Peixoto. 2005, 126f. Tese (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

STASI, Luigi. **Fornos Elétricos**. Hemus Editora Limitada, São Paulo, SP, 1981.