



Universidade do Porto

**FEUP** Faculdade de  
Engenharia

Licenciatura em Engenharia Electrotecnicia e Computadores

Ramo de Automação, Produção e Electrónica Industrial

Tecnologia de Sistemas de Controlo e Automação

Trabalho nº 1

Trabalho Realizado por:

Ana Luísa Mendonça Amaro Martins ee04255

Magno Alexandre Tavares Petiz dos Santos ee00168

Ricardo Manuel da Rocha Canossa ee00114



## Sumário

Este trabalho consiste no controlo de temperatura de um forno.

Vão ser abordadas duas maneiras de efectuar esse controlo:

- 1- Controlador industrial do tipo PID
- 2- Autómato programável

## Índice

Sumário .....	i
Objectivos: .....	1
Controlo PID: .....	1
Simulador do Forno: .....	1
Esquema ligação .....	2
Controlador Digital .....	3
O Autómato .....	5
O Trabalho .....	6
1ª Parte – Controlo de temperatura usando um controlador digital .....	6
Esquema de ligação .....	6
Método ON-OFF .....	6
Método auto-tuning .....	7
Método PID .....	8
Comentários aos resultados obtidos .....	11
2ª Parte – Controlo de temperatura utilizando um autómato programável .....	12
Esquema de ligações .....	12
Verificação da comunicação com o autómato .....	12
Estudo da função PID do autómato .....	13
Comentários aos resultados obtidos .....	16
Conclusão .....	17
Recomendações .....	18
Anexo (programação do PID no autómato) .....	20
Referências bibliográficas .....	22

## Objectivos:

Pretende-se controlar a temperatura de um forno eléctrico através de controlo PID. Este controlo será efectuado com dois equipamentos distintos, um controlador digital e um autómato programável.

## Controlo PID:

O controlo por PID é um método de controlo amplamente utilizado a nível industrial. Este caracteriza-se pelas vantagens que possui relativamente a outros métodos de controlo. Entre elas temos o facto de não ser necessário recorrer ao seu modelo matemático, o que acontece com outros métodos analíticos e mesmo assim consegue-se obter um controlo bastante satisfatório.

Um controlador PID é constituído pelas componentes proporcional ( $k$ ), integral ( $T_i$ ) e derivativa ( $T_d$ ).

A componente proporcional é a mais importante, desta depende a rapidez de resposta ao sistema. Contudo, se esta for calculada por excesso pode levar a que ocorra uma resposta oscilatória e a um *overshoot* elevado. A componente integrativa diminui o erro em regime permanente, se o seu valor for mal dimensionado a resposta transitória vai ter tendência para piorar, podendo mesmo levar à instabilidade do sistema. A componente derivativa altera a sensibilidade do sistema a perturbações externas, permitindo que o controlador possa medir a variação do erro, e efectuar correcções do mesmo, tornando-se bastante útil em sistemas com atrasos. Além disto com a componente derivativa é possível melhorar a resposta transitória, e reduzir o *overshoot*.

## Simulador do Forno:

Todo o trabalho foi realizado sob um kit de simulação do forno. Este kit é constituído essencialmente por uma lâmpada, um sensor de temperatura, um TRIAC (ou um opto acoplador óptico) e uma resistência.

O kit simula o funcionamento do forno através da lâmpada, sendo que quando esta liga gera calor, que é medido pelo sensor de temperatura. Deste modo podemos considerar a analogia entre a lâmpada e o forno.

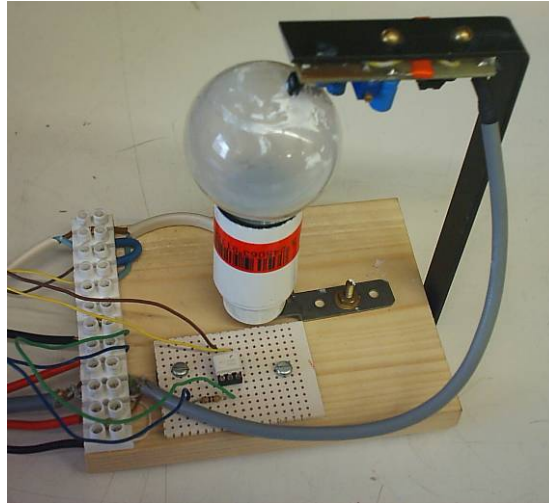


Fig. 1 Kit de simulação

## Esquema ligação

Na figura seguinte pode-se ver o esquema de ligações de: alimentação da lâmpada (a 230V), terminais para controlo (ponto I e II), alimentação do sensor de temperatura (a 12 V), terminais para leitura dos valores adquiridos pelo sensor (TEMPERATURA e 0V).

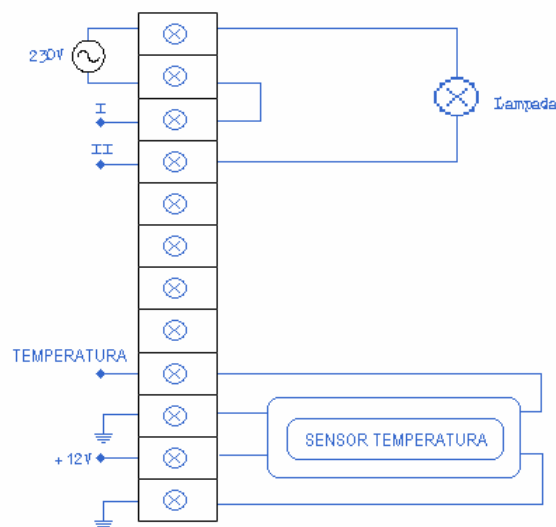


Fig. 2 Esquema de ligações com o kit

Nota: os terminais para controlo estarão ligados à saída do controlador, assim como os terminais para leitura estarão ligados à entrada do controlador.

## Controlador Digital

O controlador digital utilizado é o E5AX-LA da OMRON. Este dispositivo permite obter valores de sensores lineares com diversas gamas de tensão e/ou corrente, sendo possível efectuar ajustes de escala. Este controlador tem dois modos de funcionamento internos, um por ON-OFF, e outro por PID. Além dos modos de funcionamento possui ainda a possibilidade de configurar alarmes.

No modo de PID, dois modos são passíveis de execução. O de *auto-tuning*, em que o próprio controlador corre uma série de testes internos e obtém automaticamente os parâmetros para o PID. O outro modo é a introdução manual dos parâmetros do PID, em que para o cálculo destes existem alguns métodos de cálculo analítico como o *Método de Chien*.



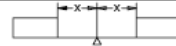

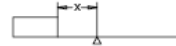
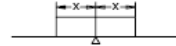
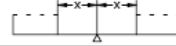

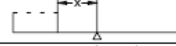
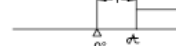
Fig. 3 Controlador digital E5AX-LA da OMRON

Para configurar os diversos modos de funcionamento do controlador existe no seu interior um DIP Switch com 6 pinos que conforme a sua configuração o controlador desempenhará determinadas funções. Para seleccionar a função pretendida existe a tabela seguinte com as configurações a colocar no DIP Switch:

Function		Pin no.					
		1	2	3	4	5	6
Control mode*	ON/OFF	ON					
	PID	OFF					
Output operation**	Normal (Cooling)		ON				
	Reverse (Heating)		OFF				
Input shift data display	Enable			ON			
	Disable			OFF			
Temperature Sensor standard	DIN				ON		
	JIS				OFF		
Display units	°F					ON	
	°C					OFF	
PID constant data display	Enable						ON
	Disable						OFF
Factory setting		OFF	OFF	OFF	OFF	ON	OFF

Fig. 4 Configuração das funções do controlador

O controlador possui ainda 2 alarmes, cada um tem o seu selector e conforme o valor seleccionado comporta-se de determinada maneira de acordo com a tabela seguinte:

No.	Alarm mode	Character code in display level 2	Alarm output operation	Setting range
0	No alarm	Nothing displayed	Output off	
1	Upper- and lower-limit alarms	]- - [-		0 to 9999 (TC)* 0 to 999.9 (Pt)**
2	Upper-limit alarm	- - - [-		-999 to 9999 (TC) -99.9 to 999.9 (Pt)
3	Lower-limit alarm	]- - -		
4	Upper- and lower-limit range alarm	- [- ]-		0 to 9999 (TC) 0 to 999.9 (Pt)
5	Upper- and lower-limit alarm with standby sequence	3 - - E		
6	Upper-limit alarm with standby sequence	- - - E		-999 to 9999 (TC) -99.9 to 999.9 (Pt)
7	Lower-limit alarm with standby sequence	3 - - -		
8	Event alarm	l - - [-		
9	Proportional alarm	P r 0	Refer to the explanation that follows.	

\*TC: Thermocouple

\*\*PT: Platinum resistance thermometer

X: Alarm value

Y: An absolute value within the selected temperature scale range

Fig. 5 Configuração do modo de alarme



## O Autómato

O autómato utilizado é o *CJ1M* da *OMRON*. Além do módulo de processamento possui uma carta com 16 entradas digitais (modelo ID211), uma carta com 16 saídas digitais de colectador aberto (modelo OD211) e uma carta de entradas e saídas analógicas (4 entradas, 2 saídas). A carta analógica em questão é a *MAD42*, da qual se usou uma entrada analógica (sensor de temperatura).

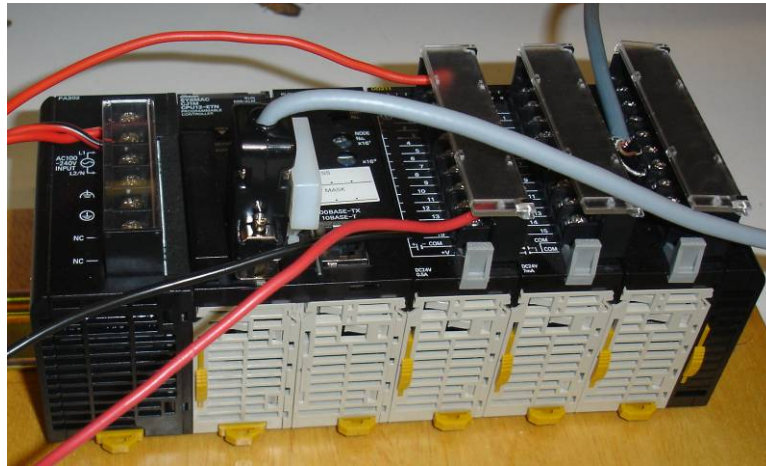


Fig. 6 Autómato CJ1M da OMRON

## O Trabalho

### 1ª Parte – Controlo de temperatura usando um controlador digital

A primeira parte do trabalho foi realizada no controlador digital de duas formas, usando o modo de controlo por ON-OFF e PID.

#### Esquema de ligação

Na figura seguinte está representado a disposição dos terminais do controlador digital. Aos terminais 9 e 10 é ligada a saída do sistema, o que corresponde aos pontos I e II da fig. 2. A saída do sensor de temperatura (terminais TEMPERATURA e a massa representados na fig. 2) liga aos terminais 13 e 14 (respectivamente) do controlador. Nos terminais 16 e 17 do controlador era ligada a alimentação deste.

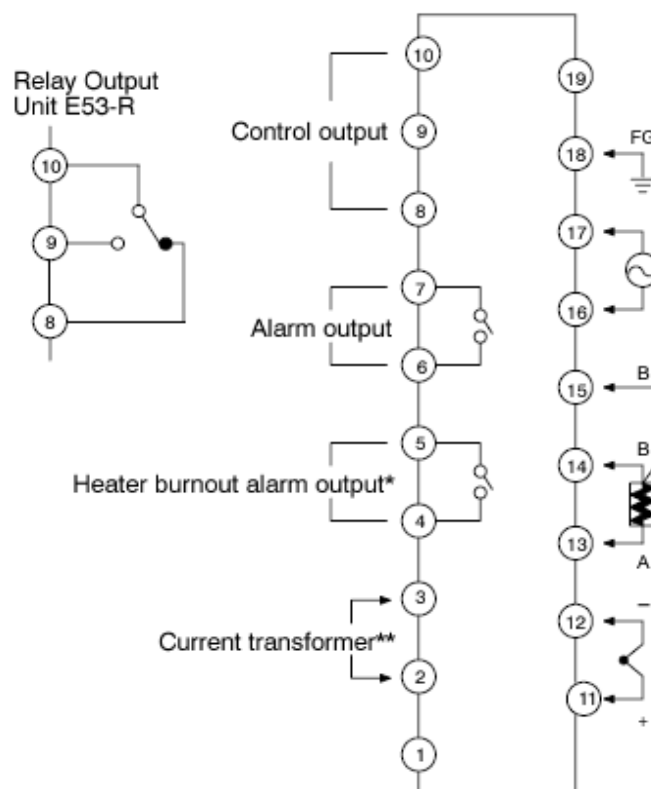


Fig. 7 Terminais do controlador digital

#### Método ON-OFF

Foi atribuído ao controlador um SET POINT (representado a cor-de-rosa na fig. 8), sendo este a temperatura desejada a alcançar pelo sistema. Quando o valor lido pelo sensor

(representado a azul na fig. 8) ultrapassava o valor do SET POINT o controlador desligava a saída (representado a amarelo na fig. 8). Quando o valor do sensor era inferior, a saída era activada. Verificou-se assim que com este método não é possível uma boa estabilização do sistema, sendo por isso um método de controlo “pobre”.

A figura seguinte exemplifica este controlo:

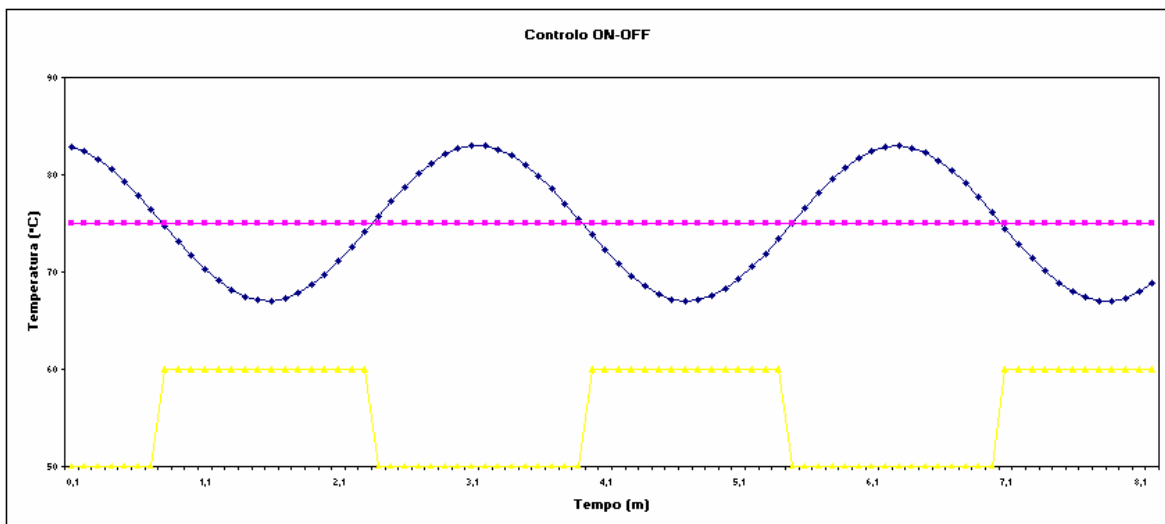


Fig. 8 Método de controlo ON-OFF

Para o funcionamento em ON-OFF no presente trabalho, o DIP Switch foi colocado na seguinte configuração:

Pin 1	Pin 2	Pin 3	Pin 4	Pin 5	Pin 6
ON	OFF	ON	ON	OFF	ON

### Método auto-tuning

O controlador digital utilizado possui um modo de *auto-tuning*, em que o próprio calcula os parâmetros para o PID. Para tal foi necessário mudar a configuração do modo de funcionamento deste recorrendo uma vez mais ao DIP Switch. Estando configurado para o modo de PID, a metodologia a adoptar para o controlador funcionar em *auto-tuning* é bastante simples. Basta para isso, premir simultaneamente em duas teclas (representadas pela etiqueta “AT”), durante 3s e este entra em modo de *auto-tuning* (o mesmo processo caso seja pretendido que esta saia do modo de *auto-tuning*).

Estando já no modo de *auto-tuning* bastou atribuir um valor desejado para a temperatura, (o set value), e o controlador corre um algoritmo interno durante um intervalo de tempo, até estar

adequadamente calibrado. Após este se ter auto-configurado, o modo de *auto-tunning* termina e o conversor passa a funcionar como PID com os parâmetros adquiridos durante o *auto-tunning*.

### Configuração:

Para o funcionamento em PID, o DIP Switch foi alterado de modo a ter a seguinte configuração:

Pin 1	Pin 2	Pin 3	Pin 4	Pin 5	Pin 6
OFF	OFF	ON	ON	OFF	ON

Valores obtidos em modo *auto-tunning*.

Temperatura	P	I	D
45°C	5,5	28	7
60°C	9.8	29	7

### Método PID

Para aplicar este método é necessário obter os valores dos parâmetros do PID analiticamente. O método analítico utilizado foi o de *Chien*, em que para tal foi necessário aplicar um degrau ao sistema em malha aberta e registar a sua resposta.

Foram aplicados dois degraus diferentes ao sistema. Inicialmente pôs-se a saída do controlador a 40% tendo-se esperado até ao sistema estabilizar, em seguida o valor da saída foi alterado para 60% e foram registados os valores da variação do sistema até este estabilizar novamente, mas rapidamente se pôde verificar que com esta variação não se iria conseguir ter uma perspectiva do funcionamento do sistema, dado os valores serem muito dispersos. Por esta razão optou-se por aplicar um outro degrau ao sistema, em que desta vez a gama de variação foi aumentada, tendo a saída como valor inicial 20% e final 80%.

Para o degrau de 40% para 60%, os valores obtidos estão representados na figura seguinte. Como se pode verificar a resposta do sistema é muito inconclusiva, pelo que foi necessário aplicar um outro degrau.

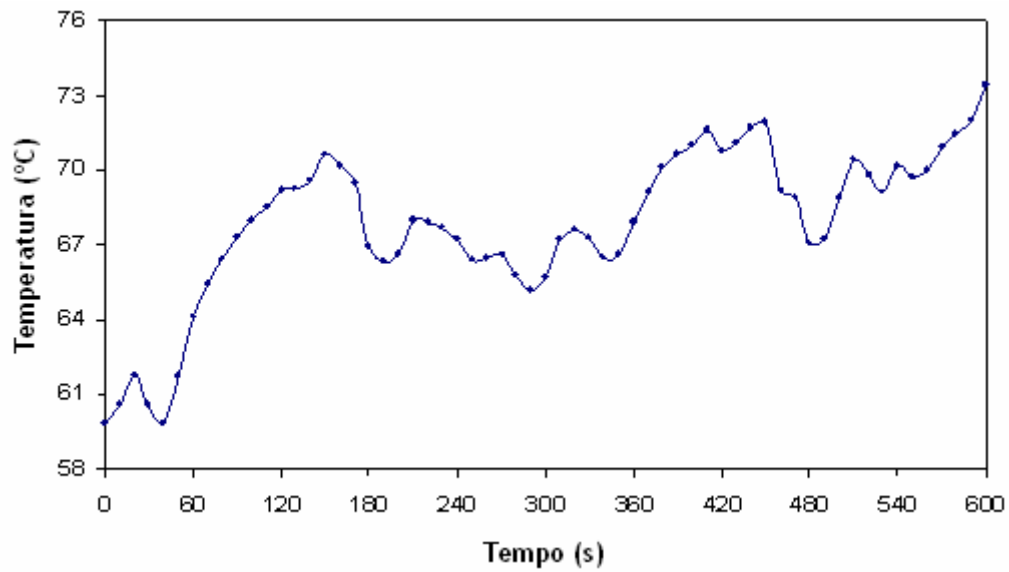


Fig. 9 Degrau de 40% para 60%

No degrau de 20% para 80%, já foi possível aplicar o método de *Chien*, para tal foi feita uma aproximação dos valores por uma curva exponencial segundo a seguinte expressão:

$$f(t) = k \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

Resultando no seguinte gráfico:

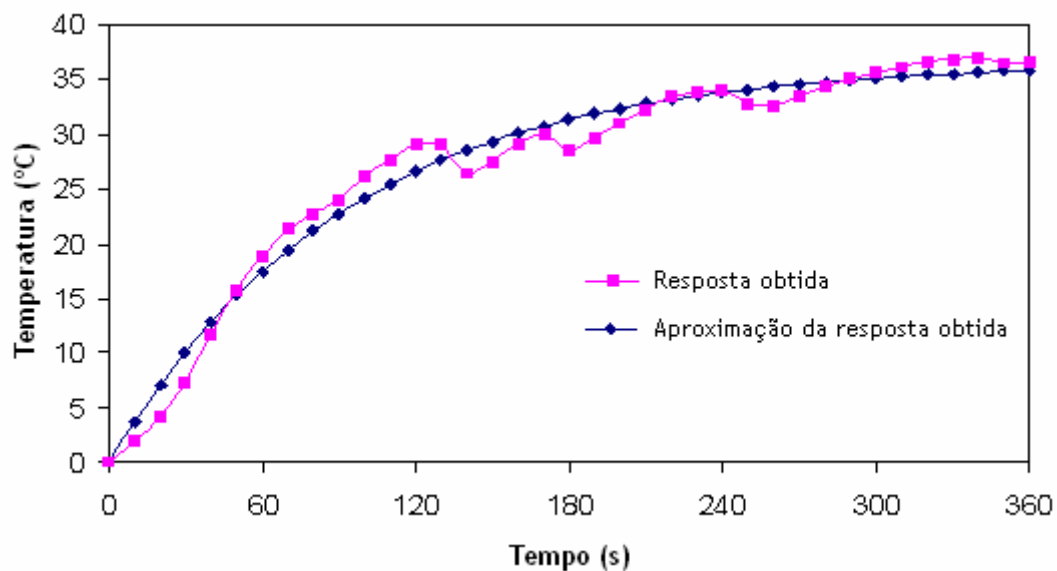


Fig. 10 Degrau de 20% para 80%

Nota: Esta curva de aproximação foi obtida utilizando o solver do Excel, tendo os valores de  $K$  e  $\zeta$ , sido obtidos para um erro mínimo.

Os valores obtidos para  $K$  e  $\zeta$  estão representados na tabela seguinte:

$K$	$\tau$
0,608904	92,46468

Com o método de *Chien*, retiraram-se dois conjuntos de valores que apenas diferem na banda proporcional.

Primeiro conjunto de valores obtidos:

$T_p$	$T_i$	$T_d$
30,4	92,46	0

O que resulta na seguinte resposta do sistema, para uma temperatura desejada de 75° C:

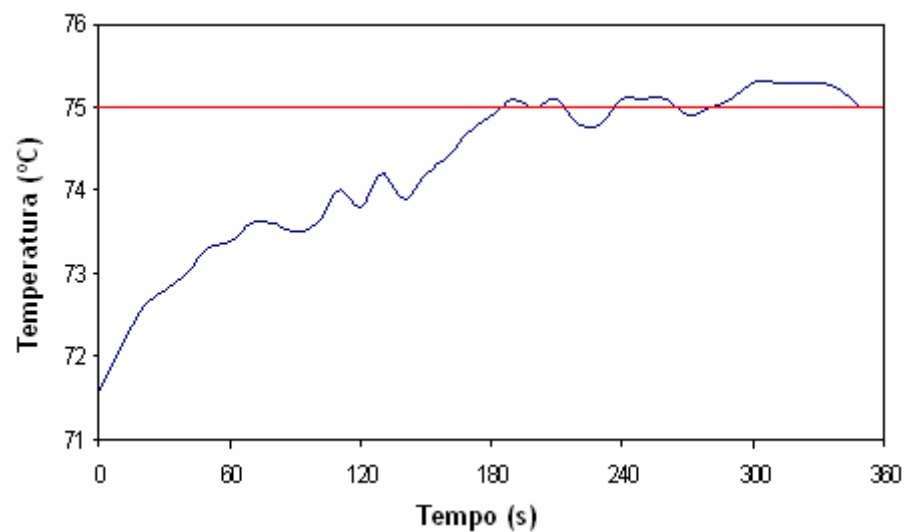


Fig. 11 Resposta do sistema com os primeiros valores segundo o método de *Chien*

Segundo conjuntos de valores obtidos:

$T_p$	$T_i$	$T_d$
60,8	92,46	0

Resultando na seguinte resposta também para uma temperatura de 75° C:

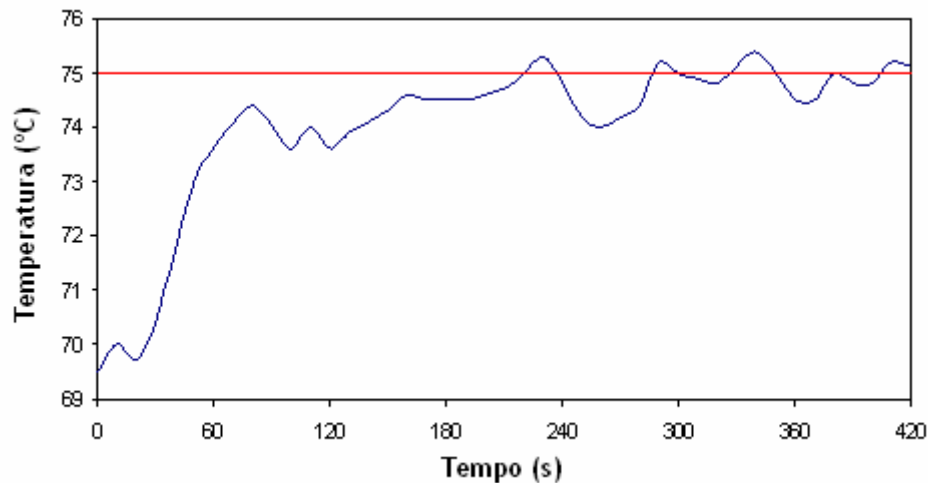


Fig. 12 Resposta do sistema com os segundos valores através do método de *Chien*

### Comentários aos resultados obtidos

Como se pode verificar existem duas maneiras de obter os parâmetros do PID (auto-tuning ou introdução manual), apresentando os dois resultados bastante satisfatórios, sendo a grande vantagem do auto-tuning de não se ter de calcular manualmente os parâmetros, perdendo por isso menos tempo (não é necessário aplicar um degrau de teste e fazer uma análise da resposta).

Conclui-se também que quanto maior for o degrau aplicado na entrada do sistema maior é a estabilidade da resposta obtida. Em relação ao degrau 20% → 80% verificou-se que ao aumentar a banda proporcional de 30,4% para 60,8% a resposta à temperatura desejada (75°C) foi ligeiramente mais rápida e com um menor *over-shooting*.

Não existem dados relativos ao funcionamento do sistema pelo método de controlo ON-OFF, pois a abordagem deste método foi apenas a título de experiência, e de um melhor conhecimento das capacidades do controlador, tal como a utilidade dos alarmes do controlador digital, que deu para se ter a percepção da sua utilidade no funcionamento do controlador num ambiente mais real, que não num laboratório de aulas. São sem dúvida uma mais valia do equipamento.

## 2ª Parte – Controlo de temperatura utilizando um autómato programável

Esta parte do trabalho consiste em utilizar um autómato programável como controlador PID, recorrendo a uma função interna do PLC que implementa o controlo PID.

### Esquema de ligações

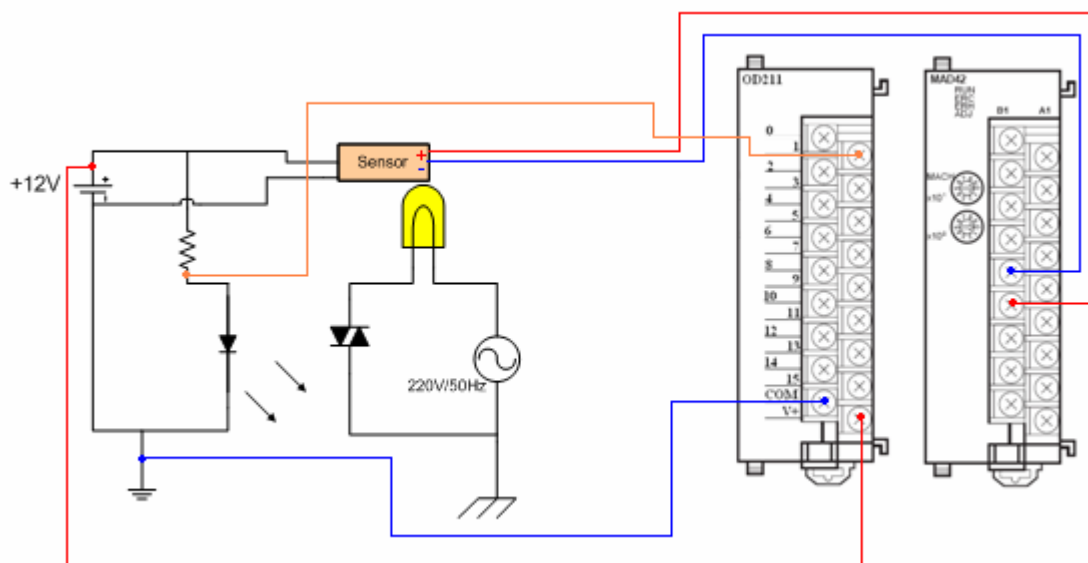


Fig. 13 Esquema de ligações do autómato ao kit

### Verificação da comunicação com o autómato

Para proceder à comunicação com o autómato, o “Unit Number Switch” da carta MAD42 foi configurado da seguinte maneira:

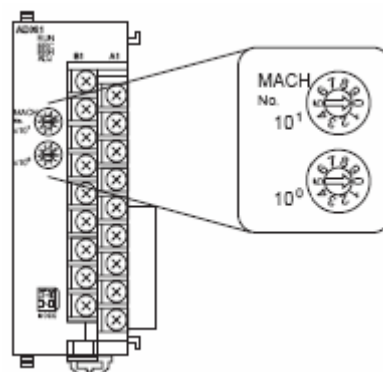


Fig. 14 Carta MAD42



A partir daqui ficaram definidos os endereços de memória que se vai precisar para configurar a comunicação Simulador/Autómato/PC (D20000 a D20099).

Configurações necessárias:

DM Word	Bits															
	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
D20018	C				1				0				0			
	Tempo de conversão de 250 $\mu$ s e resolução de 8000								Modo Normal							
D20000	0				0				2				0			
	Taxa de Conversão								Entrada				Saída			
D20001	0				4				0				0			
	Escala de sinal de entrada (Input 2 1-10V)								Escala de sinal de saída							

Posto isto, verificou-se a comunicação com o autómato através de um pequeno programa que está sempre a actualizar o valor do sensor de temperatura e coloca uma saída em modo intermitente.

### Estudo da função PID do autómato

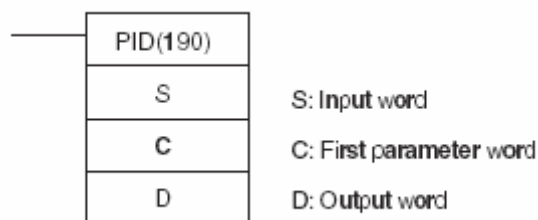


Fig. 15 Símbolo ladder do bloco PID

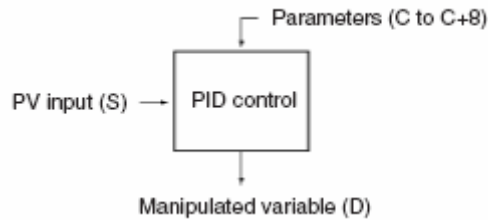


Fig. 16 Diagrama de funcionamento do PID

De um modo geral tem-se:

S – Valor actual do sensor de temperatura

C – Parâmetros de configuração

D – Valor de referência (variável manipulada) para a rampa que gera o PWM, que faz com que a temperatura varie.

O PID está sempre a ler o valor actual (PV) da temperatura na word S e compara-o com o valor pretendido (Set Value, SV) Word C+0 (D10) e desencadeia o controlo PID de acordo com os parâmetros estabelecidos na word C (configurações) até atingir o valor desejado. O resultado (variável manipulada, MV) é depois armazenado na word de saída D.

Quando se usa o controlo PID existem duas direcções de controlo possíveis.

- Acção directa: MV aumenta quando PV é maior que o SV.
- Acção inversa: MV aumenta quando PV é menor que o SV.



No presente caso interessa a acção inversa, ou seja, se o valor actual da temperatura do forno for superior ao valor desejado então o controlo PID faz a temperatura diminuir e vice-versa.

Posto isto, configurou-se o PID com os seguintes parâmetros:

Zona de memória	Significado	Valores atribuídos			
		1º Ensaio		2º Ensaio	
C+0: D10	Valor de temperatura a atingir (SV)	75 °C	0x0BB8	75 °C	0x0BB8
C+1: D11	Banda Proporcional (P)	30,4%	0x0130	60,8%	0x0260
C+2: D12	Tempo Integrativo (Tik)	92,46s	0x039D	92,46s	0x039D
C+3: D13	Tempo Derivativo (Tdk)	0s	0x0000	0s	0x0000
C+4: D14	Período de Amostragem ( $\tau$ )	0,5s	0x0032	0,5s	0x0032
C+5: D15	Modo directo (0) / inverso (1)	1	0x0001	1	0x0001
C+6: D16	Limite de controlo (Bit 12: 0- Sem limite 1- Com limite)	-	0x0494	-	0x0494
C+7: D17	Limite inferior de saída (0000 a FFFF)	0	0x0000	0	0x0000
C+8: D18	Limite superior de saída (0000 a FFFF)	0	0x0000	0	0x0000

Resultados obtidos:

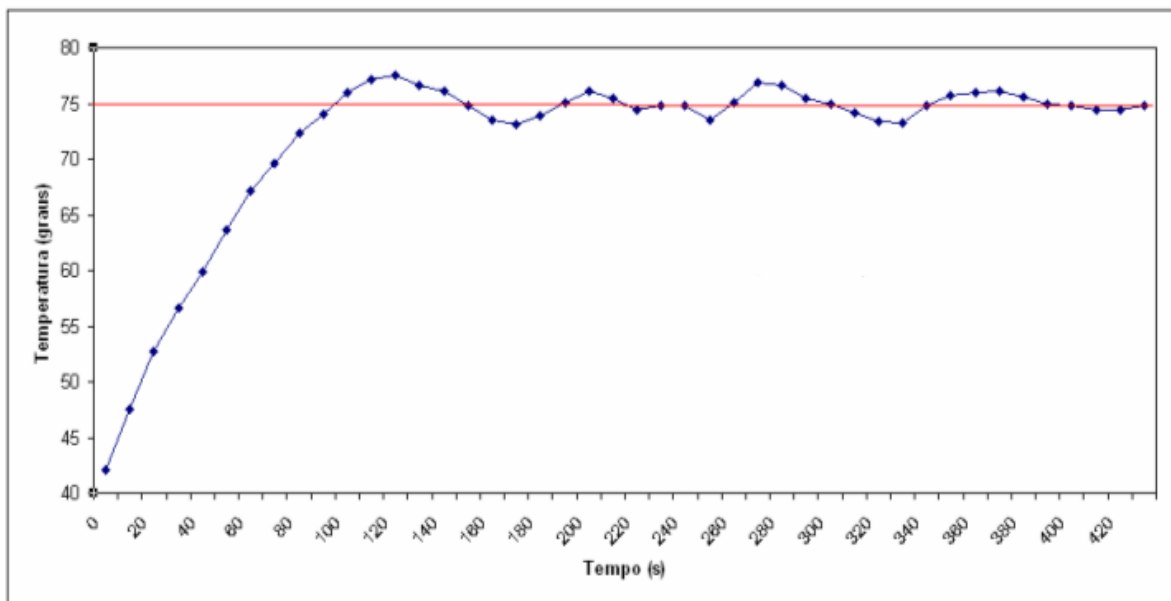


Fig. 17 Resposta do sistema para P = 30,4%

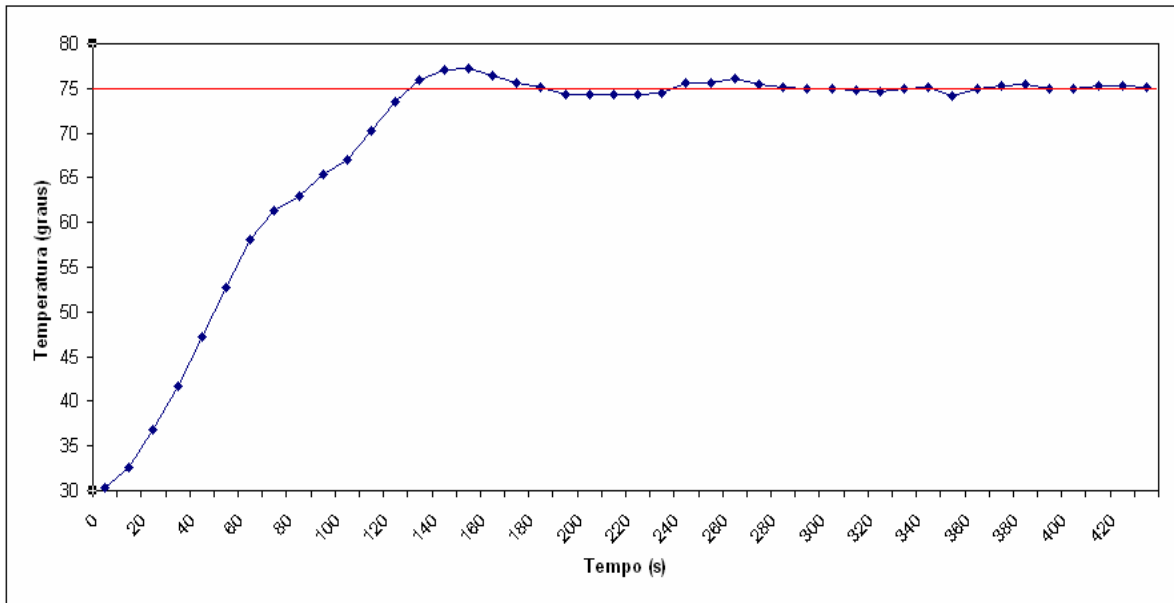


Fig. 18 Resposta do sistema para  $P = 60,8\%$

### Comentários aos resultados obtidos

Aumentando o ganho de um ensaio para outro, embora se tenha demorado mais tempo a chegar ao valor de temperatura desejado, obteve-se um menor over-shooting e uma maior estabilidade.

## Conclusão

Com a realização deste trabalho foi possível verificar na prática como se comporta um controlo PID e ON-OFF, ganhando-se experiência na implementação deste tipo de controlos. Foi também possível a familiarização com um controlador digital de temperatura com o qual é possível o controlo pelo método ON-OFF e PID. Adquiriu-se também prática em programação de autómatos.

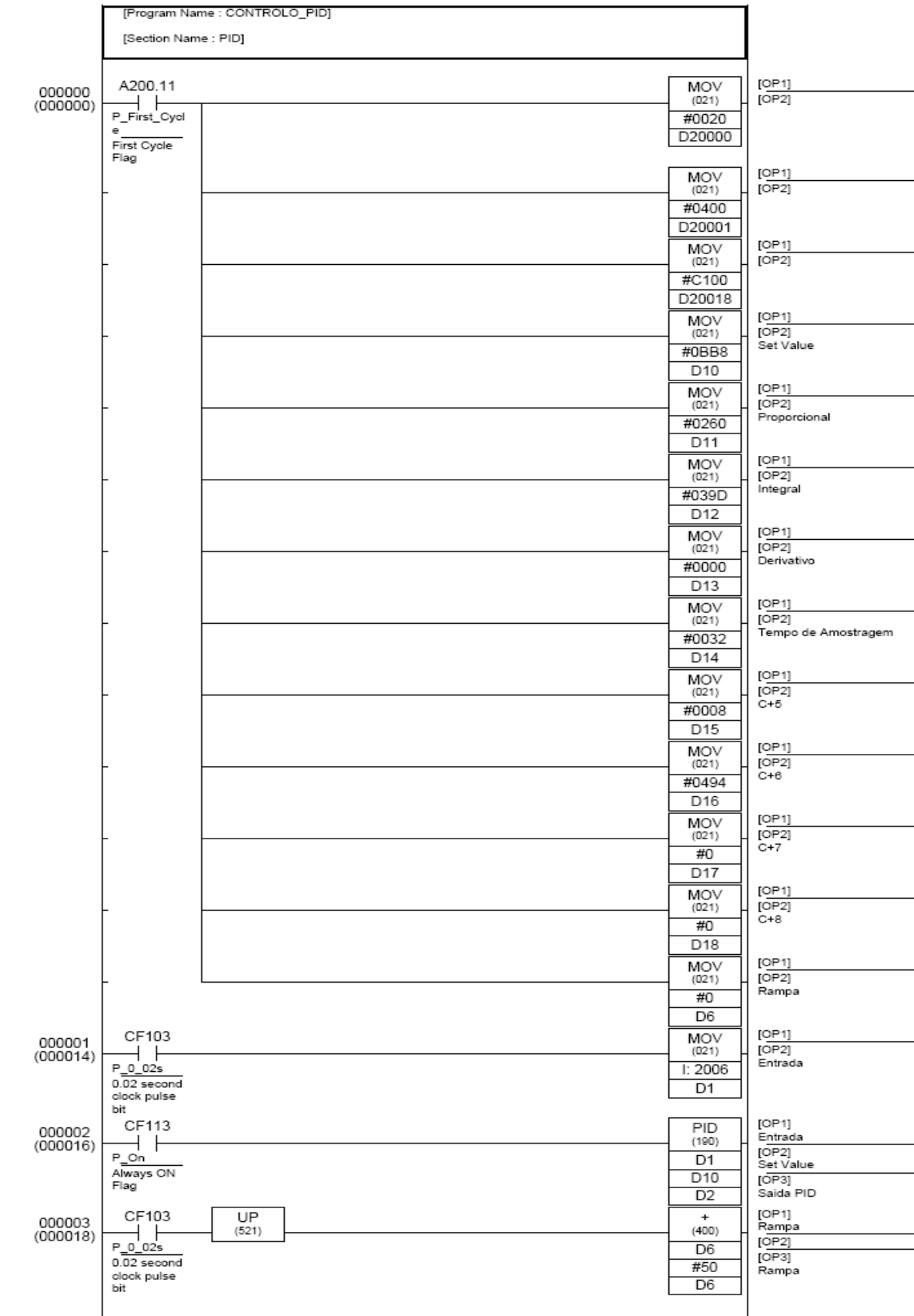
Relativamente aos dois equipamentos utilizados para o controlo por PID e aos resultados obtidos, conclui-se que com o autómato é possível uma melhor de resposta do sistema, quer a nível de velocidade como de estabilidade, sendo que na ausência deste equipamento o controlador digital o pode substituir satisfatoriamente. A fraca qualidade dos resultados verificados com o controlador digital pode ter sido devido ao ambiente no laboratório, pois houveram correntes de ar e pessoas em constante movimento.

## Recomendações

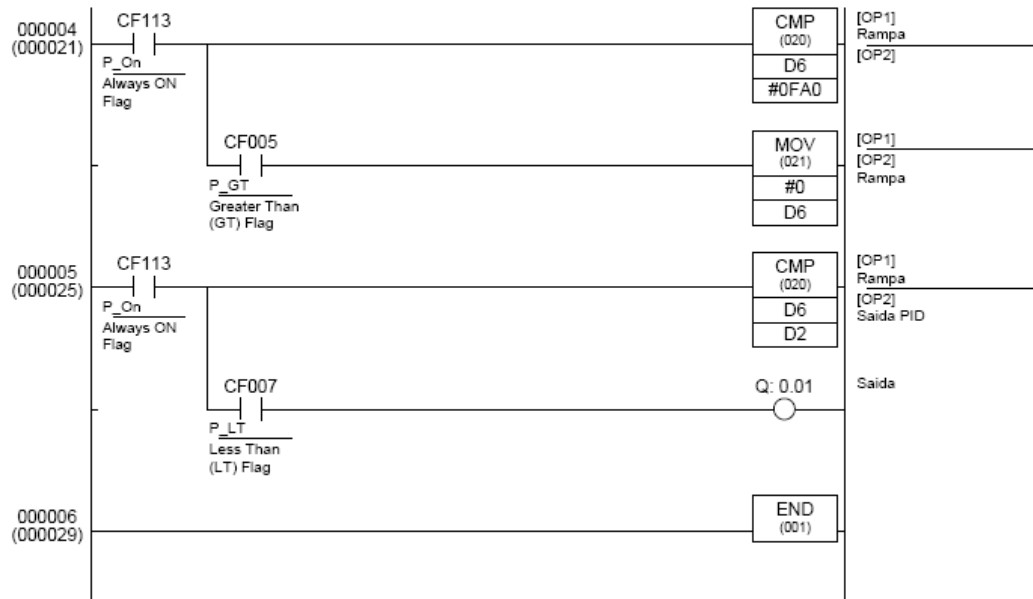
Seria interessante invés de usar um kit de simulação, ter-se oportunidade de implementar o controlo em ambiente real. Mesmo utilizando o kit, o ambiente em redor devia de ser mais isolado.



### Anexo (programação do PID no autómato)







## Referências bibliográficas

- [PDF] CJ1M\_Instructions\_Reference\_Manual
- [PDF] CJ1M\_Programming\_Manual
- [PDF] MAD42
- [PDF] E5AX-SP1-System