

## **CONTROLADOR DMC APLICADO A UMA PLANTA DE NÍVEL PARA UMA APLICAÇÃO DIDÁTICA NA ENGENHARIA**

**Ravena Soares Monteiro** – ravenaa.soares@hotmail.com

**Felipe da Silva Paiva** – felipedasilvapaiva@gmail.com

**Raphael Belizario de Souza Gomes** – rapha.belizario@gmail.com

**Rogério Passos Amaral** – rogeriop@ifes.edu.br

**Marco Antonio de Souza Leite Cuadros** – marcoantonio@ifes.edu.br

**Gustavo Maia de Almeida** – gmaia@ifes.edu.br

**Guilherme Vicente Curcio** – gvcurcio@ifes.edu.br

**Daniel Romero Guerra da Silva** – daniel\_romeros@outlook.com

**Gian Foeger Lim** – gianfoeger@gmail.com  
Instituto Federal do Espírito Santo – Campus Serra  
Rodovia ES-10 – Km 6,5 – Manguinhos  
29164-231 – Serra – ES

**Igor Mombrine Souza** – Igormombrines@gmail.com  
Marinha do Brasil  
Praça Barão de Ladário, Edifício Almirante Tamandaré, 5º andar – Centro  
20.091-000 – Rio de Janeiro – RJ

**Resumo:** Os cursos de engenharia de controle necessitam se manter atualizados com as técnicas de controle mais modernas. O controle DMC (Dynamic Matrix Control) tem sido muito utilizado nas indústrias, por isto este trabalho apresenta uma aplicação deste controlador em uma planta didática permitindo que futuros engenheiros se capacitem nesta técnica. Será apresentada o desenvolvimento do simulador e de uma aplicação prática na planta didática de nível. Como ferramentas computacionais será utilizado o software LabVIEW e MATLAB.

**Palavras-chave:** Planta Didática. Controlador DMC. LabVIEW. MATLAB.

### **1 INTRODUÇÃO**

O ensino de controle de processos industriais requer a adequada fundamentação teórica dada na sala de aula, bem como a realização de experimentos em laboratório, que abordem o uso de tecnologias existentes no mercado para a solução dos problemas reais encontrados no meio industrial (PEREIRA,2011).

Assim, é importante que instituições de ensino de controle e automação investem no desenvolvimento de plantas didáticas (PEREIRA,2011) e nelas implantem os vários tipos de controladores atualmente usados na indústria.

Normalmente os controladores preditivos não são ensinados na graduação, fazendo parte do conteúdo das disciplinas de controle ensinadas nos mestrados das instituições acadêmicas. Porém os avanços tecnológicos estão proporcionando aplicações destes tipos de controladores em muitas áreas da indústria, por exemplo na área química, de petróleo e robótica, fazendo a necessidade que o mesmo seja gradativamente ensinado também na graduação.

Portando, o objetivo deste trabalho é apresentar o procedimento de implantação do controlador *Dynamic Matrix Control* (DMC), que é um controle preditivo baseado em modelo (CPMB) em um laboratório de controle de uma instituição de ensino, facilitando que os alunos aprendam tanto na teoria com a prática como funciona este importante controlador. Para isso, primeiramente é apresentada a teoria do controlador, seguido da interface utilizada para criação do algoritmo e posteriormente a simulação do controle de processos, seguido de uma aplicação em uma planta de nível para uma melhor compreensão da teoria.

## 2 CONCEITOS

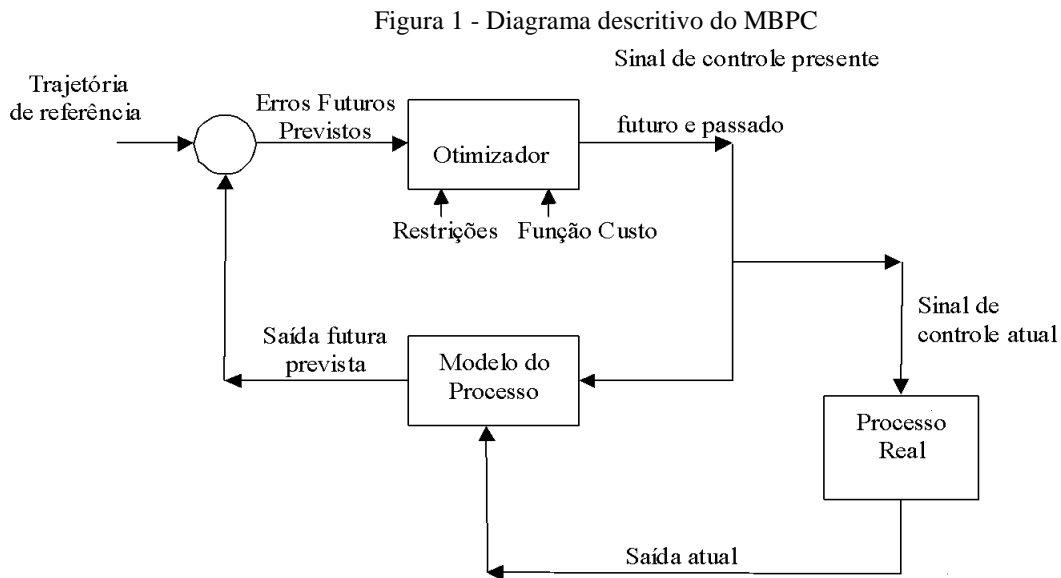
Serão apresentados resumidamente alguns conceitos que são a base do aprendizado do controlador DMC, além de breves conceitos dos softwares utilizados (LabVIEW e MATLAB).

### 2.1 Definições Básicas usadas no controle de processos

O Controle Preditivo baseado em Modelo (do inglês, “*Model Based Predictive Control – MBPC*”) é vastamente utilizado por realizar otimizações nas respostas de controle que preservam características de cada processo, como: restrições de abertura e fechamento de válvulas, níveis máximos de torque de um motor, entre outras características. A estrutura dos algoritmos de MBPC's são muito semelhantes, pois todos utilizam modelos de predição e leis de controle na implementação. Porém, se diferenciam na utilização de diferentes técnicas de se aplicar esses elementos comuns. Por exemplo o controle DMC é um tipo de controle CPMB, que utiliza como modelo a resposta ao degrau (OLIVEIRA NETO; ALMEIDA, 2012).

A estratégia de controle adotada pelo MBPC, onde sua classe de algoritmo que se baseia em modelo de processo prevê o comportamento futuro através da função minimizadora. O princípio de seu funcionamento é o cálculo da saída de controle que leva a variável do processo para a referência (*setpoint*) determinada através de uma otimização matemática que a cada instante  $K$ , gera saídas futuras para minimizar a forma de saída atual ao *setpoint* (CRUZ,2015).

Conforme mostrado na “Figura 1”, o algoritmo MBPC analisa a saída atual do processo real com o sinal de controle calculado no otimizador, que obtém dados futuros e passados do modelo de processo. Com esses dados registrados, o algoritmo calcula a saída futura prevista e analisa em relação a trajetória de referência requerida. Após essa etapa são avaliados todos os erros futuros e previstos. Esses dados no otimizador leva em consideração as restrições do processo e a função custo (que será otimizada) para calcular um novo sinal de controle presente. Esses dados são para buscar a melhor resposta de controle possível.



Fonte: Pereira (2011).

Depois dessa etapa de predição e análise de do sinal recebido pelo controle são gerados sinais de controle que são aplicados ao processo real e retornados ao modelo do processo. Dessa forma o loop de informação do controle é aplicável a uma situação real e retornada para uma análise experimental a fim de ajudar a predição dos futuros estados do processo.

### **DMC – Dynamic Matrix Control**

O DMC é um controlador preditivo baseado em modelo (MBPC), sendo amplamente utilizado devido a sua vasta aplicação, devido sua resposta ser baseada em um degrau aplicado à planta e por levar em consideração todas as restrições e as limitações da planta. Sua aplicação é muito comum na área de robótica, principalmente no controle de trajetória de um robô, tendo como base a predição e o processo (RAIMUNDO,2013).

Sua ampla utilização é devido á sua forma de representar o comportamento do processo com modelos lineares que aprende com o decorrer das interações a prevê sua saída a uma referência desejada. Para obter a resposta desejada, têm se dois conceitos importantes no controlador DMC que são a base do controle, o modelo de predição e o modelo do processo. Determinando assim, os os parâmetros para ação de controle.

O modelo de predição é um algoritmo capaz de analisar o estado atual do processo, levando em consideração a função transferência da planta para “prever” estados futuros através de estados passados e assim, ter uma resposta mais eficiente a distúrbios, bem como a eventuais mudanças de *setpoint*. Toda essa análise leva em consideração as restrições, limitações, ruídos de modelagem e de processo e muitos outros aspectos modeláveis que irão interferir, de forma efetiva, no processo. O modelo do processo é uma técnica eficiente de se modelar um processo e avaliar a resposta do controlador a um degrau aplicado à planta. A modelagem para uma resposta ao degrau é definida pela função de transferência de primeira ordem de acordo com Raimundo (2013).

O modelo de primeira ordem conforme Raimundo (2013), foi discretizado utilizando a função “C2DM” para obter os parâmetros da função de transferência no tempo discreto “[numd,dend]” conforme a “Figura 2-a”. Após a discretização do modelo de processo, foi utilizado a função “dstep” para gerar a resposta ao degrau do modelo discreto.

Através do modelo discreto é obtido as “N” raias correspondentes ao tempo de amostragem, que é escolhido de forma que o “erros futuros” do sistema seja zero para um horizonte de controle (hc) e um horizonte de previsão (hp) determinados, Conforme Pereira (2011).

Figura 2 – Parâmetros do controlador DMC

**a)**

**MATLAB script**

```
N=80;
num=[3,5];
den=[100 1];
TsN=1; %tempo de amostragem para nível
[numd,dend]=c2dm(num,den,TsN)
ll= 1000;
t= 1:ll;
gi= dstep(numd,dend,t);
```

**b)**

**MATLAB script**

```
W(1) = alfa*y + (1-alfa)*vetorsp(1);

for i=2:hp,
    W(i) = alfa*W(i-1) + (1-alfa)*vetorsp(i);
end
for k=1:hp
soma=0;
    for i=1:N
        soma = ((gi(k+i) - gi(i))*M(N+1-i) + soma ;
    end
yf(k) = ym1+ soma; %resposta livre
end
```

Para calcular o sinal de controle do processo (u) e assim obter a resposta desejada (y), é necessário calcular a previsão da trajetória (W) através do modelo de previsão do DMC. Onde “W” é o “caminho” que o controlador seguirá para conseguir chegar ao setpoint escolhido “vetorsp” com um fator constante “alfa” que aproxima “W” da trajetória. Também é calculada a resposta livre (yf) do controlador, que são as respostas passadas do controle, considerando a “saída passada” do controle preditivo. “W” e “yf” é calculado conforme a “Figura 2-b” através das respostas anteriores do passado “ym1”. Tais parâmetros do controlador são aprofundados em Pereira (2011) e Oliveira Neto e Almeida (2012).

Na “Figura 3”, é mostrado como é obtido os parâmetros do otimizador (D) para que seja possível calcular a melhor ação de controle ( $\Delta u$ ) dentro das restrições impostas ao simulador. Para isso foi utilizado a função “quadprog” do MATLAB, que é a função de otimização quadrática com restrições lineares. Ao aplicar à variável manipulada (u) ao processo obtêm se a saída do controlador, criando a lei de controle do DMC. Conforme o diagrama de blocos da “Figura 4”.

Figura 3 – Cálculo do otimizador

**MATLAB script**

```
gama11 = ones(hp,1)*ymax-yf;
gama21 = yf'-ones(hp,1)*ymin;
gama22 = [gama11;gama21];
GGG=[G;-G];

TT1=ones(hc,hc);
TT1 = tril(TT1);
TT2 = -ones(hc,hc);
TT2 = tril(TT2);
TT = [TT1;TT2];

gama1 = ones(hc,1)*(umax-um1);
gama2 = ones(hc,1)*(um1-umin);
gama = [gama1;gama2];
```

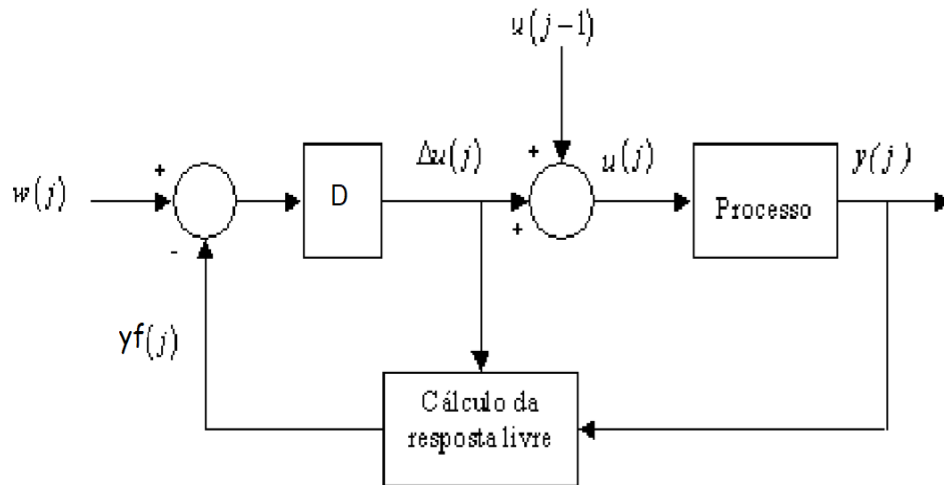
**MATLAB script**

```
AA1 = eye(hc,hc);
AA2 = -eye(hc,hc);
AA = [AA1; AA2];
BB1 = ones(hc, 1)*Dumax;
BB2 = -ones(hc, 1)*Dumin;
BB = [BB1; BB2];

AAA=[AA;TT;GGG];
GAMA=[BB;gama;gama22];

FF = 2.*delta*(yf-W)*G;
D = quadprog(GG,FF,AAA,GAMA);
```

Figura 4 - Diagrama de blocos do DMC



Fonte: Pereira (2011).

Uma das vantagens de se utilizar o controle preditivo é a possibilidade de calcular um controle ótimo levando em consideração todas as restrições físicas do processo, bem como suas restrições de controle. Sendo assim, as ações de controle ( $\Delta u$ ) e a saída do processo ( $y$ ) podem ser restringidas a um limite máximo e mínimo de atuação, conforme “Equação (1)” e “Equação (2)”.

$$u_{\min} \leq \Delta u \leq u_{\max} \quad (1)$$

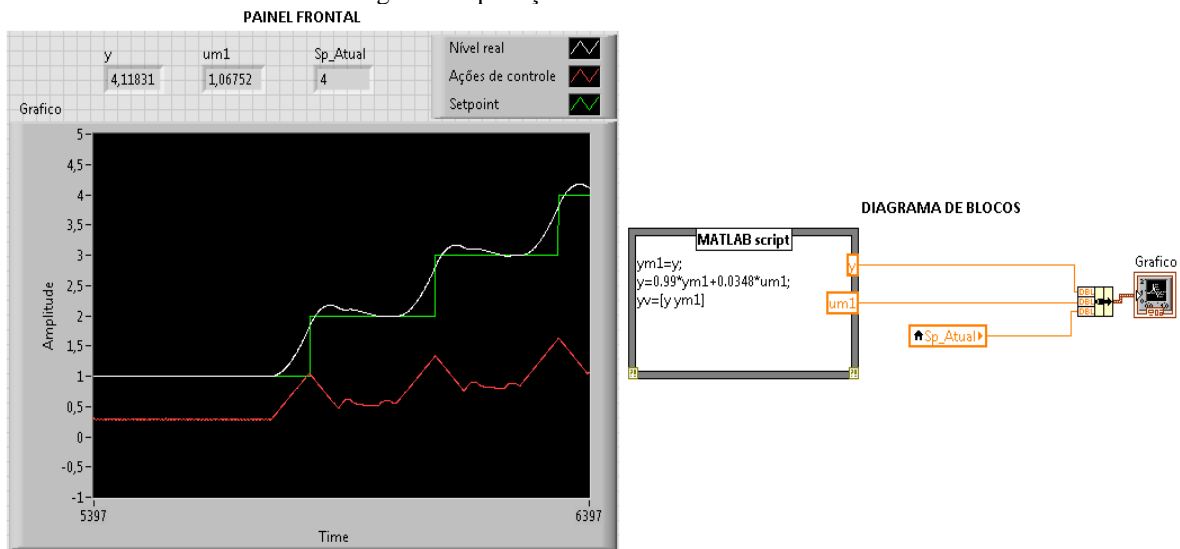
$$y_{\min} \leq y(t + k) \leq y_{\max} \quad (2)$$

## 2.2 Princípios básicos de LabVIEW e MATLAB

O software LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) é uma linguagem de programação gráfica, que tem o intuito de simular e manipular modelos de fluxos de dados. O programa é dividido entre o painel frontal (front panel) e o diagrama de blocos (block diagram), no painel frontal o usuário pode acessar os dados e ilustrar a simulação de forma gráfica. No diagrama de blocos o programador implementa a lógica e simula os resultados como na “Figura 5”, que ilustra a interface do painel frontal juntamente com o diagrama de blocos de modo a simular de forma gráfica a resposta devido a ação de controle do DMC.

O software Matlab tem encontrado vasta aplicabilidade na Engenharia, tanto do ponto de vista técnico como educacional. Os diversos recursos disponíveis no Matlab podem ser utilizados na resolução de problemas em diferentes áreas, além de permitir ao professor transmitir aos alunos tópicos da disciplina complexos de serem ministrados em sala de aula com quadro e giz (MARIANI, 2002). Um recurso importante é a interação direta entre os dois softwares através da função “*MATLAB script*” onde o programador consegue fazer operações algébricas no LabVIEW, utilizando linguagem padrão de programação. As “Figura 2”, “Figura 3” e “Figura 5” mostra como esse recurso é implementado. Na “figura 5” para gerar a saída “ $y$ ” a um “*setpoint*” desejado, o controlador calcula a ação de controle ( $\Delta u$ ) através de seus parâmetros mostrados nas figuras “Figura 2” e “Figura 3”, e será detalhado na simulação do controlador DMC aplicado a uma planta didática.

Figura 5: Aplicação no LabVIEW e MATLAB



### 3 EXEMPLO DE SIMULAÇÃO

Nesta seção será apresentada a implementação de um simulador usando a técnica de controle preditivo DMC. A planta será substituída em primeiro plano, por um modelo de primeira ordem para os parâmetros de simulação da “Tabela 1”.

Tabela 1 – Parâmetros da planta para simulação

Kp	3,5
$\tau$ (ms)	100
u(mim)	0,5
u(max)	4,5
y(mim)	0,5
y(max)	4,5

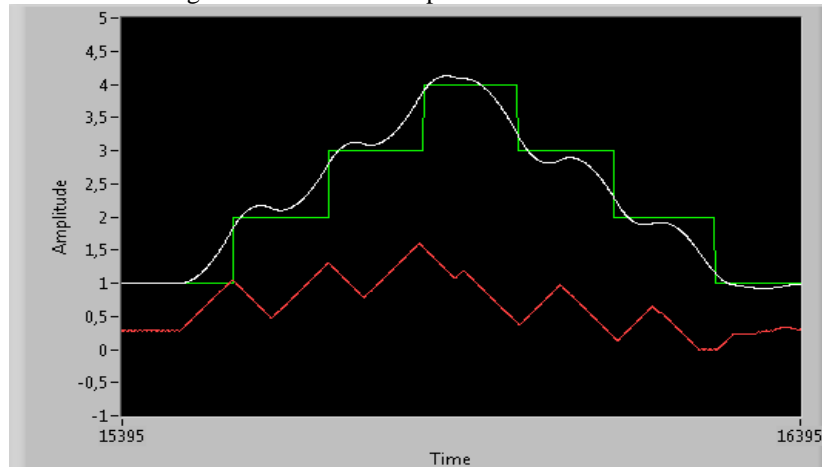
Cálculos foram feitos para sintonizar os parâmetros da planta com os parâmetros controlador DMC para chegar na resposta da “Figura 6”. A “Tabela 2” demonstra tal sintonia para o cálculo de “D” conforme a “Figura 3”.

Tabela 2 – Parâmetros do DMC

hc	1
hp	19
N	80
alfa	0
delta	1

O gráfico na “Figura 6”, demonstra a ação do controlador para uma planta de nível, onde o programador define a trajetória através de um vetor de *setpoint* (linha verde) na “Figura 6” que determina a referência da trajetória (W) como na “Figura 2-b”. Tendo esses parâmetros, o otimizador (D) prevê o próximo setpoint, logo se antecipa a ação de controle (linha vermelha) na “Figura 6” tendo em vista que o modelo da planta é conhecido pelo controlador.

Figura 6 - Simulador da planta no LabView



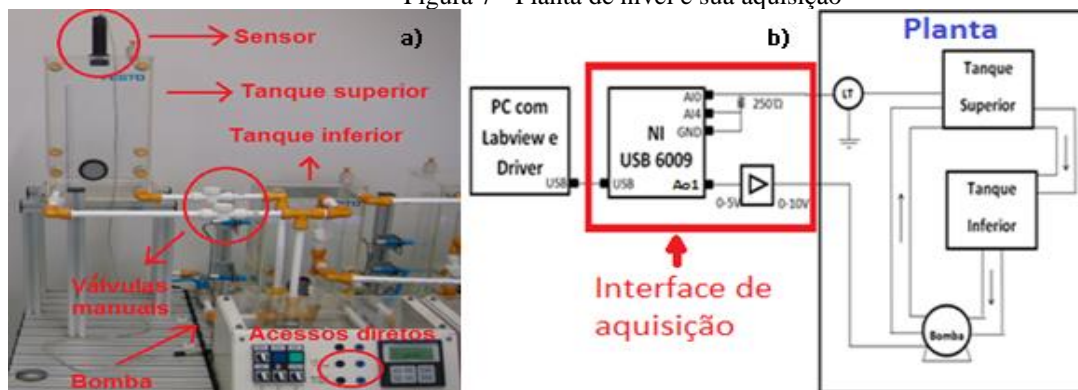
Por isso se faz necessário obter o limite da variação de entrada, devido a função “quadprog” que determina a ação de entrada para chegar ao *setpoint* definido. O simulador acima, poderia ser aplicado a qualquer processo, mas de forma didática a planta de nível foi escolhida com intuito de facilitar o entendimento da teoria DMC. As restrições da planta física a qual foi aplicado o controlador deve ser levado em consideração e será detalhada no próximo tópico.

## 4 APLICAÇÃO PRÁTICA

Nesta seção será apresentada a planta que foi utilizada para simular e aplicar o controlador DMC e a resposta da planta quando aplicado ao controlador. Por ser uma planta de nível e com poucas restrições poderia ter sido aplicado ao controlador PID, mas para um melhor entendimento do DMC sua aplicação será na planta de nível de forma didática.

### 4.1 Planta

Figura 7 - Planta de nível e sua aquisição



A planta de nível é constituída de um tanque superior, outro inferior e uma bomba que leva água entre os tanques como representada na “Figura 7-a” que encontra se no laboratório de controle do Instituto Federal do Espírito Santo (IFES) campus Serra. Para obter o nível da planta utilizou se uma placa de aquisição que mede o nível do tanque superior através de uma entrada analógica e uma bomba que é acionada através de uma saída analógica. Isso é possível devido a interligação entre a planta e a placa que pode ser observado na “Figura 7-b”.

A aquisição de dados é através de uma interface que recebe o sinal do sensor por corrente de 0 a 20 mA onde uma resistência de 250 ohms converte em tensão de 0 a 5V, devido a placa que trabalha com essa faixa, tanto que para acionar a bomba é por tensão de 0 a 10V e nessa relação placa-bomba usa se um amplificador de ganho dois para trabalhar com o máximo da bomba, devido à restrição da placa de aquisição.

#### 4.2 Placa de aquisição

A aquisição de dados é obtida através da placa NI USB-6009 na “Figura 8”, que utiliza entradas e saídas analógicas do software Measurement & Automation Explorer da National Instruments® onde os drivers da placa são instalados, criando a comunicação entre a planta e a placa.

Figura 8 - Foto da placa NI USB 6009



#### 4.3 Resultados práticos

Após a simulação do controlador e a comunicação entre a planta, a placa de aquisição e a comunicação da planta com o programa no LabVIEW. É necessário obter o modelo da planta para então adaptar o simulador, de forma a obter resposta do controle tanto na planta quanto no programa.

Para isso foi definido a tensão máxima e mínima da bomba considerando as restrições citadas no tópico acima, e o limite máximo e mínimo do nível, para que o controle opere nessa faixa, conforme a “Tabela 3”. Os degraus no gráfico (linha vermelha) da “Figura 9”, são os *setpoint* pré-definidos para o controle da trajetória. Os parâmetros do controlador foram os mesmos usados na simulação conforme a “Tabela 2”.

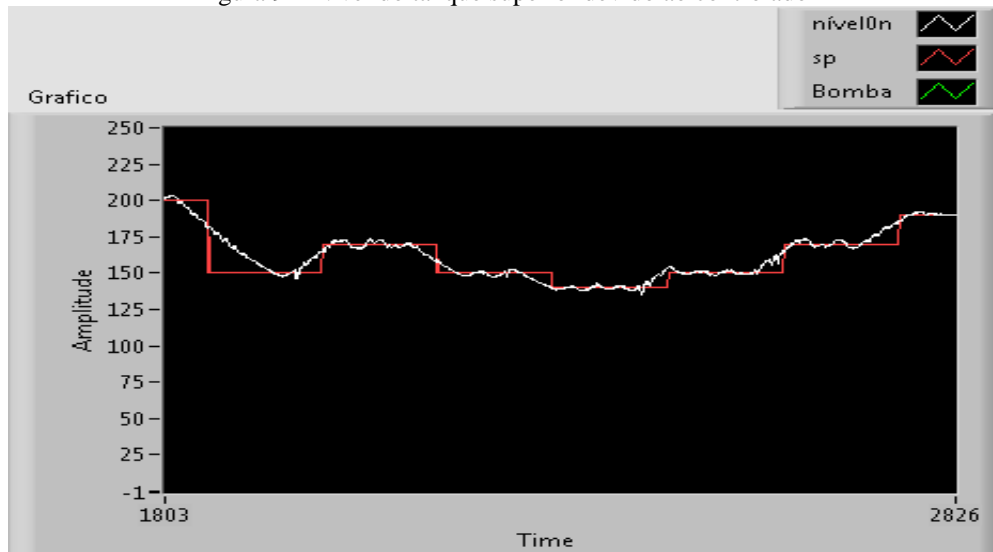
O controle de nível no gráfico (linha branca) da “Figura 9”, respondeu de forma satisfatória a aplicação na planta. E pode ser observado na “Figura 9”, logo a resposta do nível devido á previsão do controlador DMC foi aproximada ao setpoint desejado, chegando ao objetivo final.

Tabela 3 – Parâmetros da planta

Kp	3,5
$\tau$ (ms)	100 ms
u(mim)	0,5 V
u(max)	4,5 V
y(mim)	25 mm
y(max)	200 mm



Figura 9 – Nível do tanque superior devido ao controlador



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um controlador DMC usando simulação e implementação prática a uma planta didática. Com intuito de demonstrar como pode ser feita a abordagem do controlador DMC em instituições acadêmicas para incentivar, aplicar e desenvolver outras técnicas de controle na prática, tais como disciplinas de controle e automação. Motivando os alunos a ter vivência laboratorial e conseqüentemente experiência nas aplicações e no meio profissional, principalmente no controle preditivo e suas aplicações. Mostrando também o uso de simuladores que são muito importantes nas disciplinas de controle, permitindo o aluno aprimorar seus conhecimentos e técnicas neste ambiente de simulação. A planta didática foi utilizada para reforçar o conhecimento teórico com o prático.

Como trabalho futuro é sugerido que o controlador DMC seja implantado na planta de nível simuladora do molde disponível no laboratório de pesquisa do IFES/Serra, assim o mesmo poderá ser analisado perante perturbações periódicas, como foi feito com o controle *Repetitive Generalized Predictive Control*, R-GPC (CRUZ, 2015).

### Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPES - Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo e ao Instituto Federal do Espírito Santo pelo fomento à pesquisa e desenvolvimento. E ao grupo de Automação Industrial (GAIIn) campus Serra que deu suporte para desenvolver este artigo.

## REFERÊNCIAS

Cruz, Daniel Miranda. **Estruturas de Controle Preditivo Repetitivo Baseadas na Formulação GPC**. 2015. 108f. Dissertação (mestrado) - Curso de Engenharia de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015.Cap.2.

MARIANI, V. C. Laboratório Computacional na Disciplina de Cálculo Numérico: um Relato. In: XXX - Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia. **Anais**. Piracicaba, 2002.

OLIVEIRA NETO, Mardoqueu de; ALMEIDA, Gustavo M. de. Elaboração de um Toolbox de Controle Preditivo do Tipo Controle Preditivo por Matriz Dinâmica (DMC) no SCAILAB: o engenheiro professor e o desafio de educar. In: XL Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2012, Belém. **Anais**. Belém, 2012.

PEREIRA, Rogerio Passos do Amaral. **Implementação do Controlador Preditivo Multivariável DMC em uma planta Piloto**. 2011. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2011. Cap.4.

RAIMUNDO, Augusto dos Santos. **Simulação de um Controlador Preditivo Baseado em Modelo com Termo Integral**. 2013. 27 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Controle e Automação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Cap. 3.

## **DMC CONTROLLER APPLIED TO A LEVEL PLANT DIDACTIC FOR AN APPLICATION IN ENGINEERING**

**Abstract:** *Control engineering courses need to keep up to date with the most modern control techniques. The DMC (Dynamic Matrix Control) control has been widely used in industries, so this work presents an application of this controller in a didactic plan allowing future engineers to become qualified in this technique. It will be presented the development of the simulator and of a practical application in the level didactic plant. LabVIEW and MATLAB software will be used as computational tools.*

**Keywords:** Didactic Plant, DMC controller. LabVIEW. MATLAB.