

## **Resumo**

ProtoPLC propõe um sistema de simulação de processos modular que permite reduzir custos e, ao mesmo tempo, liberdade para a criação de grande variedade de simulações de processos industriais, facilitando a compreensão durante os estudos de Automação Industrial nas disciplinas que tratam de controladores lógicos programáveis. O aperfeiçoamento posterior dos dispositivos apresentados permite que também possam ser utilizados equipamentos de instrumentação e controle, ampliando assim sua aplicação nas instituições de ensino técnico.

Palavras Chave: Simulação; Processo Industrial; Eletrônica Digital;

## Sumário

Resumo .....	1
Sumário.....	2
1 Introdução.....	3
2 Simulação por meio de um sistema modular.....	4
3 Sistema de controle básico.....	4
3.1 Alimentação, sincronia e velocidade de simulação .....	5
3.2 Comunicação bidirecional entre dispositivos .....	6
3.3 Comunicação entre controladores programáveis e dispositivos simuladores.....	9
4 Dispositivos simuladores .....	11
4.1 Simulador de Válvula.....	12
4.1.1 Lógica de funcionamento .....	12
4.1.2 Construção .....	13
4.2 Simulador de Bomba.....	13
4.2.1 Lógica de funcionamento .....	14
4.2.2 Desenvolvimento.....	15
4.3 Simulador de Tanque .....	17
4.3.1 Lógica de funcionamento .....	17
4.3.2 Desenvolvimento.....	21
5 Aperfeiçoamento do sistema de simulação .....	22
6 Conclusão .....	23
7 Bibliografia .....	24

# 1 Introdução

Hoje em dia, todos os processos industriais utilizam alguma forma de controle automatizado, seja fazendo uso apenas de instrumentação discreta ou até mesmo de contrails de controle com vários controladores programáveis. Com isso, o estudo de Automação Industrial se torna cada vez mais essencial.

O treinamento em Automação Industrial, especialmente nos estudos de Controladores Lógicos Programáveis e Instrumentação, faz uso de algumas ferramentas para facilitar no aprendizado do estudante, como representações miniatura de vários equipamentos utilizados em processos industriais, e também de alguns programas simuladores.

No entanto, essas ferramentas didáticas têm algumas limitações. No caso das representações miniatura, geralmente não conseguem fazer a representação de um processo completo: apenas mostram como cada equipamento funciona, isoladamente. Quando o fazem, exigem uma grande área disponível para a instalação dos vários equipamentos necessários para a simulação de um processo simples; neste caso, se perde também a flexibilidade de criar uma simulação durante as aulas. Já os programas simuladores podem ter uma das seguintes limitações: ou possuem um conjunto pré-definido de processos simulados, não permitindo ao professor criar processos personalizados adequados ao nível de conhecimento atual do estudante; ou são extremamente complexos e, se utilizado em aula, exigiriam um tempo grande apenas para preparar uma simulação para posteriormente ser estudada. Outra complicação inerente dos programas simuladores que permitem total personalização é o alto preço e complexidade, exigindo treinamento específico dos professores para o uso eficiente deles.

Essas limitações se tornam mais aparentes quando o aluno vai fazer uso do próprio controlador programável, momento em que a falta de uma simulação do processo sendo estudado faz com que ele tenha bastante dificuldade em perceber a lógica necessária para realizar o exercício proposto pelo professor. Como o aluno de Automação Industrial normalmente não tem

familiaridade com algoritmos e lógica de programação é extremamente difícil para ele criar, em um curto espaço de tempo, o nível de raciocínio abstrato necessário para programar um processo sem poder verificar, em tempo real, os resultados de sua programação e assim poder corrigir suas falhas.

A necessidade de existir um sistema de simulação que fosse simples de utilizar, simples de criar simulações específicas, e ao mesmo tempo eficiente em auxiliar no estudo de controladores programáveis, de modo interativo e em tempo real, é que motivou a criação deste projeto, Proto-PLC.

## **2 Simulação por meio de um sistema modular**

A fim de permitir que o sistema seja utilizado para simular vários processos diferentes, torna-se necessário que ele seja composto por várias partes diferentes, cada parte simbolizando um equipamento utilizado em processos industriais como válvulas, bombas, tanques de armazenamento, esteiras, etc. Estes vários dispositivos diferentes devem também ter a capacidade de responder, de modo visual ou sonoro, aos estímulos externos, como acionamento de botões e dos próprios controladores programáveis, assim como os equipamentos industriais.

Para simplificar o desenvolvimento destes dispositivos, se torna necessário a padronização de algumas destas características, como o método utilizado para a comunicação entre os próprios dispositivos para permitir a simulação, de fato, de um processo industrial.

## **3 Sistema de controle básico**

Para conferir modularidade ao sistema de simulação, faz-se necessário que cada um dos dispositivos seja independente do outro, de forma que cada um deles possa representar uma função específica no objetivo de simular um processo.

Uma característica comum nos equipamentos utilizados em processos é que quase todos funcionam com o princípio que utilizam algum

material alimentado em sua entrada, o modificam de acordo com sua função, e entrega o resultado em uma saída, sendo este material resultante utilizado por outro equipamento, e assim por diante.

Podemos assim estabelecer padrões para que cada um destes dispositivos possa transmitir seu estado atual para os outros dispositivos conectados, de acordo com a lógica do processo sendo simulada pelo sistema, da mesma maneira que os equipamentos reais, recebendo o estado de um dispositivo instalado anteriormente por uma porta de entrada, e enviando seu estado para os dispositivos posteriores por uma porta de saída.

Outra preocupação é quanto a qual tipo de circuito seria utilizado para o desenvolvimento das lógicas de cada função, considerando o tipo de alimentação, potência máxima de operação, e simplicidade de fabricação e manutenção. Como o objetivo principal do sistema é ser utilizado em sala de aula, próximo a computadores, a utilização da alimentação disponível nos conectores USB é uma opção atraente, e isto vai determinar o tipo de circuito a ser utilizado no desenvolvimento dos circuitos.

### **3.1 Alimentação, sincronia e velocidade de simulação**

A adoção de um sistema digital como o TTL ou CMOS é extremamente atraente, já que pode ser utilizados na mesma tensão de 5V, padrão nos conectores USB. Para minimizar a potência total da simulação, o padrão CMOS foi escolhido, fazendo com que o sistema possa operar utilizando apenas um conector USB, disponível em praticamente todos os computadores atuais.

Convenientemente, como a alimentação regulada de 5V exigida por sistemas TTL/CMOS está disponível no padrão USB, não se faz necessário um circuito específico para regulação de tensão, simplificando a alimentação.

Um circuito centralizado foi utilizado com a função de distribuir a alimentação para outros dispositivos, a fim de evitar que cada dispositivo tivesse que comportar fisicamente uma entrada USB, e assim multiplicando a quantidade de cabeamento e portas necessárias.

Alguns dos dispositivos podem utilizar lógicas que conferem certo tempo de resposta aos estímulos externos de outros dispositivos ou na indicação de estados internos de sua própria lógica para conferir certa interatividade ao sistema. Nestes casos, uma forma de calcular o tempo necessário para cada ação se faz necessário.

Cada dispositivo poderia ter em seu circuito uma lógica específica de temporização, mas isto criaria dificuldades quanto à sincronização de tempo entre vários dispositivos diferentes, além do aumento no tamanho físico do circuito.

Assim como no caso da alimentação, um circuito temporizador central, tendo como base o CI LM555, é utilizado para gerar os pulsos digitais que dão a noção de tempo e sincronia para os dispositivos que necessitam de temporização. O sinal então é propagado para todos os dispositivos simuladores que podem ou não fazer uso dele. Este circuito também faz a regulação da velocidade do ciclo de pulsos, dando a possibilidade de ajustar a velocidade com a qual essas lógicas interativas são processadas. O circuito temporizador é configurado de maneira que a frequência do pulso seja de 0,5Hz até 2Hz, conferindo a simulação o controle da velocidade com a qual os eventos simulados acontecem.

Tanto a alimentação quanto o sinal temporizador são enviados para todos os dispositivos simuladores. O posicionamento dos conectores de alimentação foi padronizado na parte inferior dos dispositivos, centralizado horizontalmente, com os pinos na sequência **5V**, **PULSO** e **GND** (terra).

### **3.2 Comunicação bidirecional entre dispositivos**

Aproveitando novamente que um processo industrial pode ser resumido em um material passando de equipamento em equipamento até o resultado final, podemos simplificar a comunicação entre os dispositivos utilizando os estados **VERDADEIRO** e **FALSO** da lógica binária para indicar se o material está fluindo entre os dispositivos, baseado no estado atual de cada dispositivo. Assim, podemos definir que cada dispositivo emite para o

dispositivo posterior se existe material fluindo entre eles. Vejamos como exemplo o processo a seguir:



**Figura 1 Processo industrial simples**

Neste processo, podemos entender que só fluirá material da bomba para o tanque caso a bomba estiver ligada, e só fluirá material do tanque para a válvula caso o tanque tenha material suficiente. O estado de cada um dos equipamentos determina se há fluxo de material entre eles.

Traduzindo isto para um sistema digital, podemos convencionar que quando a bomba estiver em funcionamento, ela envia um sinal VERDADEIRO para o tanque, estabelecendo o fluxo de material entre os dois dispositivos. O tanque assim pode alterar seu estado interno de acordo com o sinal recebido na sua entrada digital, representando que existe material sendo armazenado. Nesta situação, o tanque envia um sinal VERDADEIRO para a válvula, indicando para ela que existe material disponível e que este pode ser direcionado para outro dispositivo. Quando a bomba for desligada, ela deixa de enviar produto para o tanque, desfazendo o fluxo de material. Neste caso, ela envia um sinal FALSO para o tanque, este podendo deixar de mudar seu estado interno e manter a quantidade atual de material.

Ao mesmo tempo, certos dispositivos necessitam da informação sobre o uso do fluxo de material feito pelo dispositivo posterior. No caso do tanque, a quantidade interna de material só diminuirá caso a válvula seja acionada; neste caso, a válvula envia para o tanque o sinal VERDADEIRO, indicando que qualquer material enviado para ela está sendo devidamente encaminhado para o dispositivo posterior. Enquanto a válvula estiver desligada, ela impede o fluxo de produto; neste caso, a válvula envia para o tanque o sinal FALSO, indicando que não há a possibilidade de fluxo de material.

Portanto, foi padronizado que cada dispositivo simulador deve ter pelo menos uma **entrada bidirecional** e uma **saída bidirecional**. Em cada uma destas portas existem dois conectores: um *positivo*, onde o dispositivo recebe informação de outro dispositivo, e um *negativo*, onde ele envia informações para outro dispositivo.

Na **porta de entrada**, cada conector funciona da seguinte maneira:

- No conector “*positivo*”, o dispositivo **recebe** VERDADEIRO se o dispositivo anterior está tentando enviar material adiante, ou FALSO caso contrário.
- No conector “*negativo*”, o dispositivo **envia** para o dispositivo anterior VERDADEIRO se há a possibilidade do recebimento do fluxo de produto, ou FALSO caso contrário.

Na **porta de saída**, cada conector funciona da seguinte maneira:

- No conector “*positivo*”, o dispositivo **recebe** VERDADEIRO se o dispositivo posterior tem a possibilidade de receber o fluxo de material, ou FALSO caso contrário.
- No conector “*negativo*”, o dispositivo **envia** para o dispositivo posterior VERDADEIRO se ele tem condições de enviar um fluxo de material, ou FALSO caso contrário.

Na construção física de cada dispositivo, também se padronizou o posicionamento destas portas, para evitar confusão na conexão desta comunicação entre dispositivos. Posicionados na parte superior de cada dispositivo estão as portas: a de entrada, comunicando com o dispositivo anterior, localizado na esquerda; a de saída, comunicando com o dispositivo posterior, localizado na direita. Os nomes “entrada” e “saída” são utilizados a fim de ter similaridade com a direção de leitura, indicando o fluxo de material no processo da esquerda para a direita. Os conectores são pareados de forma que a **saída negativa** seja ligada a **entrada positiva**, na parte mais superior, comunicando da esquerda para a direita, ou seja, do dispositivo anterior para o posterior, e a **entrada negativa** seja ligada a **saída positiva**, abaixo do par anterior, numa comunicação da direita para a esquerda, ou seja, do dispositivo posterior para o anterior.



Com esta configuração de comunicação bidirecional, várias lógicas complexas podem ser incorporadas nas lógicas de cada dispositivo, como, por exemplo, a simulação de sobrecarga da bomba no exemplo anterior, caso ela seja acionada sem que o tanque tenha espaço para receber o fluxo de produto. Neste caso, apesar da bomba enviar VERDADEIRO para o tanque, o tanque responde com FALSO, indicado que não há possibilidade para esse fluxo ocorrer. Quando isto acontece, uma lógica no dispositivo simulador de bomba pode acionar um aviso de sobrecarga, dando ao aluno o estímulo necessário para a correção de sua programação.

O fluxo de produto pelo simulador pode ser iniciado fazendo uma junção das conexões de entrada: ligando a entrada negativa na entrada positiva, criamos o início de fluxo, uma alimentação infinita de produto, desde que o estado do dispositivo inicial permita o início do fluxo. Quando este dispositivo estiver pronto para receber fluxo, o envio do sinal VERDADEIRO pela entrada negativa é recebido pela entrada positiva, criando assim uma alimentação inicial.

Da mesma maneira, a saída final do produto pode ser estabelecida fazendo uma junção das conexões de saída: ligando a saída negativa na saída positiva, temos um dreno de produto. Sempre que o último dispositivo estiver em condições de enviar produto para o fim, o próprio sinal VERDADEIRO enviado é realimentado, sempre dando condições para a saída de produto.

### **3.3 Comunicação entre controladores programáveis e dispositivos simuladores**

Alguns dispositivos simuladores têm, em sua lógica funcional, outros tipos de comunicação, além da que acontece entre outros dispositivos. No caso de um dispositivo que simula uma válvula, este apenas permitiria o fluxo de material entre dois dispositivos conectados a ele caso este seja acionado por um estímulo externo, como um botão ou outro tipo de acionamento. Já no caso de um dispositivo que simula o armazenamento de material, a indicação de que ele está cheio ou vazio deve ser direcionado

para o controlador programável, para que este possa responder devidamente de acordo com sua programação, enviando sinais para outros dispositivos ou até mesmo para indicadores utilizados pelo aluno.

As entradas digitais básicas para que os controladores programáveis possam enviar informações digitais para os dispositivos são compostas de diodo de proteção, para evitar inversão de polaridade; isolador ótico como o 4N35, para fazer o acionamento com uma tensão diferente da tensão de trabalho dos dispositivos; e um resistor para limitar a corrente da conexão. Como a corrente utilizada por cada dispositivo simulador é muito pequena, apenas uma pequena corrente do lado de acionamento é necessária para que seja transmitida a informação. Para o acionamento usando corrente direta numa faixa de tensão entre 5V e 24V, um resistor de  $3,3k\Omega$  é suficiente, gerando uma corrente máxima de 6,76mA. Esta faixa de operação foi determinada considerando as faixas de tensão mais comuns nos controladores programáveis, tanto de baixo custo quando de uso industrial.

As saídas digitais utilizadas pelos dispositivos para o envio de informação para os controladores programáveis são compostas de acionamento via relés comutadores, dando flexibilidade em como fazer a ligação elétrica destas saídas, podendo ser utilizados tanto nas entradas digitais dos controladores programáveis quanto diretamente em comandos elétricos, desde que estes acionamentos estejam dentro dos limites dos relés. O acionamento dos relés é feito pelo próprio circuito do dispositivo, utilizando relés de acionamento de 5V. Em paralelo a este acionamento é colocado um diodo polarizado inversamente, para que a tensão reversa gerada no desligamento do solenoide do relé não prejudique o restante do circuito.

Também foi padronizado o posicionamento destas portas. Assim como na comunicação entre dispositivos, utiliza-se o padrão de leitura para definir este posicionamento: na parte inferior dos dispositivos, o lado esquerdo é dedicado para as entradas digitais, e o lado direito para as saídas digitais.

Esta comunicação externa dos dispositivos com os controladores permite que o sistema tenha o mesmo comportamento dos equipamentos

utilizados nos processos industriais, detalhe essencial no objetivo de realizar uma simulação interativa, que facilite o aprendizado dos estudantes de automação.

## 4 Dispositivos simuladores

Depois de definidos os padrões básicos de funcionalidade que devem ser respeitadas por cada dispositivo simulador, cada um deles pode ser desenvolvido considerando apenas sua função, sem a necessidade de comunicação específica de cada tipo de dispositivo diferente. Este é um detalhe essencial na modularização do sistema simulador, dando liberdade no desenvolvimento de vários dispositivos para cada tipo de equipamento utilizado em processos industriais.

Neste primeiro momento, podemos desenvolver alguns dispositivos para uma simulação simples, mas bastante eficiente para demonstrar a funcionalidade deste sistema.

A seguir, utilizaremos as seguintes definições para nos referirmos às entradas e saídas padrões dos dispositivos:

$E^+ = \text{Entrada Positiva};$

$E^- = \text{Entrada Negativa};$

$S^+ = \text{Saída Positiva};$

$S^- = \text{Saída Negativa};$

E o padrão binário:

$VERDADEIRO = 1;$

$FALSO = 0;$

## 4.1 Simulador de Válvula

O dispositivo mais simples que pode ser desenvolvido é o simulador de válvula. Sua função é apenas permitir o fluxo entre dois dispositivos ligados a ele, apenas quando permitido por acionamento externo. Sem este acionamento, a válvula impede o fluxo de material, interrompendo assim o processo simulado.

Nas expressões a seguir, *A* se refere ao acionamento utilizado pela válvula para receber o comando que a liga ou desliga.

### 4.1.1 Lógica de funcionamento

Caso a válvula seja acionada, ela apenas *repete* o sinal recebido na **entrada positiva** para a saída negativa, e o sinal da saída negativa para a entrada positiva, fazendo uma ligação direta entre o dispositivo ligado na sua entrada e o dispositivo ligado na sua saída.

Caso a válvula não seja acionada, ela interrompe o fluxo do produto enviando FALSO para o dispositivo anterior via a entrada negativa, e FALSO para o dispositivo posterior via a saída positiva.

Podemos utilizar a seguinte tabela verdade para extrairmos a expressão booleana de cada situação:

Tabela 1 Tabela Verdade da Lógica de Funcionamento de uma válvula

Variáveis de entrada			Variáveis de Saída	
$E^+$	$S^+$	$A$	$S^-$	$E^-$
0	0	0	0	0
0	1	0	0	0
1	0	0	0	0
1	1	0	0	0
0	0	1	0	0
0	1	1	0	1
1	0	1	1	0
1	1	1	1	1

Temos então, as seguintes expressões booleanas:

$$S^- = A \cdot E^+$$

$$E^- = A \cdot S^+$$

#### 4.1.2 Construção

Com as expressões booleanas definidas, podemos utilizar um CI com pelo menos 2 portas AND de duas entradas, ou o mais comum CI com quadro portas NAND de duas entradas, como o CMOS 4011. Neste caso, podemos utilizar duas das quatro portas como portas inversoras, transformando o resultado das operações NAND em AND.

O circuito básico se torna o seguinte:

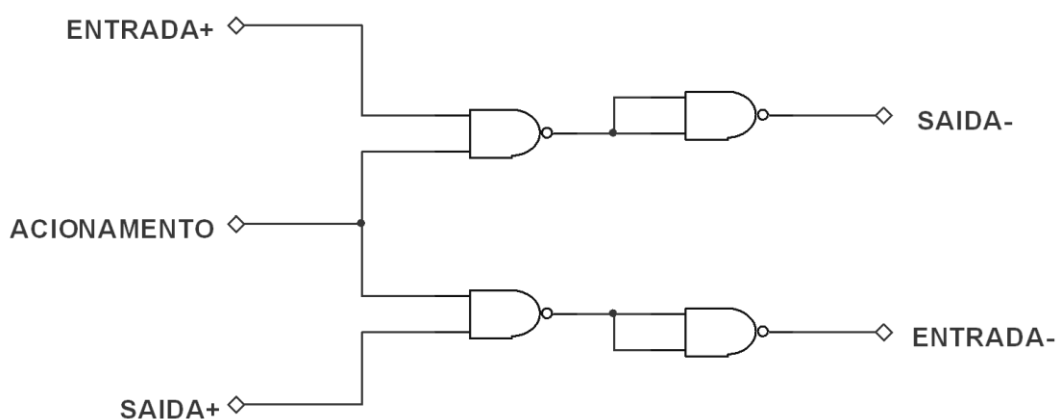


Figura 2 Circuito lógico do fluxo de produto da válvula

Além da lógica acima, também podemos adicionar uma indicação luminosa para que o estudante confirme visualmente o acionamento da válvula, que é ligada quando a válvula recebe o comando do controlador.

#### 4.2 Simulador de Bomba

O dispositivo simulador de bombeamento de produto pode ser simplificado de maneira a ser considerado basicamente uma válvula. Quando acionado, ele bombeia para o próximo dispositivo o fluído entre o dispositivo anterior e ele.

A diferença entre a bomba e a válvula é que a bomba, ao ser acionada, deve obrigatoriamente ter um fluxo de produto entrando nela, e sua saída não deve estar interrompida: se algum destes dois pré-requisitos não for atendido, a bomba pode entrar em sobrecarga e falhar. Portanto, esta verificação de sobrecarga deve ser adicionada a lógica que utilizamos no dispositivo simulador de válvula.

#### **4.2.1 Lógica de funcionamento**

Assim como a válvula, a bomba precisa apenas repetir o sinal recebido na sua entrada positiva para a saída negativa, e o sinal recebido na sua saída positiva para a entrada negativa, quando ela for acionada. Mas, ao mesmo tempo, devemos verificar se quando ela for acionada, temos condições de enviar o produto adiante, e se estamos recebendo produto do dispositivo anterior.

No caso do sinal a ser enviado na entrada negativa e na saída negativa, temos as mesmas expressões booleanas da válvula:

$$S^{-} = E^{+} \cdot A;$$

$$E^{-} = S^{+} \cdot A;$$

A condição de sobrecarga pode ser estabelecida utilizando a seguinte tabela verdade:

Tabela 2 Tabela Verdade de sobrecarga da bomba

Variáveis de Entrada			Variável de Saída
$S^+$	$E^+$	$A$	<i>Sobrecarga</i>
0	0	0	0
0	1	0	0
1	0	0	0
1	1	0	0
0	0	1	1
0	1	1	1
1	0	1	1
1	1	1	0

Então temos:

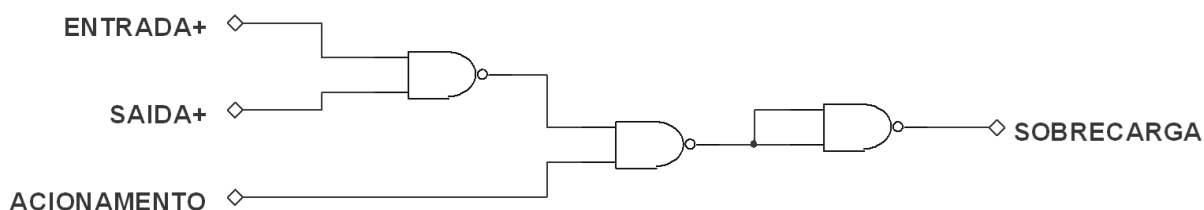
$$Sobrecarga = A \cdot \overline{S^+} + A \cdot \overline{E^+} \rightarrow A \cdot (\overline{S^+} + \overline{E^+});$$

portanto:

$$Sobrecarga = A \cdot \overline{(S^+ \cdot E^+)};$$

#### 4.2.2 Desenvolvimento

Aproveitando o desenvolvimento feito no dispositivo de válvula, podemos simplesmente repetir o mesmo circuito lógico desenvolvido anteriormente para a lógica de fluxo do produto no simulador. Para a lógica de sobrecarga, como fica óbvio na expressão o uso da função NAND, podemos utilizar mais um CI 4011 para desenvolvê-la.

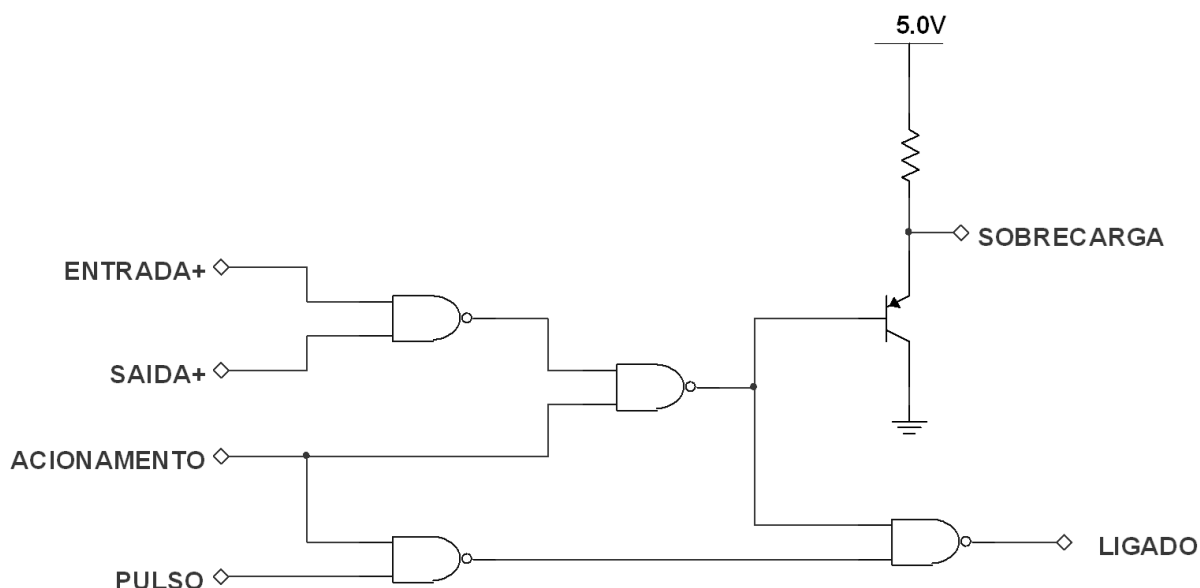


**Figura 3 Circuito Lógico da sobrecarga de uma bomba**

Na construção física do simulador de bomba, podemos substituir a porta inversora final do circuito acima por um transistor NPN, no acionamento do indicador luminoso de sobrecarga.

Com o uso de apenas duas das quatro portas lógicas disponíveis no CI 4011, podemos utilizar as outras duas restantes para criar uma lógica de indicador de bombeamento, onde o indicador luminoso pisca em sincronia com o gerador de pulso para indicar o funcionamento correto da bomba. Em caso de sobrecarga, o indicador de funcionamento se mantém ligado, ao mesmo tempo em que o indicador de sobrecarga está ligado.

Portanto, o circuito completo seria:



Definida a lógica de acionamento de sobrecarga, a saída é utilizada também para o acionamento do relé de comunicação externa para dar o *feedback* necessário ao controlador programável e ao estudante, que pode fazer as correções necessárias em sua lógica para evitar a sobrecarga da bomba no processo simulado.



## 4.3 Simulador de Tanque

O último dispositivo desenvolvido para demonstração do processo simples mencionado anteriormente é o simulador de armazenamento de produto, ou tanque. Neste dispositivo, devemos utilizar alguma forma de manter uma contagem ascendente e descendente do volume de produto armazenado no dispositivo. Além disso, uma série de indicadores luminosos também pode ser utilizada para que o estudante possa ter a confirmação visual desta acumulação de produto.

Como temos esta necessidade de aumentar e diminuir a quantidade de produto acumulado no dispositivo, devemos utilizar um contador com a capacidade de aumentar ou diminuir o valor armazenado em sua lógica interna. Para isto, utilizaremos o CI 4029, um contador Binário/Década que consegue aumentar ou diminuir o valor acumulado.

Também importante para o desenvolvimento da lógica do controlador programável é a indicação dos níveis baixo e alto, quer dizer, o aviso de quando o tanque estiver vazio e quando estiver cheio. Estes dois estados também influenciam em como o fluxo de produto se comporta no processo simulado.

### 4.3.1 Lógica de funcionamento

Podemos simplificar a criação da lógica de funcionamento do tanque dividindo-a em partes distintas, onde os resultados podem ser utilizados em outras lógicas:

- Lógica de Armazenamento: onde decidimos se vamos aumentar ou diminuir a quantidade de produto acumulado;
- Lógica de Nível: onde convertemos o valor acumulado para vários níveis diferentes, como **vazio**, **cheio**, e os valores intermediários como 25%, 50% e 75%.

Além das duas lógicas principais, também temos a lógica de fluxo, onde enviamos a confirmação de que o tanque pode receber produto para o dispositivo anterior quando ele não estiver **cheio**, e que há produto para ser

enviado adiante quando ele não estiver **vazio**. Esta é uma lógica simples, que envia a informação para os dispositivos conectados ao tanque:

$$S^- = \overline{VAZIO}; e$$

$$E^- = \overline{CHEIO}$$

#### 4.3.1.1 Lógica de Nível

A lógica de nível tem como entrada o valor em BCD das saídas A, B, C do CI 4029. Já que definimos os níveis desejados de saída, 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, podemos utilizar apenas 3 bits da saída do CI, os valores de 0 até 4.

Outra consideração importante é que os níveis são acionados sequencialmente; cada nível superior também aciona os níveis anteriores. Com isso, caso estejamos a 50% do nível, tanto o indicador de 50% quanto o indicador de 25% estarão acionados. A única exceção é o nível de 0%: como ele é utilizado apenas para a lógica interna, a informação importante para a lógica é se temos **qualquer** nível ou não: na falta de qualquer nível, obviamente estaríamos no nível vazio.

Teremos então a seguinte tabela verdade:

Entradas			Saídas				
<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	VAZIO	25%	50%	75%	CHEIO
0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0	0	0
0	1	0	0	1	1	0	0
0	1	1	0	1	1	1	0
1	0	0	0	1	1	1	1

De onde podemos tirar as seguintes expressões:

$$CHEIO = C;$$

$$75\% = AB + CHEIO \rightarrow AB + C;$$

$$50\% = \bar{A}B + 75\% \rightarrow \bar{A}B + AB + C \rightarrow B + C;$$

$$25\% = A + 50\% \rightarrow A + B + C; e$$

$$VAZIO = \bar{A}\bar{B}\bar{C} \text{ ou } \overline{25\%} \rightarrow \overline{(A + B + C)}$$

#### 4.3.1.2 Lógica de Armazenamento

A função da lógica de armazenamento é definir como configurar as portas  $UP/\overline{DOWN}$  e  $\overline{CLOCK\,ENABLE}$  do CI 4029. De acordo com sua documentação, quando a entrada  $UP/\overline{DOWN}$  estiver em VCC, o pulso recebido em  $CP$  faz com que o contador aumente o valor atual em 1; caso a entrada  $UP/\overline{DOWN}$  estiver em GND, ele subtrai 1 do valor armazenado. Em ambos os casos, se  $\overline{CLOCK\,ENABLE}$  estiver em VCC, ele impede a alteração do valor atual. Portanto, ao criar a expressão lógica para calcular o estado de  $\overline{CLOCK\,ENABLE}$ , devemos considerar que a entrada é invertida.

Para representar a lógica de funcionamento do tanque em si, devemos considerar o fluxo atual de produto: se o tanque estiver recebendo produto e não estiver enviando produto para o próximo dispositivo, a quantidade de material armazenado aumenta; se o tanque não estiver recebendo produto e o próximo dispositivo estiver recebendo o produto armazenado no tanque, a quantidade de material armazenado diminui. Quando o tanque recebe produto ao mesmo tempo em que ele é recebido pelo dispositivo posterior ou quando ele não recebe nem tem o material armazenado consumido, então não alteramos nada e o tanque funciona basicamente como a válvula. Podemos verificar se o tanque está recebendo produto através da entrada positiva, e se o produto está sendo utilizado pela saída positiva. Outro dado importante é que não podemos aumentar o valor quando o tanque estiver CHEIO, e não podemos diminuir o valor quando o tanque estiver VAZIO.

Podemos utilizar a seguinte tabela verdade, removendo os casos de VAZIO e CHEIO estarem em 1 ao mesmo tempo, já que esta é uma condição impossível:

Entradas				Saídas	
$E^+$	$S^+$	VAZIO	CHEIO	CLOCK ENABLE	UP/ $\overline{DOWN}$
0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0
0	0	1	0	0	0
0	1	0	0	1	0
0	1	0	1	1	0
0	1	1	0	0	0
1	0	0	0	1	1
1	0	0	1	0	1
1	0	1	0	1	1
1	1	0	0	0	1
1	1	0	1	0	1
1	1	1	1	0	1

De onde podemos retirar as seguintes expressões:

$$UP/\overline{DOWN} = E^+;$$

e, após o uso do mapa de Karnaugh:

$$CLOCK\ ENABLE = \overline{E^+}S^+\overline{VAZIO} + E^+S^+CHEIO;$$

mas como CLOCK ENABLE deve ser invertido:

$$\overline{CLOCK\ ENABLE} = \overline{\overline{E^+}S^+\overline{VAZIO} + E^+S^+CHEIO} \therefore$$

$$\overline{CE} = S^+(\overline{E^+ + VAZIO}) + E^+(\overline{S^+ + CHEIO});$$

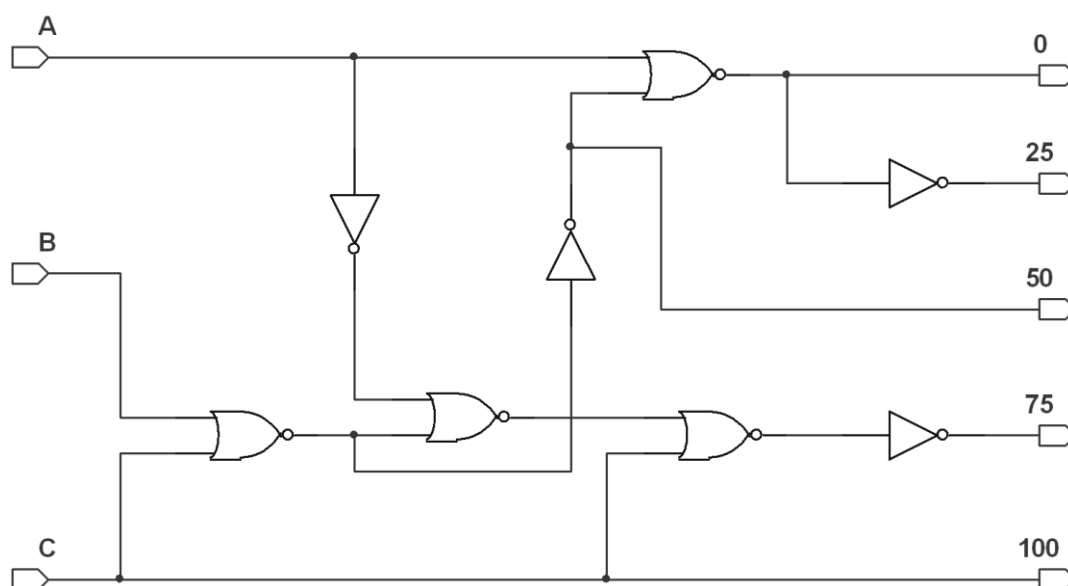
Esta expressão pode ser construída com portas NOR e NAND com facilidade.

### 4.3.2 Desenvolvimento

Para a construção da Lógica de Nível, podemos utilizar dois operadores lógicos, o CI 4001 para a função NOR e o CI 4069 para inversão das operações de NOR em OR.

Um caso em particular é o nível de 75%, o único que utiliza uma função AND em sua expressão. Podemos transformar a operação AND em NOR da seguinte forma:  $AB \rightarrow \overline{(\overline{A} + \overline{B})}$ . Mas quando o nível de 75% é alcançado, temos os seguintes estados: B em 1 e C em 0. Podemos utilizar o fato de C estar em 0 para temporariamente transformar a porta NOR em uma NOT, e este resultado ser enviado para uma das entradas de outra porta NOR com o inverso de A, configurando assim uma porta AND. Ao mesmo tempo, a porta que calcula  $\overline{B + C}$  serve para o cálculo de  $B + C$  utilizado nas expressões de 50% e 25% passando antes por uma porta NOT.

O circuito lógico então se torna:



Cada uma das saídas de 25% a 100% são então ligadas aos indicadores luminosos de nível, fazendo assim o *feedback* visual sobre o estado atual do tanque para o estudante. Os sinais de 0% e 100% também



## 6 Conclusão

Utilizar da simplicidade que a eletrônica digital oferece para assim estruturar o sistema de simulação ProtoPLC faz com que ele se torne uma alternativa muito acessível quando comparado aos outros tipos de simulação. O custo de construção de cada dispositivo é extremamente baixo devido à simplicidade e o preço dos componentes eletrônicos utilizados. Além disso, a estrutura física necessária para o uso desse sistema também fica bastante simplificada, já que as dimensões reduzidas possibilita o uso em uma mesa qualquer, apenas acompanhado dos outros equipamentos necessários para o estudo, como computador e controlador programável.

Esta simplificação e redução de estrutura física necessária também seguem a tendência da tecnologia atual, de miniaturização dos equipamentos eletrônicos: atualmente, muitos profissionais de Automação Industrial estão substituindo os grandes PLCs por sistemas menores como Arduino e RaspBerryPi.

O sistema ProtoPLC consegue, ao mesmo tempo, dar flexibilidade aos professores e alunos no estudo de vários processos industriais diferentes e reduzir os custos, tanto de aquisição de equipamento quanto de estrutura física necessária para as aulas práticas.

## 7 Bibliografia

- Fairchild. (Abril de 2015). *4N25M, 4N26M, 4N27M, 4N28M, 4N35M, 4N36M, 4N37M 6-Pin General Purpose Phototransistor Optocouplers*. Fonte: 4N25M, 4N26M, 4N27M, 4N28M, 4N35M, 4N36M, 4N37M Datasheet: <https://www.fairchildsemi.com/datasheets/4N/4N35M.pdf>
- Metaltex. (s.d.). *Relé Miniatura AX1RC-5V*. Fonte: Relé Miniatura AX1RC-5V: <http://www.metaltex.com.br/downloads/A.pdf>
- ST. (Janeiro de 2014). *HCF4069U*. Fonte: HCF4069U Hex Inverter: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/3e/c9/a7/2e/ff/04/4b/e1/CD00000391.pdf/files/CD00000391.pdf/jcr:content/translations/en.CD00000391.pdf>
- Texas Instruments. (2003). *CD4011B, CD4012B, CD4023B NAND Types*. Acesso em 2016, disponível em CD4011B NAND Gate Datasheet: <http://www.ti.com/product/CD4011B>
- Texas Instruments. (Outubro de 2003). *CD4029B Types*. Fonte: CD4029B Datasheet: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd4029b.pdf>
- Texas Instruments. (Setembro de 2003). *CD74HCT02 High Speed CMOS Logic Quad Two-Input NOR Gates*. Fonte: [www.ti.com](http://www.ti.com): <http://www.ti.com/product/CD74HCT02/technicaldocuments>
- Wikipedia. (s.d.). *Mapa de Karnaugh*. Fonte: Wikipedia: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Mapa\\_de\\_Karnaugh](https://pt.wikipedia.org/wiki/Mapa_de_Karnaugh)