

Projeto Pegasus 42

O objetivo deste workshop da Gambiconf 2025 é mostrar como os elementos mais básicos dos computadores digitais e videogames funcionam e como podem ser usados para formar blocos mais complexos até um computador completo.

Um simulador (chamado Digital) será usado para que os participantes do workshop possam experimentar todos os circuitos apresentados.

1. Chaves, Portas Lógicas, Circuitos Combinacionais

Estes são os blocos básicos dos circuitos digitais.

2. Circuitos Sequenciais

Circuitos mais complexos precisam de memória.

3. Processadores

O mcpu16h é um processador muito simples com apenas 4 instruções, servindo como uma boa introdução enquanto o drv32h é mais prático, sendo compatível com o padrão RISC-V

4. FPGAs e Shin JAMMA

Com circuitos reconfiguráveis (as FPGA - Field Programmable Gate Arrays ou matrizes de portas programáveis em campo) é possível ver os circuitos simulados funcionando no mundo real. Como existem muitas placas de FPGA diferentes foi criado o padrão Shin JAMMA para que o mesmo projeto funcione em todas elas

5. Vídeo e Áudio

Apesar de ser possível criar jogos interessante usando o terminal texto, saída gráfica colorida e som como aqueles gerados pelo clássico Nintendinho (NES ou Famicom) permitem jogos mais divertidos

6. Pegasus 42

Com memória cache e gráficos de alta resolução fica viável rodar a linguagem Squeak Smalltalk

A. História

Além do material apresentado no workshop, é incluída uma história do projeto Pegasus na forma de um apêndice.

1. Chaves, Portas Lógicas, Circuitos Combinacionais

O objetivo deste workshop é a construção de um retro computador (mais ou menos equivalente ao que as pessoas comprariam para ter em casa no início dos anos 1990) chamado Pegasus 42 e usá-lo para programar uns jogos simples. A idéia é que o projeto possa ser completamente entendido desde o nível mais baixo até o sistema em geral.

Para isso usaremos inicialmente um simulador, e depois passaremos a usar uma FPGA (Field Programmable Gate Array - um chip que pode ser reconfigurado para implementar qualquer circuito digital). Para cada nível de abstração existem vários simuladores que podemos usar. De um alto nível para baixo nível temos:

Nível	Exemplo de Simuladores
Arquitetura	QEMU, MAME
Micro-arquitetura	SPIM, SimpleScalar
Transferência de Registradores	Verilator, ModelSim
Portas Lógicas	Digital, TkGate
Chaves	IRSIM, MOSSIM
Circuitos Analógicos	Spice, Xyce
Componentes	TCAD, DEVSIM
Física	Elmer, Matlab

A vantagem de se usar um simulador ao invés do produto de verdade é poder ver detalhes que seriam muito difíceis, senão impossível, de medir no circuito real. Os simuladores de baixo nível mostram muito mais detalhes que os de alto nível, mas são proporcionalmente mais lentos quando executados num mesmo computador. Por isso apesar de ser possível simular um computador completo usando o Spice, talvez leve minutos para o circuito simulado executar uma única instrução. Podemos ter que esperar semanas para saber se ele carrega o sistema operacional ou não. Normalmente usamos os simuladores de baixo nível para pequenos trechos do projeto e simuladores de mais alto nível para o sistema completo.

Quando dissemos que o objetivo era entender o Pegasus 42 ao nível mais baixo exageramos um pouco. Vamos considerar o nível de chaves como sendo o mais baixo neste workshop. Apesar do *Digital* não ser otimizado para este nível, ele é suficiente para ilustrar as idéias que serão apresentadas em seguida. Ele também não é otimizado para os níveis mais altos, mas para os projetos reduzidos que serão estudados ele é suficiente (mas é lento demais para mostrar a operação de circuitos que geram vídeo de maneira usável).

Uma representação abstrata de um sistema é um retângulo com um número de entradas e algumas saídas. Normalmente mostraremos as entradas vindo da

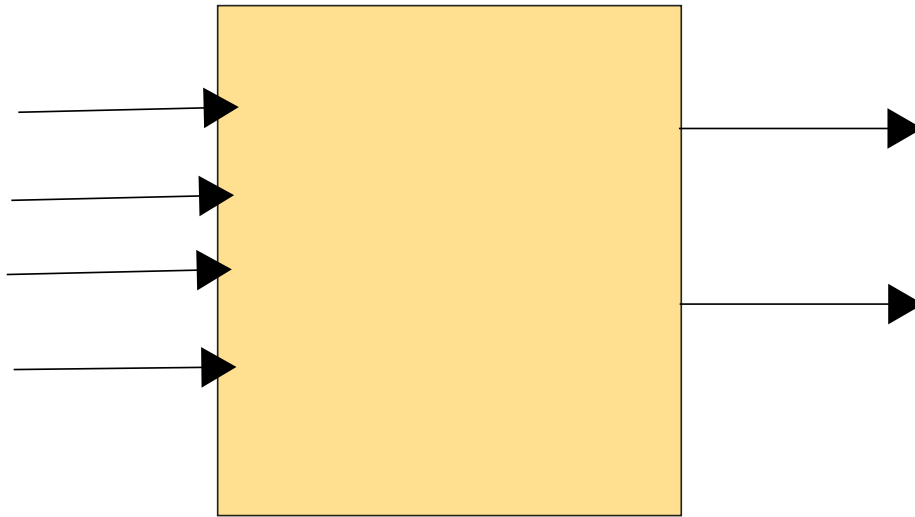


Figure 1: system

esquerda e as saídas indo para a direita, mas podemos ignorar esta regra se estiver deixando o desenho mais confuso.

Digital ou Analógica

A primeira escolha que precisamos fazer é a natureza das entradas e saídas do nosso sistema. Nas entradas e saídas analógicas algum valor do nosso circuito (tensão, corrente, etc) é análogo a algum valor do mundo (temperatura, brilho, etc). Nas entradas e saídas digitais uma série de valores do circuito representam um único valor do mundo. Esta série pode usar entradas ou saídas separadas (representação paralela) ou uma mesma entrada ou saída ao longo do tempo (representação serial).

característica	Analógico	Digital
número de circuitos	um	um por dígito
precisão	depende da qualidade do circuito	sempre igual ao número de dígitos
ruído	acumula a cada operação	não passa da entrada para saída

Os circuitos analógicos dominaram a computação até a metade do século 20, e a telecomunicação até o fim do século 20. O fator mais importante era o número de circuitos já que os componentes eram muito caros e a ligação deles um processo manual. Com a evolução dos circuitos integrados o custo passou a ser muito

baixo e os outros fatores levaram à digitalização da tecnologia. Nosso projeto é digital.

A humanidade tem usado vários sistemas digitais diferentes para representar números, sendo o mais popular o sistema posicional decimal com dígitos indus-arábicos. Quanto mais valores cada dígito pode ter, mais sensível fica aos ruídos. Mas quanto menos valores cada dígito poder ter, mais dígitos são necessários para representar o mesmo número. A melhor proteção possível contra o ruído é quando cada dígito pode ter apenas 2 valores, como no sistema posicional binário.

Apesar do sistema binário precisar de mais dígitos (e, portanto, mais circuitos) que as alternativas, cada circuito é mais simples de modo que é a opção que usaremos.

Portas Lógicas

Os circuitos combinacionais são aqueles cuja saída (ou saídas) depende apenas da combinação das entradas. No caso binário, cada dígito só pode ser 0 ou 1. Existem várias áreas da matemática que são equivalentes quando são usados apenas dois valores.

Área						
Álgebra Booleana	1	0	inversão	soma	produto	
Lógica de	verdade	falso	não	ou	e	
Predicados						
Teoria dos	conjunto	conjunto	complemento	união	intersecção	
Conjuntos	universal	vazio				
Circuitos de	5V	0V	normalmente	paralelo	série	
Chaves			fechado			

Notações de todas estas áreas podem ser usadas para representar os circuitos combinacionais. Uma outra representação possível é simplesmente uma tabela com uma linha para cada combinação de entradas e indicando a saída correspondente. Chamamos isso de “tabela verdade” mesmo quando os valores mostrados são 0 e 1 ao invés de falso e verdadeiro.

Não seremos completamente consistentes, podendo descrever um circuito como tendo a forma de “soma de produtos” (Álgebra Booleana) e outro circuito como contendo “não e” (Lógica de Predicados). Este último é a razão dos circuitos básicos serem conhecidos como “portas lógicas”.

Para ilustrar estas idéias usaremos o simulador Digital, como mencionamos anteriormente. O *Digital* foi escrito em Java e por isso é necessário instalar esta linguagem no seu computador antes de poder usá-lo. A vantagem disso é que roda em computadores com diferentes sistemas operacionais e diferentes

processadores. O site indicado é o do código fonte, mas isso só necessário para quem quer modificar o simulador. Na página tem um botão “Download” para baixar *Digital.zip* com a versão mais recente da ferramenta.

Chaves

Como falamos de circuitos de chaves, vamos começar por ai ligando duas chaves em paralelo entre uma lâmpada e uma fonte de alimentação. No menu “Arquivo” selecionamos “Novo”. Usando o menu “Componentes”, “Chaves”, “Chave” posicionamos duas chaves simples como desejamos. Já em “Componentes”, “Entradas e Saídas”, “LED” temos uma aproximação razoável para a lâmpada que desejamos (o *Digital* tem opções mais sofisticadas mas não as usaremos aqui). Finalmente em “Componentes”, “Conexões”, “Fonte” temos uma alimentação para o circuito. Note que todos os circuitos precisam de alimentação e de um sinal terra, mas normalmente não mostramos estes e o simulador funciona assim mesmo. Mas se formos construir o circuito de verdade precisamos nos lembrar deles.

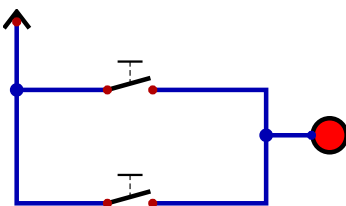


Figure 2: chaves paralelas

Se imaginarmos duas salas com duas portas entre elas, uma ao lado da outra (em paralelo), se uma *ou* outra estiver aberta poderemos ir de uma sala para a outra. Se simularmos este circuito (menu “Simulação”, “Iniciar a simulação” ou então o botão com triângulo simples apontando para a direita) veremos que o LED fica apagado. Mas se acionarmos a chave de cima ou a chave de baixo (ou as duas) ele acende.

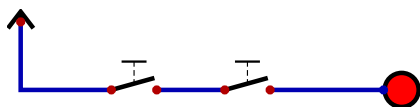


Figure 3: chaves em série

Se imaginarmos duas salas com duas portas entre elas, uma depois da outra via um pequeno corredor (em série), não basta que uma porta esteja aberta. Só será possível passar de uma sala para outra se a primeira *e* a segunda porta estiverem abertas. Neste segundo circuito ligamos as chaves em série e na simulação vemos que o LED permanece apagado a não ser que a primeira *e* a segunda chave tenham sido pressionadas.

Vimos duas das tres equivalências entre chaves e áreas da matemática. A tabela indica a última equivalência (inversão, não, complemento) como sendo uma chave normalmente fechada. Este tipo de chave abre o circuito quando pressionada. Mas aqui iremos mostrar uma alternativa de depende do nível de dispositivos (o único caso que em baixaremos até este nível neste projeto.)

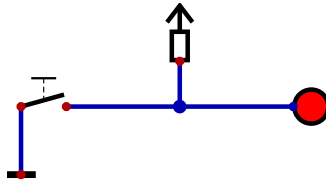


Figure 4: inversão com chave

Só usamos uma chave aqui e no lugar da alimentação usamos “Componentes”, “Conexões”, “Resistor Pull-Up”. Também precisamos de “Componentes”, “Conexões”, “Terra”. Com a chave aberta uma corrente passa pelo resistor e pelo LED, que fica aceso. Ao ser pressionada a chave oferece um caminho para 0V e a corrente vinda do resistor passa por ela ao invés do LED, que se apaga.

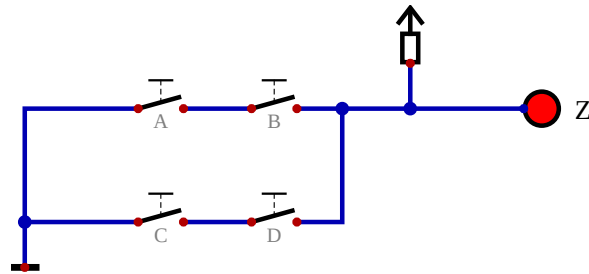


Figure 5: e, ou, inversão com chaves

Aqui temos um exemplo mais complexo usando a mesma idéia. Geralmente a porta AOI (“and/or/invert” - e/ou/inverte) não é considerada porta básica e não a veremos mais neste projeto, mas ela é útil o suficiente para ser incluída em muitas bibliotecas de projeto de circuito integrado. Em álgebra Booleana temos:

$$Z = !(A \times B + C \times D)$$

enquanto na lógica de predicados seria:

$$Z = \text{não}((A \text{ e } B) \text{ ou } (C \text{ e } D))$$

Uma quarta representação do AOI (sendo a primeira a figura ou esquemático, a segunda a álgebra Booleana e a terceira a equação lógica) seria a tabela verdade:

A	B	C	D	Z
aberta	aberta	aberta	aberta	acesa
aberta	aberta	aberta	fechada	acesa
aberta	aberta	fechada	aberta	acesa
aberta	aberta	fechada	fechada	apagada
aberta	fechada	aberta	aberta	acesa
aberta	fechada	aberta	fechada	acesa
aberta	fechada	fechada	aberta	acesa
aberta	fechada	fechada	fechada	apagada
fechada	aberta	aberta	aberta	acesa
fechada	aberta	aberta	fechada	acesa
fechada	aberta	fechada	aberta	acesa
fechada	aberta	fechada	fechada	apagada
fechada	fechada	aberta	aberta	apagada
fechada	fechada	aberta	fechada	apagada
fechada	fechada	fechada	aberta	apagada
fechada	fechada	fechada	fechada	apagada

A tabela mostra um problema - as entradas tem uma natureza (são acionadas por um dedo humano) e a saída tem uma natureza bem diferente (luz saindo do LED). Se queremos que as saídas de um circuito possam ser usadas como entradas de um outro circuito para construir sistemas maiores elas precisam ser do mesmo tipo. Felizmente foram inventadas chaves que são acionadas por eletricidade: relés (1835), válvulas termiônicas (1904) e transistores (1947). Apesar do *Digital* poder simular relés de modo limitado (como as chaves), vamos trocar as chaves do circuito AOI por transistores MOSFET (Metal/Oxide/Silicon Field Effect Transistor) tipo N (negativo) que é usado em circuitos integrados.

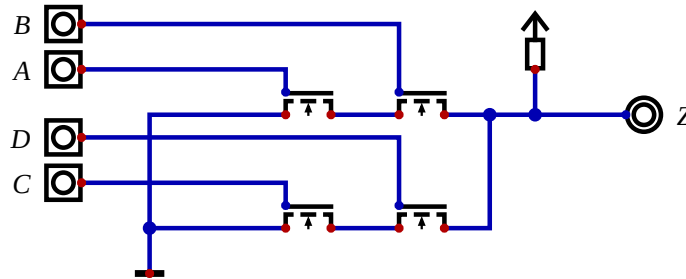


Figure 6: e, ou, inversão NMOS

Além de trocarmos as chaves por “Componentes”, “Chaves”, “FET tipo N” também usamos “Componentes”, “Entradas e Saídas”, “Entrada” e também “Saída” do mesmo menu para indicar que estes sinais podem vir de outro circuito e os resultados podem ir para outro circuito. Na simulação podemos trocar os valores das entradas e observar os valores da saída.

No menu “Análises”, o item “Analises” cria uma tabela verdade para o circuito e podemos verificar que é a mesma do circuito com chaves. Um problema deste tipo de circuito, que chamamos de NMOS, é que sempre que a saída é 0 existe uma corrente passando pelo resistor e gerando calor (e drenando a bateria se esta for de onde vem a alimentação). Um outro tipo de transistor, o “FET tipo P”, é o oposto do tipo N e conduz corrente quando a entrada é 0. Se trocarmos o resistor por um circuito complementar ao dos transistores N usando transistores P (em série quando o outro é paralelo) o funcionamento do circuito continuará o mesmo mas sem que corrente fique passando sempre.

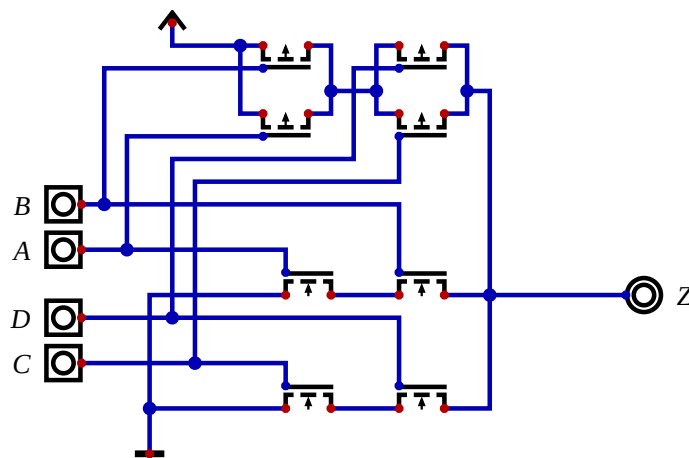


Figure 7: e, ou, inversão CMOS

A complexidade adicional do CMOS limitou esta tecnologia a nichos (como relógios digitais) nos anos 1960 e 1970, mas praticamente substituiu todos os outros tipos de circuitos nos anos 1980 quando o crescente número de transistores por chip (Lei de Moore) tornou gastar o dobro de transistores uma boa solução para reduzir a potência.

Portas Lógicas de uma entrada

Até agora vimos apenas uma porta lógica de uma entrada: Não.

Com uma só entrada, apenas duas combinações de entradas são possíveis: ou 0 ou 1. Sua tabela verdade vai ter duas linhas. A saída para cada linha pode ter dois valores de modo que existem $2^2 = 4$ tabelas verdades possíveis.

A	Z
0	0
1	0

Na primeira porta a saída é sempre 0. Não é de se surpreender que não falamos dela. Em termos de circuito é só ligar a saída no fio terra.

A	Z
0	1
1	0

Esta é a porta Não que já vimos.

A	Z
0	0
1	1

Aqui a saída é igual à entrada. Como o primeiro circuito dá para fazer isso com apenas um fio.

A	Z
0	1
1	1

A última porta tem como saída sempre um. Isso também pode ser feito como um fio ligado na alimentação.

Então das 4 portas possíveis apenas o Não é interessante. Note que se encararmos o valor de Z em cada tabela como os bits de um número binário com a primeira linha tendo o dígito menos significativo, poderemos chamar estas portas de “porta 0” ($Z = 0$), “porta 1” ($Z = !A$), “porta 2” ($Z = A$) e “porta 3” ($Z = 1$).

Portas Lógicas de duas entradas

Usando o mesmo raciocínio, uma porta de duas entradas tem 4 combinações possíveis de entradas e por isso sua tabela verdade tem 4 linhas. Usando o mesmo esquema de enumeração usaremos um número binário de 4 dígitos indicando que existem $2^4 = 16$ portas possíveis.

saídas	equação	nome
0 0 0 0	$Z = 0$	
0 0 0 1	$Z = !(A+B)$	NOR
0 0 1 0	$Z = A \times !B$	
0 0 1 1	$Z = !B$	
0 1 0 0	$Z = !A \times B$	

saídas	equação	nome
0 1 0 1	$Z = !A$	
0 1 1 0	$Z = (!Ax B) + (Ax !B)$	XOR
0 1 1 1	$Z = !(Ax B)$	NAND
1 0 0 0	$Z = Ax B$	AND
1 0 0 1	$Z = (Ax B) + (!Ax !B)$	XNOR
1 0 1 0	$Z = A$	
1 0 1 1	$Z = A + !B$	
1 1 0 0	$Z = B$	
1 1 0 1	$Z = !A + B$	
1 1 1 0	$Z = A + B$	OR
1 1 1 1	$Z = 1$	

As portas 0000 e 1111 na verdade não tem nenhuma entrada, enquanto 0011, 0101, 1010 e 1100 ignoram uma das entradas. Então estas 6 são o que vimos acima.

6 portas tem nomes no menu “Componentes”, “Lógica” e um desenho correspondente. Existe um desenho para AND (1000), OR (1110) e XOR (exclusive OR - 0110) e para o inverso deles colocamos uma bolinha na saída e um “N” no início do nome. O *Digital* também permite colocar uma bolinha nas entradas e aí podemos usar um AND para as portas 0010 e 0100 e uma porta OR para 1011 e 1101.

Soma de Produtos Se olharmos as linhas do XOR e XNOR veremos que são as equações mais complicadas. No caso do XOR o primeiro produto (AND) é $!Ax B$ e corresponde diretamente ao 1 da esquerda, enquanto $Ax !B$ é que gera o 1 da direita.

saídas	produto
0 0 0 1	$!Ax !B$
0 0 1 0	$Ax !B$
0 1 0 0	$!Ax B$
1 0 0 0	$Ax B$

Então o XOR é a soma (OR) do segundo e do terceiro produtos desta tabela. Isso é verdade para qualquer porta lógica e pode ser expandido para qualquer número de entradas. Então nunca irão descobrir no futuro uma porta lógica nova que não sabemos implementar. A tabela verdade pode ser transformada diretamente num circuito.

Isso não quer dizer que o circuito produzido assim será muito bom. Usando este método para a penúltima porta lógica teríamos

$$Z = (A \times !B) + (!A \times B) + (A \times B)$$

Mas sabemos que uma simples porta OR faz a mesma coisa. Felizmente a álgebra booleana tem regras de simplificação parecidas com as regras da álgebra normal e existe um método gráfico (chamado de Mapa de Karnaugh, que é uma das coisas que o *Digital* pode gerar) para reduzir ao máximo a lógica mantendo a mesma operação.

Múltiplos Bits

Uma desvantagem dos circuitos digitais em relação aos analógicos é a repetição dos mesmo circuito para cada dígito. Se usarmos 32 bits para representar valores, teremos 32 cópias de cada circuito.

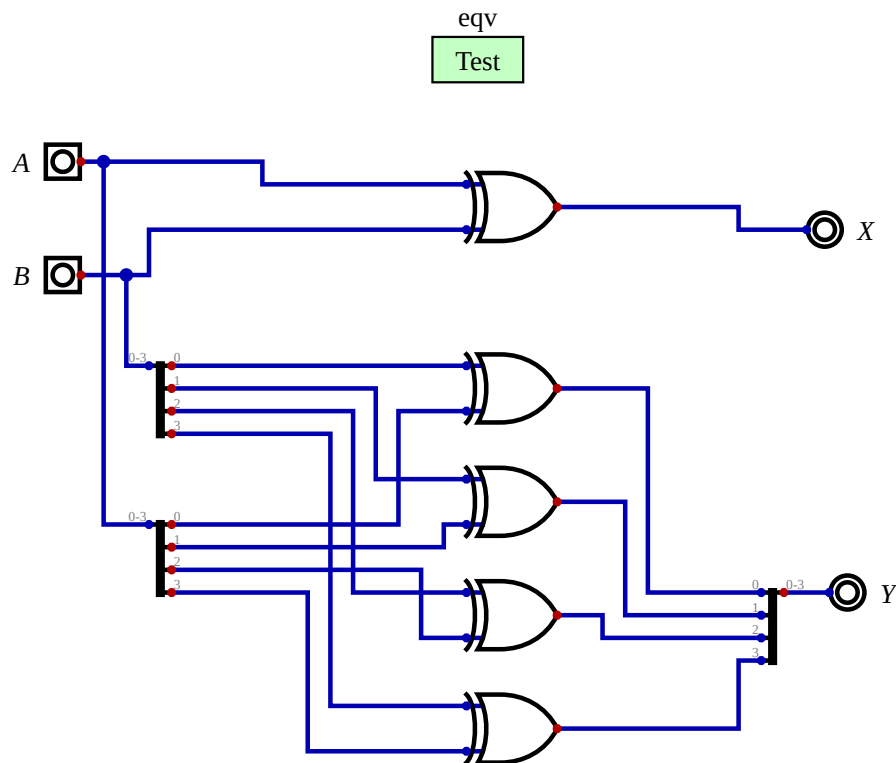


Figure 8: múltiplos bits

O *Digital* tem um recurso para reduzir esta complexidade. Para cada entrada e saída, além de um nome podemos definir uma “largura” em número de bits. No circuito acima mudamos *A*, *B*, *X* e *Y* para terem 4 bits cada uma. Em “Componentes”, “Conexão”, “Distribuidor” temos um meio para ligar sinais com diferentes números de bits. Nos dois da esquerda a entrada foi configurada como “4” e a saída como “1,1,1,1” enquanto no da direita foi o contrário. Além disso

cada componente normal pode ser configurado para uma certa largura. A porta ou exclusivo de cima foi configurada para 4 bits enquanto as quatro de baixo são 1 bit cada.

Os dois circuitos devem ser completamente equivalentes, mas o de cima é mais fácil de se entender por ser bem menor. E isso para 4 bits - a ganho para, por exemplo, 32 bits é proporcionalmente maior. Na edição do circuito o *Digital* não tem nenhuma indicação visual de que a porta de cima é diferente das outras, que as entradas e saídas são múltiplos bits ou que os fios ligando estarão carregando múltiplos bits. Durante a simulação, no entanto, os fios de 1 bit são mostrados em verde escuro (para 0) ou verde claro (para 1) enquanto os com vários bits continuam azul escuro para com o valor indicado acima do fio. E “clitando” numa entrada de 1 bit ela inverte seu valor enquanto numa de múltiplos bits aparece uma caixa de diálogo para definir o novo valor.

Usando “Análises”, “Análises” veremos a tabela verdade e podemos comparar os bits de X e de Y para confirmar que os circuitos são realmente equivalentes. Com 256 linhas, no entanto, esta confirmação é bem cansativa. E se fizermos qualquer alteração no circuito teremos que repetir este estudo da tabela verdade. Felizmente o *Digital* permite automatizar isso via “Componetes”, “Diversos”, “Caso de Teste”. Editamos o teste (que chamamos de “eqv”) para:

A B X Y

```
loop(a,16)
  loop(b,16)
    (a) (b) (a~b) (a~b)
  end loop
end loop
```

Usando “Simulação”, “Executar testes” todas as 256 combinações de a e b são geradas para A e B e X e Y são comparadas com $a \text{ XOR } b$. Todos os testes que passam são mostrados em verde e todos os que falham com um “x” vermelho. É possível examinar os detalhes para saber onde ocorreu a falha.

Outra maneira que o *Digital* elimina complexidade é o uso de projetos hierarquicos. Vários componentes podem ser combinados num circuito que pode ser mostrado como um bloco único num circuito de mais alto nível. Qualquer projeto prático deve usar isso extensamente e também incluir muitos testes para cada sub-circuito. Mas como o objetivo deste workshop é mostrar a complexidade de um computador, os projetos que serão vistos terão o mínimo de níveis possível. Muitas vezes sub-circuitos são comparados às chamadas de subrotinas nas linguagens de programação mas na verdade são mais equivalentes às macros.

Decisões

Nas linguagens de programação temos construções como “if A then B else C” para usar uma entrada para escolher entre duas outras entradas.

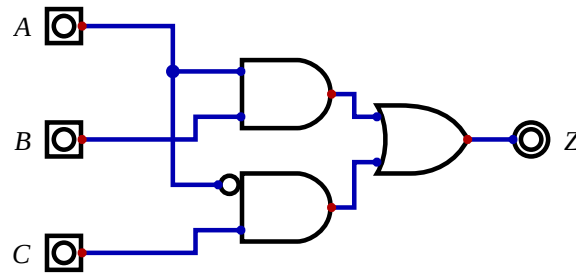


Figure 9: multiplexador de 2 entradas

Olhando a tabela verdade vemos que $Z = B$ sempre que A é 1, mas $Z = C$ se A for 0. Isso significa que circuitos combinacionais podem tomar decisões. Na verdade podem escolher entre mais de duas alternativas, como o “switch/case” nas linguagens de programação.

Isso é mais complicado de testar pois com $8+3 = 11$ entradas são 2048 combinações possíveis. O teste exaustivo ($t8 \times 256$) ainda é possível:

S_2 S_1 S_0 A_7 A_6 A_5 A_4 A_3 A_2 A_1 A_0 Z

```
loop(s,8)
  loop(a,256)
    bits(3,s) bits(8,a) bits(1,a>>s)
  end loop
end loop
```

Aqui estamos confirmando que a saída corresponde ao bit selecionado por S (Z é calculado deslocando a entrada à direita de modo que o bit menos significativo é a entrada desejada). Um teste mais cuidadoso é verificar que quando todas as entradas são 0 a saída também é e em seguida tornar uma entrada por vez 1 e a saída deve continuar 0 a não ser quando a entrada desejada é a que vai para 1. Ao invés de 8×256 testes precisamos de apenas 8×9 . Neste caso o teste completo é até melhor, mas na fabricação de um produto onde parte do custo é o tempo gasto no equipamento de teste a solução mais reduzida seria mais vantajosa.

Nosso projeto usará muitos multiplexadores e o circuito mostrado é meio grande (e teria que ser repetido 32 vezes para selecionar entre 8 valores de 32 bits cada). Ao nível de portas lógicas esta é a melhor solução, mas se descermos ao nível de chaves é possível economizar transistores.

Este circuito passa pelos mesmos testes que o circuito anterior. Na prática este uso de transistores de passagem NMOS causa uma redução no sinal de saída mas com dois inversores este problema é eliminado. Usar pares NMOS e PMOS de passagem é outra solução, mas a fiação fica meio complexa. A idéia de mostrar isso é para que possamos usar multiplexadores nos nossos projetos sem nos preocuparmos demais com o custo deles.

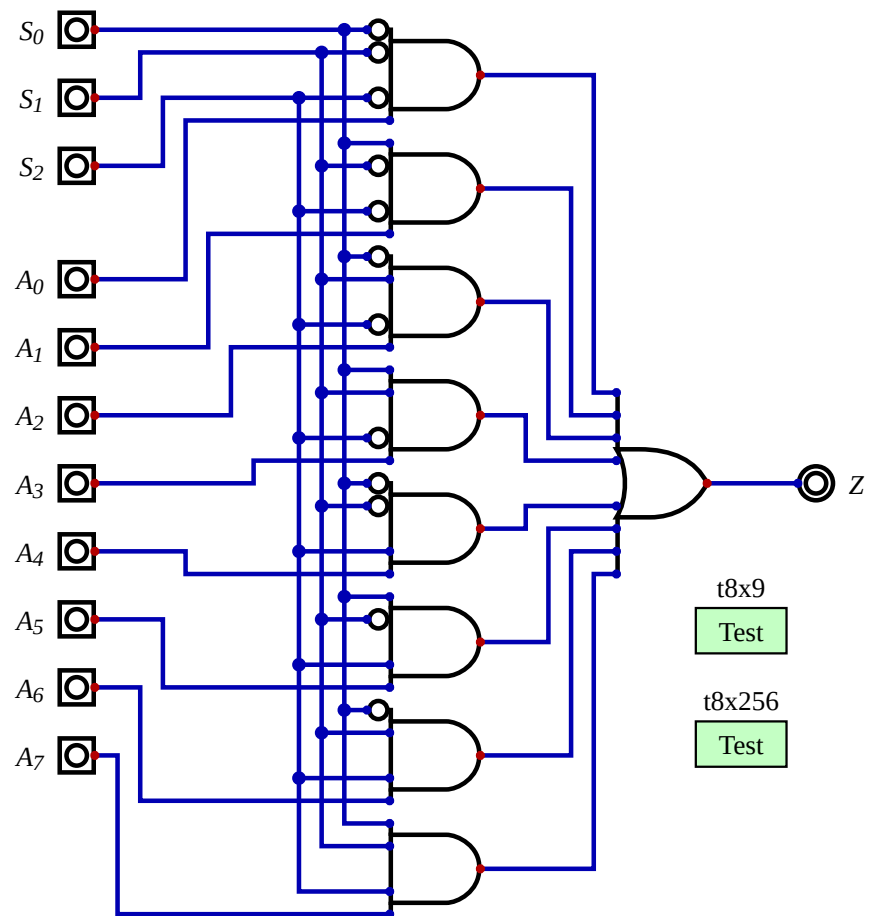


Figure 10: multiplexador de 8 entradas

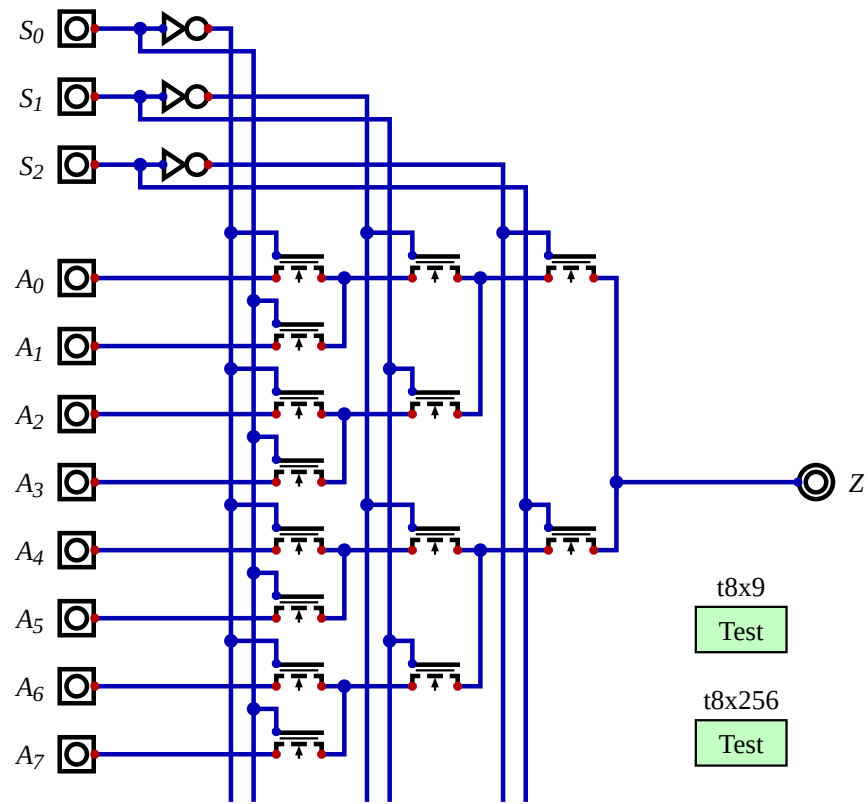


Figure 11: multiplexador de 8 entradas

Números

Uma idéia muito popular é que computadores apenas manipulam números mas nós podemos interpretar estes números como sendo letras, cores, sons, etc. Isso está sutilmente errado - os computadores podem manipular representações de muitas coisas, incluindo números. Não é fácil perceber isso para os números inteiros positivos, mas para números negativos ou de ponto flutuante fica mais claro.

O primeiro detalhe que precisamos observar é a diferença entre “+” na álgebra Booleana e na aritmética binária:

A	B	A+B Booleana	A+B Binária
0	0	0	0
0	1	1	1
1	0	1	1
1	1	1	10

O resultado na última linha tem mais dígitos que as entradas no caso da aritmética binária. Este também é o caso na aritmética decimal: somando dois números decimais de 5 dígitos pode gerar um resultado de 6 dígitos. E para cada dígito o resultado será de 0 a 18, sendo o último de 2 dígitos.

Vamos chamar os dígitos da soma de números binários de 1 bit de S (de “soma”) para o menos significativo e C (de “carry”, que é “vai um” em inglês) para o mais significativo.

A	B	C	S
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

C tem a tabela verdade da porta lógica AND e S da porta OU Exclusivo. Então um somador é:

Para os dígitos menos significativos dos números de entrada isso já serve. Mas para os demais é necessário levar em conta o “vai um” vindo do dígito logo à direita. Por isso chamamos este circuito de “meio somador” e usamos dois deles para criar um “somador completo”, que é um circuito com 3 entradas e 2 saídas.

Repetindo o somador completo 4 vezes podemos somar dois números binários de 4 bits cada um. Na verdade poderíamos ter usado um meio somador para o dígito menos significativo, mas fazendo deste jeito fica fácil combinar vários blocos destes para números ainda maiores.

Podemos testar que realmente estamos somando números:

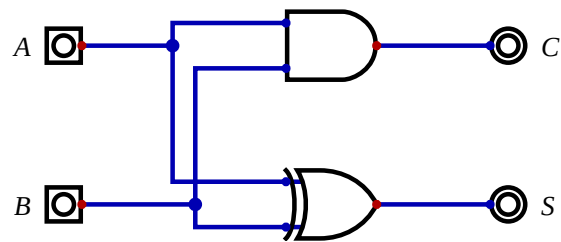


Figure 12: meio somador

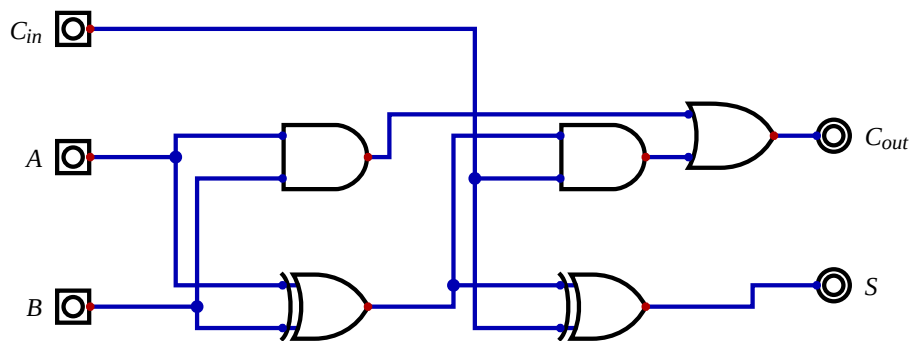


Figure 13: somador completo

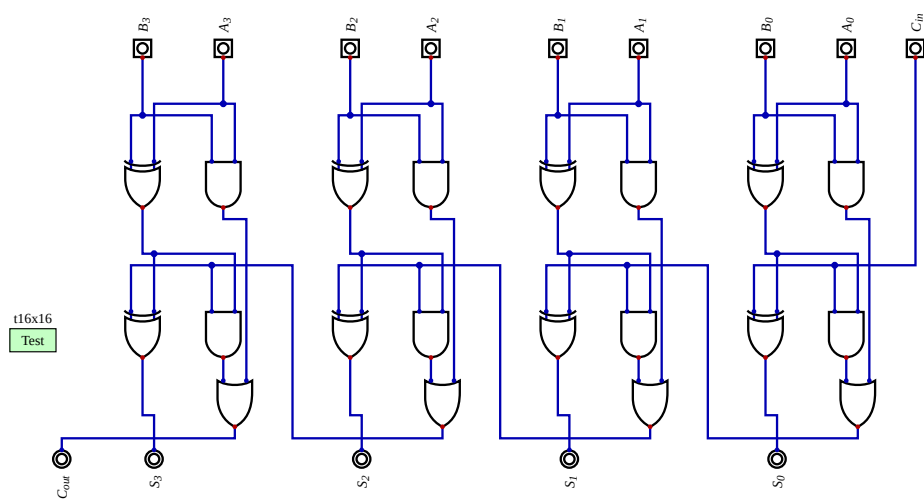


Figure 14: somador de 4 bits

```
C_in  A_3 A_2 A_1 A_0  B_3 B_2 B_1 B_0  C_out S_3 S_2 S_1 S_0
```

```
loop(a,16)
  loop(b,16)
    0 bits(4,a) bits(4,b) bits(5,a+b)
    1 bits(4,a) bits(4,b) bits(5,a+b+1)
  end loop
end loop
```

Repare que com C_out e S_3 a S_0 o resultado é de 5 bits, um dígito à mais que as entradas.

Este é um “somador em cascata” e não é muito rápido. O vai um passa de dígito em dígito e só chega no dígito mais significativo com muito atraso. Se dobrarmos o número de dígitos o somador vai operar com metade da velocidade. Existem circuitos mais complexos que reduzem este problema, mas para o nosso projeto esta solução simples já é suficiente.

2. Circuitos Sequenciais

3. Processadores

4. FPGAs e Shin JAMMA

5. Vídeo e Áudio

6. Pegasus 42

A. História