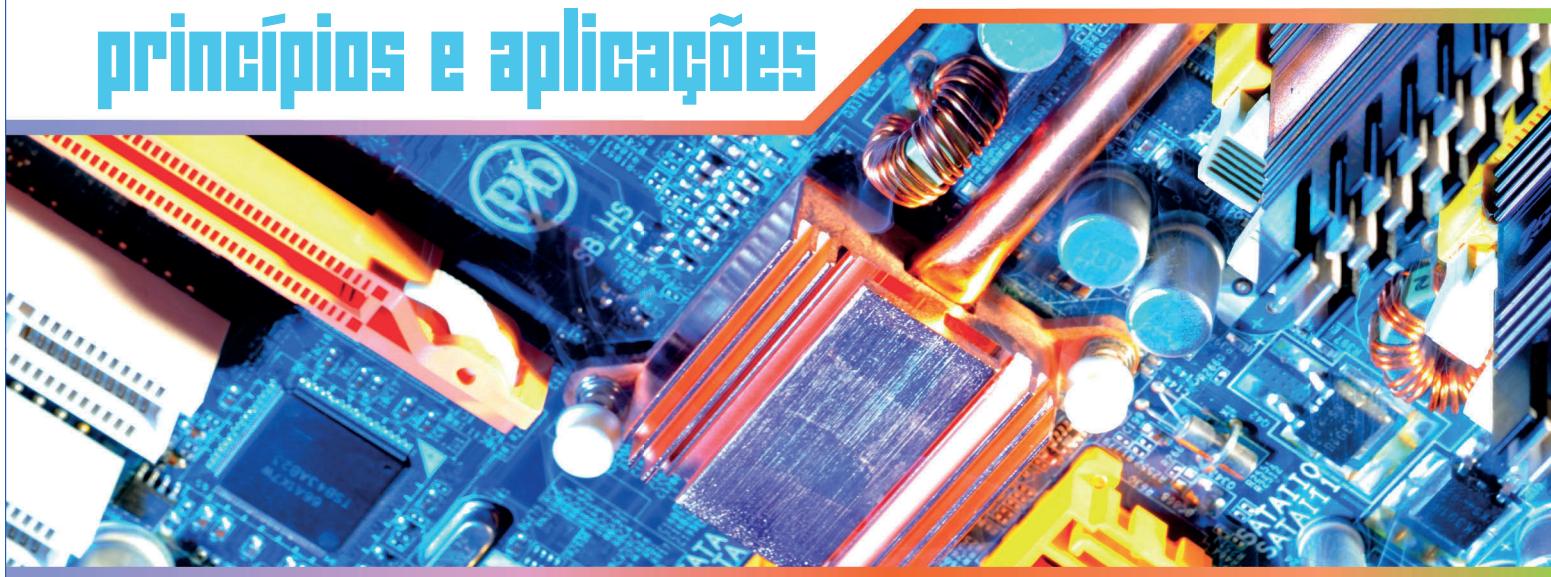


RONALD J. TOCCI  
NEAL S. WIDMER | GREGORY L. MOSS

11ª EDIÇÃO

# SISTEMAS DIGITAIS

princípios e aplicações



ALWAYS LEARNING

PEARSON

```

23  END COMPONENT;
24  BEGIN
25      enabled <= '1';
26
27      prescale:fig10_37      -- MOD-60 prescaler
28          PORT MAP( clk => pps_60,
29                  ena => enabled,
30                  tc  => cascade_wire1);
31
32      second:fig10_37        -- contador de segundos do módulo 60
33          PORT MAP( clk => pps_60,
34                  ena => cascade_wire1,
35                  ones => sec_ones,
36                  tens => sec_tens,
37                  tc  => cascade_wire2);
38
39      minute:fig10_37        -- contador de minutos do módulo 60
40          PORT MAP( clk => pps_60,
41                  ena => cascade_wire2,
42                  ones => min_ones,
43                  tens => min_tens,
44                  tc  => cascade_wire3);
45
46      hour:fig10_29          -- contador de horas do módulo 12
47          PORT MAP( clk => pps_60,
48                  ena => cascade_wire3,
49                  low => hour_ones,
50                  hi  => hour_tens,
51                  pm  => pm);
52  END a;

```

FIGURA 10.38 (continuação) Relógio completo em VHDL.

**Questões para revisão**

1. O que é definido no nível superior (de topo) de um projeto hierárquico?
2. Onde se inicia o processo do projeto?
3. E o de construção?
4. Em que estágio(s) devem ser feitos testes de simulação?

**10.5 PROJETO DE FORNO DE MICRO-ONDAS**

Até aqui, discutimos os blocos de construção elementares de sistemas digitais e analisamos exemplos de sistemas simples que usam alguns destes blocos. Nesta seção, cobriremos um sistema complexo conhecido: o forno de micro-ondas. Este sistema contém muitos dos blocos de construção que constituem os sistemas digitais e demonstra como podem ser combinados para controlar uma das invenções de maior impacto em nossas vidas.

Fornos de micro-ondas apenas usam um gerador de radiofrequência (rf) com energia suficiente para excitar as moléculas no alimento e aquecê-lo. Os quatro componentes básicos usados nestes eletrodomésticos não mudaram muito desde que a cozinha com micro-ondas foi inventada, na década de 1960: um transformador de alta-voltagem, um diodo, um capacitor e um tubo de magnetron. A coisa mais importante que você precisa saber a respeito deste circuito é que ao aplicar 120 VAC ao transformador, o forno cozinha o alimento e ao desconectar o 120 VAC, o forno desliga. Em outras palavras, ele pode ser controlado por um 1 ou um 0. Os circuitos que controlam o forno de micro-ondas mudaram com o passar dos anos, de simples timers mecânicos a sistemas digitais complexos. O controlador que vamos projetar permite que o usuário programe o tempo de cozimento desejado, em minutos e segundos, e oferece os controles básicos para um forno típico, similar ao da foto na Figura 10.39(a).

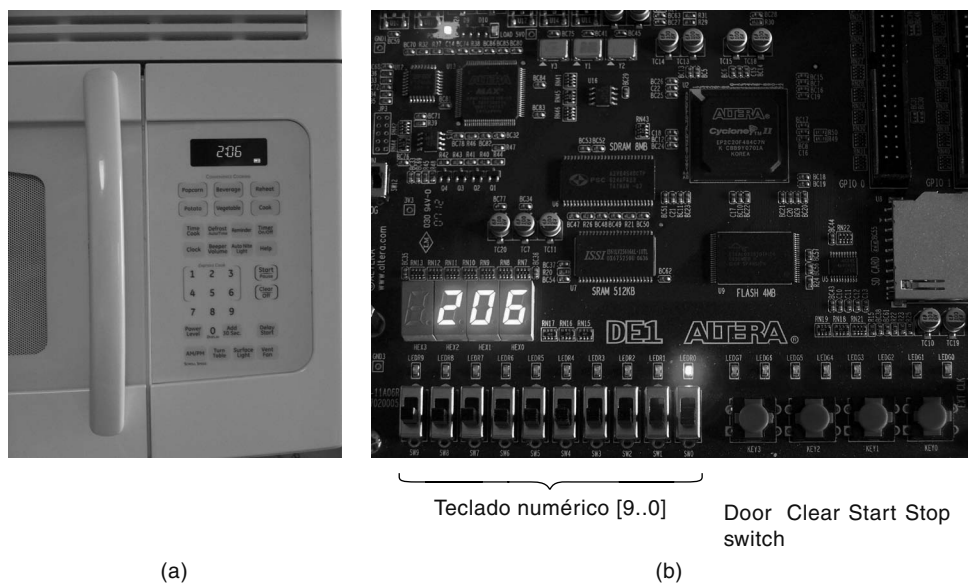


FIGURA 10.39 (a) Forno de micro-ondas típico; (b) projeto do forno de micro-ondas na placa DE1.

Definição do projeto

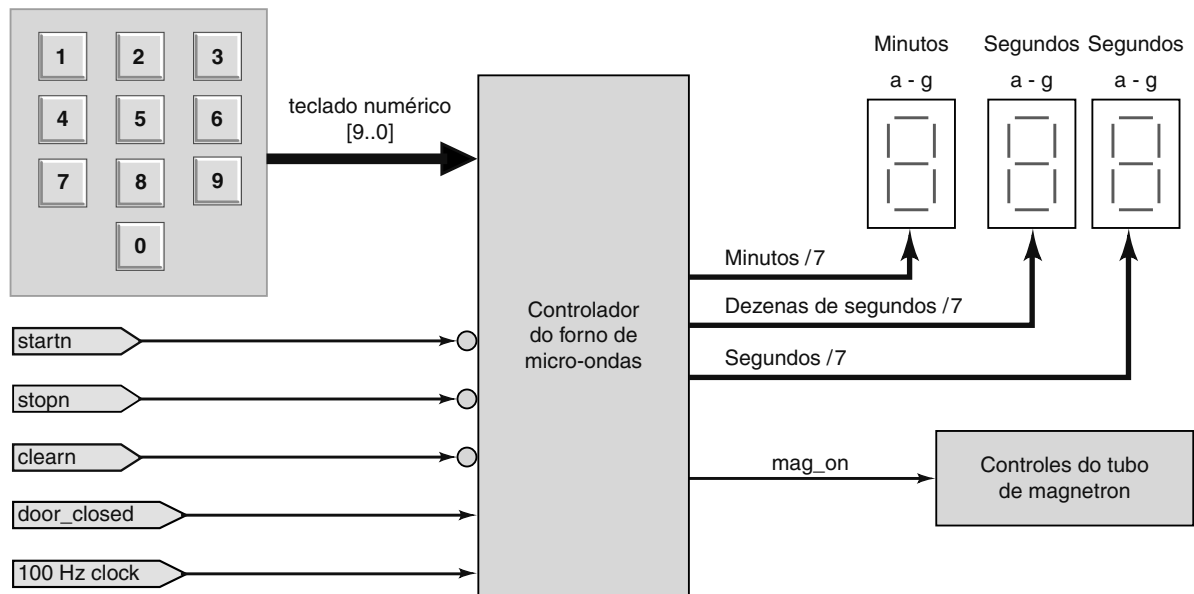
Vamos começar no topo e definir entradas e saídas do sistema para o controlador de micro-ondas. Deve ser observado que a intenção deste projeto é implementá-lo na placa de desenvolvimento do Altera DE1 (ou DE2 ou similar) como mostrado na Figura 10.39(b). Já que os níveis lógicos para o sistema combinam com os recursos de hardware (chaves e displays) das placas Altera, decidimos usar dez chaves individuais para representar as entradas de teclado numérico, similares ao codificador mostrado na Figura 9.15. Uma abordagem alternativa seria utilizar uma matriz externa do teclado numérico como descrita na Seção 10.3. Este exemplo opta por evitar utilizar hardwares externos à placa de desenvolvimento. O diagrama de bloco da Figura 10.40 define o alcance do projeto juntamente com as especificações detalhadas listadas na Tabela 10.3.

O sistema deve funcionar como um forno de micro-ondas típico. Quando não está cozinhando um alimento, você deve ser capaz de entrar o tempo de cozimento desejado pressionando os números no teclado numérico. Cada número pressionado aparece à direita do display, e os outros dígitos se deslocam para a esquerda. Quando o botão iniciar é pressionado, se a porta estiver fechada, o tubo de magnetron é ativado e os dígitos fazem uma contagem decrescente em minutos e segundos. Zeros à frente são eliminados no display. Se a porta é aberta ou o botão de parar é pressionado, o tempo para no valor atual e o magnetron é desligado. Pressionar ‘limpar’ (clear) a qualquer momento força a contagem a 0. Quando a contagem chega a 0, o magnetron é desligado e o tempo lê 0. Se uma pessoa entra um valor inicial para segundos maior que 59 (isto é, 60-99), o contador de segundos deve contar de maneira decrescente deste valor até 00.

TABELA 10.3

Sinal de entrada	Especificação do sinal
clock	100 Hz, níveis lógicos padrão 3,3 V
startn, stopn, clearn	Normalmente em nível ALTO, botões ativos em nível BAIXO, níveis lógicos padrão 3,3 V
door_closed	ALTO quando a porta está fechada, BAIXO quando a porta está aberta
keypad (0–9)	10 botões de teclado numérico individuais: ativos em nível ALTO (chaves de correr usadas no DE1)

Sinal de saída	Especificação do sinal
mag_on	Saída ativa em nível ALTO usada para aplicar 120 VAC ao circuito magnetron
min_segs (a–g)	Saídas ativas em nível BAIXO para dígito de display (minutos) alto: segmentos a–g, respectivamente
sec_tens_segs (a–g)	Saídas ativas em nível BAIXO para dígito de display (dezenas de segundos) médio: segmentos a–g, respectivamente
sec_ones_segs (a–g)	Saídas ativas em nível BAIXO para dígito de display (unidades de segundos) baixo: segmentos a–g, respectivamente



**FIGURA 10.40** Diagrama de bloco de sistema para o forno de micro-ondas.

## Planejamento estratégico/decomposição do problema

A primeira decisão estratégica deve ser a respeito do uso de um microcontrolador ou um circuito digital personalizado. Para essa aplicação não há razão de um microcontrolador não ser usado para controlar o forno. Na realidade, o forno de micro-ondas talvez use um microcontrolador para esta finalidade. Lembre que é um sistema de computador em um chip. Ele realiza instruções sequenciais que o projetista armazenou na memória. Instruções como conferir cada entrada, desempenhar quaisquer cálculos e atualizar as saídas, podem ser realizadas de maneira mais rápida que o dedo de uma pessoa consegue pressionar e soltar um botão. Qualquer microcontrolador é rápido para acompanhar o movimento humano, de maneira que a velocidade de circuitos digitais personalizados não é necessária para essa aplicação. Entretanto, este é um livro sobre sistemas digitais e escolhemos incluir o maior número possível de blocos de construção de sistemas digitais nesta solução. O micro-ondas será implementado como circuito digital em uma matriz de porta programável (FPGA) em vez de um microcontrolador. Esta decisão afeta a maneira que planejamos os blocos do projeto.

As características do forno de micro-ondas nos permitem identificar com facilidade os principais blocos funcionais do sistema. Há muitas maneiras para se decompor um sistema. Assim, o projetista tem de decidir quantos blocos funcionais e quantos níveis hierárquicos são necessários e também tomar algumas decisões estratégicas que afetam o grau de dificuldade para solucionar cada bloco funcional. O projeto é decomposto de tal maneira que há três níveis de hierarquia e quatro blocos funcionais no nível 2. As complexidades dos blocos vão do simples ao complexo. Quando tarefas são designadas para uma equipe de projeto, o administrador é capaz de alinhar a tarefa com o nível de experiência/habilidade dos membros da equipe.

Talvez o bloco funcional mais óbvio no sistema do forno de micro-ondas seja o timer de minutos/segundos, circuito que conta de maneira decrescente em intervalos de um segundo. Os requisitos deste bloco de contador são:

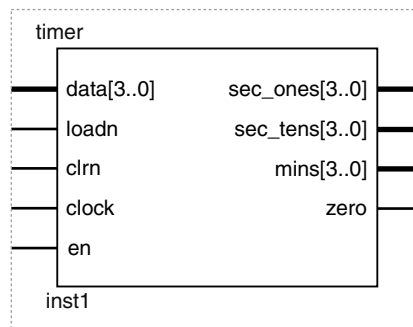
- Ele deve contar de maneira decrescente e parar de contar quando chega a zero.
- Ele deve ser carregado (minutos e segundos) um dígito BCD por vez. Dígitos têm de se deslocar para a esquerda.
- Ele deve poder ser limpo;
- Ele deve ser capaz de ser desabilitado (manter a contagem atual).

A segunda decisão estratégica deve ser tomada neste ponto. O projeto deve usar um contador binário direto ou um BCD para o timer do forno? Um contador binário direto é fácil de descrever ou construir, mas como poderia ser carregado com o número binário apropriado cada vez que uma tecla é pressionada? Lembre que cada entrada de tecla produz um dígito BCD. O circuito que poderia mudar entradas BCD em um número binário e carregar esse contador exigiria operações matemáticas sofisticadas. Do lado da saída, o bloco de circuito que traduz este número binário (do contador) para o BCD de 7 segmentos também seria complexo. Utilizar um contador binário pode não ser uma boa ideia. Por outro lado, se pudermos fazer o contador operar como estágios BCD que são colocados juntos em cascata, então o bloco do contador será ligeiramente mais complexo que um simples contador binário; mas o carregamento dos dados e a exibição destes será muito mais simples. Lembre-se, toda decisão tem consequências, pensar nas consequências das suas decisões

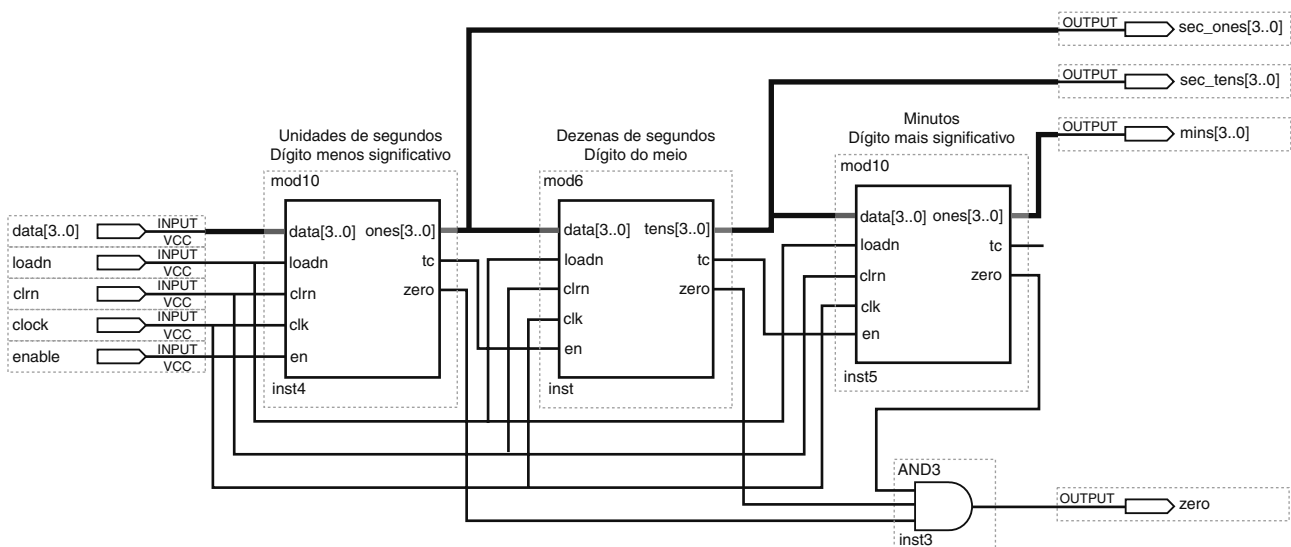
é um ótimo investimento. Decidimos usar um contador BCD em cascata. Consequentemente, as entradas necessárias são um único dígito BCD (isto é, valor de dados de 4 bits), uma linha de controle de *carga* (load), uma de *clock*, uma de *habilitação* (enable) e uma de *clear*, como na Figura 10.41. Observe dos rótulos que as linhas *loadn* e *clearn* são ativas em nível BAIXO enquanto a *habilitação* é ativa em nível ALTO. As saídas são três dígitos BCD e uma linha de sinal (zero) que indica quando o contador chegou a 0.

Vamos decompor o bloco de contador minutos/segundos em módulos funcionais, criando um terceiro nível da hierarquia. A Figura 10.42 mostra como três estágios de contador BCD podem ser conectados em cascata para criar tal funcionalidade. Cada estágio é um contador BCD decrescente de dígito único. Entretanto, já que o contador de segundos tem de contar de maneira decrescente em segundos de 59 para 00, o das dezenas de segundos (dígito do meio) tem de ser um BCD de módulo 6. Os outros dois estágios, os contadores de unidades de segundos e minutos, são de módulo 10 idênticos. Reduzimos o problema a criar um contador decrescente BCD de módulo- $N$  com as seguintes características: cada estágio deve ter uma capacidade de carga paralela síncrona a um controle *loadn* ativo em nível BAIXO. A função *clearn* é assíncrona e ativa em nível BAIXO, enquanto a habilitação (*enable* — *en*) é ativa em nível ALTO. Todos os sinais *load*, *clear* e *clock* para cada dígito são vinculados e acionados pelo sinal de entrada correspondente. Cada bloco tem uma saída chamada *TC* (*terminal count* — contagem terminal). O propósito da *TC* é indicar quando aquele dígito de contador está no valor mínimo (0) e quando irá para o valor máximo no próximo *clock*. O *TC* vai para o nível ALTO quando o contador chega a zero, presumindo que o contador esteja habilitado.

A conexão em cascata dos três contadores é conseguida ao se conectar o *TC* do estágio mais baixo para a habilitação do próximo estágio mais alto. Assim, quando o estágio na ordem mais baixa está desabilitado, todos mantêm seus valores atuais. Observe que a saída BCD do estágio de dígito menos significativo está conectada à entrada de dados BCD do estágio de dígito médio e que a saída BCD do estágio de dígito médio está conectada à entrada de dados BCD do dígito



**FIGURA 10.41** O bloco de contador de minutos/segundos do sistema de micro-ondas.



**FIGURA 10.42** Nível 3: o bloco contador decrescente BCD de 3 dígitos para minutos e segundos.

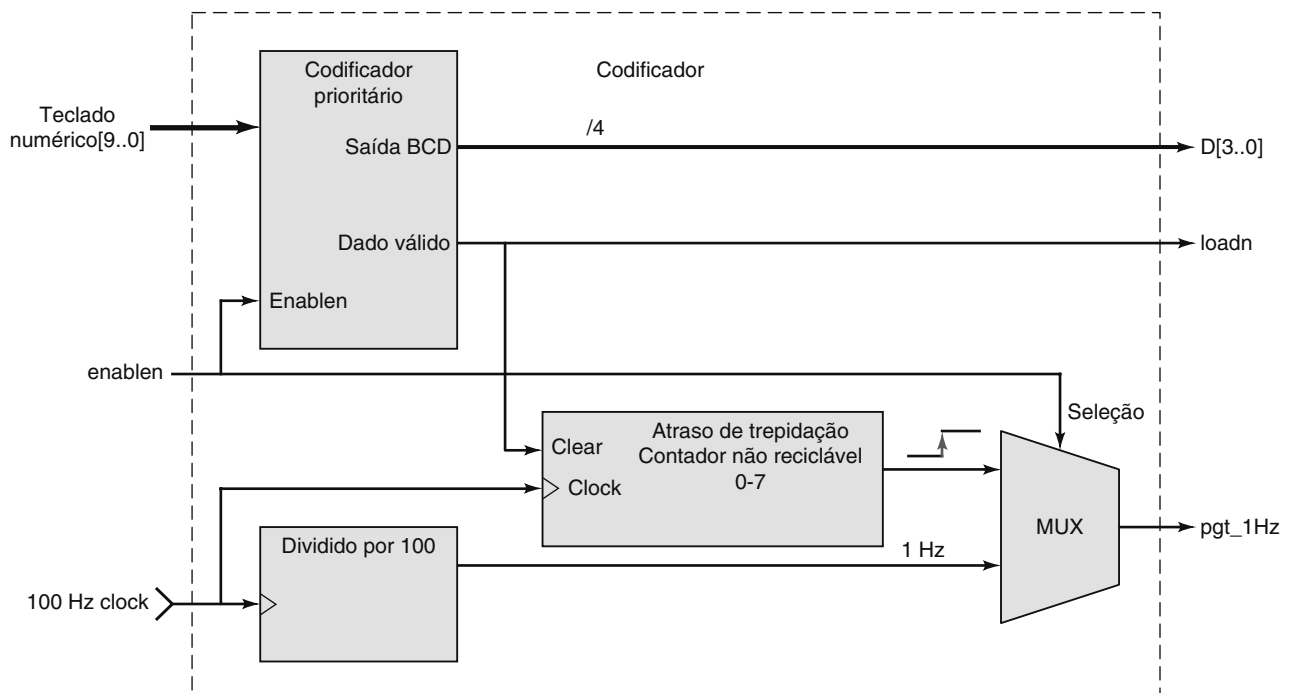
mais significativo (MSD). Isto é feito para realizar a transferência de dados ou operação de deslocamento cada vez que há um novo dígito.

O segundo bloco funcional (nível 2 da hierarquia) no sistema é o bloco de entrada/controla do timer. Ele é responsável por reconhecer entradas-chave e controlar o bloco de contador. Tem dez chaves do teclado numérico como entradas, um *clock* de 100 Hz, e um *enablen* ativo em nível BAIXO que vai permitir que o codificador de teclado numérico funcione e determine qual sinal é enviado para a entrada de clock do bloco contador. O *clock* para o contador deve ser uma forma de onda de clock de 1 Hz quando o magnetron está energizado. Quando o magnetron está desligado e as chaves estão sendo pressionadas para entrar o tempo de cozimento, a entrada de clock do bloco contador tem de receber uma única borda de subida (*positive going transition*) alguns milissegundos após cada tecla ter sido pressionada. Ele não pode receber outra borda de subida até a tecla ser solta ou então carregaria múltiplos dígitos para uma única entrada de tecla. Assegurar que uma entrada limpa seja recebida de cada ativação de chave é referido como *eliminar o efeito de trepidação do contato*, que você estudou no Capítulo 5. Neste caso, a eliminação do efeito de trepidação do contato se dá esperando (atrasando) alguns milissegundos após o botão ter sido pressionado antes de criar uma borda de subida que vai entrar o dígito BCD no contador. Para criar este atraso, um contador de três bits não reciclável começa a contar quando uma chave é pressionada. Quando o contador chega a 4 (40 ms depois) a saída torna-se ALTA, criando uma borda de subida. O contador continua a contar de maneira crescente, mas para em 7 até o controle de clear ser ativado e a chave, solta. A Figura 10.43 mostra este bloco de controle com seus elementos funcionais (nível 3). Observe os blocos de construção digitais diferentes usados aqui: codificação, divisão de frequência, multiplexação e contagem.

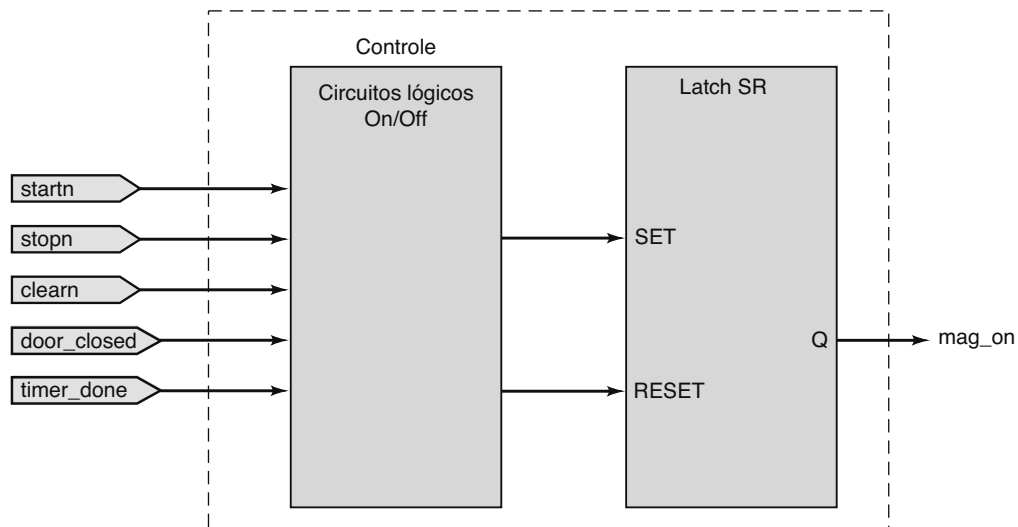
O terceiro bloco funcional de nível 2 é o de magnetron. É um bloco lógico usado para controlar a saída de tubo de magnetron (*mag\_on*) e deve ligar o magnetron quando o botão de iniciar for pressionado e seguir ligado após o botão de iniciar ser solto. Isto significa que é necessária uma ação de *latch* dentro deste bloco, que também precisa de alguma lógica combinacional para determinar as condições que podem ligar e desligar o tubo de magnetron. A Figura 10.44 mostra os elementos funcionais deste bloco. Observe que as entradas são as quatro chaves do sistema (controles de usuário), assim como um sinal que indica que o timer expirou (*timer\_done*).

O quarto bloco funcional tem de decodificar os três dígitos BCD, acionar os displays de LED de 7 segmentos e fornecer funções de eliminação de zeros à frente. O bloco de decodificação poderia ser decomposto em três circuitos decodificador/driver 7447 (nível 3 da hierarquia) descritos no Capítulo 9. A funcionalidade completa do bloco de decodificação é facilmente implementada com um único arquivo de fonte HDL, tornando o terceiro nível de hierarquia desnecessário.

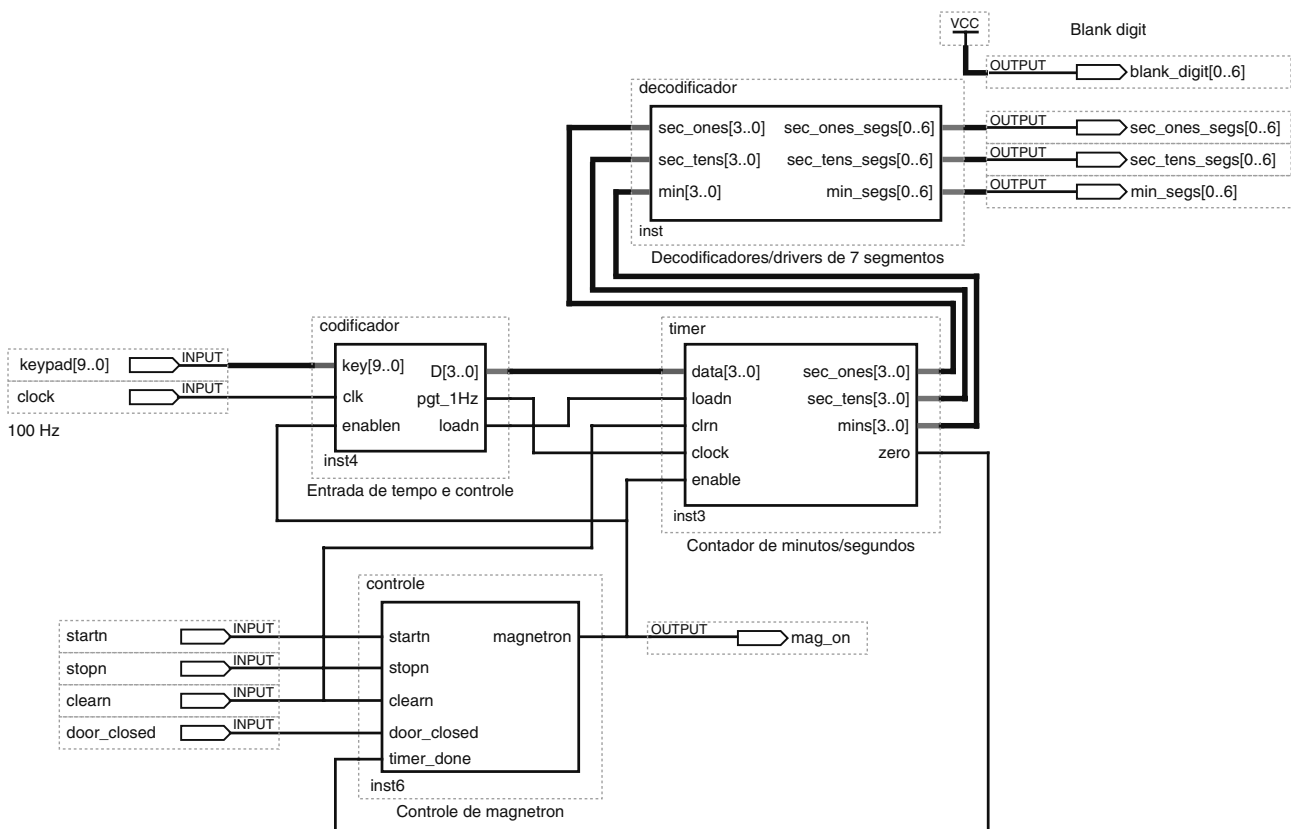
A Figura 10.45 mostra o diagrama de bloco inteiro para o nível 2 da hierarquia com todos os sinais de interconexão.



**FIGURA 10.43** O bloco de controle de entrada codificador/timer decomposto em seus blocos funcionais.



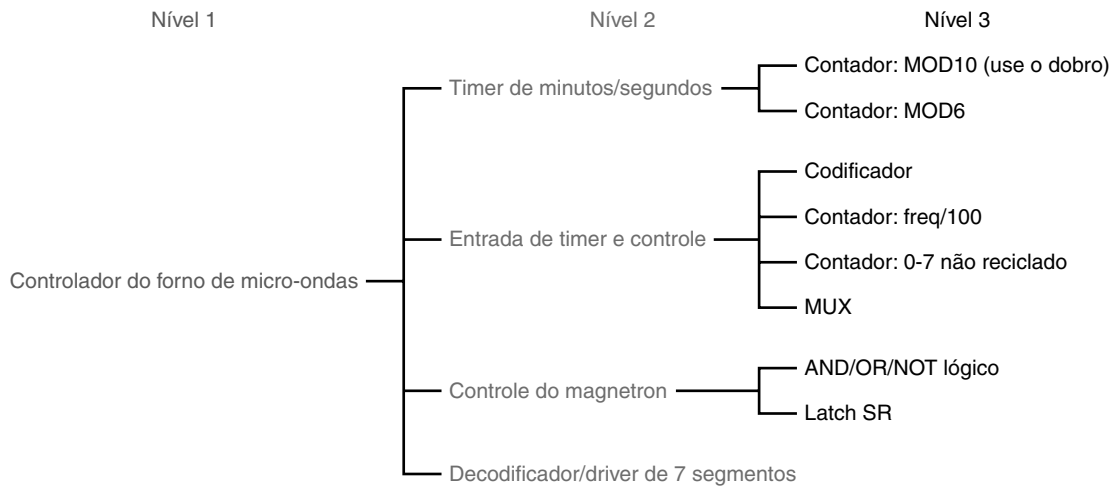
**FIGURA 10.44** O bloco de controle do magnetron decomposto em seus blocos funcionais básicos.



**FIGURA 10.45** Nível 2 da hierarquia mostrando blocos e sinais.

## Síntese/integração e testes

O projeto do forno de micro-ondas foi agora decomposto como mostrado nos três níveis de hierarquia da Figura 10.46. Observe que nos níveis mais baixos (nível 3) temos apenas blocos funcionais familiares básicos. Cada um destes blocos funcionais pode ser implementado usando circuitos similares a outros exemplos neste texto por modelos de CIs TTL (funções maxplus2); megafunções Quartus, ou descrevendo sua operação usando linguagem de descrição de hardware. Agora é com você solucionar o problema de sintetizar os pequenos blocos, testar cada um e integrar o sistema. Se este projeto é



**FIGURA 10.46** Decomposição do projeto em três níveis de hierarquia.

implementado em uma placa DE1 (ou DE2) da Altera, há duas questões a mais a serem observadas. As ports conectadas a VCC no canto superior direito da Figura 10.45 são os segmentos do display de 7 segmentos mais significativos (chamado *Blank Digit*). Isto é feito a fim de desligar o quarto dígito (não utilizado). Também, o clock de 100 Hz pode ser fornecido pela entrada de clock externa, ou usando o cristal de 50 MHz *on-board* e dividi-lo por 500 mil (*prescaling*) usando um contador de megafunção como descrito no Capítulo 7.

#### Questões para revisão

1. Quais são os nomes dos blocos funcionais no nível 2 da hierarquia do forno de micro-ondas?
2. Descreva o sinal que aciona a entrada de clock para o timer de minutos/segundos se nenhum botão no teclado numérico estiver pressionado.
3. Descreva o sinal que aciona a entrada de clock para o timer de minutos/segundos se quaisquer botões no teclado numérico estiverem pressionados.

## 10.6 PROJETO DE FREQUENCÍMETRO

O projeto desta seção demonstra o uso de contadores e outras funções de lógica padrão para implementar um sistema denominado frequencímetro, que é similar à peça de equipamento de teste que você provavelmente já usou no laboratório. A teoria do funcionamento é descrita em termos dos dispositivos lógicos convencionais MSI e depois relacionada aos blocos de construção desenvolvidos usando HDL. Como na maioria dos projetos, esse exemplo é formado por circuitos que já estudamos em capítulos anteriores. Eles são combinados aqui para formar um sistema digital com propósito único. Primeiro, vamos definir o frequencímetro.

Um **frequencímetro** é um circuito que mede e exibe a frequência de um sinal. Como você sabe, a frequência de uma forma de onda periódica é o número de ciclos por segundo. Moldar cada ciclo de frequência desconhecida em um pulso digital permite que utilizemos um circuito digital para contar os ciclos. A ideia geral por trás da medida de frequência envolve habilitar um contador o número de ciclos (pulsos) da forma de onda recebida durante um período de tempo especificado, chamado **intervalo de amostra**. A duração do intervalo de amostra determina o intervalo de frequências a ser medido. Um intervalo mais longo fornece uma precisão maior para baixas frequências, mas gera overflow no contador ao chegar às frequências mais altas. Um intervalo de amostra mais curto fornece uma medida menos precisa das frequências mais baixas, mas mede uma frequência máxima mais alta sem exceder o limite máximo do contador.

#### Exemplo 10.1

Suponha que um frequencímetro use um contador BCD de quatro dígitos. Determine a frequência máxima medida usando cada um dos seguintes intervalos de amostra:

- (a) 1 segundo      (b) 0,1 segundo      (c) 0,01 segundo