

EXPERIÊNCIAS COM FPGAs E POTENCIAL EM PMEs BRASILEIRAS DO SETOR ELETRO-ELETRÔNICO

Edward Moreno, Fábio Pereira, César Penteado, Rodrigo Pericini

Centro Universitário Eurípides de Marília - UNIVEM

Av. Hygino Muzzi Filho 529

CEP 17525-901, Marília, S.P.

(edmoreno, fabiopereira, cesarpenteado, pericini)@fundanet.br

Maria E. Leon

Universidade de São Paulo - USP

Departamento de Eng. de Produção

Av. Prof. Almeida Prado 128 Trav. 3

CEP 05508-900, São Paulo, S.P.

melena@usp.br

Resumo. Na indústria eletro-eletrônica mundial há várias tecnologias e metodologias usadas na construção e projeto de circuitos e sistemas digitais. Recentemente, no Brasil tem se começado a usar circuitos programáveis (tais como FPGAs - *Field Programmable Gate Arrays*) projetados e implementados via uma linguagem especial para projetar hardware, conhecida como VHDL (*Very Hardware Description Language*). O artigo consiste em divulgar experiências bem sucedidas na área de desenvolvimento e projeto de sistemas digitais complexos, tais como Microprocessadores e Microcontroladores, utilizando-se de FPGAs, os quais representam uma boa parte dos sistemas digitais usados nos vários setores da indústria Eletroeletrônica, principalmente nas áreas de automação e componentes eletrônicos. Os usuários dessa metodologia podem desenvolver e validar toda a lógica funcional dos circuitos desejados. Neste intuito, eles exercitam o potencial criativo que possuem inato e podem até implementar sistemas muito mais otimizados para aplicações específicas. Neste artigo apresenta-se uma visão da indústria eletroeletrônica brasileira e os conceitos de sistemas digitais. Se enfatiza, principalmente, no projeto e desempenho de um microprocessador de 8-bits, destacando as experiências técnicas e o potencial que pode trazer para as PMEs, do setor de automação, do ponto de vista de custo, tecnologia e inovação. Dessa maneira, verifica-se que projetar circuitos e sistemas digitais usando-se dessa metodologia (FPGAs e VHDL) poderá ter um grande impacto na economia das pequenas e médias empresas do setor eletro-eletrônico, as quais precisam inovar para se manterem competitivas diante do cenário de globalização.

Palavras-chave: Inovação Tecnológica, Sistemas Digitais, Circuitos Programáveis, Setor Eletroeletrônico Brasileiro, Automação Industrial

Abstract. In the electro-electronics industry world, there are several technologies and methodologies used for developing and projecting circuits and digital systems. Recently, in Brazil it has been beginning to use programmable circuits (FPGAs) projected and implemented through a special language (VHDL). FPGAs allow projecting complex digital systems such as microprocessors and microcontrollers, which of both represent a good percentage of the digital systems used in the automation sections and useful electronic components to the electro electronics industry. With FPGAs it is possible to project and to implement those digital system for specific needs. Thus, this paper to try emphasizing that to project circuits and digital systems using FPGAS and VHDL, it can serve as alternative to innovate in small and medium companies associated to the automation sections and electronic components of Brazil. This conclusion bases on the fact of the technology and methodology based on FPGAs and VHDL offers three important factors: (i) they need a time of product (prototypes) much smaller than the traditional methodologies of microelectronic and other available ones in Brazil, (ii) Their costs are relatively low and accessible to Small and Medium Enterprises and (iii) it explores the innate creative potential and of innovation that the people of that area already possess.

Keywords: Technological Innovation, Digital Systems, Programmable Circuits, Brazilian Electro electronics Sector, Industrial Automation

tabela 1). Os direcionadores de custos estruturais são aqueles resultantes da estrutura econômica e tecnológica da indústria e da escolha estratégica da empresa.

Tabela 1. Direcionadores de Custos Estruturais e de Execução

Custos Estruturais	Custos de Execução
<i>Escala:</i> tamanho de um investimento a ser feito	<i>Envolvimento da força de trabalho</i> – participação o conceito de comprometimento da força de trabalho com a melhoria contínua;
<i>Escopo:</i> grau de integração vertical – a magnitude pela qual a empresa possui ou controla as operações dos fornecedores e consumidores,	<i>Gestão da qualidade total</i> – do produto e do processo
<i>Experiências:</i> quantas vezes no passado a empresa já fez o que está fazendo agora;	<i>Utilização da capacidade</i> –dadas as escolhas de escala na construção da unidade
<i>Tecnologia:</i> tecnologias de processos são usadas em cada fase da cadeia de valor da empresa–da produção das matérias-primas até a distribuição do produto final;	<i>Eficiência</i> da configuração das instalações
<i>Complexidade:</i> amplitude da linha de produtos ou de serviços a ser oferecida aos clientes	<i>Habilidade da empresa</i> em explorar as ligações com os fornecedores e/ou clientes

A maneira como a direção da empresa toma as decisões sobre esses fatores afeta os produtos e seus custos de produção. Contudo, os direcionadores de custos estruturais e o custo final não são diretamente correlacionáveis. Em outras palavras, uma quantidade adicional de qualquer desses fatores pode ou não reduzir o custo de produção.

Os direcionadores de custo de execução (Riley, op. cit.) são aqueles que refletem a habilidade de uma empresa executar de forma bem sucedida suas operações de produção.

Na atual conjuntura econômica, as pequenas e médias empresas (PMEs) estão sendo submetidas a restrições que provocam a redução dos preços dos produtos. Logo para manter a taxa de rentabilidade que permita uma permanência no mercado, a empresa tem que ampliar a receita e/ou diminuir os custos.

Nesse sentido, o artigo pretende enfatizar as vantagens de utilizar FPGAs (circuitos programáveis) em PMEs ligadas ao setor eletro-eletrônico e, em especial, ao setor de automação industrial, pois esta nova tecnologia permite projetar e implementar sistemas eletrônicos digitais de forma mais fácil do que a tradicional e tem a grande vantagem de possibilitar a criação de novos mecanismos de inovação. E o mais importante, a

utilização de FPGAs, está intimamente ligado à diminuição de custos, tanto estruturais quanto os custos de execução. Assim, a utilização de FPGAs interage diretamente com o sistema de custos de uma PME, além de facilitar o processo de inovação.

2. O PANORAMA DO SETOR ELETROELETRÔNICO BRASILEIRO

A grande onda de liberalização, abertura comercial e câmbio sobrevalorizado nos anos 90 produziu mudanças e retrocessos estruturais na configuração industrial e empresarial brasileira com significativa desnacionalização em muitos setores.

O setor eletroeletrônico é um dos exemplos mais marcantes das profundas mudanças estruturais pelas quais vem passando a produção nacional, as empresas de quase todos os setores da indústria continuam alterando a cadeia produtiva, aumentando as importações e diminuindo o valor adicionado por produto fabricado (Gomide & França, [3]).

Na década de 90 a indústria de componentes instalada no País quase foi destruída, como reflexo da abertura sem critérios da nossa economia, da acentuada desnacionalização dos produtos aqui fabricados e da sobrevalorização do real por um período muito longo.

Em 1990 existiam no Brasil cerca de 200 empresas fabricantes de componentes e hoje pouco mais de 50 atuam no setor. Atualmente, o mercado mundial de eletrônica movimenta US\$ 3,5 trilhões, com tendência de crescimento e, o mercado mundial de petróleo US\$ 2,8 trilhões, com tendência de queda.

No Fórum de Competitividade da Cadeia Produtiva do Complexo Eletrônico Brasileiro realizado no ano 2000 (Fórum, [2]) o Brasil concordou com a decisão de vários outros países que definiram o setor de eletrônica como prioridade econômica, caso da China, Coréia, Taiwan, EUA, Japão e outros.

Portanto, a eletrônica é um setor de extremo dinamismo e com diversas aplicações. Isso faz com que o desenvolvimento tecnológico se configure como um elemento central para aquelas empresas que desejam acompanhar a sua evolução, mantendo-se competitivas.

O complexo eletrônico compreende os setores responsáveis pelo projeto e fabricação de sistemas e, os vários setores fornecedores de insumos, partes e equipamentos. Alguns sistemas eletrônicos são bens finais de consumo (áudio e vídeo, equipamentos fotográficos, relógios e etc.). Outros são bens de investimentos utilizados na indústria, na agricultura e nos serviços (equipamentos de processamento de dados, escritório, telecomunicações e instrumentos de precisão para usos científicos, médicos e industriais). O setor eletroeletrônico está conformado por oito (8) sub-áreas como apresentado na tabela 2.

Tabela 2. Áreas que compõem o Setor Eletro-Eletrônico Brasileiro

1. Automação industrial	2. Componentes elétricos e eletrônicos
3. Equipamentos Industriais	4. Geração, transmissão e Distribuição de energia Elétrica
5. Informática	6. Material Elétrico de Instalação
7. Telecomunicações	8. Utilidades Domésticas Eletroeletrônicas

2.1 Informações dos Anos 2000 e 2001

O setor eletroeletrônico apresentou faturamento de R\$ 58,2 bilhões em 2001 com crescimento de 15% em relação a 2000, de acordo com os dados da ABINEE (Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica), como visto na figura 1. Tal desempenho pode ser considerado positivo, levando-se em conta o cenário turbulento de 2001, marcado pela crise de Argentina, ataques terroristas aos EUA e arrefecimento da economia mundial.

importações do setor eletro-eletrônico para os anos de 2000 e 2001.

Tabela 3. Exportações e Importações do Setor Eletro-Eletrônico anos 2000/2001 [Fonte Abinee [1]]

Áreas	Importações US\$ milhões		Exportações US\$ milhões	
	2000	2001	2000	2001
Automação Industrial	801	945	62	732
Componentes Elétricos e Eletrônicos	6.620	5.761	1.519	1.558
Equipamentos Industriais	667	1.320	219	262
GTD	213	335	200	195
Informática	1.080	1.032	346	251
Material Elétrico de Instalação	640	932	142	152
Telecomunicações	1.522	1.862	1.158	1.327
Utilidades Domésticas Eletroeletrônicas	355	313	778	693
Total	11.887	12.500	4.423	4.512

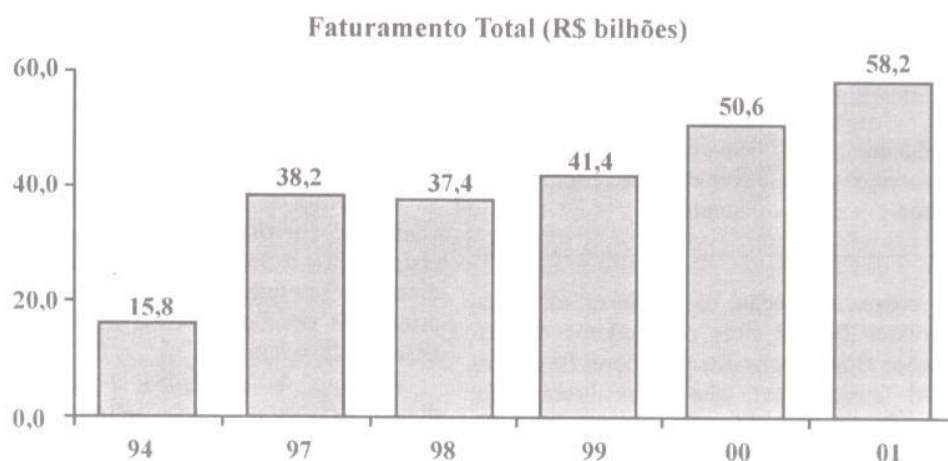


Figura 1. Faturamento da Indústria Eletroeletrônica. [Fonte Abinee.[1]]

Balança Comercial: No ano de 2001, o déficit da balança comercial setorial totalizou US\$ 8 bilhões, com as exportações somando US\$ 4,5 bilhões e as importações US\$ 12,5 bilhões. Em 2000, as exportações somaram US\$ 4,4 bilhões e as importações US\$ 11,9 bilhões. O saldo negativo foi de US\$ 7,5 bilhões.

As exportações dos produtos eletroeletrônicos no 1º semestre de 2001 totalizaram US\$ 2,08 bilhões, com acréscimo de 1,8% em relação ao igual período do ano anterior. A maior parcela das exportações foi da área de Componentes, com um volume de US\$ 711,7 milhões, seguida por Telecomunicações com vendas externas de US\$ 541,1 milhões. As importações cresceram, no 1º semestre de 2001, 31,6% em relação ao mesmo período de 2000, com volume de US\$ 6,83 bilhões. Na tabela 3 são apresentados os valores das exportações e das

Nos próximos 20 anos o mercado de bens eletroeletrônicos crescerá em escala geométrica no Brasil. As projeções indicam que, neste período, a representatividade da indústria eletroeletrônica em relação ao PIB passará dos atuais 4,2% para níveis superiores a 10%.

É preciso, portanto, ampliar e modernizar o parque industrial brasileiro, elevar o valor agregado da produção e perseguir índices crescentes de qualidade, priorizando os investimentos em pesquisa, desenvolvimento e na formação profissional dos nossos trabalhadores.

Para tanto, a indústria deve estar voltada para o aprimoramento contínuo do sistema educacional, desde o nível básico até as mais modernas e avançadas instituições de pesquisa e universidades. Afinal, a tecnologia transformou-se de ferramenta em vantagem

competitiva fundamental. Precisa-se atrair para o Brasil empresas detentoras de tecnologia e definir um modelo baseado em trocas internacionais, capaz de atender parcialmente ao mercado interno e destinar parte substancial da produção ao mercado internacional.

Aproveitando a visão do setor eletro-eletrônico, acredita-se que os FPGAs poderão facilitar o processo de projetar circuitos e sistemas digitais (CSDs) muito usados em todos os setores da indústria eletro-eletrônica, conforme indicado na tabela 6. Ressalta-se que há uma maior ênfase nos setores de automação e componentes eletrônicos do setor das PMEs, pois essa nova tecnologia facilita e conduz a rápidos projetos a baixo custo, o que possivelmente ajudará a fomentar o crescimento desse setor considerado tão importante para a economia do Brasil. Assim, a seção seguinte apresenta os conceitos e vantagens de se usar esses FPGAs.

2.2 Análise no Ano de 2003 [Abinee [1]]

Saldo: Nos primeiros nove meses de 2003, a Balança Comercial dos Produtos Elétricos e Eletrônicos apresentou déficit de US\$ 3,57 bilhões, montante 21,6% inferior ao verificado em igual período de 2002 (US\$ 4,56 bilhões). As exportações atingiram US\$ 3,44 bilhões, com acréscimo de 7,7% em relação a janeiro-setembro de 2002, e as importações US\$ 7,01 bilhões, com queda de 9,5% na mesma comparação.

As transações comerciais realizadas com o Sudeste da Ásia (exceto Oriente Médio) foram as responsáveis pela maior parte do déficit do setor no período janeiro-setembro/03, atingindo US\$ 2,75 bilhões. Em seguida, veio a União Européia com déficit de US\$ 1,17 bilhão.

Por outro lado, os negócios com os países da ALADI geraram superávit de US\$ 666 milhões, sendo que US\$ 202 milhões foram somente com a Argentina.

Exportações: Da mesma forma do que vem se verificando durante todos os meses deste ano, com exceção do mês de março, as exportações de produtos elétricos e eletrônicos permaneceram, em setembro/03, acima das ocorridas em setembro/02.

Em setembro, as exportações cresceram em relação a igual período do ano passado (+20,4%) e na comparação com agosto de 2003 (+13,9%). Todas as áreas tiveram um bom desempenho. A que mais exportou foi Componentes Eletro-eletrônicos com US\$ 177 milhões, seguida Telecomunicações com US\$ 126 milhões.

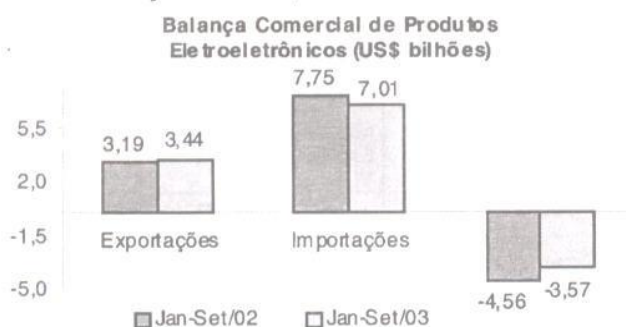


Figura 3. Balança Comercial dos Produtos Eletro-Eletrônicos no ano de 2003 [Fonte Abinee [1]]

Na comparação com setembro do ano passado, as maiores taxas de crescimento estiveram por conta das áreas de Automação Industrial (+83,7%), Utilidades Domésticas (+37,1%), Informática (+34,9%) e Equipamentos Industriais (+29,6%).

Com esses resultados, as exportações acumuladas no ano somaram US\$ 3,4 bilhões, 7,7% acima das registradas no ano passado (ver figura 3).

Durante o ano de 2003, a recuperação do mercado argentino foi a principal responsável pelo crescimento das exportações do setor eletroeletrônico. A participação das vendas para aquele País sobre o total das exportações do setor, que no ano passado estava em 4%, passou para 9% em janeiro-setembro/2003, atingindo US\$ 302,0 milhões. Todas as áreas aumentaram suas exportações para a Argentina, sendo que, o maior montante foi de Componentes Elétricos e Eletrônicos com US\$ 85,2 milhões, e as maiores porcentagens de crescimento foram de 594% para bens de Informática, seguidos de 420% para Utilidades Domésticas e 305% para equipamentos para Telecomunicações (ver detalhes na tabela 4).

Tabela 4 Exportações do Setor Eletroeletrônico
JANEIRO-SETEMBRO [Fonte Abinee [1]]

Áreas	US\$ milhões		Var %
	2002	2003	
Automação Industrial	49,0	53,4	9,1%
Componentes (Total)	1.255,5	1.294,8	3,1%
- Elétricos	717,0	827,4	15,4%
- Partes e Peças	172,8	250,4	44,9%
- Componentes	544,2	577,0	6,0%
- Eletrônicos	538,5	467,4	-13,2%
- Partes e Peças	245,7	201,1	-18,2%
- Componentes	292,8	266,3	-9,1%
Equipamentos Industriais	205,2	245,0	19,4%
GTD	118,1	117,2	-0,8%
Informática	80,6	136,9	69,8%
Material de Instalação	103,7	108,8	4,9%
Telecomunicações	973,7	987,8	1,4%
Utilidades Domésticas	406,5	492,8	21,2%
Total	3.192,3	3.436,8	7,7%

Os produtos mais exportados para a Argentina e respectivos montantes, no período de janeiro a setembro deste ano, foram os seguintes: eletrônica embarcada (US\$ 41 milhões), periféricos de computadores (US\$ 25 milhões), refrigeradores (US\$ 22 milhões), telefones celulares (US\$ 21 milhões) e equipamentos para telefonia pública (US\$ 18 milhões).

Foi importante, também, o crescimento das exportações para os países da União Européia (+21,2%) e do Resto do Mundo (+20,0%), que totalizaram US\$ 386 milhões e US\$ 326 milhões, respectivamente.

O mercado americano no período de janeiro-setembro/03 continuou como o principal importador de

produtos eletro-eletrônicos brasileiros (US\$ 1,7 bilhão), apesar do pequeno recuo verificado nas exportações para os Estados Unidos na comparação com igual período do ano passado (-0,3%).

Ainda em relação aos primeiros nove meses do ano, as piores performances para nossas exportações ficaram por conta dos outros Países da ALADI (exceto Argentina), que apresentaram queda de 3,3%, e Sudeste da Ásia, com retração de 19,7%.

Quanto aos bens do setor eletroeletrônico mais exportados, no período de janeiro a setembro deste ano, destacou-se o telefone celular, com US\$ 807 milhões, representando 23% das exportações do setor. O maior mercado para este produto foi o americano, com US\$ 690 milhões, seguido dos países da ALADI com US\$ 108 milhões.

Foi bastante significativo o crescimento das exportações de refrigeradores, que passaram de US\$ 42 milhões de janeiro a setembro/02, para US\$ 108 milhões de janeiro a setembro/03. A expansão ocorreu em várias regiões do mundo, como Argentina (+784%), outros ALADI (+22%), EUA (+584%), União Européia (+198%) e Sudeste da Ásia (+414%).

Tabela 5 16 Produtos mais importados
JANEIRO-SETEMBRO

Produtos	US\$ milhões		Var %
	2002	2003	
Semicondutores	1.105	1.228	11%
Componentes p/ Informática	647	610	-6%
Comp.p/ Telecomunicações	464	578	24%
Grupo Motogerador	1.013	431	-57%
Instrumentos de Medida	393	375	-4%
Eletrônica Embarcada	318	352	11%
Comp. p/ Equip. Industriais	237	234	-2%
Outros Mat. Elétr. Instalação	197	211	7%
Cinescópios	219	193	-12%
Componentes Passivos	197	192	-2%

Interessante observar os dados da tabela 5, os quais permitem afirmar que dois setores atrativos para as PMEs do Setor Eletro-Eletrônico são ELETRÔNICA EMBARCADA e a dos COMPONENTES PARA EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS, onde a utilização de FPGAs pode ser relevante, pois esta tecnologia e as suas ferramentas associadas de desenvolvimento permitem criar protótipos de circuitos e sistemas digitais específicos para as necessidades de equipamentos e aplicações de interesse nesses setores, com baixo custo e rápido desenvolvimento dos primeiros protótipos industriais, os quais posteriormente podem ser fabricados em volume, a um custo mais favorável usando-se de outra tecnologia como ASICs (Circuitos de Aplicações Específicas), por exemplo.

3. CIRCUITOS PROGRAMÁVEIS (FPGAs)

FPGAs (Field Programmable Gate Arrays) são circuitos programáveis compostos por um conjunto de células lógicas ou blocos lógicos alocados em forma de uma matriz. Um FPGA é um componente que tem a aparência externa equivalente a um circuito integrado comum. Um FPGA é como um "mar" de células básicas (portas AND, OR, LUTs, CLB, Flip-flops) desconexas, onde a conexão será feita no momento em que for programado. A forma e disposição das conexões entre as células geram um circuito, que é definido pelas instruções de um programa que será armazenado no FPGA (Van Den Bout, [16]; Oldfield, [7]).

A "programação" do FPGA pode ser feita utilizando-se VHDL - Linguagem de Descrição de Hardware, dentre outras linguagens, sendo assim o "programa" gerado por intermediário da linguagem, é "descarregado" no FPGA, onde agora o FPGA se comporta seguindo as instruções do programa que resolverá um problema específico.

Os fabricantes mais famosos de dispositivos FPGA e CPLD são XILINX e ALTERA e, ambos oferecem excelentes softwares para o desenvolvimento de projetos incluindo compilador de VHDL ou Verilog, além de recursos gráficos que contêm bibliotecas (conhecido como projeto em esquemático, que permite a união de várias portas lógicas necessárias ao projeto). Integrado ao software há também potentes simuladores do comportamento do circuito idealizado, gerando estatísticas de temporização, espaço ocupado pelo projeto no FPGA ou CPLD, dentre outras informações.

A título de exemplo, pode-se fazer o FPGA se comportar como quase todos os chips existentes no mercado atual, "imitando" o comportamento do chip diante dos dados a serem processados. É claro que não é uma tarefa tão fácil, pois precisa-se saber exatamente a lógica comportamental, temporização e todas as características do chip a ser "imitado", além de conhecer profundamente uma linguagem de descrição de hardware (VHDL).

Tabela 6. Possíveis Aplicações das FPGAs [Smith, [11]]

Áreas de Aplicação	Exemplos de Utilização
Previsão do Tempo	HDTV, CATV
Consumo	Decodificador de áudio digital, Arcade Games, Video Games, Sistemas de Karaokê
Transportes	Sistemas de estradas de ferro, Controle de Tráfego, Semáforos, Sistemas de Controle
Industrial	Equipamentos de teste e medidas, Equipamentos médicos, Controle remoto, Robótica, Emulador ASIC, Sistemas de Visão
Comunicação de Dados	Multiplexadores, Roteadores, Vídeo Conferencia, Criptografia, Conectores, Modems, Compressão de dados, LAN HUBs, FDDI, Wireless LANS
Telecomunicação	Interfaces SONET, Interfaces de fibras ópticas, ATM, Interfaces ISDN, Controlador de Voice-Mail, Equipamentos PBX, Multiplexadores T1, Compressão de dados

Militar	Sistemas de computadores e comunicação, Controle de Fogo
Periféricos	Controladores de disco, Controladores de vídeo, FAX, Máquinas de caixa, Modems, Sistemas POS, Cartões de Aquisição de Dados, Terminais, Impressoras, Scanners, Copiadoras
Computadores	Interfaces de memória, Controladores DMA, Controladores de Cache, Co-Processadores SSP, Multimídia, Gráficos

Sabendo estes aspectos, os únicos limites são o tamanho do FPGA (número de portas lógicas - gates) (Tocci, [15]) que atualmente está em aproximadamente seis milhões de portas lógicas e 560 seu número de portas de E/S (entrada e saída, úteis para comunicação com outros aparelhos e/ou circuitos). Com exceção de poucos chips específicos como o Pentium, processadores de imagem em três dimensões (3D), aceleradores gráficos, a grande maioria dos chips comuns do mercado atual não ultrapassa dois milhões de portas lógicas e algo em torno de 250 pinos de E/S (Smith, [11]). Portanto, pode-se observar que os limites de FPGAs não são em nada intimidadores, pois permitem projetar e implementar sistemas digitais tão complexos como um microprocessador Pentium ou até mais poderosos.

A utilização do FPGA na indústria tem um amplo horizonte: podendo-se implementar desde circuitos básicos - como um rádio relógio - até circuitos complexos como uma CPU (Unidade Central de Processamento - é o coração dos microprocessadores e microcontroladores) potente (ver informações da tabela 6). E o mais interessante é que pode-se alterar facilmente o "programa fonte" que define o comportamento do FPGA e trocar sua "lógica" interna diretamente na placa do circuito final, caso necessite de alguma alteração de comportamento ou de adição de novas portas de E/S não previstas no protótipo inicial. Importante salientar que essas possíveis mudanças não aumentam significativamente os custos de projeto de sistemas digitais.

Pode-se ainda, desenvolver circuitos onde o núcleo é um FPGA, e a lógica final do funcionamento, poderá ser trocada pelo próprio usuário. Um exemplo prático é trocar o processador do computador, simplesmente fazendo um "download" na internet, do código a ser inserido no FPGA, ou em outras palavras: trocar um Pentium III por um Pentium IV, simplesmente alterando o software comportamental do FPGA, sem precisar alterar completamente o hardware que o compõe.

No sentido de aplicações específicas, os FPGAs possuem desempenho de processamento equivalente ou superior a circuitos integrados de propósito geral, pois após desenvolvido um programa que represente a lógica funcional do circuito geral, bastará programar o FPGA e este sendo um chip único, resulta em hardware menor, com boa capacidade de processamento e menor consumo de energia e direcionado a resolver problemas específicos.

Estrutura de um FPGA: A estrutura básica de um FPGA pode variar de fabricante para fabricante, de família para família ou até em uma mesma família pode existir variações, mas algumas características fundamentais sempre são mantidas. Pode-se destacar três características fundamentais em um FPGA: (i) CLB, (ii) IOB e (iii) SBs. A figura 4 apresentam a estrutura interna de um circuito programável.

CLB (Configurable Logic Block) Bloco Lógico Configurável, unidade lógica de uma FPGA, Em algumas arquiteturas, os Blocos Lógicos possuem recursos sequenciais tais como *flip-flops* e/ou registradores. Cada fabricante nomeia o seu Bloco Lógico, podendo haver mais de uma denominação para um mesmo fabricante. Assim, elas podem ser chamadas de LM (*Logic Modules*), LE (*Logic Elements*, ou *CLBs*).

IOB (In/Out Block) Bloco de entrada e saída, localizado na periferia dos FPGAs. Os IOBs são responsáveis pela interface com o resto do sistema.

SB (Switch Box): Caixa de conexão, responsável pela interconexão entre os CLBs através dos canais de roteamento, que é realizada através de uma rede de camadas de metal. As conexões físicas entre os fios são feitas ora com transistores de passagem controlados por bits de memória (PIP) ora com chaves de interconexão (*Switch Matrix*).

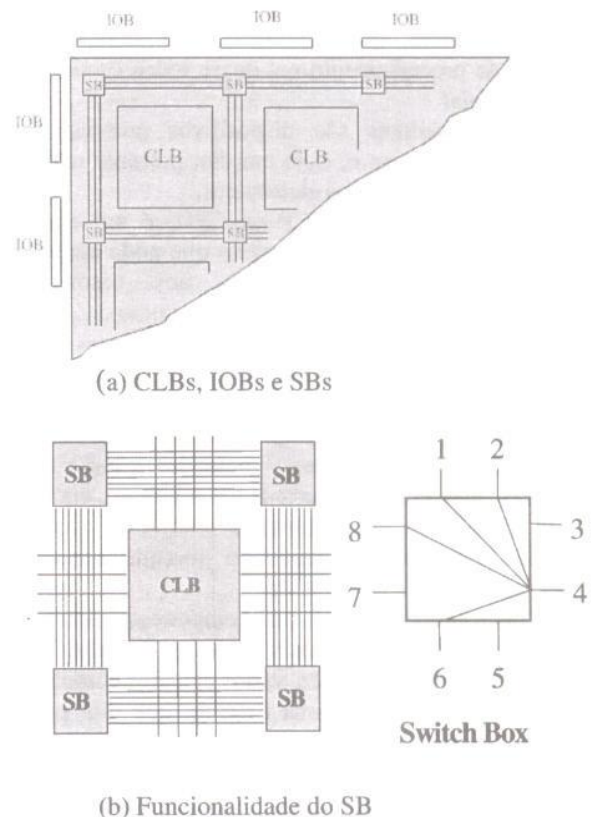


Figura 4. (a) Representação dos elementos básicos de uma FPGA. (b) Um SB

Em geral, a funcionalidade destes blocos assim como o seu roteamento são configuráveis por software. A palavra Field indica que a configuração do circuito pode ser feita pelo usuário final sem a necessidade da utilização de recursos de foundries internacionais, o que diminui grandemente os custos associados as circuitos e sistemas digitais. Os FPGAs, além de proporcionar um ambiente de trabalho simplificado e de baixo custo possibilita operar com um número ilimitado de circuitos através da configuração do próprio dispositivo.

4. CONCEITOS DE MICROPROCESSADORES E MICROCONTROLADORES

4.1 Microprocessadores

Nos últimos anos tem-se observado um aumento significativo na utilização e complexidade dos sistemas de informação, principalmente na complexidade de especificação, projeto, implementação, validação, programação e aprendizado da teoria dos sistemas computacionais. Analisando os sistemas computacionais usados nos últimos anos observa-se muitas inovações nas arquiteturas e tecnologias utilizadas nas implementações. Entre os elementos construtivos mais importantes dessas arquiteturas pode-se destacar os elementos de processamento, entrada e saída (E/S), e armazenamento.

Mas, sem dúvida os elementos de maior destaque, pela importância, evolução e complexidade são os microprocessadores, que atualmente são usados como elementos de processamento em quase todos os sistemas computacionais.

Microprocessadores são dispositivos presentes em todos os computadores e, hoje em dia, presente também em muitos outros aparelhos eletrônicos.

O Microprocessador (MCP ou CPU) é um circuito integrado eletrônico muito complexo que pode conter de alguns milhares de transistores nos casos dos microprocessadores de segunda geração, como o Z-80 e o 8085, até 7 milhões de transistores nos microprocessadores de última geração (Ex. o Pentium II). Os transistores internos ao microprocessador constituem os mais diversos circuitos lógicos, como registradores, decodificadores, contadores, unidades lógicas e aritméticas, acumuladores, etc. Estes inúmeros circuitos lógicos arranjados em estruturas complexas dão ao microprocessador a capacidade de executar operações lógicas, aritméticas e de controle.

Um microprocessador é um componente eletrônico que, devido às suas modernas técnicas de fabricação, consegue efetuar com rapidez, vários cálculos complexos, sob controle de um programa externo, que dita para a máquina a seqüência das operações a serem executadas. Estas operações do programa externo são executadas possibilitando grande redução no tempo de finalização de uma determinada tarefa.

Seu funcionamento consiste em um processo contínuo de busca por instruções e dados, que são processados de maneira lógica, em forma seqüencial ou paralela, onde as instruções determinam o tipo de cálculo que será

realizado sobre estes dados. Um microprocessador pode realizar milhões de cálculos por segundo, os quais podem ser cálculos de soma, multiplicação, divisão, subtração e etc.

4.2 Microcontroladores

Microcontroladores estão sendo cada vez mais utilizados nas indústrias e em projetos que envolvem informática e eletrônica. Um Microcontrolador possui características de um sistema computacional completo em um único chip: CPU, Memória RAM, Memória EPROM ou EEPROM, Portas de comunicação I/O selecionáveis por software, bloco de comunicação com algum protocolo conhecido, Timer gerador de sinais para interrupções, Conversor A/D e outras características que variam de fabricante a fabricante. De forma genérica a diferença básica entre microcontroladores e microprocessadores é a presença ou a ausência desses componentes (Microcon, 2002). Dentre os Microcontroladores mais conhecidos do mercado atual, podemos citar: COP8 (National), PIC (Microchip), 8051 (Vários fabricantes), MSP (Texas Instruments) e M68HC11 da Motorola.

Importante ressaltar que para o setor da automação industrial e demais áreas do setor eletro-eletrônico, os microcontroladores são muito úteis pois eles além de ter um microprocessador, possui também memórias e unidades especiais para se comunicar com outros aparelhos e ou componentes eletrônicos. Um fator a ser salientado é o fato de ser possível construir um microprocessador em um FPGA e, similarmente, também é possível projetar e implementar microcontroladores em esses circuitos programáveis. Por esse motivo, FPGAs, são uma boa alternativa para o setor de automação e, em especial, para as PMEs, pois com circuitos programáveis é possível projetar eficientemente e a baixo custo MCPs e MCCs com características próprias às necessidades da indústria brasileira.

5. EXPERIÊNCIAS NO PROJETO DE UM MICROPROCESSADOR EM FPGAs

No CIEM (Centro Incubador de Empresas de Marília), foram projetados vários microprocessadores, de 8-bits e 16 bits, focalizados para diferentes aplicações do setor eletro-eletrônico. A seguir descreve-se o projeto e alguns dados de desempenho do chip e, em especial, destacando as experiências e lições aprendidas no uso dessa nova tecnologia (Circuitos Programáveis – FPGAs). Importante salientar também que esta tecnologia, e as experiências de projeto adquiridas no LAS (Laboratório de Sistemas Computacionais do UNIVEM – Centro Universitário Eurípides de Marília), focalizam no potencial que essa tecnologia oferece para o setor eletro-eletrônico brasileiro, as quais podem ser úteis para outros projetistas e empresários de PMEs interessadas no projeto de sistemas digitais próprios às necessidades da região e do país (Moreno et Al., [6]).

A CPU é o “cérebro” do computador, sua função é executar programas armazenados na memória principal, buscando suas instruções, examinando-as, e então executando uma após a outra. A CPU é composta por varias partes distintas. A unidade de controle é responsável pela busca de instruções da memória principal e determinação de seus tipos. A unidade lógica e aritmética faz operações tais como adição, subtrações, AND e OR, necessárias para execução das instruções. A CPU contém ainda blocos como contador de programa, que aponta para próxima instrução a ser executada. O Registrador de instrução também é importante (Tanenbaum, [14]).

- (i) Modo de Execução de instruções (passo a passo): Uma tarefa complexa é realizada seguindo um processo de execução passo a passo de instruções, como descrito na figura 5, onde uma instrução é buscada na memória principal até a decodificação e execução, armazenando o(s) resultado(s) em locais apropriados:

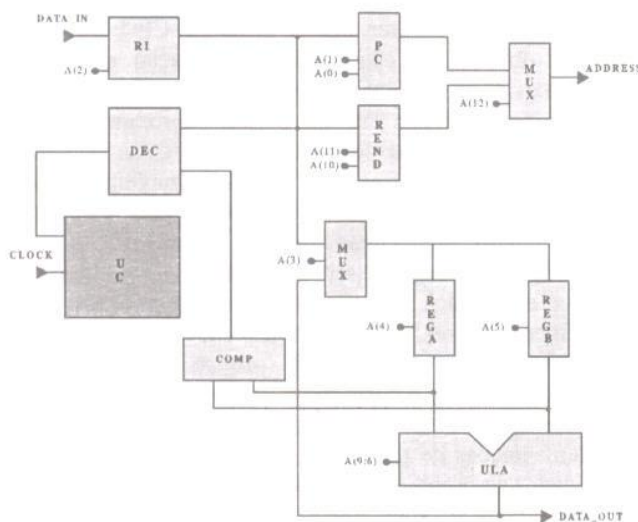


Figura 5 – Visão Geral da Arquitetura da CPU implementada em FPGAs

Assim, o processo é descrito nas seguintes oito fases:

- (ii) Busca a próxima instrução da memória e envia para o registrador de instrução (RI).
- (iii) Atualiza o contador de programa (PC) para que ele aponte para a instrução seguinte.
- (iv) Determina o tipo da instrução.
- (v) Se a instrução usa dados da memória, determina que posições eles estão.
- (vi) Busca os dados, se houver algum, e envia para registradores internos da CPU;
- (vii) Executa a instrução.
- (viii) Armazena resultado(s) em locais apropriados, determinadas posições de memória ou registradores da UCP.
- (ix) Volta ao passo 1 para iniciar a execução da próxima instrução.

Esta seqüência de passos é freqüentemente referida como ciclo de “busca-decodifica-executa”. Ela é o centro da operação de todos os computadores, microprocessadores e microcontroladores [TANENBAUM, [14]].

Desenvolver um sistema complexo, como uma UCP, em VHDL, exige desde um conhecimento aprofundado da linguagem VHDL até o conhecimento geral e específico do funcionamento de todo o sistema [CARRO, 2001].

A figura 5 apresenta todos os módulos ou blocos da UCP e suas respectivas interconexões necessárias para o seu correto funcionamento. É possível identificar os blocos através das respectivas abreviações indicadas anteriormente.

Essa UCP simplificada é composta por apenas: (i) Um Registrador de Instrução (RI); (ii) Um Registradores de A (RegA) e B (RegB) de alimentação da ULA; (iii) Um Decodificador de Instruções (DEC); (iv) Multiplexadores (MUX) para auxiliar no controle do fluxo de informação; (v) Uma Unidade Lógica e Aritmética (ULA); (vi) Um Contador de Programa (PC); (vii) Um Registrador de Endereço (REND); (viii) Um Comparador (COMP); (ix) Uma Unidade de Controle (UC). [BROWN, 2000].

Cada um destes módulos unidos por uma lógica de controle compõem uma UCP. Inicialmente se apresenta o funcionamento geral do sistema e posteriormente apresenta-se o funcionamento detalhado do sistema projetado com VHDL e mapeado em um FPGA.

Tabela 7 – Instruções da CPU Simplificada para Aplicações de Automação

Nº	Opcode	Instrução	Significado
1	0000	MOV A,DADO	A recebe DADO
	0000	MOV B,DADO	B recebe DADO
	0000	MOV A,REND	A recebe REND
	0000	MOV B,REND	B recebe REND
	0000	MOV REND,A	REND recebe A
	0000	MOV REND,B	REND recebe B
2	0001	ADD A,B	A recebe A+B
3	0010	SUB A,B	A recebe A-B
4	0011	OR A,B	A recebe A or B
5	0100	AND A,B	A recebe A and B
6	0101	XOR A,B	A recebe A xor B
7	0110	NAND A,B	A recebe A nand B
8	0111	NOR A,B	A recebe A nor B
9	1000	XNOR A,B	A recebe A xnor B
10	1001	JUMP [END]	JUMP para END
11	1010	INC	Incrementa
12	1011	DEC	Decrementa
13	1100	CMP A, B	Compara A-B
14	1101	JG [END]	JUMP se maior para END
15	1110	JL [END]	JUMP se menor para END
16	1111	JZ [END]	JUMP se zero para END

O sistema digital descrito a seguir é uma CPU de 8 bits relativamente simples sendo composta por 16 instruções básicas. A tabela 7 mostra as 16 instruções que a CPU é capaz de executar. Essas operações são consideradas suficientes para aplicações e necessidades da área de automação, destinadas a empresas de pequeno e médio porte (Moreno & Silva [5]).

Cada instrução possui um opcode ou código de operação. Tendo um conjunto de 16 instruções é necessário 4 bits ($2^4=16$) de opcode para diferenciar cada uma delas. Note que existe vários tipos de instrução MOV, mas o seu opcode é sempre o mesmo (0000), pois como já foi citado cada instrução possui um opcode.

A CPU é implementada utilizando diferentes metodologias, (i) inicialmente a implementação de uma CPU microprogramada em VHDL, (ii) posteriormente a implementação da mesma CPU utilizando esquemático e (iii) finalmente a implementação utilizando máquina de estado finita (FSM), descrição em VHDL.

A CPU exemplo é completamente implementada utilizando a ferramenta da Xilinx, Foundation Series 3.1. A implementação em um FPGA real, onde o arquivo gerado pela síntese e implementação é descarregado na placa de desenvolvimento, necessita de uma memória RAM onde são armazenadas as instruções e dados que são executados pela CPU. A ferramenta da Xilinx Foundation disponibiliza um módulo de uma memória RAM, utilizado no projeto para armazenar as instruções a serem executadas.

A tabela 8 apresenta uma comparação de estatísticas de desempenho e espaço ocupado na FPGA, pelas três diferentes metodologias de projeto da CPU. O funcionamento das três implementações foi devidamente verificado tanto em software quanto em hardware. Na verificação em software usou-se da simulação funcional e temporal próprio da ferramenta da Xilinx. Já na verificação em hardware usou-se do osciloscópio verificando o funcionamento real da CPU em FPGAs.

Importante destacar que as três metodologias de projeto utilizadas são diferentes. O primeira delas, esquemático, é a mais simples, porém a sua performance é muito baixa. Pode-se observar que o uso de esquemático em sistemas considerados complexos produz soluções e projetos não muito otimizados (na tabela 8 aparece como o pior desempenho, tanto em tempo quanto no uso dos circuitos programáveis). Já a solução microprogramada, é uma solução intermediária, melhora a velocidade do circuito em questão e a respectiva utilização da FPGA. Esta proposta é 40% (em tempo) e 60% (uso do FPGA) melhor que o projeto em esquemático. Já a metodologia de usar FSM, produz ainda melhores resultados (25% em tempo e 15% uso do FPGA) que a microprogramada.

Pode-se observar que há uma diferença significativa entre implementação com máquina finita de estados e as outras metodologias, visto que esta implementação simplifica a descrição da arquitetura da CPU proposta, gerando um desempenho tanto temporal com espacial mais otimizado. A frequência de operação obtida (próxima de 40 MHz) é razoável para aplicações de automação e controle nas PMEs do Brasil.

Importante ressaltar que a primeira CPU projetada usando do modelo esquemático (utilização de blocos funcionais já projetados e validados, chamados de forma gráfica) foi realizada em um período aproximado de 1 mês, por um usuário conhecedor de FPGAs, VHDL e microprocessadores. As novas implementações, microprogramada e FSM, foram projetadas em muito menos tempo (aproximadamente 1 semana). As duas novas implementações são inovadoras e melhores e, conseguem dados de performance melhorados. A implementação real e física usou o mesmo FPGA. Isso diminui muito o custo de projeto, o tempo de desenvolvimento e o custo básico, pois somente se precisa de um único FPGA para realizar todas as possíveis implementações de protótipos e soluções diferenciados e adequados ao problema original.

Importante ressaltar que se essas CPUs tivessem sido projetadas e implementadas com tecnologias tradicionais de microeletrônica, elevaria muito o custo de projeto pois neste caso precisam-se de ferramentas muito mais custosas (acima de 30000 dólares, quando aquelas dos FPGAs está em torno de 1500 a 2000 dólares).

Além disso, independentemente da metodologia de projeto usada, a versão final do primeiro protótipo do projeto inserido em um chip real, depende de empresas estrangeiras (foundries especializadas em implementar no chip algum projeto digital, pois usam de alta tecnologia de processos físicos e etc.).

No Brasil não há nem sequer uma dessas foundries. Assim, esse processo de enviar o projeto para essas empresas demandaria um tempo muito alto (acima de 6 meses) para esperar o chip realizando as funções desejadas. Isso produz custos operacionais e tempos de espera muito elevados. Soma-se a isso o fato que o chip

Tabela 8 - Estatísticas desempenho da CPU de 8 bits

	CPU de 8 bits - Três projetos Diferentes							
	FF	LUTs 4	LUTs 3	CLBs	TL (ns)	TR (ns)	TT (ns)	Freq [MHZ]
Esquemático	98	356	89	259	18.569	31.347	49.916	20
Microprogramada	83	291	29	154	11.079	23.766	34.845	28
FSM	68	259	26	137	10.140	18.721	28.861	35

FF - número de Flip-Flops, LUTs 4 - número de LUTs 4, LUTs 3 - número de LUTs 3, CLBs - número de CLBs, TL - tempo de lógica, TR - tempo de roteamento, TT - tempo total (TL+TR). Freq: Frequência de Operação da CPU projetada em MegaHertz.

produzido pode ter algum problema de fabricação ou falha funcional ou comportamental, o que produz que o processo seja novamente iniciado, incluindo novamente os tempos de espera e aumentando os custos do projeto, sem ter ainda o protótipo funcionando.

A criação de novas versões otimizadas do chip, também levariam um tempo similar, pois continua a dependência de projeto com aquelas foundries. Dessa maneira, tecnologias tradicionais de construção de projeto de circuitos e sistemas digitais são inviáveis às PMEs, além de restringir o processo de inovação.

Contrário a esse panorama, a utilização de FPGAs permite realizar protótipos adequados às necessidades próprias, a baixo custo e rapidamente. A criação e inovação de novas soluções e produtos, é facilitada e oferece acesso às PMEs. Dessa maneira, se as PMEs investirem nessa tecnologia poderão se beneficiar grandemente, pois novos produtos inovadores poderão ser rapidamente construídos e projetados a um custo relativamente baixo. Os circuitos e sistemas digitais que venham a ser implementados pelas Pequenas e Médias Empresas (PMEs) poderão ser mais adequados às necessidades próprias das respectivas aplicações de automação industrial.

Portanto, FPGAs aparecem como uma alternativa adequada às PMEs do setor eletroeletrônico, pois além de incentivar a inovação criando sistemas digitais complexos e adequados a problema típicos de várias áreas como automação e etc., diminui os custos estruturais e de execução dessas empresas.

6. CONCLUSÕES

Este artigo defende que a metodologia (utilização de FPGAs – circuitos programáveis) é eficiente e reduz o tempo de projeto de um sistema digital. Este tipo de desenvolvimento diminui o tempo de projeto e facilita a rápida atualização do mesmo, o qual pode inserir rapidamente novas funcionalidades ou até mesmo otimizações, todas no mesmo chip. O custo de otimizar os projetos é muito baixo, pois se utiliza um software para projetar e a parte final, o chip físico e real, pode ser implementado na mesma placa, sem nenhum custo adicional.

O trabalho mostra que utilizar FPGAs poderá ser uma alternativa viável para PMEs do setor eletro-eletrônico, em especial daquelas do setor de automação industrial, pois permitem projetar circuitos e sistemas complexos (tais como microprocessadores e microcontroladores) em bom tempo e em custo acessível às PMEs. Os FPGAs possibilitam inserir novidades e soluções adequadas e inovadoras próprias a problemas reais e específicos de cada empresa.

REFERÊNCIAS

- [1] ABINEE: Associação Brasileira da Indústria Eletro-Eletrônica. *Situação Atual e Perspectivas*. In: <http://www.abinee.org.br> . Extraído em 12/02/2004.
- [2] FORUM. Ministério do Desenvolvimento Indústria e Comércio Exterior- Secretaria do Desenvolvimento da Produção- *Documento Básico sobre o Fórum de Competitividade da Cadeia Produtiva do Complexo Eletro-eletrônica*- Novembro 2000.
- [3] GOMIDE S.& FRANÇA A . Mais Produção, menos Empregos. *Gazeta Mercantil*. 6 de dezembro de 1996. Caderno Nacional, pag A4.
- [4] MICROCON, Informações Gerais sobre Microcontroladores. Sites na internet:
<http://www.motorola.com/mcu/hc11/>.
http://www.home1.gte.net/tdickens/68hc11/docs_references.html
<http://www.hc11.demon.nl/thrsim11/68hc11/>
<ftp://nyquist.ee.ualberta.ca/pub/motorola/68hc11/www.microcontrolador.com.br>
http://dec1.wi-inf.uni-essen.de/~astephan/links/links_micro.htm
- [5] MORENO, E.D.; SILVA, J.L. *Computação Reconfigurável Experiências e Perspectivas* – Editora FEESR: 2000.
- [6] MORENO, E.D.; PEREIRA, F.D.; PENTEADO, C.G.; PERICINI, R.A. *Projeto, Desempenho e Aplicações de Sistemas Digitais em Circuitos Programáveis (FPGAs)*. Editora Bless: 2003.
- [7] OLDFIELD, J. V.; DORF, R.C. *Field Programmable Gate Array*. 1995.
- [8] PORTER, M. E. Os caminhos da lucratividade: como implementar uma verdadeira vantagem competitiva. *HSM Management*. São Paulo: Savana, v.1, n.1, março-abril, 1997. p.88-94.
- [9] RILEY, D. Competitive cost based investment strategies for industrial companies. In: *Manufacturing issues*. New York: Booz, Allen, Hamilton. 1987.
- [10] SHANK, J. K. , GOVINDARAJAN, V. *A revolução dos custos: como reinventar e redefinir sua estratégia de custos para vencer em mercados crescentemente competitivos*. 2.ed. Rio de Janeiro: Campus, 1997. 341p.
- [11] SMITH, D. L. *HDL Chip Design: A practical guide for designing, synthesizing and simulating ASICs and FPGAs using VHDL or Verilog* – Doone Publications.1997.

[12] SOUZA, M. C.A., BACIC,J.M; COELHO, J.M. Gestão Estratégica de Custos e as Pequenas e médias empresas. In. Anais do Simpósio de Engenharia de Produção.- SIMPEP—*Gestão de Pequenas e Médias Empresas*. Unesp- Bauru: 2000.

[13] TALAMO, J.R. *Inovação Tecnológica em pequenas e médias Empresas do Setor Eletro-Eletrônico*. Dissertação de Mestrado- Escola Politécnica da USP- Departamento de Engenharia de Produção. 2001.

[14] TANENBAUM, A.S. *Organização Estruturada de Computadores* – Terceira Edição - Editora Prentice-Hall do Brasil LTDA: 1992.

[15] TOCCI, R. J. *Sistemas Digitais Princípios e Aplicações* Prentice- Hall do Brasil: 1996.

[16] VON DEN BOUÏ, D. *The Pratical Xilinx Designer* Lab Book: 1997.