



Centro Universitário da FEI  
Projeto de Iniciação Científica



---

RELATÓRIO FINAL INICIAÇÃO CIENTÍFICA

**IMPLEMENTAÇÃO DE METODOLOGIA PARA PROJETO DE  
SISTEMAS ELETRÔNICOS EMBARCADOS**

Orientador: Flavio Tonidandel

Data: 30/3/2015 11:06

Candidato: Danilo Pucci Smokovitz

Curso: Engenharia Elétrica

Nº de Matrícula: 12.111.304-7

Projeto: Futebol de Robôs

---

## RESUMO

O projeto que envolve o desenvolvimento de um sistema eletrônico, como qualquer projeto de engenharia, é seguido por métodos que devem ser conduzidos a fim de reduzir o custo, tempo e garantir uma alta qualidade do produto além de utilizar diversas ferramentas como Softwares ECAD (*Electronic Computer Aided Design*). Dentre os diversos métodos utilizados em projetos de engenharia, podemos destacar o Seis Sigma [1] que é um conjunto de práticas originalmente criada pela Motorola®, definido como uma estratégia gerencial para promover mudanças nas organizações, visando melhorias nos processos e produtos.

O robô da categoria Small Size da equipe de futebol de robôs RoboFEI [2, 3] do Centro Universitário da FEI utiliza um sistema eletrônico com duas placas eletrônicas. Durante o projeto do sistema eletrônico, após passar por duas revisões de projeto, a atual versão da placa funciona de acordo com o projetado. As revisões do projeto eletrônico foram feitas de acordo com resultados não esperados após a placa ter sido produzida, alguns destes resultados serão aprofundados neste documento e será detalhado como poderiam ter sido evitados.

Este projeto de Iniciação Científica tem como objetivo implementar um método de desenvolvimento de sistemas eletrônicos embarcados ao sistema eletrônico do robô da equipe RoboFEI, com o auxílio de um ECAD avançado utilizado pela indústria eletrônica.

Palavras chave: Sistemas eletrônicos embarcados; Metodologia; Projeto; ECAD

---

## 1 INTRODUÇÃO

Projetos envolvendo sistemas eletrônicos são bastante complexos, independente da sua área de aplicação. Atualmente, muitas ferramentas para auxílio no desenvolvimento de sistemas eletrônicos são imprescindíveis para um projeto, desde simuladores de lógica de sistemas (por exemplo, simular uma máquina de estados de um sistema lógico digital) até softwares que realizam testes funcionais no sistema eletrônico. Todas essas ferramentas foram criadas com o objetivo de aumentar o rendimento do projeto em aspectos de qualidade, tempo, custo e confiabilidade, além de facilitar o desenvolvimento e colaborar com a evolução desses sistemas [4].

Para todos os sistemas eletrônicos há sempre uma placa de circuito impresso, que é a parte do sistema que traz o projeto programado em computador para a realidade de funcionamento e muitas vezes os projetos dessas placas de circuito impresso se tornam tão complexos quanto ao próprio sistema que ele executará.

O sistema eletrônico do robô da equipe RoboFEI apresenta esta complexidade na placa de circuito de controle dos robôs. O projeto conta com uma placa de quatro camadas, design com FPGA (*Field Programmable Gate Array*), circuitos que controlam motores brushless, sensores para monitoramento de consumo de bateria e corrente em cada motor, além de um circuito de proteção contra danos às baterias utilizadas. Durante o projeto dessa placa de controle houve alguns problemas que, por falta de uma metodologia de projeto e também de ferramentas de desenvolvimento adequadas, atrasaram e aumentaram o custo do projeto. Como exemplo na primeira revisão da placa de controle, um problema grave com o circuito de alimentação ocorreu, este poderia ter sido evitado com simulações e análises disponíveis em software profissionais para projeto de circuito impresso, denominados ECAD's (*Electronic Computer Aided Design*). As vantagens de ter um software avançado não são somente em ter uma qualidade e

---

funcionamento para o sistema, mas também permite otimizá-lo em outros aspectos como tamanho e espaço disponível em placa, pontos de testes que facilitam a manutenção entre outros.

### 1.1 Objetivos

O objetivo deste projeto de Iniciação Científica é implementar um método de projeto de sistemas eletrônicos embarcados e aplicá-lo de acordo com as necessidades dos projetos que poderão ser desenvolvidos no Laboratório de Robótica do Centro Universitário da FEI.

### 1.2 Justificativas

Ter um meio de comprovar o funcionamento e a confiabilidade do circuito além de ajudar a identificar uma falha o mais cedo possível e corrigi-la também leva ao projetista a possibilidade de ultrapassar os limites da inovação, ou seja, ter uma ideia que possa testá-la, analisar os resultados, colocar em prática e aperfeiçoá-la em um curto período de tempo.

Durante o projeto da placa eletrônica de 2010 houve vários problemas, como placas de desenvolvimento queimadas durante o desenvolvimento e teste dos módulos; a falta do uso de capacitores de desacoplamento com design de FPGA e microcontroladores; transistores MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) utilizados para o módulo dos motores queimando com frequência por falta de proteção; layout da placa com alguns defeitos como caminho de trilhas muito longos causando alta impedância e seguindo caminhos não otimizados; entre outros. Estes problemas enfrentados durante o projeto e também a consequente necessidade de duas revisões de projeto poderiam ter sido evitados se existisse um método de

---

desenvolvimento definido e o constante uso de ferramentas sofisticadas de simulações de circuitos e placa reduzindo o tempo, custo e aumentando a qualidade. O esquemático e o layout da placa foram feitos em um programa básico de layout, chamado Cadsoft Eagle [5], que é um software adequado para pequenos projetos de placas que possuem uma eletrônica envolvida simples, que não é o caso do sistema eletrônico citado. Para sistemas eletrônicos embarcados envolvendo microcontrolador, FPGA, memórias, circuitos com motores e seu sensoriamento e placa com multi camadas é necessário o uso de ferramentas como softwares avançados ECAD, que permitem simular o sistema eletrônico além de seguir métodos de desenvolvimento a fim de garantir uma alta qualidade e reduzir o tempo e custo de projeto. Dentre os softwares ECAD mais avançados, podemos destacar produzidos pelas empresas Mentor Graphics, Cadence e Altium. Inicialmente neste projeto, seguindo orientações dos engenheiros experientes do laboratório de robótica, será utilizado o Altium Designer, produzido pela empresa Altium.

A principal contribuição deste trabalho para o Laboratório de Robótica do Centro Universitário da FEI é estabelecer uma metodologia de desenvolvimento de placas de circuito impresso e oferecer um conhecimento mínimo para o desenvolvimento de projetos complexos.

### **1.3 Metodologia Empregada**

A metodologia empregada para este trabalho de iniciação científica tem os aspectos de compreensão do funcionamento do sistema eletrônico, com pesquisas e consultas a documentos disponibilizados pelos fabricantes dos componentes além da documentação feita após o projeto do sistema eletrônico, compreensão e habilidade de

---

desenvolvimento em um software ECAD avançado e consultas a documentações e normas referentes a placas de circuito impresso utilizadas pela industria eletrônica.

Foi feito um estudo para compreender o funcionamento dos módulos do esquemático da placa principal na sua atual revisão. Este estudo foi baseado nos datasheets dos componentes com as especificações dos fabricantes e nas especificações do circuito, deste modo foi possível estabelecer quais simulações se aplicam a cada tipo de circuito. O projeto feito no software Cadsoft Eagle foi importado para o software Altium Designer, explorando os principais recursos do software, tanto para captura de esquemático quanto para o layout da placa. Esses recursos foram pesquisados e estudados, para uma posterior descrição neste trabalho, a fim de mostrar as principais vantagens e modos adequados para a sua utilização.

---

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Electronic Computer-Aided Design

Electronic Computer-Aided Design (ECAD) e Electronic Design Automation (EDA) são ferramentas de software do tipo CAD utilizados para desenvolvimento de sistemas eletrônicos, seja ele uma placa de circuito impresso ou um circuito integrado [6, 7].

Ferramentas do tipo CAD tem capacidade de criar, modificar, analisar e otimizar um projeto e são utilizadas para economizar tempo do projetista e para aumentar o nível da qualidade e também complexidade de desenvolvimento de certo projeto, dessa forma atualmente o seu uso é predominante em qualquer tipo de projeto, por mais simples que ele seja.

### 2.2 Etapas para desenvolvimento de projetos eletrônicos

Os autores Van Merode Dirk, Arras Peter e Johan Van Bauwel [8] fazem um estudo de caso sobre um projeto eletrônico completo feito em sala de aula da Thomas More University College, utilizando ECAD. Neste artigo é abordado a importância de um método, no caso para aprendizado, dos alunos do curso. Da mesma maneira que em outros projetos, há as restrições e requisitos de projeto como: flexibilidade para possíveis alterações futuras e manter o baixo custo. Os autores descrevem todo o processo do projeto com o auxílio do ECAD Altium Designer [9] e mostra seus resultados e conclusões.

É possível descrever as etapas de um projeto eletrônico e explorar as ferramentas que um ECAD avançado oferece. Um projeto eletrônico basicamente começa em seus requisitos de projeto, passa por um estudo de viabilidades, o desenvolvimento do

---

dispositivo, por fim um protótipo direcionado para o produto final [4]. As etapas citadas são descritas a seguir.

### **2.2.1 Requisitos e especificações de projeto**

Esta é a etapa que são analisados todos os objetivos, funções e especificações que o projeto deve conter. O grau de segurança e as condições de operação que o sistema eletrônico vai ser submetido têm de ser compreendidos, definidos e documentados.

Os requisitos de um projeto eletrônico automotivo, por exemplo, deve ser levado em conta fatores como a temperatura de operação e as vibrações mecânicas e estes requisitos são diferentes de um projeto eletrônico de um celular ou tablet que tem circuitos de radio frequência e necessita de um baixo consumo de energia [10]. Esses fatores podem ser mais relevantes para um tipo dispositivo do que para outro tipo. Os requisitos do projeto eletrônico e de componentes eletrônicos de um projeto são movidos pelo sistema que o compõe.

Nesta etapa deve se criar um documento com todas as características que especifica o scopo do projeto.

### **2.2.2 Estudo de viabilidades**

Estudo e análise das principais dificuldades que podem ser enfrentadas ao decorrer do projeto e as possíveis soluções para minimizá-las. Dentre as dificuldades podemos citar: a disponibilidade de componentes eletrônicos, tendo em vista que o projeto deve seguir um modo favorável a modificações como a substituição de um componente eletrônico de um fabricante por um similar de outro fabricante; disponibilidade de serviços de terceiros como a produção da placa de circuito e sua

---

montagem assim como a disponibilidade de pessoas e ferramentas que podem ser utilizadas no auxílio da execução de uma etapa do processo. Após este estudo, pode-se definir o custo do desenvolvimento do projeto e definir um cronograma e os prazos referentes [10].

### 2.2.3 Desenvolvimento do hardware e firmware

Desenvolvimento do esquemático baseados em cálculos e análises de circuitos com ajuda de softwares simuladores e softwares ECAD. Após a simulação, o layout da placa de circuito é feito e também simulado com o Software. Nesta etapa é imprescindível o uso de simulações ou análises detalhadas, pois os erros serão eliminados logo no início evitando que o erro se propague e seja percebido apenas no protótipo ou em outra fase posterior, o que traz atraso no projeto. Com o desenvolvimento do firmware, é possível que haja modificações no esquemático e consequentemente no layout da placa, a fase de simulação é repetida e a etapa é concluída [11].

Dentro das fases de simulações e análises podemos dividir em quatro itens: análise analógica, digital, mixed-signal e análises em placa, que são descritas a seguir [4].

**Análise analógica:** Circuitos analógicos podem ser divididos em diversos tópicos, mas resumidamente podemos dividir em duas partes: circuitos lineares e circuitos não lineares, que consistem em componentes passivos e ativos. Circuitos lineares são basicamente os circuitos resistivos, capacitivos e indutivos e suas combinações como filtros, diferenciadores, integradores e conversores de sinais analógicos. Circuitos não lineares podem envolver diodos, transistores MOSFET (*Metal Oxide Silicon Field Effect Transistor*) e BJT (*Bipolar Junction Transistor*) e amplificadores operacionais, buffers de corrente, entre outros. Um simples exemplo é um amplificador de pequenos sinais usando

---

BJT, onde a entrada é analógica e apesar de possíveis ruídos, inversões de fase, distorções, rejeições de sinal, a saída permanece analógica.

De modo geral, podemos melhor definir circuitos analógicos como os circuitos que tem entradas analógicas e saídas analógicas e deste modo podemos combinar circuitos lineares com circuitos não lineares nas mais diversas formas e aplicações [12].

Nas simulações analógicas é abordado o dimensionamento do sistema baseado nos modelos de simulação de cada componente eletrônico que o compõe. O projetista entra com os as fontes de tensão e corrente, equipamentos de medida nos pontos do circuito a serem analisados e pode dimensionar alguns parâmetros ao decorrer dos testes. Podem-se simular condições limites de operação nos componentes (tensões, correntes, frequências máximas de operação, distorção, ruídos, aquecimento) e assim aperfeiçoar e comprovar o funcionamento do circuito de acordo com as necessidades do projeto[13].

**Análise Digital:** Um sistema digital é uma combinação de dispositivos projetados para manipular informações lógicas ou quantidades físicas que são representadas no formato digital. As quantidades podem assumir valores discretos. Estes dispositivos na maioria das vezes são sistemas eletrônicos, mas podem ser feitos também em dispositivos magnéticos, mecânicos ou pneumáticos [14].

Um destes dispositivos são os circuitos digitais, que utilizam sinais lógicos que assumem dois valores, ligado ou desligado (0 ou 1) em representação binária. Os circuitos digitais são feitos basicamente em transistores, resistores e capacitores que em conjunto e em especifica topologia formam a lógica de um circuito [15].

As simulações digitais podem ser descritas em diversas áreas, desde a implementação básica de portas lógicas, implementação em FPGA's (*Field*

---

*Programmable gate-array*) e microcontroladores até a interação de um circuito digital com outros circuitos digitais.

As simulações de circuitos digitais são feitas em várias etapas da criação de um circuito eletrônico, seja ele um circuito eletrônico integrado ou um circuito eletrônico em uma placa de circuito impresso. Para os circuitos integrados, as etapas do desenvolvimento podem ser descritas em várias etapas. O primeiro, conhecido como *architectural design*, (design de estrutura) onde é projetada uma estrutura em nível de sistema em blocos funcionais. O segundo é chamado de *logic design* (projeto lógico) onde a etapa anterior decompõe mais blocos em portas lógicas. Finalmente são implementadas as portas lógicas em dispositivos físicos (esta conhecida por *transistor level*) e um layout deste circuito é criado e a partir daí vai para o processo de fabricação dos wafers de silício [16]. Em cada etapa descrita ocorrem as simulações para comprovar o funcionamento e identificar falhas. As mesmas etapas de desenvolvimento também podem ser descritas para designs com FPGA's e circuitos lógicos em placas de circuito impresso e para estes casos também ocorrem às simulações abordadas.

**Análise Mixed-Signal:** Podem ser definidos como circuitos que consistem em blocos digitais e blocos analógicos. Seguindo esta definição, um comparador é o mais simples exemplo de um mixed-signal circuit. Ele compara dois níveis de tensões analógicas e retorna com um valor de nível lógico ALTO se a primeira tensão é maior que a outra e nível lógico BAIXO se a primeira tensão é menor do que a outra. Um comparador basicamente funciona como um Conversor Digital-Analógico (ADC) de um bit. Também se pode dizer que um simples inversor digital se enquadra em circuitos de sinais mistos já que a sua entrada digital controla uma saída analógica. Outro tipo de circuito considerado mixed-signal são os Amplificadores de Ganho Programáveis (PGA's - *Programmable*

---

*gain amplifier*) que são normalmente utilizados na entrada de um circuito de sinal misto para permitir uma ampla escala de amplitudes no sinal de entrada do circuito. Eles operam como um controle de volume ajustado digitalmente, o PGA é configurado para ganhos elevados para baixas amplitudes de entrada e pequenos ganhos para altas amplitudes de entrada. Os circuitos mais comuns que podem ser considerados mixed-signal são os Conversores Analógicos Digitais (ADC) e Conversores Digitais Analógicos (DAC) como citados anteriormente [16].

As simulações em sinais mistos consistem em combinar os dois tipos de simulações descritas anteriormente. Nesta etapa é obtida a influência de um bloco digital no bloco analógico e também o oposto, combinando e analisando as possibilidades dos eventos como exemplo em um bloco analógico uma queda de tensão na alimentação por um instante pode afetar o bloco digital, alterando a sua funcionalidade e comprometendo o sistema. Com este tipo simulação é possível comprovar o funcionamento de um sistema que utiliza os dois tipos de circuitos além de analisar o grau de relação entre eles[17, 18].

#### **2.2.4 Análise de placa**

As PCBs (Printed Circuit Boards) [19] são placas onde são soldados os componentes eletrônicos com as suas respectivas interconexões dando origem física ao circuito elétrico. As PCBs são classificadas basicamente em duas grandes classes de acordo com a sua funcionalidade: placas com circuitos analógicos, radiofrequência e microondas e placas com circuitos digitais complexos.

Placas com circuitos analógicos, radiofrequência e microondas dependem muito das propriedades dos materiais utilizados; dos parâmetros das chapas de cobre que compõem a placa; das proximidades dos componentes; detalhes de roteamento como características das trilhas, pads e vias que atuam como indutores e capacitores em

---

circuitos de radiofrequência e microondas e no caso de fontes de alimentação, uma trilha tem de ser capaz de conduzir uma alta corrente sem dissipar potência e causar quedas de tensão. Já as placas com circuitos digitais contêm um grande número de componentes, que possuem um grande número de pinos necessitando muitas conexões entre eles. Estas conexões precisam ser imunes a ruídos para não alterar as funcionalidades do circuito digital.

Para estabelecer as condições limites de operação do circuito como a máxima indutância que pode aparecer entre conexões sem que afete o desempenho; a máxima frequência que um circuito pode operar; máxima corrente e tensão aplicadas em uma trilha etc, são feitas nas análises de esquemático e os dados extraídos destas análises podem ser transportados para o recurso Design Rules dos softwares ECAD, que não permitem o projetista quebrar as regras estabelecidas pelos dados extraídos das análises, além de regras estabelecidas pelo fabricante da placa, durante o roteamento de trilhas e posicionamento de componentes.

Além deste tipo de análise, é possível analisar também as características físicas da placa em 3D sendo permitido estudar componentes que tem uma interação externa à placa como botões, conectores, LEDs e parafusos onde a placa vai ser montada. Isto é possível, pois podemos importar o modelo mecânico do dispositivo feito em outro software CAD de projetos mecânicos (AutoCAD, Inventor, SolidWorks). Este tipo de análise é muito importante para evitar erros após a produção do protótipo, como falta de encaixe dos componentes da placa e o dispositivo e também possibilita as análises de funcionalidade do dispositivo como posicionamento de LEDs e botões.

### **2.2.5 Protótipo**

A produção do protótipo é a primeira fase em que há o encontro do dispositivo com a realidade. Nesta etapa são realizados testes de conformidade. Os testes no

---

protótipo demonstram, se houver, qualquer erro no projeto eletrônico ou mecânico que não tenha sido capturado durante as simulações feitas em software [11].

### **2.2.6 Entrega**

Após comprovar o funcionamento do dispositivo nos testes do protótipo de acordo com o projetado o produto é produzido em uma versão final. Desta versão final é colocada em uso, podendo sofrer modificações e revisões de projetos que se devem ao fato de ter um aperfeiçoamento do sistema e também a implementação de novas funcionalidades.

### **2.3 Padrões IPC**

IPC - Institute of Printed Circuits (Instituto de Placas Impressas)[20] fundado em 1957 com seis empresas membro, com foco na padronização de técnicas de acordo com a necessidade e desenvolvimento da indústria. Desde então o IPC esteve criando documentos e padronizações e atualmente com 3,660 empresas membro que fazem, usam e projetam placas de circuitos nas mais diversas áreas de aplicações como: microeletrônica, aeroespacial e militar, automotiva, equipamentos industriais, equipamentos médicos e telecomunicações. O IPC dedica-se para a melhoria da gestão e valorização de tecnologia, para a criação de normas pertinentes e a proteção do meio ambiente.

Para o projeto de placas de circuito impressos, o IPC tem como principais e mais relevantes os padrões chamados IPC-2221, IPC-2251, IPC-2152 e IPC-2141 que serão descritos brevemente a seguir.

### 2.3.1 IPC-2221

Com o título *Generic Standards on Printed Board Design* (Padrões genéricos para projetos de placas de circuitos) [21] este documento tem como objetivo definir requisitos genéricos para o projeto de placa de circuitos e outras formas de montagem de componentes. Propõe princípios de projetos e recomendações que devem ser utilizados em conjunto com recomendações específicas de acordo com o tipo de projeto, descritas em documentos que complementam o IPC-2221. A Figura 1 indica a hierarquia dos documentos complementares para cada tipo de projeto, onde:

- IPC-2222 *Rigid organic printed board design*, se refere a placas rígidas e orgânicas [22];
- IPC-2223 *Flexible printed board design*, se refere a placas flexíveis [23];
- IPC-2225 *Organic, MCM-L (Multi-chip Modules) printed board design*, se refere a placas orgânicas e com módulos multi-chip [24];
- IPC-2226 *High Density Interconnect (HDI) printed board design*, se refere a placas com alta densidade de interconexões [25];

O documento IPC-2224 *Sectional Design Standard For PC Card Form Factors* (Projeto padrão para projetos utilizando PC Card), foi cancelado pelo IPC e os detalhes relevantes para projetos com PC Card foram transferidos para o IPC-2221 e IPC-2222.

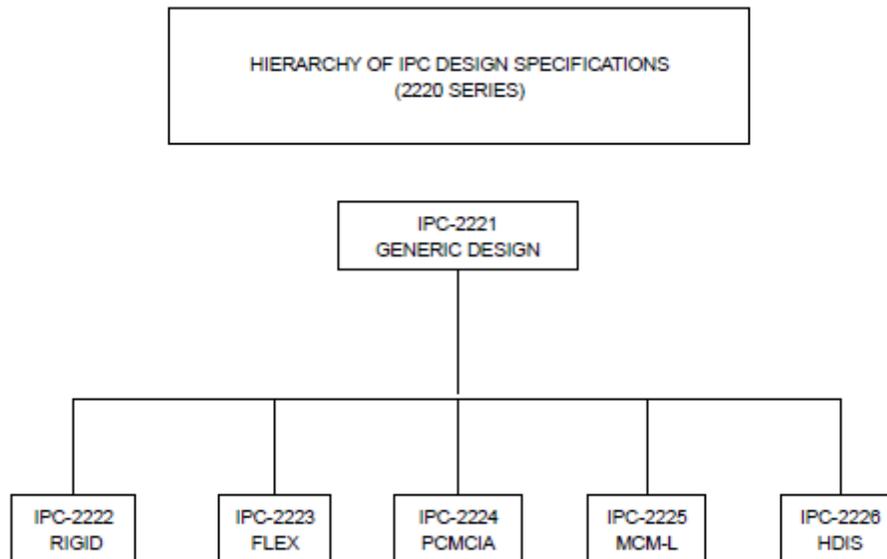


Figura 1. Arvore de hierarquia entre os documentos complementares a IPC-2221.

### 2.3.2 IPC-2251

Com o título *Design Guide for the Packaging of High Speed Electronic Circuits* (Diretrizes para projetos de circuitos elétricos com alta velocidade) [26] tem o objetivo de dar diretrizes para o projeto de circuitos de alta velocidade. Os assuntos citados neste documento representam os principais fatores que podem influenciar em projetos com circuitos de alta velocidade. Estas considerações são definidas por ruídos elétricos, interferência eletromagnética, tempos de propagação de sinais e dissipação térmica.

### 2.3.3 IPC-2152

Com o título de *Standard for Determining Current Carrying Capacity in Printed Board Design* (Padrão para determinar a capacidade de corrente em condutores nos projetos de placas de circuito) [27] este documento tem como objetivo mostrar as

---

relações entre corrente, dimensões do condutor e temperatura para o uso especialmente em condutores de cobre em placas de circuito impresso. Além disso, de propor diretrizes para determinar dimensões apropriadas dos condutores em função da capacidade de corrente que ele pode conduzir e em termos dos limites de temperatura.

Este documento é um resultado de experimentos padronizados e em simulações computacionais e substitui o gráfico de dimensionamento de condutores existente na IPC-2221.

#### **2.3.4 IPC-2141**

Com o título *Design Guide for High-Speed Controlled Impedance Circuit Boards* (Diretrizes de projeto para placas de circuitos de alta velocidade com impedância controlada) [28], este documento tem como objetivo ajudar o projetista a entender quando controle de impedância deve ser considerado no projeto do circuito e de descrever os conceitos importantes para controle de impedância.

---

### 3 ESTUDO DE PROJETO

Durante o início do trabalho, foi feito um estudo para definir e separar em diferentes módulos o circuito da placa eletrônica, dessa forma foi possível obter o conhecimento necessário para utilizar como base na hora de fazer o layout da placa. Este estudo realizado será descrito nesta seção.

Após a análise feita podemos dividir a placa em três módulos: Alimentação, Controle dos Motores e Sensores. Com essas três partes estudadas, foi concluído que as partes que são mais complexas e precisam de atenção durante o layout são Alimentação e Controle dos Motores, por se tratarem de circuitos de potência do ponto de vista do projeto, por sua densidade elevada de componentes e principalmente o módulo de Alimentação que destribui para o FPGA, que é um componente extremamente sensível neste aspecto.

#### 3.1 Alimentação

A alimentação da placa é utilizada pelo FPGA, sensores de corrente, conversor A/D, dos motores e das memórias flash e PROM. Os níveis de tensão utilizados são 12V (11.1V nominais fornecidos pela bateria de Li-Po), 5V, 3.3V, 2.5V e 1.2V, sendo os três últimos citados de uso predominante na alimentação do FPGA. Esses níveis de tensão são regulados a partir da alimentação da bateria.

Na primeira etapa a tensão da bateria é regulada para uma tensão de 5V, esta regulação é feita através de um circuito step-down (Buck converter, através do CI LM2596). Utilizando a saída de 5V, o nível de 3.3V é regulado através de um regulador linear (LM1086). Os níveis de 2.5V e 1.2V provem da saída de 3.3V, estes níveis também são regulados através de reguladores lineares, LF25CDT e FAN1112

---

respectivamente. Os três circuitos integrados reguladores de saídas 3.3V, 2.5V e 1.2V tem características de uma baixa queda de tensão (Low Dropout), são adequados para aplicações que utilizam bateria como fonte principal e possuem uma eficiência alta.

Para a alimentação do FPGA em particular, há um complemento para a fonte de alimentação. De modo geral, dispositivos eletrônicos como ASIC's, Microcontroladores, FPGA's necessitam de uma fonte de alimentação estável, comumente chamadas de PDS (Power Distribution System)[29, 30] e nesse PDS está incluso o cálculo e toda análise necessária de projeto de capacitores de desacoplamento, não só referente a nível de esquemático, mas também levando em consideração os fatores que o lay-out da placa fornece ao circuito.

Em [30], Larry Smith comenta todo o processo e os tópicos mais importantes para o design de um PDS para microprocessadores. Relacionando a frequência de operação com a impedância que eles tem no ponto de vista da fonte, o autor destaca a importância de projetar o PDS para todos os tipos de transientes de corrente (transient current) que estão relacionados com as diversas frequências que o microprocessador trabalha para diferentes tipos de operação, além disso comenta sobre os módulos de alimentação regulados, chamando-os de VRM (Voltage Regulator Module) e cita o circuito step-down (Buck Regulator) comumente utilizado em PDS, o autor ainda especifica o desacoplamento e os parâmetros a serem levados em consideração nesta etapa.

Já em [29], Mark Alexander trata prioritariamente dos capacitores de desacoplamento em uso específico de FPGAs, explicando o papel de cada parâmetro desta parte do circuito, modelando os capacitores em questão e analisando fatores como a Indutância e a Resistência em série com o capacitor (ESL, ESR – Equivalent Series Inductance, Equivalent Series Resistance) e a sua relação com o funcionamento do circuito. Um pouco mais adiante, o autor mostra como determinar os parâmetros críticos

---

do FPGA para o design dos desacopladores e também como o lay-out de placa influencia no funcionamento do circuito, apontando as principais recomendações.

Em [31], Yun Chase faz uma análise mais relacionada com teoria de redes RLC além de definir os parâmetros reais de um capacitor como os outros também fizeram. Neste, o autor ainda abrange um fator que os outros não haviam abordado: o encapsulamento diferenciado, os anteriores faziam menção apenas a encapsulamentos de 1206, 0805, 0603 e 0402, porém neste o autor, como um fabricante de capacitores, mostra os encapsulamentos 0612, 0306 e um outro tipo chamado de IDC, também nas medidas 0612 e 0508. Além de toda a análise comparando os encapsulamentos, o autor ainda comenta uma ferramenta própria da AVX para extrair os parâmetros de ESR e Impedância.

Após a leitura e entendimento dos documentos citados nos parágrafos acima, a conclusão é da importância de analisar os parâmetros reais dos capacitores, o posicionamento dos capacitores e vias no lay-out para manter uma indutância controlada e como a falta de uma simulação que comprove o funcionamento e todos os parâmetros descritos pelos fabricantes podem comprometer o funcionamento do circuito em um sistema embarcado, no caso a simulação para validar o circuito feito baseado nas recomendações do fabricante [29]. Para um microprocessador, microcontrolador ou um FPGA, o PDS é a parte mais sensível e deve ser observada com atenção na hora de projetá-la, atendendo todas as recomendações descritas no datasheet e application notes, além de ter um meio de simular o circuito final.

### 3.2 Controle de Motores

Os motores utilizados no robô são motores de corrente contínua brushless (BLDC) com sensores de efeito Hall (Maxon EC45-flat 50W). O circuito controlador de

---

motor da placa se trata de uma meia ponte H, utilizando um CI com MOSFETs complementares IRF7389.

Para possibilitar o acionamento dos MOSFETs pelo FPGA (com uma baixa tensão e baixa corrente), existe um driver de MOSFETs (TC4427) trabalhando em conjunto com eles, que recebem um PWM com nível lógico ALTO em 3.3V e jogam esse nível lógico para a tensão de alimentação do próprio driver, e na saída é ligado o MOSFET [32]. Ao mesmo tempo que as fases do motor recebem tensão dos MOSFETs, o motor retorna os sensores Hall para o FPGA, auxiliando o programa descrito em VHDL saber qual é o posicionamento do motor e qual a próxima sequência de PWM que deve ser gerada para o motor.

Para cada motor, há três pares de MOSFETs complementares, ou seja, três CIs IRF7389 e três drivers TC4427, já que este também tem saída dupla, adequado para esta aplicação.

Em [33], John T. Lee faz um breve resumo sobre motores brushless DC (BLDC) e chega a compará-los com motores AC, em questão de eficiência, controle de velocidade, torque, além de peso e tamanho, o autor ainda cita alguns exemplos de aplicações com motores BLDC, dentre eles o uso automotivo e sistemas industriais. O controle de motores BLDC, em termos de circuitos elétricos é um assunto que envolve diversos componentes e topologias de circuito. Entre os citados no documento, MOSFETs ou IGBTs são componentes que atuam como chaves na ponte H, os drivers dos MOSFETs/IGBTs são os que fazem a amplificação da tensão que aciona o MOSFET/IGBT para a que polariza o Gate, elementos de retorno de informações sobre o motor como encoders, sensores de efeito Hall e tacômetros e um circuito responsável pela lógica de controle do motor, como exemplo Microcontroladores.

Em [34], Dal Y. Ohm analisa diferentes tipos de comutação e controle de corrente em motores brushless para o seu controle, mostrando os dois tipos comuns de controle de

---

velocidade: Variando o nível de tensão que alimenta os motores ou utilizando um sinal PWM (Pulse Width Modulation), variando a largura do pulso e o duty cycle é possível controlar a velocidade do motor. O segundo método é o mais utilizado (também utilizado na placa em estudo neste trabalho), dentro outros fatores a facilidade de variar o duty cycle em relação a variar o nível de tensão que alimenta os motores. O autor ainda faz uma análise e demonstra equações para o dimensionamento de corrente e tensão, levando em consideração a resistência do indutor, a indutância e a inércia do rotor e da carga. Um sistema de realimentação com medidas de corrente do motor, onde a lógica que controla o sinal de PWM enviado para os motores leva em consideração se a corrente que está passando no motor for acima da permitida (valor determinado na lógica), o sistema é desabilitado instantaneamente para proteção.

Em [35] Richard J. Oleksuk e Dal Y. Ohm fazem um estudo e descrevem cinco diferentes esquemas para controle de motores brushless por PWM: 2 Quadrant switching, Quadrant switching – Simultaneous, 4 Quadrant switching – Simultaneous – Complementary, 4 Quadrant Non-Simultaneous e 4 Quadrant Non-Simultaneous-Complementary. No artigo, analisam os efeitos de cada um desses cinco esquemas sobre a eficiência do sistema, ruído do pwm e interferência eletromagnética além de perdas no driver.

Após a leitura dos documentos citados, foi possível adquirir um conhecimento básico sobre o controle de motores brushless e poder analisar os fatores críticos que podem gerar problemas e o não funcionamento do circuito durante o design. Dentre eles o dimensionamento adequado do transistor para operar na ponte H é um deles: o tipo do transistor (canal N ou canal P), o Rds-on, o tempo de subida do transitório off-on e o inverso, limites de operação, potencia dissipada (o que interfere no encapsulamento do transistor a ser escolhido). Além do aspecto do transistor, há também fatores relacionados ao motor como o modelo elétrico, os limites de operação tanto em corrente como em

---

tensão e inércia do rotor e da carga são alguns deles. Esses aspectos são os básicos previstos para o design do driver do motor, mas também há os esquemas de PWM que interferem no rendimento e perdas tanto nos transistores quanto nos motores, para um projeto eficiente de um driver de motor é imprescindível o uso de ferramentas para simular e posteriormente medir os sinais de ativação do motor e de retorno.

### 3.3 Sensores

Os sensores utilizados na placa, são os sensores de corrente (ACS712) combinados com o Conversor Analógico-Digital (AD79X8) de 12 bits e 6 canais, que leem a corrente que passam pelas fases dos motores, possibilitando um diagnóstico geral do consumo e proteção contra danos aos motores [32], ou seja, quando o sensor lê uma corrente com um valor máximo de corrente determinado pelo fabricante, todas as fases dos motores são desabilitadas, protegendo o motor. Além disso, o conversor AD também é utilizado para a leitura da tensão da bateria. Todos esses dados lidos são enviados via rádio para o computador para telemetria e monitoramento dos robôs.

---

## 4 RESULTADOS

Durante o trabalho foi preciso importar o projeto eletrônico do Cadsoft Eagle para o Altium Designer e durante esse processo os recursos do software assim como a maneira correta e adequada de utilizá-los foram analisados. Este estudo está descrito no Capítulo 5.

Ao decorrer do trabalho, dois pontos referentes ao processo do desenvolvimento de um projeto eletrônico foram abordados: captura de esquemático e layout da placa. Esses dois pontos foram abordados nos aspectos de estabelecer uma maneira correta de desenvolvimento e de estabelecer uma metodologia com passos básicos para atingir este objetivo.

### 4.1 Passos para a captura de esquemático

Os tópicos descritos abaixo são essenciais para ter um esquemático claro e organizado, de forma que outras pessoas que não fizeram parte do desenvolvimento serão capazes de compreender e buscar informações sobre o circuito de forma rápida. Os passos descritos visam também transformar o arquivo de esquemático de uma simples etapa onde os componentes são interligados antes do layout para um arquivo pertencente a documentação do projeto, contendo informações relevantes sobre o projeto, facilitando modificações posteriores.

Os passos também visam garantir que a próxima etapa do desenvolvimento de uma placa, o *Layout* tenha todas as informações e pré-definições estabelecidas, evitando que erros sejam cometidos.

- 
- 1) Separar circuitos em diferentes classes de acordo com a sua função, como alimentação, interface com periféricos, circuitos de potência, entre outros.
  - 2) Organizar o esquemático em blocos, de forma que seja possível visualizar a conexão e dependência entre os diferentes circuitos.
  - 3) Informações sobre dimensionamento de circuitos e componentes
    - a. Fornecer o máximo informações relevantes ao projeto, como dados de componentes e algum cálculo relevante.
    - b. Se necessário, citar algum documento de referência para o dimensionamento de um circuito, como *application notes* e *datasheets*.
  - 4) Definir características de layout
    - a. De acordo com as suas classes, os circuitos tem características de layout diferentes, como os de potência que precisam de mais atenção nas larguras de trilhas.
    - b. Em alguns componentes, recomendações de layout são descritas no seu datasheet e essas recomendações devem estar referenciadas no esquemático.

#### **4.2 Princípios para Layout de placa**

Profissionais em design de placas dizem que um layout consiste em 90% posicionamento e 10% o roteamento de condutores. Um bom posicionamento dos componentes deixa o trabalho de roteamento mais fácil e garante que o circuito funcione de forma adequada [36]. Os tópicos abordados nesta seção são os mais importantes para ter um layout adequado de acordo com a projeto.

- 
- 1) Limitações de processo e elétricas
    - a. As limitações de máquinas do processo de fabricação devem ser estabelecidas como regras e devem ser de conhecimento do layoutista. Este item está detalhado na seção 5.2.2.
    - b. Limitações elétricas devem ter sido definidas na fase de captura de esquemático. Este item está detalhado na seção 5.2.1
  - 2) Posicionamento de componentes
    - a. Definir as dimensões e formato da placa, assim como a característica mecânica do ambiente que a placa será montada.
    - b. Os itens como posição de furos, conectores, chaves mecânicas, botões e LED's que tem uma posição definida devem ser os primeiros componentes a serem posicionados e durante todo o resto do processo estes itens devem ser observados e os princípios para o seu funcionamento devem sempre ser lembrados. Um exemplo é com conectores e botões, que normalmente serão manuseados e o espaçamento necessário para apertar o botão ou colocar/retirar um conector deve ser respeitado, dessa forma é preferível que eles estejam na periferia da placa e que outros componentes não atrapalhem o seu funcionamento.
    - c. Posicionar componentes que possuem muitos pinos. Estes componentes precisarão de espaços ao seu redor para as suas conexões e também para componentes auxiliares, dessa forma, os componentes seguintes poderão ser posicionados com um espaçamento adequado em relação a estes componentes com muitos pinos.
    - d. Posicionar o restante dos componentes como capacitores e resistores. Uma recomendação geral nesta etapa é que os componentes de um mesmo

---

grupo de circuito estejam o mais próximo possível um do outro, formando um grupo para cada circuito. Seguindo esta ideia de formar grupos com cada circuito, é importante também que todos os componentes polarizados (capacitores, diodos, circuitos integrados) sejam orientados na mesma posição e de forma simétrica em todo o layout, dessa maneira facilita a visualização e manutenção da placa[36].

### 3) Roteamento de trilhas e interconexões entre componentes

- a. Esta etapa o layoutista deve ter em mente uma lista de prioridades dos circuitos que devem ser roteados, não há uma regra geral, porem em diversos documentos [36] recomendam que os circuitos mais críticos devem ser os primeiros a serem roteados. De modo geral, a maioria das placas tem seu circuito de potencia, sinais e baixa potencia (como LEDs e botões).
  - b. Começar pelos condutores de alta potencia, pois estes devem ter o menor caminho possível sem fazer caminhos complexos, evitando que cruzem os caminhos de condutores de sinais e garantindo que não ocorra EMI (Interferencia Eletromagnetica) [37].
  - c. Após os condutores de potencia, os circuitos de sinais devem ser roteados, se necessário. Nesta etapa é preciso atenção para não cruzar estes condutores próximos aos condutores de potencia.
- 4) Ajustes finais. Com a maioria dos componentes posicionados e condutores traçados, é comum que haja a necessidade de ajustes no posicionamento e no caminho de alguns condutores e este deve ser feito levando em consideração de que classe os objetos a serem ajustados pertencem.

---

## 5 RECURSOS E FERRAMENTAS

Os recursos do software Altium Designer, podem ser divididos em duas partes: Captura de Esquemático e Layout. Essa divisão é apenas para efeito de explicação, pois na prática esses dois assuntos são totalmente interligados, ou seja, um se relaciona com o outro.

### 5.1 Captura de Esquemático

Para a captura de um esquemático, é muito importante ter em mente que o esquemático é feito para consulta de pessoas que não necessariamente fizeram parte do projeto, podendo ser anexado em algum manual, utilizado como referência e por estes motivos o esquemático deve ser desenhado da forma mais clara e organizada possível, com todas as informações relevantes, se preciso, adicionar algumas notas de texto, gráficos e imagens. Visando atingir de forma completa esses objetivos, o Altium Designer oferece diversos recursos que devem ser utilizados, estes recursos serão descritos abaixo.

#### 5.1.1 Recursos para Conexões

Os recursos para conexões são utilizados para conectar dois ou mais pontos de elementos diferentes, são essas conexões que dão forma ao circuito, que interligam por exemplo, um resistor a um pino de um circuito integrado, ou uma saída de um circuito à entrada de outro. Os recursos para conexões mais básicos em todos os ECAD's são os *wires* e *net labels*. O Altium Designer oferece alguns recursos adicionais, que facilitam a conexão de diversos objetos ao mesmo ponto, inclusive objetos em páginas de esquemático diferentes. São eles: *Net Label*, *Sheet Symbol*, *Ports*, *Sheet Entries*, *Harness*

*Conector e Harness Entry.* Nesta seção será descrito cada um deles, com uma ilustração retirada do projeto da placa de estudo.

- *Net Labels* são utilizados para realizar a conexão entre dois pontos em uma mesma folha de esquemático. Podem ser substitutos de *wires* (fios) em casos específicos.

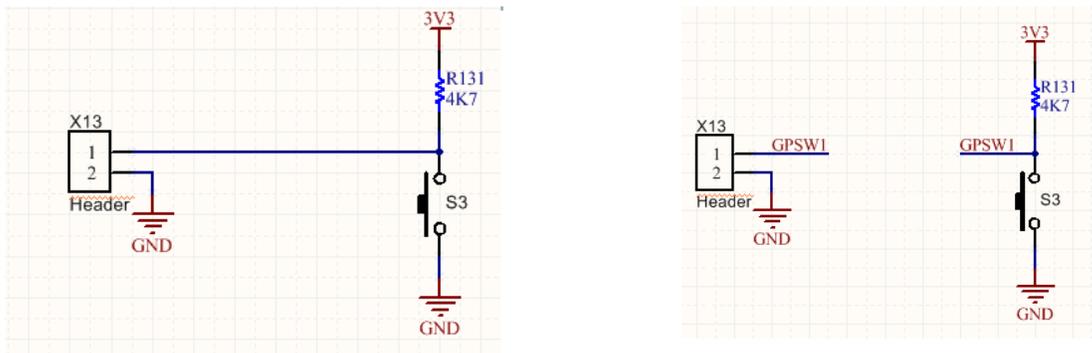


Figura 2. A esquerda, conexão entre dois pontos utilizando Wires. A direita, conexão utilizando Net Labels

A Figura 2 ilustra os dois tipos de conexões: *wires* e *net labels*. O uso de *wires* é comum para ligar os pontos entre componentes eletrônicos, como exemplo um resistor a um LED. O uso de *net labels* é utilizado para conectar saídas e entradas como indicado na figura, a saída de um pushbotton a entrada de um conector.

- *Sheet Symbols* são utilizados para dar uma visão geral sobre a parte elétrica do projeto. Divide-se o projeto em diversas paginas (aqui serão chamadas de *sheets*), cada com uma relação diferente, e definidas por blocos. Por exemplo, neste caso o projeto foi dividido em blocos chamados Power Supplies, FPGA, Motor Driver e Peripherals, cada um em uma *sheet*. O recurso *Sheet Symbol* cria uma espécie de componente com a pagina de esquemático, permitindo interligá-los com outros *sheet symbols*.

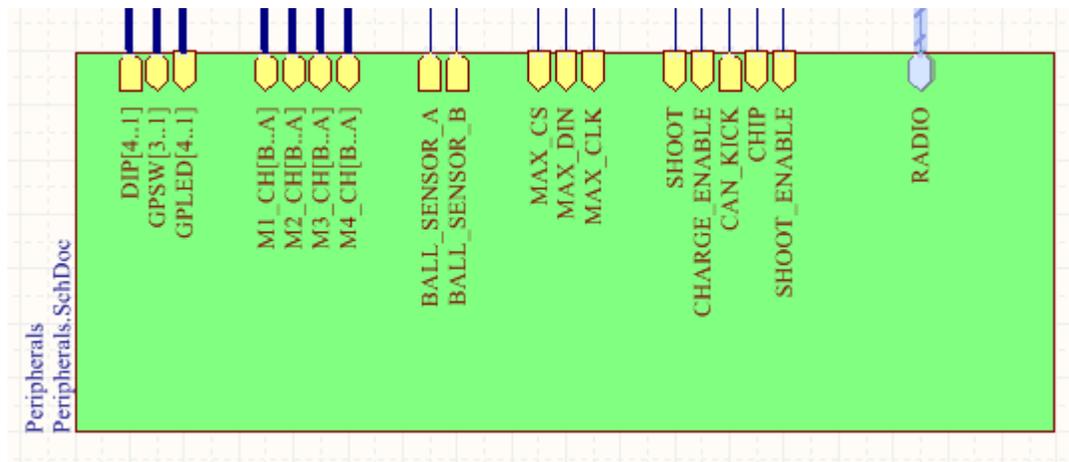


Figura 3. Sheet Peripherals definida como um sheet symbol

Com sheet symbols ainda é possível estabelecer uma hierarquia de cada folha de esquemático. Neste caso, o circuito de desacoplamento do FPGA foi adicionado com uma hierarquia, ou seja, a pagina Decoupling está abaixo da pagina FPGA.



Figura 4. Lista de arquivos inclusos no projeto do Altium Designer, indicando a hierarquia que foi criada em cada sheet.

Cada nome na lista da Figura 4 representa uma pagina de esquemático, portanto temos também sheet symbols chamados Power Supplies, FPGA, Motor Driver e Peripherals. Vale observar que criar um sheet symbol para cada folha de esquemático não é obrigatório para o projeto, porém para um projeto complexo e com diversos blocos e

componentes, esta opção se torna válida para a organização e clareza da captura de esquemático.

- *Ports* são utilizados para fazer conexões de uma página de esquemático para fora dela em um projeto *mult-sheet*. Para realizar esta conexão basta criar um *port* com determinado nome em uma página, em outra criar um outro *port* com o mesmo nome e ambos estarão conectados. A Figura 5 ilustra o uso de *Ports*.

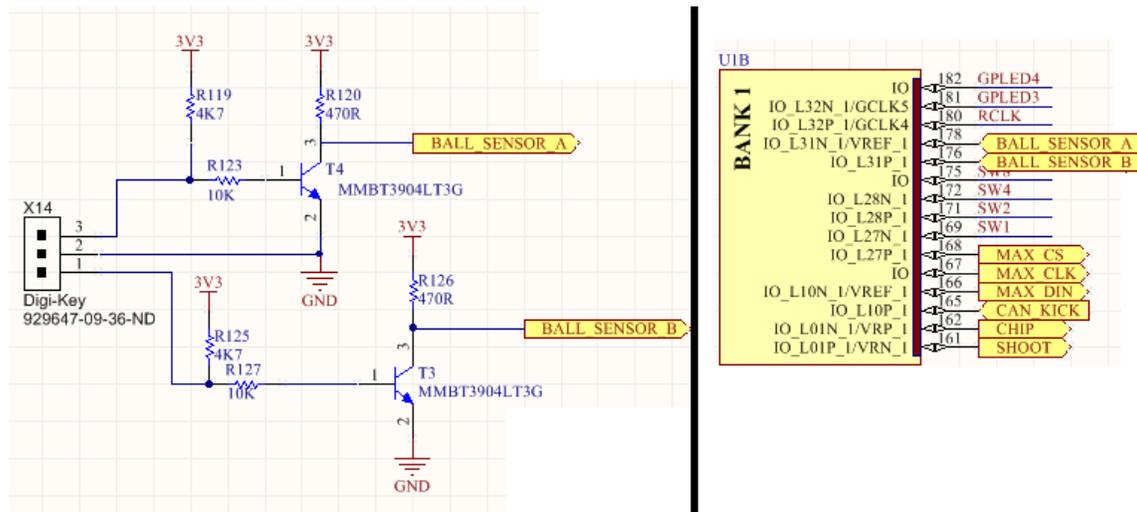


Figura 5. Uso de *Ports* para conexão entre dois pontos de diferentes folhas de esquemático. Na esquerda, dois *Ports* no *Sheet Peripherals*. Na direita, os *Ports* com o mesmo nome no *Sheet FPGA*, conectados entre si.

- *Sheet Entries* são utilizados para definir as conexões de determinado *Sheet Symbol* com a parte externa ao sheet symbol, seja ele um componente eletrônico ou um outro *sheet symbol*. Para realizar esta conexão, é necessário ter um *Port* dentro da página de esquemático referente ao determinado *sheet symbol*, assim ao adicionar um *sheet entry*

com o mesmo nome do *port* criado, eles já estarão conectados. As Figuras 3 e 5 ilustram o uso de *Sheet Entries*: dentro do *sheet symbol* Peripherals foi criado o *port* BALL\_SENSOR\_A, posteriormente um *sheet entry* com o mesmo nome e conectado a um outro *sheet entry* do *sheet symbol* FPGA, que também tem um *port* com o mesmo nome.

- *Harness Connector* são utilizados para criar um conector virtual de um determinado tipo de conexão. Um exemplo da utilização é com a interface JTAG ou com protocolos de comunicação (SPI, I2C, UART). Como os pinos terão sempre a mesma nomenclatura, então utiliza-se um *harness connector*. Como exemplo, em um projeto onde haja cinco periféricos com comunicação I2C. Ao invés de criar ports com os pinos I2C para CADA periférico, cria-se um *harness connector* do tipo I2C e ele sempre terá os pinos comuns a um padrão I2C, e partir dele conecta-se ao dispositivo através de wires, bus ou net names.

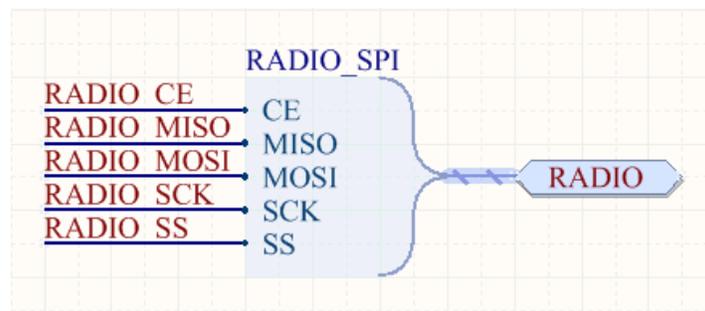


Figura 6. Uso de *Harness Connector* do tipo RADIO\_SPI para a conexão do RADIO.

- *Harness Entries* são utilizados para criar os sinais que vão fazer parte do *harness connector*. Na Figura 6, “CE, MISO, MOSI, SCK e SS” são *harness entries*.

---

Utilizando os recursos de conexão citados nesta seção, é possível desenhar um esquemático de um projeto eletrônico de forma organizada e clara, facilitando a compreensão do circuito e também a sua consulta. Esses recursos aumentam a produtividade do usuário ao desenhar o esquemático, facilitando conferência posterior, É possível destacar as conexões que os *nets* e *ports* servem, indicando em quais lugares os pontos se conectam, dessa forma é possível conferir rapidamente se os pontos das conexões estão corretos.

### 5.1.2 Recursos Gráficos

Os recursos gráficos são utilizados para fim de alguma documentação sobre o projeto. Essa documentação pode ser para complementar as informações que o próprio circuito fornece adicionando notas de textos, tabelas, imagens entre outros. Além de recursos para documentação, também há recursos gráficos que podem servir para deixar essa documentação e os circuitos claros e organizados. Dessa maneira, os recursos gráficos podem ser divididos em dois: *drawing tools* e *notes*.

- *Notes* são muito utilizadas para dar uma descrição ou deixar alguma observação conveniente ao esquemático. Normalmente este tipo de recurso é utilizado para deixar alguma orientação ao layoutista, também para dar alguma informação sobre algum componente. Na Figura 7 é possível observar o recurso *Notes* com uma observação ao layoutista: “Nota: R1 e R2 devem ficar o mais próximo possível do IC1 e as trilhas distantes de L1”

- *Drawing Tools* basicamente são desenhos geométricos que podem ser adicionados no esquemático como retângulos e linhas. Além de desenhos geométricos o *drawing tools* oferecem a opção de adicionar fotos ao esquemático, dessa forma o uso fica ao critério do usuário, que pode utilizá-lo para adicionar algum gráfico referente ao

comportamento de um circuito, um diagrama de blocos ou como é normalmente utilizado, para adicionar o logo de uma empresa. A Figura 7 ilustra o uso de um desenho geométrico para delimitar a área do circuito, no caso chamado de “+5V Power Supply”

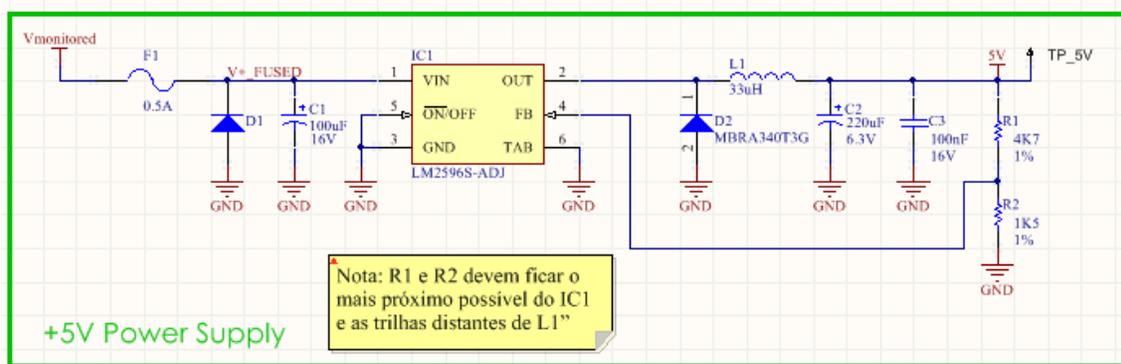


Figura 7. Uso de recursos gráficos no esquemático

### 5.1.3 Informações dos Componentes

O recurso mais sofisticado para os componentes é o de propriedades dos componentes. Na aba propriedades é possível adicionar o datasheet, link do fornecedor, part number, footprints e comentários livres. Esse tipo de funcionalidade é de extrema importância, pois ao relacionar o datasheet do componente, é possível acessá-lo com apenas um clique do mouse e obter as informações de forma rápida, como ilustrado na Figura 8. Além disso, é possível relacionar gráficos e tabelas do datasheet no componente e sempre que for preciso uma consulta, basta clicar no componente e acessá-lo. Isso de certa forma centraliza as informações do projeto e deixa com fácil acesso. Para adicionar o link do fornecedor também é algo extremamente importante: ao finalizar o projeto, é preciso gerar uma lista de componentes (conhecida como BOM – Bill of Materials) e ao ter os links dos fornecedores relacionados com os componentes, através de um plug-in é

possível gerar a lista atualizada com a disponibilidade, custo e quantidade. Portanto, durante o desenvolvimento do projeto, se for necessário alguma alteração, é possível verificar a disponibilidade do componente e já adicioná-lo ao custo do projeto.

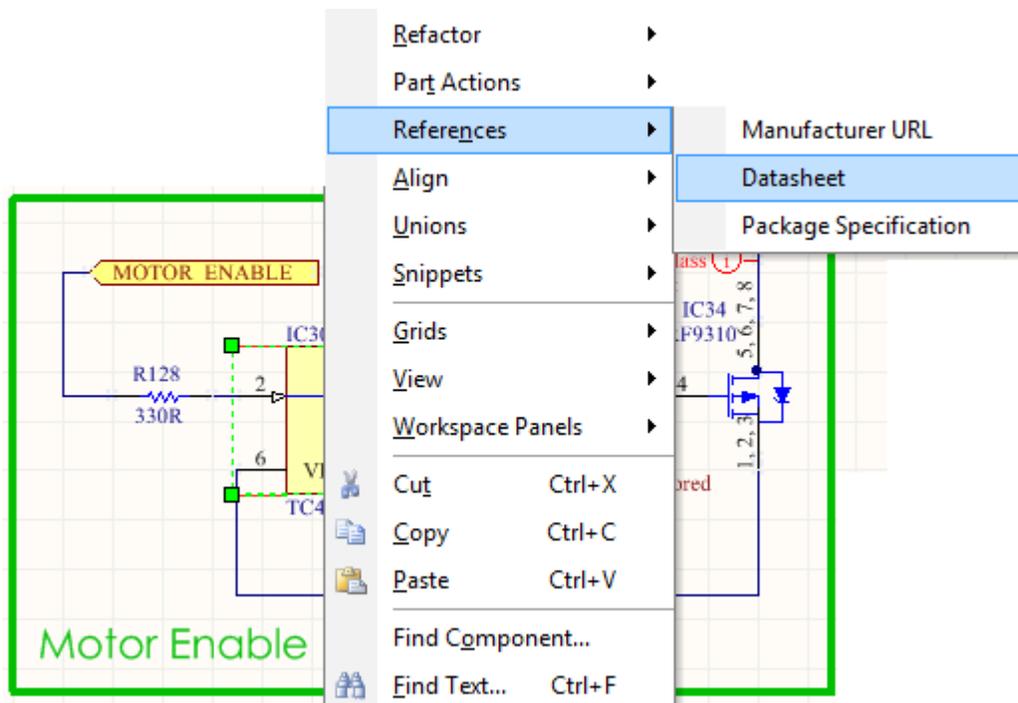


Figura 8. Tela de acesso as configurações do componente.

## 5.2 Regras de Projeto

Regras de projeto são divididas em duas partes: *Electrical Rules* e *Design Rules*, sendo para a captura de esquemático e layout, respectivamente. Isso não limita que o *Design Rules* seja algo a ser feito apenas na fase de layout, como vai ser descrito posteriormente.

---

### 5.2.1 *Electrical Rules*

Electrical Rules são regras que o esquemático deve obedecer. São baseados em parâmetros e a relação de erros e avisos que o software deve indicar durante o processo de compilação do projeto. Esses parâmetros são definidos nas opções de projeto, pelo próprio usuário. Os *Electrical Rules* são divididos em duas categorias pelo software: *Error Reporting* e *Connection Matrix*.

- *Error Reporting* é composto por uma lista de características que o software é capaz de analisar ao compilar o projeto, chamadas de violações. A Figura 9 demonstra essa lista de opções. Um exemplo é o tópico *unconnected wires* (ligações desconectadas), ao ligarmos um wire de um ponto A e deixarmos este wire sem terminar em outro ponto, um *warning* será disparado ao compilar o projeto. Como os *wires* são feitos manualmente e de forma bastante gráfica, pode acontecer de ao tentar conectar um *wire* de um ponto A a um ponto B ele fique muito próximo do ponto B, porém não conectado. Ao compilar o projeto, o software irá achar esta “má conexão” e avisará ao usuário, indicando o ponto e a localização. Na lista estão todas as violações que o software pode detectar, e também todas as violações que vão comprometer de alguma forma o processo de gerar as conexões para o layout.

| Error Reporting                     | Connection Matrix                                   | Class Generation | Comparator | EC |
|-------------------------------------|---|------------------|------------|----|
| Violation Type                      | Description   | Report Mode      |            |    |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Violations Associated with Nets                     |                  |            |    |
|                                     | Adding hidden net to sheet                          | Warning          |            |    |
|                                     | Adding Items from hidden net to net                 | Warning          |            |    |
|                                     | Auto-Assigned Ports To Device Pins                  | Warning          |            |    |
|                                     | Bus Object on a Harness                             | Error            |            |    |
|                                     | Differential Pair Net Connection Polarity Inversed  | Warning          |            |    |
|                                     | Differential Pair Net Unconnected To Differential P | Error            |            |    |
|                                     | Differential Pair Unproperly Connected to Device    | Error            |            |    |
|                                     | Duplicate Nets                                      | Error            |            |    |
|                                     | Floating net labels                                 | Warning          |            |    |
|                                     | Floating power objects                              | Warning          |            |    |
|                                     | Global Power-Object scope changes                   | Warning          |            |    |
|                                     | Harness Object on a Bus                             | Error            |            |    |
|                                     | Harness Object on a Wire                            | Error            |            |    |
|                                     | Missing Negative Net in Differential Pair           | Error            |            |    |
|                                     | Missing Positive Net in Differential Pair           | Error            |            |    |
|                                     | Net Parameters with no name                         | Warning          |            |    |
|                                     | Net Parameters with no value                        | Warning          |            |    |
|                                     | Nets containing floating input pins                 | Error            |            |    |
|                                     | Nets containing multiple similar objects            | Error            |            |    |
|                                     | Nets with multiple names                            | Warning          |            |    |
|                                     | Nets with no driving source                         | Warning          |            |    |
|                                     | Nets with only one pin                              | No Report        |            |    |
|                                     | Nets with possible connection problems              | Error            |            |    |
|                                     | Same Net used in Multiple Differential Pairs        | Error            |            |    |
|                                     | Sheets containing duplicate ports                   | Warning          |            |    |
|                                     | Signals with multiple drivers                       | Error            |            |    |

Figura 9. Lista de *Error Reporting*

- *Connection Matrix* é uma matriz baseada em todas as combinações de diferentes tipos de pinos e conexões disponíveis no software. O funcionamento é baseado na comparação de duas ou mais interconexões, ou seja, o software analisa e compara o tipo de conexões entre dois pinos, e baseado nessa matriz de conexões, o software poderá dar *warning* ou um error (dependendo da configuração). Um exemplo simples que pode ser visto na Figura 10 é se um *IO Pin* for conectado em um *Power Pin*, acusará um *warning*. Dessa forma, o usuário poderá fazer a sua configuração de acordo com as características dos componentes que o projeto possui.

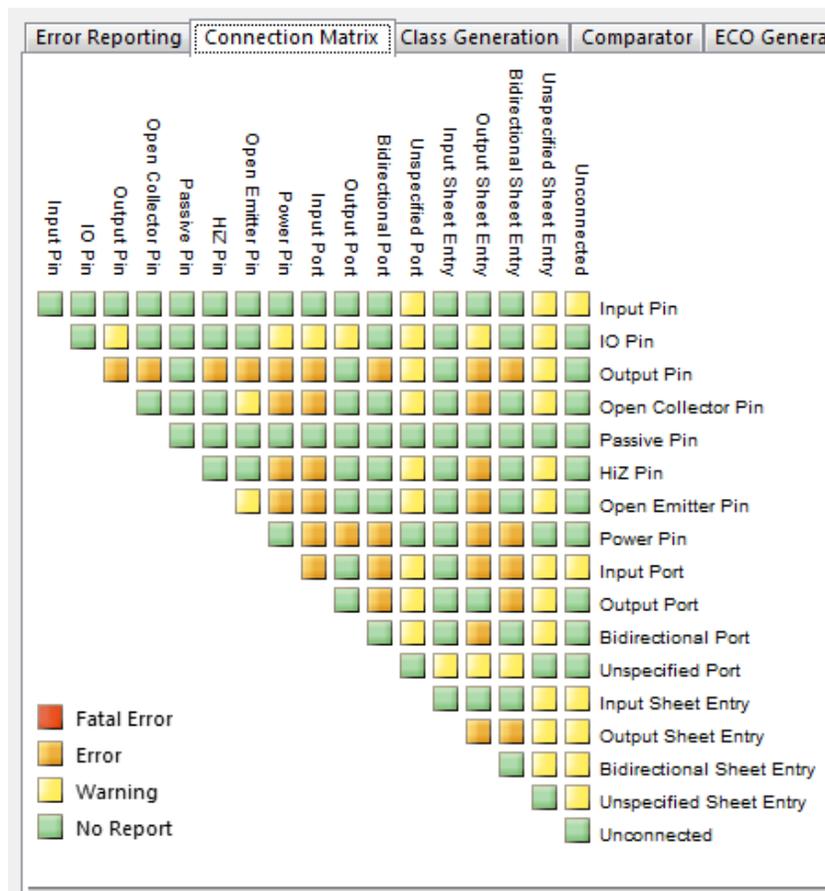


Figura 10. *Connection Matrix*

### 5.2.2 Design Rules a partir do Esquemático

Ainda na fase de captura de esquemático, há um momento onde é necessário começar a dar diretrizes para o layout. Além do uso de notas para orientações ao layoutista, é possível criar regras, para que não haja erros de especificações elétricas no layout (como exemplo, trilhas muito finas para circuitos de alta corrente).

Para criar regras de layout ainda na fase de esquemático, o software fornece *Directives* (diretrizes) e a partir daí é possível adicionar *Parameters* (parâmetros) e incluir regras de layout, baseado em todas as regras disponíveis para o layout. As Figuras 11 e 12 ilustram uma regra para largura da trilha de um certo *net*. Para isso, adiciona-se um *Parameter Set* e nele cria-se uma regra. Note que na Figura 10, a janela está descrita como Edit PCB Rule (From Schematic), ou seja, estamos acessando as regras de PCB através do esquemático. Ainda nesta janela, é possível ver os parâmetros utilizados para a largura da trilha.

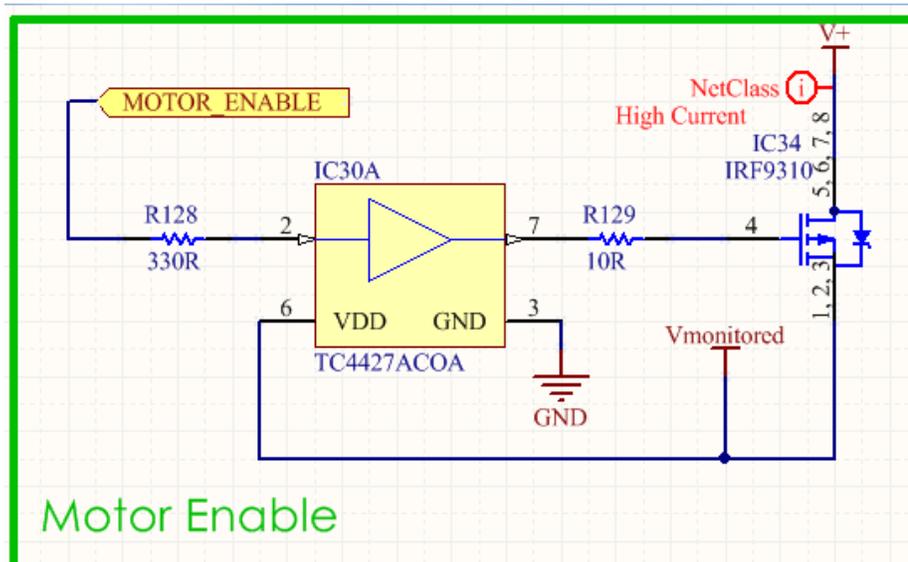


Figura 11. Net Class

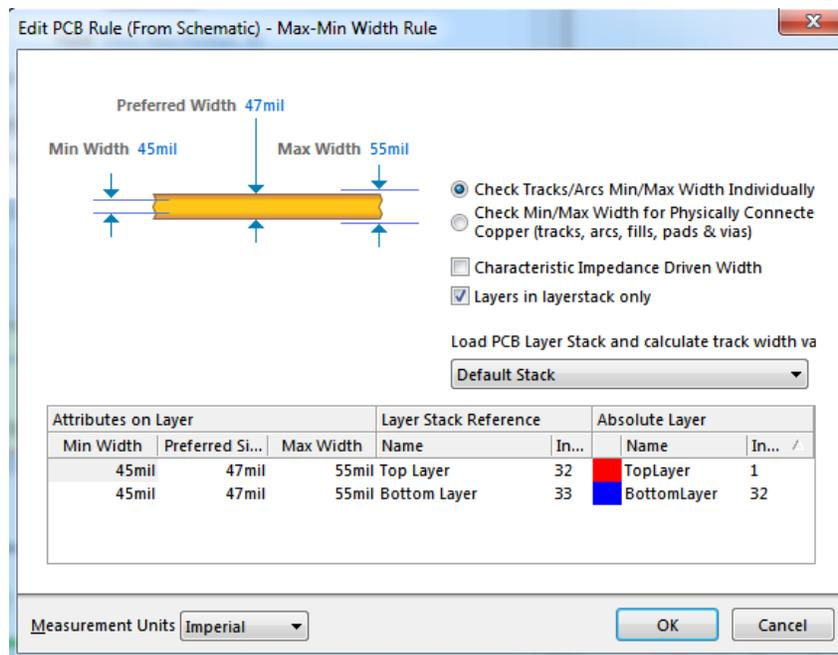


Figura 12. Tela de configuração de parâmetros de geometria das trilhas

Para determinar os parâmetros a fim de inseri-los nas regras de layout como dimensionamento de trilhas e vias é possível e recomendado se basear nos padrões IPC para placas de circuitos impressos, de acordo com o tipo de dimensionamento desejado, os documentos descritos na seção 2.3 fornecem formulas e recomendações para o dimensionamento correto.

Para auxiliar estes cálculos, análises e dimensionamento é possível utilizar ferramentas adicionais, como calculadoras específicas. Uma ferramenta que podemos citar é o Saturn PCK Toolkit, fornecido pela empresa Saturn PCB [38] localizada nos Estados Unidos, presta serviços de projetos eletrônicos e especialmente suas placas de circuito impressos e fornece essa ferramenta gratuita chamada Saturn PCB Toolkit. Esta

ferramenta é uma calculadora para dimensionamento para placas de circuitos impressos, baseadas nos padrões IPC e também em livros de magnetismo, com uma interface gráfica, o usuário coloca os parametros fixos e o software retorna os parametros de dimensionamento. Ela tem o poder de dimensionar o espaçamento entre condutores, larguras de trilhas, controle de impedância de condutores, dimensionamento de pares diferenciais entre outros.

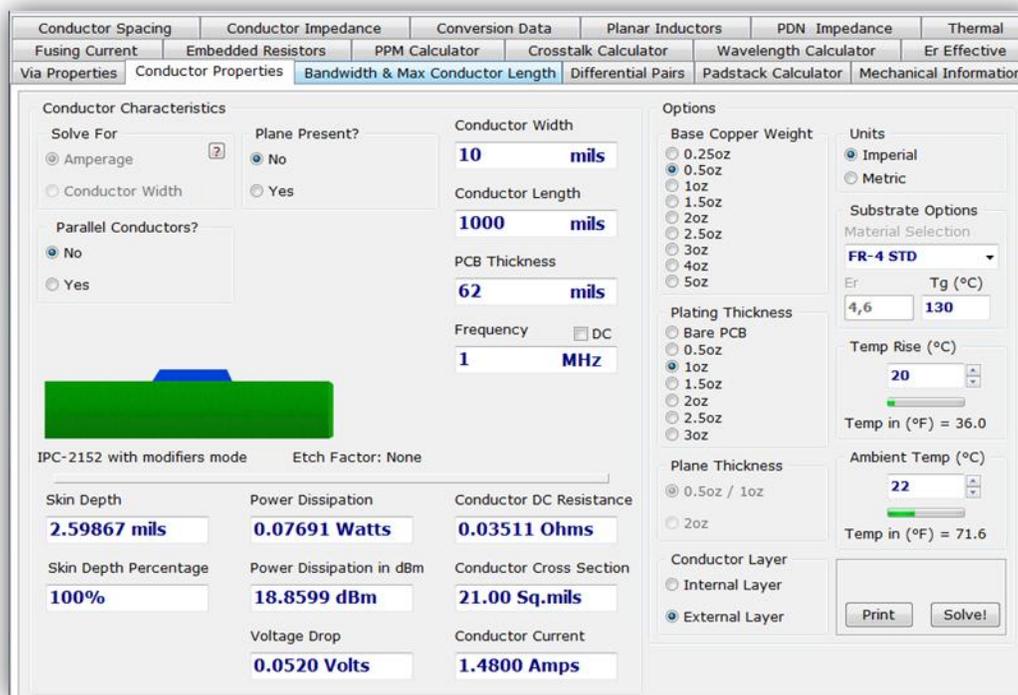


Figura 13. Tela do software Saturn PCB Toolkit

A Figura 13 é possível observar a interface gráfica do programa. Os parâmetros de entrada são como a largura e tamanho do condutor, a espessura da placa, o material da placa, a espessura do cobre, a frequência do sinal a ser transmitido e o aumento da

---

temperatura. Também é possível observar outras abas que possuem outros tipos de cálculos como: controle de impedância, pares diferenciais, propriedades de vias, espaçamento entre condutores entre outros. Um fator muito importante é se o condutor a ser dimensionado é em uma camada interna ou em uma camada externa.

Utilizando os recursos para criar regras de layout durante o esquemático é de alto valor para a fase de layout. Tendo regras elétricas bem definidas, ao fazer o roteamento das trilhas o software garante que nenhuma delas será violada, garantindo o funcionamento adequado do circuito.

### **5.3 Layout da Placa**

Para a fase de layout, podemos dividir em duas importantes etapas: Design Rules. O *Design Rules* é de extrema importância para aumentar o rendimento do layout (menos tempo para roteamento e mais qualidade ao layout). O posicionamento de componentes é a etapa que todos os componentes são posicionados seguindo alguns critérios que serão descritos nesta seção.

#### **5.3.1 Design Rules**

*Design Rules* (regras de projeto) em ECADs servem para evitar que erros sejam cometidos durante o processo de desenvolvimento do projeto. Os critérios para os *Design Rules* vão desde limitações da máquina de fabricação da placa de circuito impresso, distância entre componentes por conta de dissipação de calor, ou pelo ambiente onde a placa de circuito vai ser montada evitando colisões mecânicas até características elétricas.

A primeira etapa é saber as limitações das máquinas da empresa que irá fabricar a placa de circuito. Essas limitações estão em um documento que a empresa disponibiliza ao projetista e nele são definidos as tolerâncias, medidas mínimas, distância entre objetos,

| GRIFUS  |                 | PARÂMETROS TÉCNICOS PARA PROCESSO E PRODUTO |   |                    |            | Form 34     |
|---|-----------------|---|---|--------------------|------------|-------------|
|   |                 |   |   |                    |            | Rev.02      |
| CARACTERÍSTICA  |                 | CAPABILIDADE PADRÃO / ESPECIFICAÇÕES        |   |                    |            | TOLERANCIAS |
| MATERIAL BASE   | TIPO            | ESPESSURA                                   | FR-1 / FR-2<br>FACE SIMPLES   | FR-4<br>DUPLA FACE |            |             |
|   | LAMINADO        | medida                                      | 0,13 mm   |                    | ok         | ± 0,025 mm  |
| sobre   |                 | 0,20 a 0,25 mm                              |   | ok                 | ± 0,038 mm |             |
| dieletrico  |                 | 0,30 a 0,35 mm                              |   | ok                 | ± 0,050 mm |             |
| (sem cobre)   |                 | 0,50 mm                                     |   | ok                 | ± 0,064 mm |             |
| medida  |                 | 0,80 a 1,00 mm                              |   | ok                 | ± 0,100 mm |             |
| sobre o   |                 | 1,20 a 1,60 mm                              | ok  | ok                 | ± 0,130 mm |             |
| cobre base  |                 | 2,0 a 2,40 mm                               | ok  | ok                 | ± 0,180 mm |             |
|   |                 | 3,20 mm                                     |   | ok                 | ± 0,230 mm |             |
| PREPREG   |                 | 1080  | 0,065 mm  |                    | ok         | ± 10%       |
|   |                 | 2113  | 0,095 mm  |                    | ok         | ± 10%       |
| (MULTILAYER)  | 7628            | 0,18 mm                                     |   | ok                 | ± 10%      |             |
| ESPESSURA DE COBRE BASE   |                 | (COBRE LAMINADO)                            |   |                    |            |             |
|   | 17µm (½ oz/ft²) | 35µm (1 oz/ft²)                             | 17µm (½ oz/ft²)   |                    | ± 10%      |             |
| ESPESSURA DE COBRE DEPOSITADO >= 20µm   |                 |   |   |                    |            |             |
| A ESPESSURA ESPECIFICADA DO COBRE DE PLACAS FACE SIMPLES, DUPLA FACE E CAMADAS EXTERNAS DE MULTILAYER É CONSIDERADA A ESPESSURA TOTAL (COBRE BASE + COBRE ELETRODEPOSITADO), SALVO ESTIVER CLARAMENTE DEFINIDA COMO SENDO COBRE BASE. |                 |   |   |                    |            |             |
| ESPESSURA FINAL DA PLACA  |                 | MINIMA 0,5mm                                | ±10% OU A TOLERANCIA INDICADA NO ITEM "MATERIAL BASE" (O QUE FOR MAIOR) |                    |            |             |
|   |                 | MAXIMA 3,2mm                                |   |                    |            |             |
| DIMENSÃO FINAL DA PLACA   |                 | SEM VINCOS: MÁXIMO DE 420mm X 570 mm        |   |                    |            |             |
|   |                 | CONTENDO VINCOS: MÁXIMO DE 420mm X 550mm    |   |                    |            |             |
| QUANTIDADES DE CAMADAS EM PLACAS MULTILAYERS  |                 | 3 A 6 CAMADAS                               |   |                    |            |             |
| DIAMETRO FINAL DE FUROS METALIZADOS   |                 | MÍNIMO DE 0,20mm (8mil)                     |   | ± 0,1mm (4mil)     |            |             |
| RASGOS / RECORTES   |                 |   |   |                    |            |             |
| LARGURA MINIMA DE RASGOS METALIZADOS:   |                 | 0,70mm                                      |   |                    |            |             |
| LARGURA MINIMA DE RASGOS NÃO METALIZADOS:   |                 | 0,80mm                                      |   |                    |            |             |
| COMPRIMENTO MÍNIMO DO RASGO:  |                 | 2X Largura do Rasgo + 0,3mm                 |   |                    |            |             |
| ASPECT RATIO  |                 | Maximo de 8:1                               |   |                    |            |             |
| (Relação Ø menor furo metalizado x Espessura da placa)  |                 |   |   |                    |            |             |
| Clearance - Distancia Traçado/Condutor de camada interna de Multilayer e parede de furos  |                 | Minimo de 0,28MM (11 mil)                   |   |                    |            |             |
| DIAMETRO FINAL DE FUROS METALIZADOS   |                 | MÍNIMO DE 0,20mm (8mil)                     |   | ± 0,1mm (4mil)     |            |             |
| RASGOS / RECORTES   |                 |   |   |                    |            |             |
| LARGURA MINIMA DE RASGOS METALIZADOS:   |                 | 0,70mm                                      |   |                    |            |             |
| LARGURA MINIMA DE RASGOS NÃO METALIZADOS:   |                 | 0,80mm                                      |   |                    |            |             |
| COMPRIMENTO MÍNIMO DO RASGO:  |                 | 2X Largura do Rasgo + 0,3mm                 |   |                    |            |             |
| ASPECT RATIO  |                 | Maximo de 8:1                               |   |                    |            |             |
| (Relação Ø menor furo metalizado x Espessura da placa)  |                 |   |   |                    |            |             |
| Clearance - Distancia Traçado/Condutor de camada interna de Multilayer e parede de furos  |                 | Minimo de 0,28MM (11 mil)                   |   |                    |            |             |
| Dimensional : contorno fresado ou vincado   |                 | ± 0,20mm                                    |   |                    |            |             |
| Distancia Traçado/Condutor interno e externo e contorno fresado ou parede de furo não metalizado.   |                 | Minimo de 0,25mm (10mil)                    |   |                    |            |             |

Figura 14. Documento com as especificações do processo de fabricação de placas de circuito impresso.

larguras mínimas de trilhas, diâmetros mínimos de vias, tudo o que for uma limitação e que cabe ao processo de fabricação da placa, estará descrito neste documento.

Com base neste documento, é importante criar um Design Rules específico, dado como mínimo, ou seja, criar regras que respeitem as especificações mínimas da empresa durante o layout. Desta forma, ao começar o processo do layout da placa, as especificações mínimas serão respeitadas desde o primeiro instante, evitando assim atrasos devido a retrabalhos que podem ocorrer ao enviar a placa para manufatura.

A Figura 14 é um documento fornecido pela empresa Griffus [39] e nele contem todas as especificações referentes ao processo de fabricação da placa de circuito. As informações relevantes que o documento fornece estão descritas como “Diâmetro final de furos metalizados”, “Largura de anel ao redor de furos (ilha)”, “Distância mínima para pads/ilhas para simoblogia de componentes” e “a máscara de solda é distanciada 2.5mil dos pads ilhas. Quando estiver mais próxima que isto é totalmente removida entre pads / ilhas com passo (pitch) menor que 26 mil”, este último é chamado de Distância mínima entre máscara de solda.

Com base nestas informações, é possível criar regras de projeto para que essas especificações não sejam violadas. A Figura 15 ilustra as regras de projeto criadas. Os parâmetros que foram criados estão descritos na Tabela 1, na esquerda a nomenclatura do documento e na direita a nomenclatura do software.

|   |                                   |
|---|-----------------------------------|
| “Diâmetro final de furos metalizados”                             | <i>Hole Size</i>                  |
| “Largura de anel ao redor de furos (ilha)”                        | <i>Minimum Annular Ring</i>       |
| “Distância mínima entre máscara de solda”                         | <i>Minimum Solder Mask Silver</i> |
| “Distância mínima para pads/ilhas”<br>(simoblogia de componentes) | <i>Silk to Silk Clearance</i>     |

Tabela 1

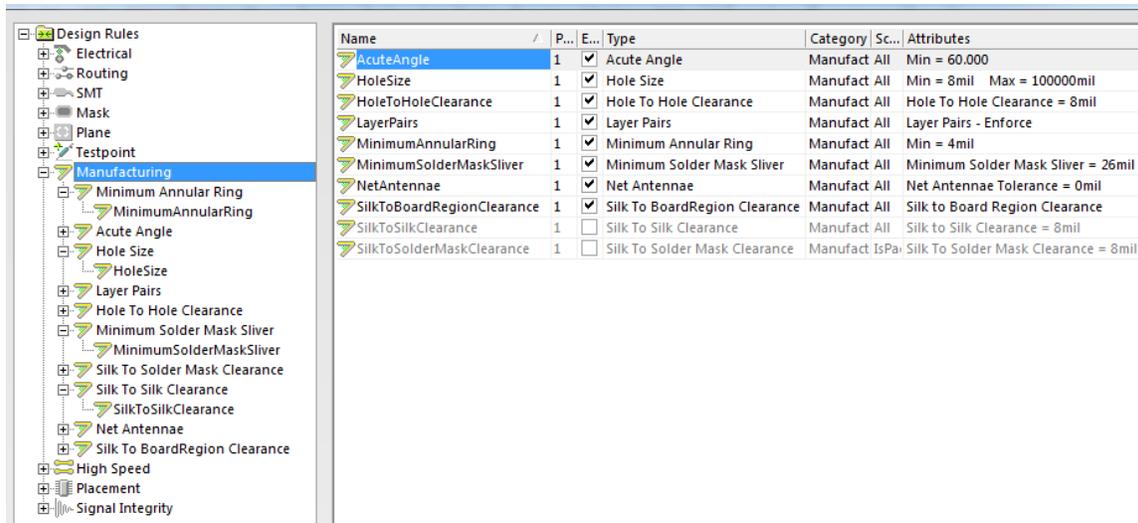


Figura 15. Design Rules referente à manufatura criado a partir do documento de especificações da empresa

A importância de ter um *Design Rules* é de que quanto mais completo ele for, quanto mais erros ele cercar, melhor o rendimento do layout. Dessa forma, menos tempo será gasto em retrabalhos e análises visuais, incluindo que será possível prevenir comportamentos inadequados nos circuitos e garantir as especificações do projeto. Além disso, ao definir um Design Rules completo, há um aumento no rendimento de outros recursos do ECAD, como o auto-router, que baseia-se 100% nos Design Rules.

---

## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho de Iniciação Científica foi estudado uma placa de circuito impresso e seu funcionamento, de forma a compreender o processo de projeto de um sistema eletrônico embarcado, possibilitando o estudo sobre o mesmo.

Foi possível concluir este projeto proposto, de estudar metodologias e ferramentas utilizados na indústria eletrônica e de adequar uma metodologia de acordo com a demanda do laboratório de Robótica, que é dado por projetos envolvendo sistemas embarcados e fabricados em pequenas quantidades. O principal objetivo atingido neste trabalho foi de possibilitar aos alunos e professores do laboratório a utilizar uma ferramenta profissional para projetos de forma adequada, reduzindo o tempo e custo e aumentando a qualidade dos projetos, além de proporcionar e aproximar os projetos de forma que é feito em grandes empresas.

A fim de detalhar o processo de projeto, pesquisou-se os principais recursos do software Altium Designer e o projeto da placa foi importado para o mesmo, utilizando os recursos estudados e dessa forma foi possível dar diretrizes sobre os recursos e sua forma adequada de utilizá-los.

Por fim, foi feito um estudo, ainda que básico e generalizado, sobre técnicas de layout que incluem regras de projeto e diretrizes para uma placa de circuito elétrico que atenda as especificações do circuito com qualidade.

Partindo deste trabalho de iniciação científica, trabalhos futuros nesta área poderão ser desenvolvidos, definindo diretrizes focando o layout específicos de placas de circuitos digitais com alta velocidade. Além disso, outros trabalhos como o desenvolvimento de um novo projeto de placa de controle dos robôs do laboratório de robótica, utilizando as diretrizes aqui definidas.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **“Metodologia Seis Sigma”**. Disponível em [http://pt.wikipedia.org/wiki/Seis\\_Sigma/](http://pt.wikipedia.org/wiki/Seis_Sigma/). Acesso em 15/01/2014.
- [2] **“Equipe RoboFEI”**. Disponível em [http://portal.fei.edu.br/pt-BR/pesquisas\\_projetos/projetos\\_institucionais/Robo\\_FEI/Paginas/robo\\_FEI.aspx](http://portal.fei.edu.br/pt-BR/pesquisas_projetos/projetos_institucionais/Robo_FEI/Paginas/robo_FEI.aspx). Acesso em 01/08/2013.
- [3] GURZONI Jr., José A.; MARTINS, Murilo Fernandes; TONIDANDEL, Flavio; BIANCHI, Reinaldo A. C. *On the construction of a RoboCup small size league team*. Journal of the Brazilian Computer Society. Vol. 17, Issue 1, pages 69-82. Springer-Verlag London (2011)
- [4] **“Design Process for Complex Electronics”**. Disponível em [http://www.hq.nasa.gov/office/codeq/software/ComplexElectronics/ce\\_design.htm](http://www.hq.nasa.gov/office/codeq/software/ComplexElectronics/ce_design.htm). Acesso em 23/01/2014.
- [5] **“About Cadsoft Eagle”** Disponível em <http://www.cadsoftusa.com/eagle-pcb-design-software/product-overview/?language=en>. Acesso em 28/01/2014.
- [6] **“Computer-aided Design”** Disponível em [http://en.wikipedia.org/wiki/Computer-aided\\_design](http://en.wikipedia.org/wiki/Computer-aided_design). Acesso em 29/03/2015.

---

[7] **“Electronic Design Automation (EDA) and Electronic Computer-aided Design Software (ECAD) Information”**. Disponível em <[http://www.globalspec.com/learnmore/industrial\\_engineering\\_software/engineering\\_scientific\\_software/electronic\\_design\\_automation\\_eda\\_electronic\\_computer\\_aided\\_design\\_software\\_ecad](http://www.globalspec.com/learnmore/industrial_engineering_software/engineering_scientific_software/electronic_design_automation_eda_electronic_computer_aided_design_software_ecad)>. Acesso em 29/03/2015.

[8] Dirk, V.M. ; Dept. of Technol., Thomas More Univ. Coll., Sint-Katelijne-Waver, Belgium ; Peter, A. ; Van Bauwel, J.. **“Use of state of the art ECAD design tools in highinnovative studies”**. Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), 2013 12th International Conference. Polyana Svalyava (2013)

[9] **“About Altium Designer”**. Disponível em <<http://altium.com/en/about-altium>>. Acesso em 015/01/2014.

[10] AGUILAR Jr; et al. **Engenharia de Requisitos**. Rio de Janeiro, 2010.

[11] **“Electronic Design Process: 5. Prototype and Review”** Disponível em <<http://www.hawksheaddesigns.co.uk/index.php/electronic-design-process/prototype-electronic-design-process>>. Acesso em 29/03/2015.

[12] SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth C. **Microeletrônica**. 5. Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.

---

[13] ROBERTS, Gordon; TAENZLER, Friedrich; BURNS, Mark. *An Introduction to Mixed-Signal IC Test and Measurement*. 1. Ed. New York: Oxford University Press, 2012.

[14] WIDMER, Tocci. *Sistemas Digitais*. 8. Ed. São Paulo:Prentice Hall, 2003.

[15] ARTMED, Frank Vahid. “*Sistemas digitais : projeto, otimização e HDLs*”. 1. Ed. São Paulo: Bookman companhia editor LTDA, 2008

[16] BUSHNELL, Michael L.; AGRAWAL, Vishwani D. “*Essentials of Electronic Testing - For Digital Memory and Mixed-Signal VLSI Circuits*”. 1. Ed. New York: Kluwer Academic Publishers, 2002.

[17] CADENCE DESIGN SYSTEMS, INC. NAVIASKY, Eric; NIZIC, Mladen. *Mixed-Signal Design Challenges and Requirements*.

[18] CADENCE DESIGN SYSTEMS, INC. KARNANE, Kishore; BALASUBRAMANIAN, Sathishkumar. “*Solutions for Mixed-Signal SoC Verification*”.

[19] COOMBS, Clyde F. “*Printed Circuits Handbook*”. 6. Ed. McGraw-Hill, 2008.

[20] “**IPC, The Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits - Overview**” Disponível em  
<[http://www.ipc.org/2.0\\_IPC/2.1\\_About/pdfs/IPC\\_Overview.pdf](http://www.ipc.org/2.0_IPC/2.1_About/pdfs/IPC_Overview.pdf)>. Acesso em  
29/03/2015.

- 
- [21] ***“Generic Standard on Printed Board Design”*** Disponível em <<http://www.ipc.org/TOC/IPC-2221B.pdf>>. Acesso em 29/03/2015.
- [22] ***“Sectional Design Standard for Rigid Organic Printed Boards”*** Disponível em <<http://www.ipc.org/TOC/IPC-2222.pdf>>. Acesso em 29/03/2015.
- [23] ***“Sectional Design Standard for Flexible Printed Boards”*** Disponível em <<http://www.ipc.org/TOC/IPC-2223.pdf>>. Acesso em 29/03/2015.
- [24] ***“Sectional Design Standard for Organic Multichip Modules (MCM-L) and MCM-L Assemblies”*** Disponível em <<http://www.ipc.org/TOC/IPC-2225.pdf>>. Acesso em 29/03/2015.
- [25] ***“Sectional Design Standard for High Density Interconnect (HDI) Printed Boards”*** Disponível em <<http://www.ipc.org/TOC/IPC-2226.pdf>>. Acesso em 29/03/2015.
- [26] ***“Design Guide for the Packaging of High Speed Electronic Circuits”*** Disponível em <<http://www.ipc.org/TOC/IPC-2251.pdf>>. Acesso em 29/03/2015.
- [27] ***“Standard for Determining Current Carrying Capacity in Printed Board Design”*** Disponível em <<http://www.ipc.org/TOC/IPC-2152.pdf>>. Acesso em 29/03/2015.
- [28] ***“Controlled Impedance Circuit Boards and High Speed Logic Design”*** Disponível em <<http://www.ipc.org/TOC/IPC-2141.pdf>>. Acesso em 29/03/2015.

---

[29] XILINX, INC. ALEXANDER, Mark. *“Power Distribution System (PDS) Design: Using Bypass/Decoupling Capacitors”*.

[30] SUN MICROSYSTEMS, INC. SMITH, Larry; et al. *“Power Distribution System Design Methodology and Capacitor Selection for Modern CMOS Technology”*

[31] AVX CORPORATION. CHASE, Yun. *“Introduction to Choosing MLC Capacitors For Bypass/Decoupling Applications”*.

[32] NXP SEMICONDUCTOR. *“Brushless Motor Control using the LPC2141”*.

[33] MICREL, INC. LEE, John, T.; RIBEIRO, Carlos; MENDONZA, Miguel. *“Designing High-Performance and Power Efficient 3-Phase Brushless DC Motor Control Systems”*.

[34] DRIVETECH, INC. OHM, Dal Y. *“The basics of Brushless Motor Drive Design”*.

[35] DRIVETECH, INC. OHM, Dal Y.; OLEKSUK, Richard J. *“Influence of PWM Schemes and Commutation Methods for DC and Brushless Motors and Drivers”*.

- 
- [36] ***“PCB Design Tutorial”*** Disponível em <  
[http://server.ibfriedrich.com/wiki/ibfwikien/images/d/da/PCB\\_Layout\\_Tutorial\\_e.pdf](http://server.ibfriedrich.com/wiki/ibfwikien/images/d/da/PCB_Layout_Tutorial_e.pdf)  
>. Acesso em 29/03/2015.
- [37] ***“PCB Design Guidelines for Reduced EMI”*** Disponível em  
<<http://www.ti.com/lit/an/szza009/szza009.pdf>>. Acesso em 29/03/2015.
- [38] ***“About Saturn PCB Design Toolkit”*** Disponível em <  
[http://saturnpcb.com/pcb\\_toolkit.htm](http://saturnpcb.com/pcb_toolkit.htm)>. Acesso em 29/03/2015.
- [39] ***“Griffus PCB”*** Disponível em <<http://www.griffuspcb.com.br/>>. Acesso em  
29/03/2015.