

CESAR VINÍCIUS SOARES GUIMARÃES

**ESTUDO DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA EM DISPOSITIVOS DE
PROTEÇÃO**

CESAR VINÍCIUS SOARES GUIMARÃES

**ESTUDOS DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA EM DISPOSITIVOS
DE PROTEÇÃO**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. José Feliciano Adami

Guaratinguetá - SP
2017

G963e	Guimarães, César Vinicius Soares Estudo de compatibilidade eletromagnética em dispositivos de proteção / César Vinicius Soares Guimarães – Guaratinguetá, 2017. 92 f : il. Bibliografia: f. 86-87 Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017. Orientador: Prof. Dr. José Feliciano Adami 1. Compatibilidade eletromagnética. 2. Equipamentos de proteção. 3. Reguladores (Máquinas). I. Título CDU 537.8
-------	--

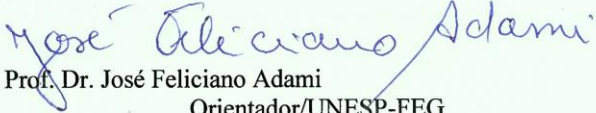
CESAR VINÍCIUS SOARES GUIMARÃES

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA"

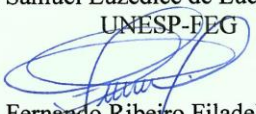
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. Leonardo Mesquita
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. José Feliciano Adami
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. Samuel Euzédice de Lucena
UNESP-FEG


Prof. Dr. Fernando Ribeiro Filadelfo
UNESP-FEG

Setembro 2017

DADOS CURRICULARES

CESAR VINÍCIUS SOARES GUIMARÃES

NASCIMENTO	04.10.1991 – SÃO PAULO / SP
FILIAÇÃO	Joel Vieira Guimarães Solange Pereira Soares Guimarães
2006/2008	Curso de Aprendizagem Industrial de Eletricista de Manutenção – SENAI Roberto Simonsen – São Paulo
2006/2008	Menor Aprendiz - Telefônica - São Paulo
2009/2010	Técnico em Informática - ETESP - São Paulo
2014/2015	Intercâmbio em Engenharia Elétrica - INSA Lyon - França
2014	Projeto de uma placa eletrônica (PCB) com sensores de deformação integrados a uma haste de fibra carbono para um Airbus (A380) - INSA Lyon e SKF - França
2015	Estagiário em Eletrônica de Simulação (EMC e EMI) - Schneider Electric - Grenoble - França
2015	Curso no <i>Software</i> CST (módulo EMC/EMI) - CST Company - Paris - França
2017	Estagiário em Engenharia de Sistemas Elétricos - Embraer - São José dos Campos
2011/2017	Curso de Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Guaratinguetá

à minha família, por toda confiança depositada em mim ao longo deste período, estando presente em todos os momentos, fornecendo toda segurança e apoio necessários para que eu pudesse concluir esta fase da minha vida com sucesso.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, por minha vida, pela minha família e amigos que foram essenciais para que eu chegasse até aqui,

ao meu orientador, *Prof. Dr. José Feliciano Adami* pelo apoio e aconselhamento durante a realização deste trabalho,

ao meu orientador de estágio, *Prof. Dr. Didier Noterman*, por seu acompanhamento durante o meu período de estágio e pelos seus preciosos conselhos para que eu tivesse um bom desempenho profissional,

ao responsável pela equipe de eletrônica da *Schneider Electric*, *Sr. Thierry Avenat*, pelo seu acolhimento na equipe e por proporcionar um excelente ambiente de trabalho,

ao responsável pelo desenvolvimento mecatrônico dos produtos da *Schneider Electric*, *Sr. Christophe Chanvillard*, que propôs o tema de estágio, pela sua confiança, pelo seu entusiasmo e suas numerosas discussões técnicas que me fizeram adquirir muito conhecimento,

ao engenheiro em eletrônica CEM da *Schneider Electric*, *Sr. Nicolas Raynaud*, por acompanhar meu trabalho, por seus inúmeros conselhos e por sua forte contribuição para a realização do meu projeto de estágio,

ao engenheiro em simulação eletromagnética 3D da sociedade CST, *Sr. Jérôme Mollet*, por sua disponibilidade ao longo do meu estágio, por seus preciosos conselhos na utilização no *software* CST STUDIO SUITE,

aos meus amigos e companheiros de estudo, *André Bianchi Laraia*, *Carlos Augusto Marcondes*, *João Pedro de Oliveira Fernandes*, *Robson Diego de Oliveira*, *Victor Polo* e *William de Paula Silva*, que estiveram ao meu lado e foram essenciais para superar muitos dos desafios acadêmicos que surgiram,

aos professores, por todo conhecimento transmitido, por todo suporte e por todos conselhos que me transformaram em um profissional preparado para o mercado de trabalho,

aos funcionários do Campus de Guaratinguetá, pela atenção, apoio e serviços prestados.

“Algo só é impossível até que alguém duvide e resolva provar o contrário.”

Albert Einstein

GUIMARÃES, C. V. S. **Estudo de Compatibilidade Eletromagnética em Dispositivos de Proteção**. 2017. 96 p. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

RESUMO

Este trabalho de graduação apresenta um estudo sobre *compatibilidade eletromagnética* (EMC) em dispositivos de proteção, acompanhado de um estudo de caso realizado na *Schneider Electric* durante meu período de estágio. No quadro de concepção de produtos eletrônicos, entre eles os dispositivos de proteção, surgem questões referentes à compatibilidade eletromagnética que estes produtos apresentam dentro de um sistema. É importante, portanto, utilizar um *software* que permite verificar o comportamento eletromagnético de certos produtos e identificar determinados problemas que vem da fase de concepção. Sendo assim, foi escolhido o *software* de simulação *3D CST STUDIO SUITE*, a fim de verificar se ele atende essas necessidades. O produto escolhido para o estudo de caso foi o *Smartlink Modbus*, um dispositivo de comunicação, monitoramento e proteção, utilizado no *Smart Panel*. Seus primeiros protótipos não passaram nos ensaios de emissão radiada devido a um pico que ultrapassa o gabarito a 460 MHz. Através do CST STUDIO SUITE foi possível identificar a problemática da placa, que vem do componente ativo ADuM1301, e trabalhar em algumas soluções para atenuar essa emissão. Além disso, uma placa de teste foi criada com o objetivo de realizar uma caracterização em banda larga do ADuM1301. E por fim, ensaios em campo próximo foram realizados, em parceria com a sociedade *Nexio*, no *Smartlink Modbus* e a placa de teste. Isso permitiu, em uma última etapa, fazer uma comparação entre os ensaios práticos e as simulações CST.

PALAVRAS-CHAVE: Compatibilidade eletromagnética. *Smartlink Modbus*. CST. ADuM1301.

GUIMARAES, C. V. S. **Electromagnetic Compatibility Study on Protective Devices**. 2017. 90 p. Graduate Work (Graduate in Electrical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

ABSTRACT

This graduate work presents a study of electromagnetic compatibility (EMC) in protection devices, accompanied by a case study that was done during my internship in Schneider Electric. As part of the design of electronic products, questions arose about the electromagnetic compatibility of those present products in a system. Therefore, it is important to find a simulation software to verify the electromagnetic behavior of some products and identify the problems that come from the design phase. We choose 3D CST STUDIO SUITE as software to check if it could answer those needs. The product choice was Smartlink Modbus, which is a communication, monitoring and protection device used on Smart Panel. Its first prototypes did not pass the radiated emission test because of a peak, which exceeds the standard at 460 MHz. With CST STUDIO SUITE, it was possible to identify the problem of the PCB, that comes from the active component ADuM1301, and work with some solutions to mitigate this issue. Furthermore, a test card was created with the goal to do a wideband characterization of the ADuM1301. Moreover, near field trials were done with the Smartlink Modbus and the test card, in partnership with Nexio company. This allowed us, in a last step, to make comparisons between the practice tests and the CST simulations.

KEYWORDS: Electromagnetic compatibility. Smartlink Modbus. CST. ADuM1301.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Compatibilidade Eletromagnética é importante para todos os sistemas eletrônicos, especialmente os aviônicos, equipamentos hospitalares e de consumo	17
Figura 2 – Curva de Custo versus Tempo	17
Figura 3 – Conjunto constituído de um painel SM6 com um controlador programável SEPAM, ambos produtos da <i>Schneider Electric</i>	25
Figura 4 – Curva de emissão irradiada do produto <i>Smartlink Modbus</i>	26
Figura 5 – Produtos da gama Acti9	28
Figura 6 – Acti9 <i>Smartlink Modbus</i>	29
Figura 7 – Visualização global de um <i>Smart Panel</i>	29
Figura 8 – Módulos disponíveis no CST STUDIO SUITE	30
Figura 9 – Vista global do funcionamento do <i>software</i> CST STUDIO SUITE	32
Figura 10 – Criação de um modelo de referência.....	32
Figura 11 – Criação de um modelo de referência.....	33
Figura 12 – Criação de um modelo de referência.....	33
Figura 13 – Criação de um modelo de referência.....	34
Figura 14 – Importação de um PCB para o CST STUDIO SUITE	35
Figura 15 – Parametrização do PCB, aba <i>Stackup</i>	35
Figura 16 – Parametrização do PCB, aba <i>Components</i>	36
Figura 17 – Parametrização do PCB, aba <i>PCB Preview</i>	37
Figura 18 – Parametrização do PCB, botão <i>Specials</i>	37
Figura 19 – Arquitetura de alimentação do <i>Smartlink Modbus</i>	38
Figura 20 – Planos de alimentação do <i>Smartlink Modbus</i>	39
Figura 21 – Planos de massa do <i>Smartlink Modbus</i>	39
Figura 22 – Visão geral do procedimento de simulação: alimentação comutada	39
Figura 23 – Importação na aba <i>PCB Preview</i>	40
Figura 24 – Vista da importação do PCB com a porta discreta.....	40
Figura 25 – Interface para lançar a simulação no CST STUDIO SUITE.....	41
Figura 26 – Curva de parâmetros S do plano de alimentação de 24 V	41
Figura 27 – Importação na aba <i>PCB Preview</i> para os planos de alimentação de 3,3 V e 5 V .	42
Figura 28 – Comparação entre as curvas de parâmetros S dos planos de alimentação	42
Figura 29 – Esquema elétrico da alimentação comutada	43
Figura 30 – Visão geral do procedimento de simulação: oscilador do microprocessador	44

Figura 31 – Esquema do oscilador do microprocessador	45
Figura 32 – Modelo 2D do circuito do oscilador utilizando modelos IBIS	45
Figura 33 – Sinal de excitação da porta 1	46
Figura 34 – Curva de corrente na alimentação do oscilador	46
Figura 35 – Realização da transformada de Fourier através do <i>Post Processing</i>	47
Figura 36 – Espectro de corrente na alimentação do oscilador	47
Figura 37 – Espectro de corrente na saída do oscilador	48
Figura 38 – Caracterização das capacitâncias de desacoplamento	49
Figura 39 – Porta discreta entre os planos 3.3 V e GND_SIGNAL	49
Figura 40 – Representação do PCB no esquema 2D	50
Figura 41 – Injeção do espectro de corrente no PCB 3D	50
Figura 42 – Combinação de resultados com o PCB 3D	51
Figura 43 – Campo elétrico em dB μ V/m a 3 m do PCB	51
Figura 44 – Componente isolante: ADuM1301	53
Figura 45 – Energia irradiada pelo ADuM1301 em um PCB de quatro camadas.....	53
Figura 46 – Visão geral do procedimento de simulação: ADuM1301	54
Figura 47 – Notas de aplicação do ADuM1301	55
Figura 48 – Modelo do funcionamento ADuM1301 no CST STUDIO SUITE.....	55
Figura 49 – Ruído gerado entre os pinos VDD e GND do ADuM1301	56
Figura 50 – Pico de corrente na saída do ADuM1301	56
Figura 51 – Portas discretas ao nível do componente ADuM1301	57
Figura 52 – Parametrização do solucionador frequencial	57
Figura 53 – Curvas de parâmetros S dos lados Sinal e <i>Modbus</i>	58
Figura 54 – Injeção do ruído ao nível dos pinos de alimentação do ADuM1301	58
Figura 55 – Esquema 2D utilizado para injeção de ruído no PCB	59
Figura 56 – Sinal de ruído modelado na <i>Simulation Transient Task</i>	59
Figura 57 – Parâmetros da função <i>Post Processing</i>	60
Figura 58 – Espectros de corrente gerados pelo sinal de ruído	60
Figura 59 – Injeção do espectro de corrente no PCB	61
Figura 60 – Parâmetros da função <i>AC. Combine Results</i>	61
Figura 61 – Comparação das curvas de campo elétrico obtidas pela função <i>AC. Combine Results</i> dos lados Sinal e <i>Modbus</i>	62
Figura 62 – Campos eletromagnéticos localizados a 424 MHz.....	62
Figura 63 – Campo elétrico a 424 MHz no lado <i>Modbus</i>	63

Figura 64 – Diagrama de radiação em campo distante.....	64
Figura 65 – Comparação entre as capacitâncias das séries UA Nichicon e GRM Murata.....	65
Figura 66 – Comparação entre curvas de parâmetros S para diferentes tecnologias de capacitâncias.....	65
Figura 67 – Stackup do modelo simplificado.....	66
Figura 68 – Janela da criação de blocos no <i>CST STUDIO SUITE</i>	66
Figura 69 – Modelo simplificado da placa <i>Smartlink Modbus</i>	67
Figura 70 – Porta discreta e capacitância de desacoplamento entre o GROUND e o 5 V	67
Figura 71 – Comparação entre as curvas de campo elétrico do modelo simplificado e da importação detalhada.....	68
Figura 72 – Modelo simplificado para comprimento de 60 mm do lado <i>Modbus</i>	68
Figura 73 – Curvas de parâmetros S para diferentes comprimentos do lado <i>Modbus</i>	69
Figura 74 – Curvas de campo elétrico para diferentes comprimentos do lado <i>Modbus</i>	69
Figura 75 – <i>Stackup</i> modificado do modelo simplificado.....	70
Figura 76 – Comparação entre as curvas de campo elétrico da importação detalhada, do modelo simplificado e do modelo com <i>stackup</i> modificado	70
Figura 77 – <i>Stackup</i> da placa de teste para o ADuM1301.....	71
Figura 78 – Parametrização do <i>stackup</i> no <i>CST STUDIO SUITE</i>	71
Figura 79 – Placa de teste para o ADuM1301	72
Figura 80 – Parametrização do solucionador frequencial	73
Figura 81 – Comparação entre as curvas de parâmetros S da placa de teste para o ADuM1301 e da importação detalhada	73
Figura 82 – Injeção do ruído na placa de teste	74
Figura 83 – Curvas de corrente das capacitâncias de desacoplamento no lado Sinal	74
Figura 84 – Curvas de corrente das capacitâncias de desacoplamento no lado <i>Modbus</i>	75
Figura 85 – Campo magnético Hx a 258 MHz.....	75
Figura 86 – Campo magnético Hy a 258 MHz.....	76
Figura 87 – Campo magnético Hx a 292 MHz.....	76
Figura 88 – Campo magnético Hy a 292 MHz.....	77
Figura 89 – Scanner de campo próximo <i>Nexio</i>	78
Figura 90 – Ensaio sobre o produto <i>Smartlink Modbus</i>	80
Figura 91 – Ensaio sobre a placa de teste para o ADuM1301.....	81
Figura 92 – Visualização dos resultados no NFS Viewer	82
Figura 93 – A comparação entre as curvas de campo magnético Hx sobre a capacitância C2	83

Figura 94 – A comparação entre as curvas de campo magnético H_y sobre a capacitância C2 83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distúrbios elétricos mais comuns	24
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Alternating Current
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
CISPR	Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques
CST	Computer Simulation Technology
DC	Direct Current
EMC	Electromagnetic Compatibility
EMI	Electromagnetic Interference
FCC	Federal Communications Commission
GND	Ground
PCB	Printed Circuit Board
VDD	Voltage Drain Drain

LISTA DE SÍMBOLOS

A	ampère
c	velocidade da luz
dB	decibel
f	frequência
Hz	hertz
M	metro
V	volt
S	segundo
Λ	comprimento de onda
μP	microprocessador

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	18
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	19
2.1	COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA	19
2.2	A COMPLEXIDADE DA TEORIA DA EMC	20
2.2.1	Fonte geradora de distúrbios	20
2.2.2	Acoplamento	21
2.2.3	Equipamento afetado	22
2.3	NORMAS E REGULAMENTOS	22
2.4	EMC INDISPENSÁVEL PARA DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO	24
3	APRESENTAÇÃO DO ESTUDO DE CASO	26
3.1	PROBLEMA DE EMISSÃO IRRADIADA DO SMARTLINK MODBUS.....	26
3.2	ACTI 9 SMARTLINK MODBUS	27
4	METODOLOGIA E RESULTADOS.....	30
4.1	CST STUDIO SUITE.....	30
4.2	MODELO DE REFERÊNCIA	32
4.3	IMPORTAÇÃO DO PCB	34
4.4	PRIMEIRA ABORDAGEM: ALIMENTAÇÃO COMUTADA.....	38
4.4.1	Contexto.....	38
4.4.2	Visão geral.....	39
4.4.3	Procedimento	40
4.4.4	Análise da primeira abordagem.....	43
4.5	SEGUNDA ABORDAGEM: OSCILADOR DO MICROPROCESSADOR.....	43
4.5.1	Contexto.....	43
4.5.2	Visão geral.....	44
4.5.3	Procedimento	45
4.5.4	Análise da segunda abordagem.....	52
4.6	TERCEIRA ABORDAGEM: ADUM1301	52
4.6.1	Contexto.....	52
4.6.2	Visão geral.....	54
4.6.3	Procedimento	54
4.6.4	Análise da terceira abordagem.....	64

4.7	SOLUÇÕES PARA ATENUAÇÃO DA ENERGIA IRRADIADA	64
4.7.1	Mudança da tecnologia das capacitâncias de desacoplamento	64
4.7.2	Modelo simplificado do Smartlink Modbus	66
4.7.3	Placa de teste para o ADuM	70
4.8	ENSAIOS EM CAMPO PRÓXIMO.....	77
4.8.1	Contexto.....	77
4.8.2	Objetivo	78
4.8.3	Descrição do ensaio.....	79
4.8.3.1	Ensaio sobre o produto Smartlink Modbus.....	79
4.8.3.2	Caracterização do componente ADuM1301.....	80
4.8.4	Comparação de resultados.....	81
5	CONCLUSÃO.....	85
	REFERÊNCIAS	86
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	88
	ANEXO A – Funções de Acti9 Smartlink Modbus	89
	ANEXO B – Datasheet LT3437.....	92

1 INTRODUÇÃO

Segundo Caloy (2012), há uma proliferação sem precedentes de dispositivos elétricos e controles eletrônicos em quase todos os aspectos da vida humana, “A inteligência” está sendo acionada até mesmo para produtos de mais baixo custo, devido à:

- Proliferação geral da eletrônica;
- Baixo preço de blocos funcionais integrados, economia em escala;
- O progresso no processamento de sinais digitais em todas as áreas.

Por todos os lados temos dispositivos que mudam nossas vidas. Mas o que seria de nosso mundo se todos os equipamentos que se possuísse interferissem em equipamentos próximos a eles, ou se o bom funcionamento fosse determinado pela não proximidade de algum outro equipamento? Foram criados, para que os dispositivos convivessem em harmonia e sempre funcionassem, além de oferecerem segurança para o ambiente e o homem, determinados níveis máximos permitidos de radiação "sentida" ou transmitida por um equipamento. Foi então, desenvolvido o conceito de **EMC - compatibilidade eletromagnética** (LIMA, 2013).

Então, a Compatibilidade refere-se à Interferência Eletromagnética (EMI) e a Susceptibilidade Eletromagnética. Espera-se que todos os equipamentos elétricos e eletrônicos não causem interferência nem em outros equipamentos, o que seria capaz de influenciar no funcionamento correto destes, nem em si próprios. Deseja-se, também, que os mesmos não sejam susceptíveis, ou seja, sensíveis, às emissões controladas de outros equipamentos (LIMA, 2013).

A compatibilidade eletromagnética pode parecer num primeiro instante um termo complexo, mas está associada a alguns efeitos que fazem parte do nosso cotidiano, e que são de conhecimento geral, decorrentes do fato de que qualquer aparelho eletrônico e/ou elétrico gerar ruídos (IBEC, 2015).

Exemplos desses efeitos são as perturbações visíveis na imagem de um televisor quando um liquidificador (em radiação eletromagnética), que está conectado na mesma rede elétrica, é ligado ou quando ouve-se rádio, perturbações provenientes de outras estações de rádio. Existem muitas outras causas dificilmente identificáveis, mas capazes de gerar efeitos imprevisíveis e que existem potencialmente em qualquer local ou ambiente, tais como, o lar, a indústria, os hospitais (IBEC, 2015).

Os equipamentos eletrônicos de todos os tipos estão susceptíveis a maus funcionamentos causados por interferência externa. Este fenômeno está se tornando mais perceptível por duas razões: a grande penetração e interação de produtos eletrônicos em todos os aspectos da vida diária, e a relativa baixa imunidade dos equipamentos modernos utilizando caixas de plástico e microprocessadores. A susceptibilidade à interferência é agora um problema para muitos tipos de dispositivos eletrônicos, especialmente para aqueles que a operação correta continuada é vital para a segurança ou razões econômicas. Os sistemas automotivos e aviônicos são exemplos da primeira categoria, redes bancárias e de telecomunicações são exemplos da última (WILLIAMS, 2007).

Observa-se problemas e, principalmente, precauções com relação à EMC durante a vida cotidiana, como ilustrado na Figura 1.

É solicitado o desligamento de equipamentos eletrônicos durante voos comerciais, por exemplo. Isso ocorre, particularmente, durante o pouso e a decolagem, que são etapas críticas do voo. Já foi reconhecido durante determinado voo um mau funcionamento do piloto automático e a causa foi diagnosticada como sendo causada pela EMI vinda de aparelhos eletrônicos dentro da aeronave, de acordo com relatórios da agencia regulatória americana (LIMA, 2013).

As interferências eletromagnéticas também são motivo de dor de cabeça para ambulâncias e serviços médicos de emergência. Para evitar que EMI possam atrapalhar no serviço de emergência, no Reino Unido é sugerido que o uso de *handsets* portáteis, terminais móveis e aparelhos celulares sejam restritos dentro de ambulâncias. Além disso, quando o acidentado é um portador de marca-passo, precauções especiais são necessárias (LIMA, 2013).

Além desses fatos, verifica-se que em caixas de som baratas e mal projetadas, sempre há um ruído no fundo das músicas. Percebe-se também que determinadas rádios param de funcionar quando se está em locais com muita radiação, como a Avenida Paulista, em São Paulo, ou na *Broadway*, em *Manhattan* (LIMA, 2013).

Todos esses fatos, ilustrados na Figura 1, indicam que é muito importante prestar-se atenção no projeto de equipamentos eletrônicos. Eles podem ser a fonte de distúrbio, ou serem facilmente afetados por efeitos eletromagnéticos (LIMA, 2013).

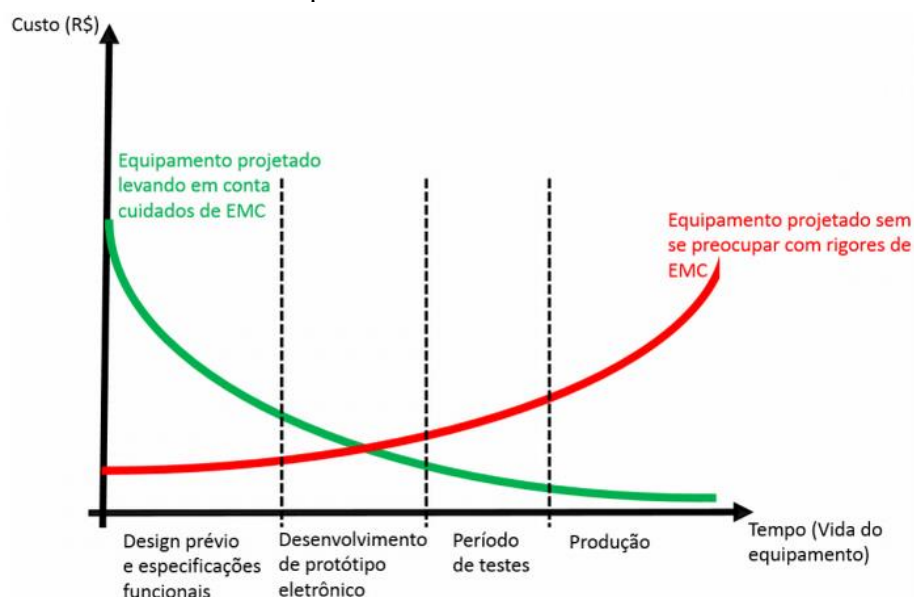
Figura 1 - Compatibilidade Eletromagnética é importante para todos os sistemas eletrônicos, especialmente os aviônicos, equipamentos hospitalares e de consumo



Fonte: LIMA (2013)

Independente da União Européia exigir que os produtos a serem vendidos em seu território tenham certificação quanto à compatibilidade eletromagnética, é adequado que o projeto de placas de circuito impresso e projetos de circuitos eletrônicos levem em conta os rigores de EMC. Um roteamento adequado permite que se minimize muito o problema de radiação ou captação de ruídos eletromagnéticos externos. O uso de dispositivos de proteção permite uma maior durabilidade do equipamento, além de garantir que o mesmo não “polua” o ambiente eletromagnético. É comprovado que sistemas que não levam em consideração os rigores exigidos pela EMC, se tornam muito caros em longo prazo - apresentam mais defeitos, têm maior custo de assistência técnica e garantia; além do suporte técnico especializado exigido para tais equipamentos ser mais custoso. Eventualmente, pode-se até prejudicar a instalação, tornando-a difícil como mostrado na Figura 2 (LIMA, 2013).

Figura 2 - Curva de Custo versus Tempo



Fonte: LIMA (2013)

No caso de dispositivos de proteção, quando os critérios da EMC não são respeitados, o maior problema causado são as situações esporádicas e que degradam aos poucos os equipamentos e seus componentes. Os mais diversos problemas podem ser gerados, por exemplo, em equipamentos eletrônicos, pode-se ter falhas na comunicação entre dispositivos de uma rede de equipamentos e/ou computadores, alarmes gerados sem explicação, atuação em relés que não seguem uma lógica e sem haver comando para isto e, queima de componentes e circuitos eletrônicos etc. É muito comum a presença de ruídos na alimentação pelo mau aterramento e blindagem, ou mesmo erro de projeto (CASSIOLATO, 2016).

O presente trabalho está estruturado basicamente em cinco capítulos, sendo este o primeiro, o qual traz uma introdução ao tema.

No segundo capítulo, é realizada uma revisão bibliográfica dos principais conceitos referentes à EMC e sua aplicação em dispositivos de proteção.

No terceiro capítulo, é apresentado produto escolhido como estudo de caso, o *Smartlink Modbus*, bem como a ferramenta de simulação utilizada neste trabalho, o *software* CST STUDIO SUITE.

No quarto capítulo, é realizado o estudo de caso do *Smartlink Modbus*; a metodologia utilizada, os resultados das simulações CST e os ensaios laboratoriais.

E no quinto capítulo, é feita a conclusão final do trabalho apresentado.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem o propósito de apresentar um estudo realizado sobre a compatibilidade eletromagnética em dispositivos de proteção, analisando sua importância e utilidade, bem como os principais problemas gerados quando a mesma é negligenciada e suas consequências. Além disso, um estudo de caso do *Smartlink Modbus* que foi realizado com objetivo de mostrar um exemplo real de problema referente à EMC ocorrido em um produto industrial da *Schneider Electric* e de como o mesmo pode ser tratado, desde a identificação e caracterização da causa deste problema até a proposição de alternativas para solucioná-lo.

2 FUNDAMENTO TEÓRICO

Neste capítulo são definidos alguns conceitos teóricos fundamentais sobre EMC e sua importância em dispositivos de proteção que auxiliarão na compreensão deste trabalho como um todo.

2.1 COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA

O tema *Compatibilidade Eletromagnética* relaciona-se com a medição e a definição de limites para as várias perturbações geradas pelo aparelho “perturbador”, de um lado, e de outro lado com a influência dessas perturbações sobre o aparelho perturbado (IBEC, 2015).

Segundo Williams (2007), a interferência eletromagnética (EMI) é uma séria e crescente forma de poluição ambiental. Seus efeitos variam desde pequenas crepitações na transmissão, até acidentes potencialmente fatais, devido à corrupção de sistemas de controle de segurança crítica. Várias formas de EMI podem causar maus funcionamentos elétricos e eletrônicos, podem impedir o uso adequado do espectro de rádio frequência, podem incendiar atmosferas inflamáveis, e podem até ter um efeito direto sobre a pele humana. Conforme os sistemas eletrônicos penetram mais profundamente em todos os aspectos da sociedade, ambos, o potencial para efeitos de interferência e o potencial para incidentes sérios induzidos pela EMI aumentam.

A compatibilidade eletromagnética, portanto, é a ausência de efeitos devido à EMI (WILLIAMS, 2007).

A ANATEL (2006) define formalmente a compatibilidade eletromagnética como sendo a capacidade de um dispositivo, equipamento ou sistema, de funcionar de acordo com suas características operacionais, no seu ambiente eletromagnético, sem impor perturbação intolerável nos demais equipamentos, dispositivos ou sistemas que compartilham o mesmo ambiente eletromagnético.

São encontradas ainda definições mais simplificadas, como por exemplo: a capacidade de um sistema eletrônico de funcionar corretamente no seu suposto ambiente eletromagnético e não ser a fonte de interferência neste ambiente (RAIZER, 2005).

Apesar das diversas definições citadas e ainda outras que podem ser facilmente encontradas em livros ou sites sobre o assunto, percebe-se que elas são complementares e estão acordadas com as normas técnicas, tanto nacionais quanto internacionais.

2.2 A COMPLEXIDADE DA TEORIA DA EMC

A base de qualquer estudo ou trabalho envolvendo EMC passa basicamente pela análise de três componentes do sistema:

- A fonte ou gerador de distúrbios;
- A propagação ou acoplamento;
- O dispositivo ou sistema afetado.

Sabe-se que estes componentes compõem um sistema e, portanto, são dependentes uns dos outros. No entanto, visando a praticidade o estudo deles é feito de forma independente.

A complexidade da teoria da compatibilidade eletromagnética se deve ao fato de que propagação das ondas eletromagnéticas é modelada pelas equações de Maxwell, que são um conjunto de equações diferenciais complexas. Sendo assim, é muito difícil encontrar uma solução analítica para equipamentos e dimensões reais. Mesmo utilizando computadores poderosos, um resultado próximo da realidade é extremamente difícil de ser obtido.

Por isso, quando se trata de problemas referentes à EMC, uma solução próxima é obtida através do uso de hipóteses e modelos simplificados, experimentos e medições.

2.2.1 Fonte geradora de distúrbios

Em EMC, uma fonte pode ser caracterizada como qualquer componente ou dispositivo que emite distúrbios eletromagnéticos, quer seja de forma conduzida ou irradiada.

O primeiro passo quando se trata de um problema de EMC, é identificar a fonte ou gerador de distúrbios. Isso permite determinar quais medidas devem ser tomadas para mitigar o problema, entre elas:

- Limitar os distúrbios gerados;
- Evitar o acoplamento cruzado, separando elementos incompatíveis;
- Blindar as potenciais vítimas.

Existem muitas causas para distúrbios eletromagnéticos, no entanto, as principais delas são a distribuição de energia elétrica, ondas de rádios, descargas eletrostáticas e raios.

No caso da distribuição de energia elétrica, os distúrbios são criados principalmente pelos circuitos de comutação. Para baixa tensão, a abertura de circuitos indutivos (motores,

válvulas solenoides e bobinas do contator etc.) gera surtos de tensão (muitos kV através das bobinas dos contadores), contendo uma alta frequência de harmônicos (centenas de MHz). Para média e alta tensão, a comutação de seccionadores produz ondas com picos muito altos de tensão em um curto intervalo de tempo (alguns nanosegundos), isto é demasiadamente prejudicial aos sistemas baseados em microprocessadores.

Já no caso das ondas de rádio emitidas por sistemas de monitoramento remoto, celulares, controle remoto, televisão, celulares etc., elas são, para alguns equipamentos mais susceptíveis, fontes de distúrbios na ordem de vários V/m. Atualmente, este tipo de emissão é cada vez mais comum e, portanto, equipamentos mais sensíveis devem possuir uma proteção mais robusta e eficaz.

As descargas eletrostáticas vêm principalmente do corpo humano, podendo ser da ordem de dezenas de quilovolts, dependendo das condições climáticas (temperatura e umidade). Um simples contato com um equipamento eletrônico pode gerar uma grande descarga (por radiação ou condução) em um curto espaço de tempo, gerando grandes distúrbios.

É importante mencionar que as fontes são geralmente classificadas de acordo com a perturbação que elas produzem, as principais são:

- Espectro;
- Forma de onda;
- Amplitude;
- Energia.

2.2.2 Acoplamento

O acoplamento pode ser definido como sendo a transmissão de distúrbios elétricos de um emissor (fonte) para uma vítima. Ele pode ser expresso através de um coeficiente k , cuja unidade é dB (decibel), que pode ser compreendido como a transmissão eficiente de distúrbios eletromagnéticos de um emissor para uma potencial vítima.

É importante definir o coeficiente k , pois quanto menos ele for, menor o distúrbio causado e, portanto, melhor para a EMC. A análise deste coeficiente só é significativa se os distúrbios gerados forem proporcionais à frequência, que é o caso frequentemente encontrado na prática.

Os modos de desacoplamento mais conhecidos são:

- Acoplamento capacitivo (interação do campo elétrico entre condutores);
- Acoplamento indutivo (acompanhadas por um campo magnético);
- Acoplamento de impedância comum (aterramento).

2.2.3 Equipamento afetado

A "vítima", para a EMC, é definida como qualquer equipamento que pode ser afetado por distúrbios eletromagnéticos. Normalmente, são equipamentos que contêm circuitos eletrônicos que são susceptíveis a distúrbios eletromagnéticos.

Os maus funcionamentos devido a esses distúrbios são geralmente classificados em quatro tipos:

- Permanente e mensurável;
- Randômico e não repetitivo, surgindo quando o distúrbio aparece;
- Randômico e não repetitivo, permanecendo mesmo depois do distúrbio desaparecer;
- Falha permanente no equipamento (danos físicos ou até mesmo destruição dos componentes).

A fim de evitar os problemas mencionados acima, algumas precauções podem ser tomadas, entre elas:

- Atentar para o projeto da placa de circuito impresso (partição funcional, layout das pistas, interconexões);
- Escolher cuidadosamente os componentes eletrônicos, consultando seus *datasheets* para verificar seu impacto no projeto final;
- Conceber uma carcaça protetora adequada ao produto;
- Interconexões com o terra são importantíssimas e devem ser feitas corretamente;
- Realizar adequadamente a cablagem.

2.3 NORMAS E REGULAMENTOS

As normas abordam dois importantes aspectos da compatibilidade eletromagnética: o fenômeno de emissão e o fenômeno de imunidade. Como todo equipamento elétrico emite um ruído eletromagnético, que pode vir a interferir em outros equipamentos ou em sistemas de

comunicação, as normas internacionais limitam os valores que os mesmos podem emitir, e isso é o que se chama de emissão, afirma Freitas (2010).

O outro aspecto que faz parte da compatibilidade eletromagnética é a imunidade, que representa o quanto o equipamento pode operar de forma adequada, mesmo com a presença de ruídos eletromagnéticos no ambiente (FREITAS, 2010).

Segundo Delaballe (2001), a legislação mundial sobre compatibilidade eletromagnética é dividida em basicamente em duas filosofias:

- dos países “liberais” como o Japão, nos quais a emissão de ruídos que perturbem as radiocomunicações é ilegal;
- dos países “regulamentados” como os EUA onde as emissões acima dos níveis normalizados estabelecidos pela FCC, parte 15, é ilegal.

Na Europa os regulamentos estão em uma posição intermediária entre essas duas: a emissão de ruídos e a fabricação de equipamentos muito sensíveis são ilegais. Ali, os regulamentos se aplicam a todos os aparelhos e instalações, sem exceções (DELABALLE, 2001).

De acordo com Delaballe (2001), os limites toleráveis na Europa e nos EUA são diferentes, assim como os métodos de ensaio. As normas americanas dividem os equipamentos automáticos de processamento de dados (ADP) em classe A (a serem usados em ambientes industriais) e B (a serem usados em ambiente residencial) e os limites toleráveis para a classe B são mais exigentes que para classe A. A classe B é exigida uma certificação enquanto que para a classe A é especificada a verificação da conformidade.

As normas usadas na Europa são as da CISPR (Comissão Internacional Especial de Rádio Interferência) que são também usadas no Japão para solucionar as eventuais pendências jurídicas, embora atualmente o espírito de cidadania leve a população a respeitar os limites (DELABALLE, 2001).

Segundo Freitas (2010), dentre os equipamentos que estão sujeitos à obrigatoriedade das normas no Brasil, atualmente estão os eletromédicos considerados de alto risco os quais são regulados pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), os equipamentos de metrologia legal, incluindo balanças e outros aparelhos, e os equipamentos conectados à rede de telecomunicações, com submissão à regulamentação da *Agência Nacional de Telecomunicações* (ANATEL). Ele conta ainda que predomina a tendência de que a ABNT realize um alinhamento cada vez maior das normas nacionais às normas da IEC.

2.4 EMC INDISPENSÁVEL PARA DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

Hoje em dia, equipamentos e sistemas estão sempre sujeitos a distúrbios eletromagnéticos e todo equipamento eletrotécnico é também, em maior ou menor grau, uma fonte geradora de distúrbios.

Entre as diversas fontes geradoras de distúrbio, as principais são as variações repentinas de corrente ou tensão. Estes distúrbios se propagam basicamente de duas maneiras: por condução, através de fios e cabos, ou por radiação, na forma de ondas eletromagnéticas.

A Tabela 1 apresenta os distúrbios elétricos mais comuns encontrados nos sistemas atualmente.

Tabela 1 - Distúrbios elétricos mais comuns

Classe	Tipo	Origem
Alta energia	Quedas de tensão	• Comutação de fonte de alimentação; • Curtos-circuitos; • Partida em motores de alta potência.
Media frequência	Harmônicos	• Sistemas com semicondutores de potência; • Fornos elétricos.
Alta frequência	Sobretensão	• Relâmpagos; • Comutação de dispositivos de controle; • Interrupção de correntes de curto-circuito por dispositivos de proteção.

Fonte: Adaptado de DELABALLE (2001)

Recentemente, a EMC tem ganhado um fator de destaque devido aos seguintes fatores:

- Distúrbios estão se tornando cada vez mais fortes devido ao aumento dos valores de tensão e corrente;
- Circuitos eletrônicos estão se tornando mais sensíveis;
- As distâncias entre circuitos sensíveis (em grande parte circuitos eletrônicos) e circuitos geradores de distúrbios (circuitos de potência) estão ficando menores.

Para dispositivos de proteção, monitoramento e controle, a EMC é fundamental, pois este tipo de equipamento deve operar normalmente em qualquer circunstância. Um exemplo de aplicação EMC em dispositivos de proteção é o conjunto mostrado na Figura 3, do painel

SM6 de média tensão contendo um disjuntor designado para interrupção de energia (centenas de ampères e dezenas de quilovolts) com um controlador lógico programável SEPAM, monitorando e protegendo a unidade.

Figura 3 - Conjunto constituído de um painel SM6 com um controlador programável SEPAM, ambos produtos da *Schneider Electric*



Fonte: ENGEREY (2016)

Não só no exemplo acima, como em muitos outros encontrados atualmente, observa-se a presença de equipamentos de comutação e controle, de alta e baixa corrente, sistemas de controle e de potência, todos muito próximos e operando lado a lado sem poder interferir no funcionamento um do outro. Portanto, vê-se que a EMC é um critério que deve ser respeitado em todas as fases de desenvolvimento e produção do produto, bem como durante a instalação e cablagem.

3 APRESENTAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

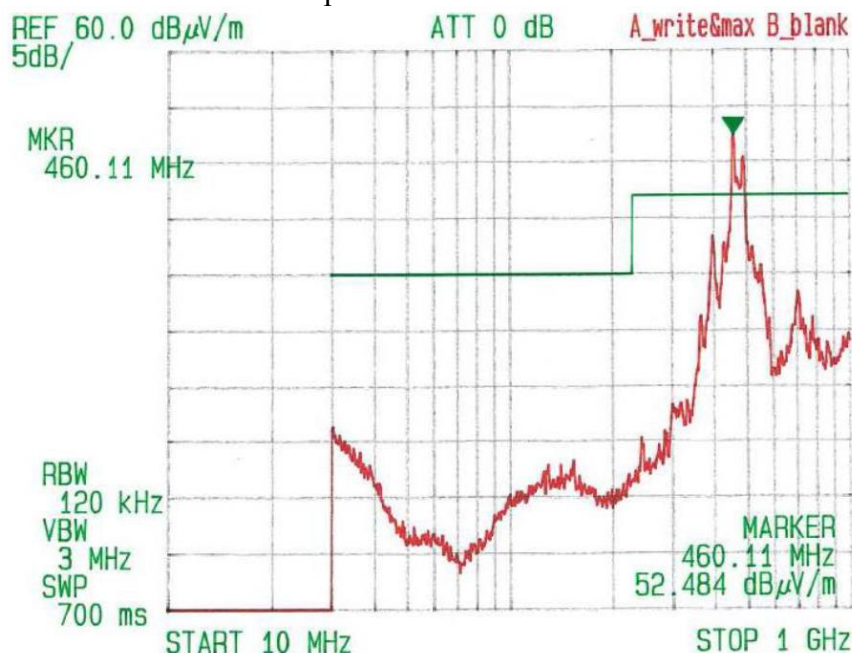
Nesta seção são apresentados, em detalhes, os motivos que levaram a escolha do produto *Smartlink Modbus* como estudo de caso, bem como uma descrição funcional do dispositivo.

3.1 PROBLEMA DE EMISSÃO RADIADA DO SMARTLINK MODBUS

O produto escolhido para estudo de caso foi o *Acti9 Smartlink Modbus*, cujo uma descrição detalhada é feita na próxima subseção. Observou-se que seus primeiros protótipos não passaram nos ensaios de emissão radiada, como mostrado na Figura 4, existe um pico que ultrapassa o gabarito, estabelecido pela norma CISPR, na frequência de 460 MHz.

Sendo o *Smartlink Modbus* um produto de supervisão, monitoramento e proteção, um problema como este pode ter diversas consequências, como por exemplo: disparo indevido de contadores, disjuntores e relés, falha na recuperação e tratamento de dados, entre outros.

Figura 4 - Curva de emissão irradiada do produto *Smartlink Modbus*



Fonte: Autor, 2017

Seja $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ e $f = 460 \text{ MHz}$, utilizando a equação (1), obtém-se $\lambda = 66 \text{ cm}$ e, portanto, um efeito de antena em $\lambda/2 = 33 \text{ cm}$, que é exatamente o comprimento do *Acti9 Smartlink Modbus*.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

λ = comprimento de onda [m]

c = velocidade da luz [m/s]

f = frequência [Hz]

Os ensaios confirmam que a irradiação é devido à geometria da placa e não à configuração dos cabos de ensaio. É preciso, portanto, encontrar a fonte de energia nesta frequência e mostrar por simulação que este problema pode ser antecipado. Neste trabalho são tratadas três abordagens: a alimentação comutada, o oscilador do microprocessador e o ADuM1301.

Depois da identificação da fonte de energia, são abordadas algumas soluções que atenuam a energia irradiada a fim de deixar o produto dentro do gabarito. Estas soluções incluem mudanças nas características dos componentes, nas camadas e no layout do PCB do produto.

A principal dificuldade encontrada na metodologia foi de encontrar o ponto de equilíbrio entre os modelos simplificados e a fiabilidade dos resultados. Sendo assim, foi gasto um tempo razoável antes de cada simulação, fazendo boas hipóteses para criar modelos simplificados coerentes.

A necessidade da criação de modelos simplificados é devido ao *software* de simulação eletromagnética 3D utilizado, cujo a metodologia consiste em equacionar por malha o objeto de simulação e resolver as equações de Maxwell para cada malha. A quantidade de malhas tem uma influência direta no tempo de simulação e, portanto, para otimizar o tempo de simulação, evitou-se a utilização de modelos muito complexos.

Além disso, procurou-se manter os modelos e procedimentos de simulação sempre simples, de modo que pudessem ser aplicados em outros projetos.

3.2 ACTI 9 SMARTLINK MODBUS

O aparelho *Acti9 Smartlink* tem 11 canais (24 VCC) e pode ser ligado a aparelhos da gama Acti9, mostrados na Figura 5, equipados com uma interface Ti24. Graças à ligação

Ti24, os dados podem ser transmitidos do aparelho *Acti9 Smartlink* para um CLP ou para um sistema de supervisão através de uma rede de comunicação *Modbus* (SCHNEIDER, 2014).

Figura 5 - Produtos da gama Acti9



Fonte: SCHNEIDER (2014)

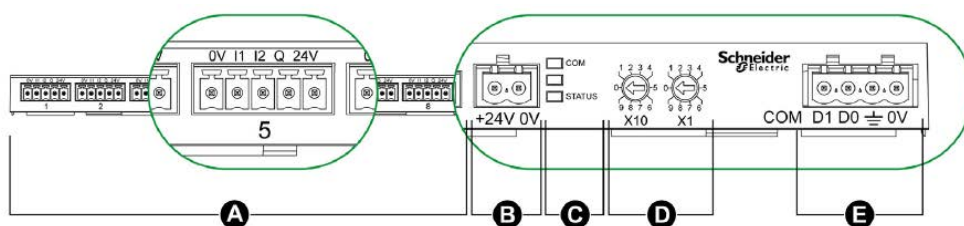
Os canais do aparelho *Acti9 Smartlink* também podem ser utilizados para transmitir I/O padronizados. Como tal, o aparelho *Acti9 Smartlink* também pode comunicar com aparelhos (não da gama *Acti9*) com ou sem uma ligação Ti24 (SCHNEIDER, 2014).

Segundo Schneider (2014), os aparelhos que podem ser ligados ao aparelho *Acti9 Smartlink* incluem:

- Produtos Acti9: interruptor de controle para contadores iACT24 e relés de impulsos iATL24, iC60 iOF+SD24 auxiliar de indicação, C60 OF+SD24 auxiliar de indicação, RCA iC60 controlo remoto com interface Ti24, disjuntor telecomandado Reflex iC60 com interface Ti24;
- Medidores: iEM2000T ou outros medidores (*Schneider Electric* ou outros fabricantes) em conformidade com IEC 62053-21 (impulso mínimo de 30 ms);
- Qualquer produto (não da gama Acti9) com informações de verificação-controle: 2 saídas discretas de 24 V e 1 entrada discreta de 24 V.

O aparelho *Acti9 Smartlink* é um intermediário entre o supervisor e vários aparelhos elétricos. Permite, portanto, recuperar e tratar as informações recebidas dos aparelhos, mas igualmente controlá-los. As funções disponíveis dependem do tipo de aparelhos ligados. As funções do *Acti9 Smartlink* são descritas em detalhe (**Anexo A**). A Figura 6 apresenta o aparelho *Acti9 Smartlink*:

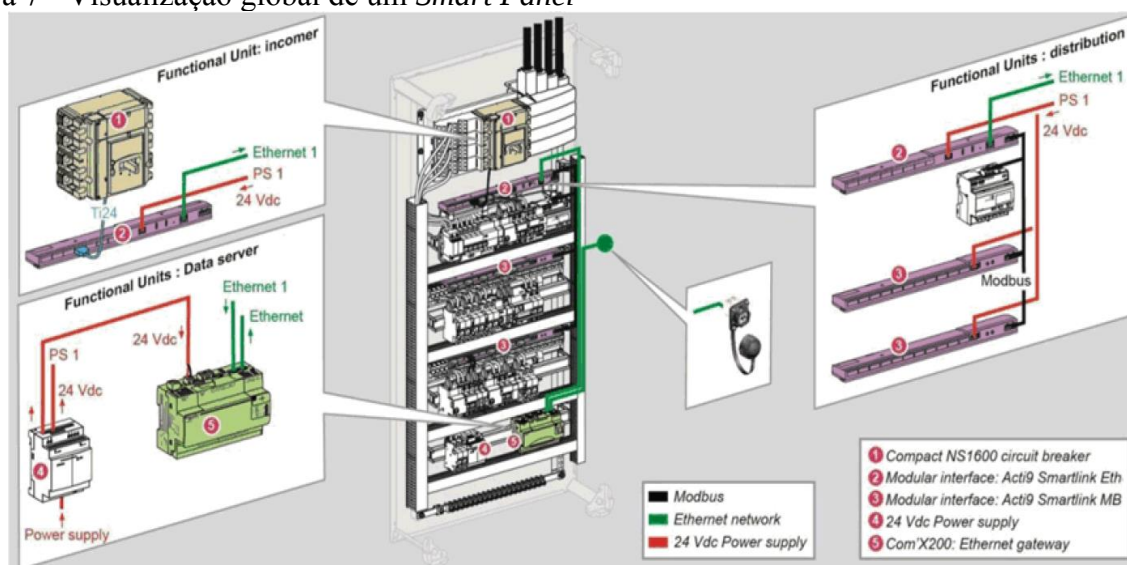
Figura 6 - Acti9 Smartlink Modbus



- A 11 canais I/O
- B Uma ficha de alimentação de 24 VCC
- C LEDs que exibem o estado de funcionamento do aparelho Acti 9 Smartlink
- D 2 selectores rotativos para o endereço do aparelho Modbus
- E Um conector de 4 pinos Modbus

Fonte: SCHNEIDER (2014)

A Figura 7 apresenta uma visualização global de um *Smart Panel*, onde o *Smartlink Modbus* apresenta uma posição central, para que se tenha uma compreensão do sistema como um todo.

Figura 7 - Visualização global de um *Smart Panel*

Fonte: SCHNEIDER, 2014

O sistema de *Smart Panels* permite efetuar economias significativas em prédios terciários e industriais, comércios, hotéis, escolas e hospitais. A concepção do *Smart Panels* da *Schneider Electric* é baseada em três etapas de gestão de energia: medir, conectar e economizar. Estes painéis são ferramentas de fácil utilização, que permite reduzir os custos energéticos e satisfazer as exigências dos *Green Buildings*.

4 METODOLOGIA E RESULTADOS

Esta seção mostra as metodologias aplicadas e os resultados obtidos das simulações realizadas através do *software* CST STUDIO SUITE e dos ensaios laboratoriais feitos em parceria com a sociedade *Nexio*.

4.1 CST STUDIO SUITE

O *software* CST STUDIO SUITE foi escolhido como ferramenta de simulação devido às experiências positivas de algumas áreas da *Schneider Electric* com a ferramenta, como por exemplo, no domínio das antenas onde ele já é amplamente utilizado.

O CST consiste em um *software* de simulação eletromagnética 3D desenvolvido com as soluções informáticas mais precisas e eficientes para os designs eletromagnéticos. Ele contém ferramentas para o design e otimização de dispositivos dentro de uma grande banda de frequência, da estática a óptica. Além disso, as análises podem incluir efeitos mecânicos e térmicos, bem como a simulação do circuito.

Durante o período de estágio, foi fornecida uma licença para acessar todos os módulos mostrados na Figura 8.

Figura 8 - Módulos disponíveis no CST STUDIO SUITE



Fonte: CST, 2017

- **CST MICROWAVE STUDIO (CST MWS):** ferramenta de ponta para simulação 3D rápida e precisa para dispositivos de alta frequência e líder no mercado de simulação no domínio temporal. Ela permite a análise rápida e precisa de antenas, filtros, acopladores, estruturas planas e multicamadas, integridade do sinal e efeitos EMC (CST, 2017).

- **CST EM STUDIO (CST EMS):** ferramenta fácil de utilizar para o design e análise de aplicações eletromagnéticas estáticas e em baixa frequência como motores, sensores, atuadores, transformadores e caixas de blindagem (CST, 2017).
- **CST PARTICLE STUDIO (CST PS):** ferramenta desenvolvida para realizar simulações completas em partículas carregadas que se movem livremente. As aplicações incluem canhões de elétrons, tubos catódicos, magnétrons e plasma (CST, 2017).
- **CST CABLE STUDIO (CST CS):** para simulações referentes à integridade do sinal, análises de compatibilidade e interferências eletromagnéticas de cablagem (CST, 2017).
- **CST PCB STUDIO (CST PCBS):** para simulações referentes à integridade do sinal, análises de compatibilidade e interferências eletromagnéticas de PCB (CST, 2017).
- **CST MPHYSICS STUDIO (CST MPS):** para análises térmicas e de estresse mecânico (CST, 2017).
- **CST DESIGN STUDIO (CST DS):** ferramenta versátil que permite realizar facilmente a co-simulação entre um circuito eletromagnético 3D e um circuito elétrico 2D (CST, 2017).

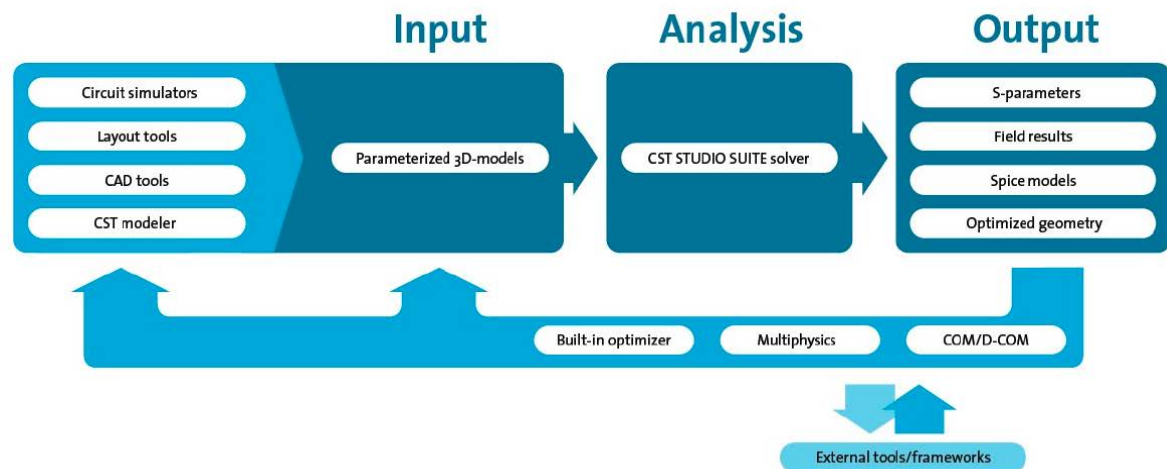
Neste trabalho somente dois módulos foram utilizados: CST MWS e CST DS. Estes módulos são suficientes para cumprir os objetivos propostos.

É importante mencionar que o solucionador CST funciona sobre o princípio de malhar uma peça 3D e aplicar, sobre cada célula da malha, as equações de Maxwell. Além disso, ele é compatível com vários *softwares* reconhecidos no mercado como: *Cadence Allegro*, *CATIA*, *PTC Creo*, *SOLIDWORKS* entre outros.

A escolha do CST não se justifica somente pela gama de possibilidades de simulação que ele fornece, mas também pelo fato de que ele possui um processo de modelagem e simulação muito intuitivo.

A Figura 9 apresenta o esquema de funcionamento do *software* CST. Observam-se três grandes blocos ligados em sequência: a entrada (interna ou externa) que deve ser parametrizada, a análise passa por um dos solucionadores e a saída que fornece resultados 1D, 2D e 3D. Além disso, o sistema possui um controle em malha fechada que tem como objetivo aperfeiçoar os resultados obtidos.

Figura 9 - Vista global do funcionamento do *software* CST STUDIO SUITE



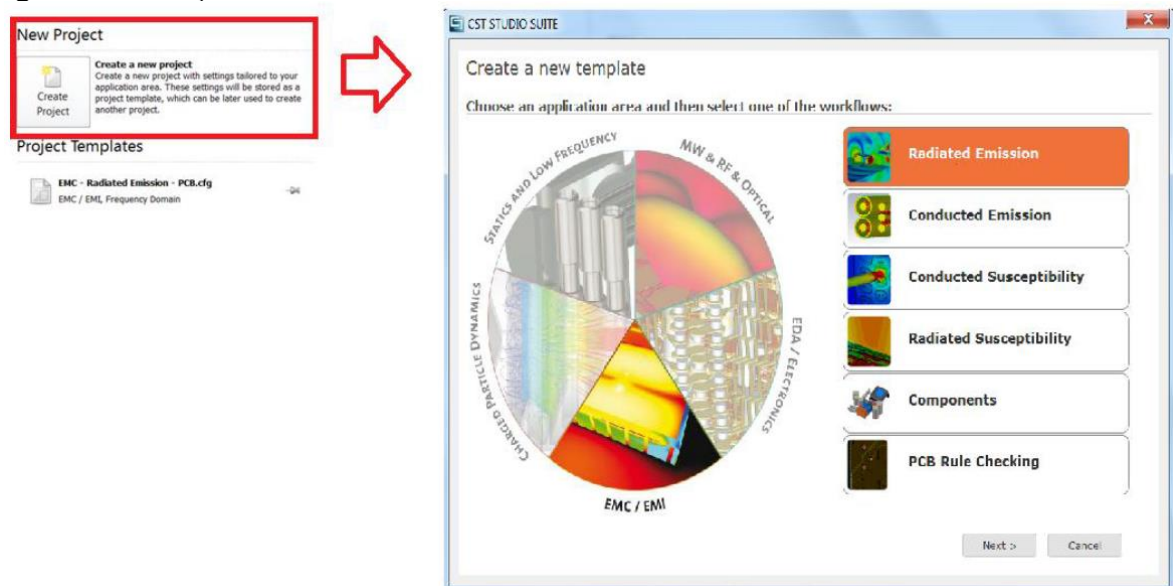
Fonte: Autor, 2017

4.2 MODELO DE REFERÊNCIA

Antes de partir para as simulações, um modelo de referência foi criado com o objetivo de servir como base para todas as simulações que são realizadas neste estudo de caso.

Primeiramente, é preciso escolher o domínio da aplicação. Como o problema de emissão irradiada pertence ao domínio da compatibilidade eletromagnética, deve-se escolher o domínio <EMC/EMI> com a opção <Radiated Emission>, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Criação de um modelo de referência



Fonte: Autor, 2017

Pode-se deixar a aplicação mais específica escolhendo a opção <High Speed Signals> e <PCB>, como mostrado na Figura 11. A opção <High Speed Signals> foi escolhida devido à transmissão de dados e ao *clock* do circuito *Smartlink Modbus*.

Figura 11 - Criação de um modelo de referência

Create a new template

EMC / EMI | Radiated Emission

Please select a workflow:

High Speed Signals Power Electronics Cables

↓

Create a new template

EMC / EMI | Radiated Emission | High Speed Signals

Please select a workflow:

PCB Connector Shielding Effectiveness of Enclosures

Fonte: Autor, 2017

Em seguida, é necessário definir o domínio e as unidades que são utilizadas. Neste caso, a melhor opção é o domínio da frequência que é destinado a aplicações menores (um PCB, por exemplo) e fortemente ressonantes. Por conveniência, escolheu-se MHz para a unidade de frequência que é a ordem de grandeza da energia irradiada pelo *Smartlink Modbus*. Todos os parâmetros foram definidos de acordo com a Figura 12.

Figura 12 - Criação de um modelo de referência

Create a new template

EMC / EMI | Radiated Emission | High Speed Signals | PCB | Solvers | Units

The recommended solvers for the selected workflow are:

Time Domain Frequency Domain

→

Create a new template

EMC / EMI | Radiated Emission | High Speed Signals | PCB | Solvers | Units

Please select the units:

Dimensions: mm

Frequency: MHz

Time: ns

Temperature: Kelvin

Voltage: V

Current: A

Resistance: Ohm

Conductance: S

Inductance: nH

Capacitance: pF

Fonte: Autor, 2017

Além disso, precisa-se definir a banda de frequência e os monitores de campo, como ilustrado na Figura 13. Uma banda de frequência de 0 a 1000 MHz fornece uma boa margem de segurança e está de acordo com os testes realizados seguindo a norma CISPR. No entanto, os monitores, que tem uma influência direta no tempo de simulação serão colocados somente após a obtenção dos primeiros resultados para otimizar o processo.

Figura 13 - Criação de um modelo de referência

The screenshot shows a web-based interface for creating a new template. At the top, there is a navigation bar with links: EMC / EMI | Radiated Emission | High Speed Signals | PCB | Solvers | Units | **Settings** | Summary. Below this is a section titled 'Please select the Settings'. The 'Frequency Min.:' is set to 0 MHz, and 'Frequency Max.:' is set to 1000 MHz. Under 'Monitors:', there are five checkboxes: E-field, H-field, Farfield, Power flow, and Power loss. The 'Define at' field is empty, with a note below it: 'Use semicolon as a separator to specify multiple values, e.g. 20;30;30.1;30.2;30.3'.

Fonte: Autor, 2017

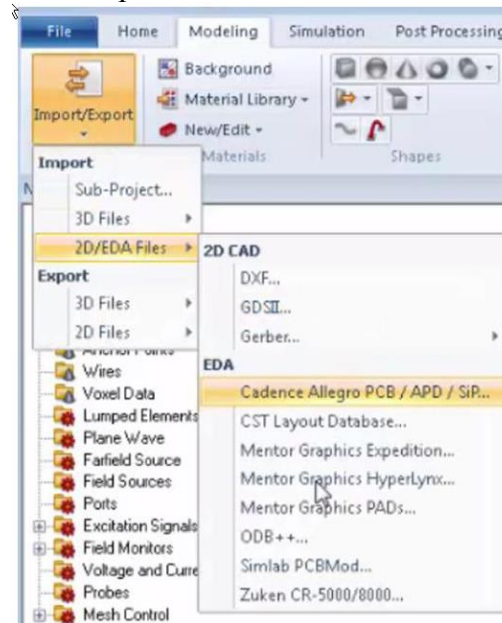
E por fim, deve-se fazer uma revisão e escolher um nome para o modelo de referência que ficará disponível na página inicial do *software* para utilização.

4.3 IMPORTAÇÃO DO PCB

Após a criação do modelo de referência, é necessário realizar a importação do PCB do *Smartlink Modbus*. Alguns parâmetros da importação podem variar dependendo do tipo de simulação, no entanto, o procedimento a seguir permanece o mesmo.

Primeiramente, é preciso escolher o tipo de arquivo que será importado. O *software* CST é compatível com alguns *softwares* de DAC (Desenho Assistido por Computador) renomados no mercado. A equipe de concepção da *Schneider* utiliza o *Cadence Allegro*, que está incluso neste grupo. Portanto, pode-se importar o arquivo de extensão **brd** gerado no *Cadence* para o CST, conforme ilustrado na Figura 14.

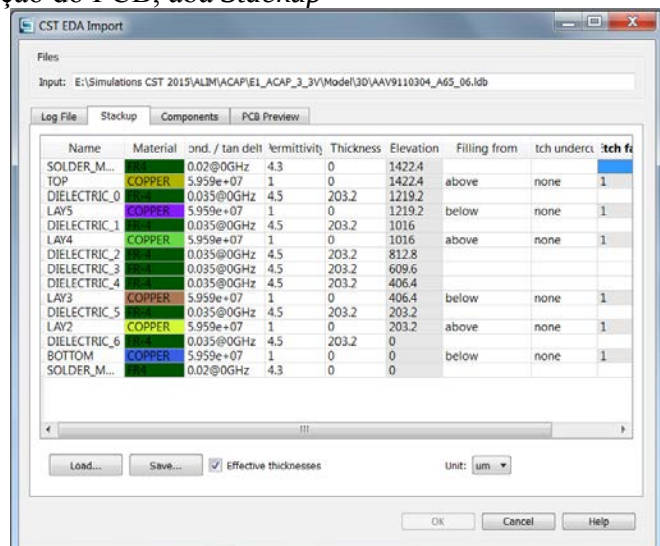
Figura 14 - Importação de um PCB para o CST STUDIO SUITE



Fonte: Autor, 2017

Em seguida, existem três abas que permitem parametrizar a importação: *Stackup*, *Components* e *PCB Preview*. A aba *Stackup*, ilustrada na Figura 15, permite modificar alguns parâmetros importantes, entre eles, os principais são: a espessura de cada camada e a constante dielétrica do material.

Figura 15 - Parametrização do PCB, aba *Stackup*



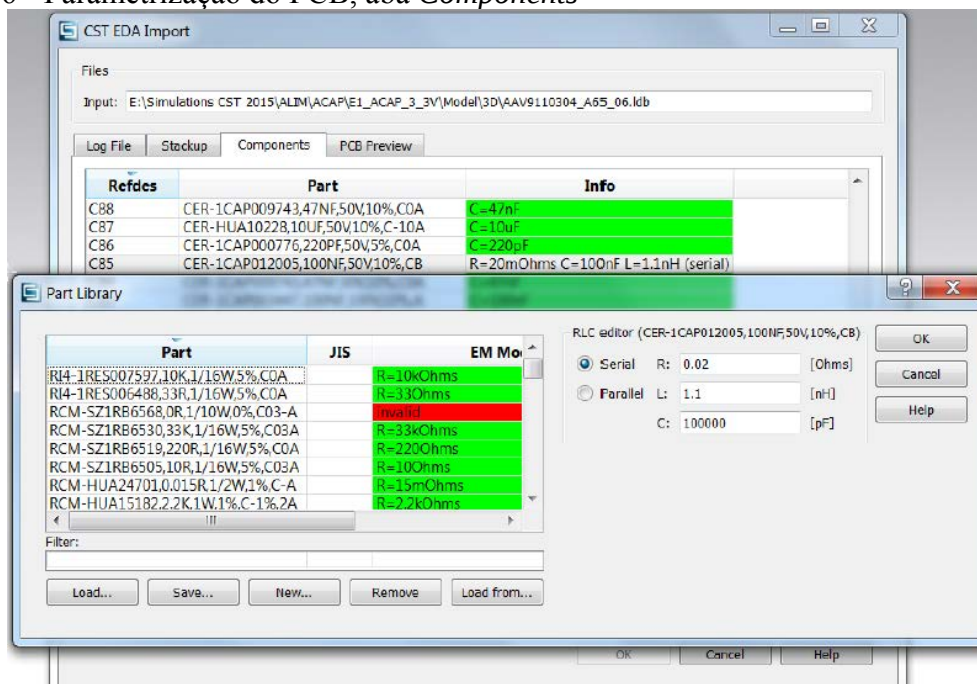
Fonte: Autor, 2017

Graças ao efeito pelicular (ou *skin effect* em inglês) que faz com que, em frequência elevada, a corrente tende a circular somente na superfície dos condutores, a espessura da

camada de cobre pode ser definida como sendo zero, reduzindo assim o número de malhas da simulação.

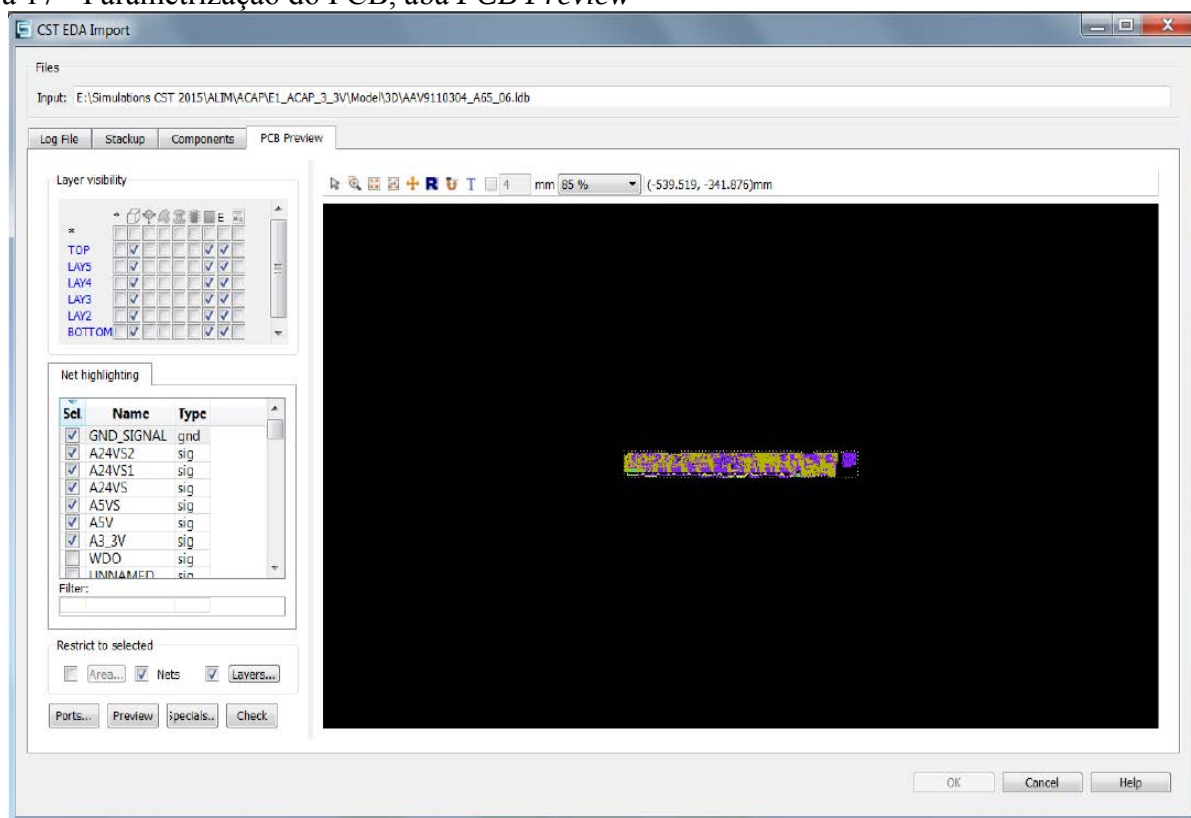
Na aba *Components*, mostrada na Figura 16, pode-se verificar se todos os componentes do PCB foram corretamente importados e os caracterizar. Alguns componentes não são reconhecidos na importação, nesses casos, deve-se fazer a modelagem se necessário.

Figura 16 - Parametrização do PCB, aba *Components*



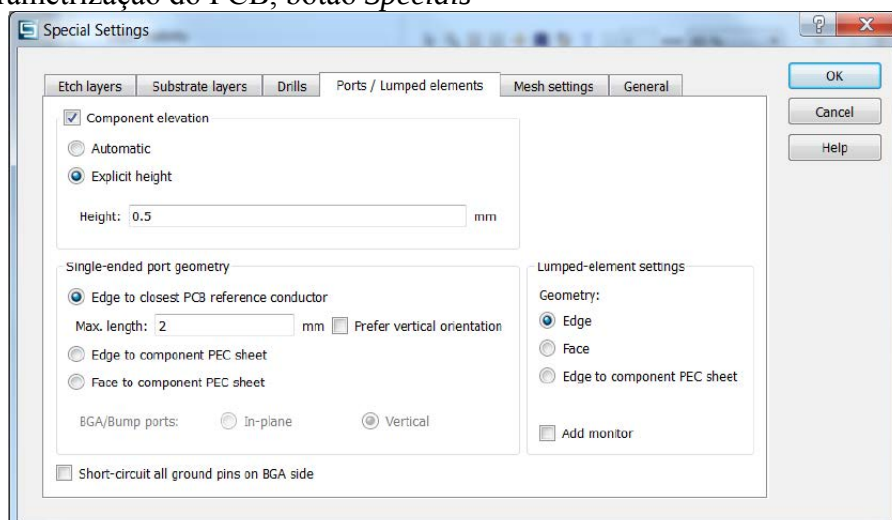
Fonte: Autor, 2017

Na aba *PCB Preview*, vista na Figura 17, seleciona-se quais são as camadas e pistas ou a parte do PCB que se deseja importar e ver como o modelo final ficará clicando sobre o botão *Preview*. Em seguida, pode-se verificar a conexão dos componentes através do botão *Check*. Além disso, no botão *Ports* é possível importar as portas discretas ou as portas *waveguides* para a simulação.

Figura 17 - Parametrização do PCB, aba *PCB Preview*

Fonte: Autor, 2017

O botão *Specials* permite entrar em uma parametrização mais específica. Um bom exemplo seria a aba *Mesh settings*, onde se caracteriza as células da malha. Uma verificação que é sempre necessária de se fazer na aba *Port/Lumped elements*, ilustrada na Figura 18, é a altura dos componentes (*Height*), que não pode ser zero para evitar um curto-circuito.

Figura 18 - Parametrização do PCB, botão *Specials*

Fonte: Autor, 2017

4.4 PRIMEIRA ABORDAGEM: ALIMENTAÇÃO COMUTADA

Esta primeira abordagem tem como objetivo verificar se a energia que vem da alimentação comutada pode ser a causa do problema de emissão irradiada encontrado no *Smartlink Modbus*.

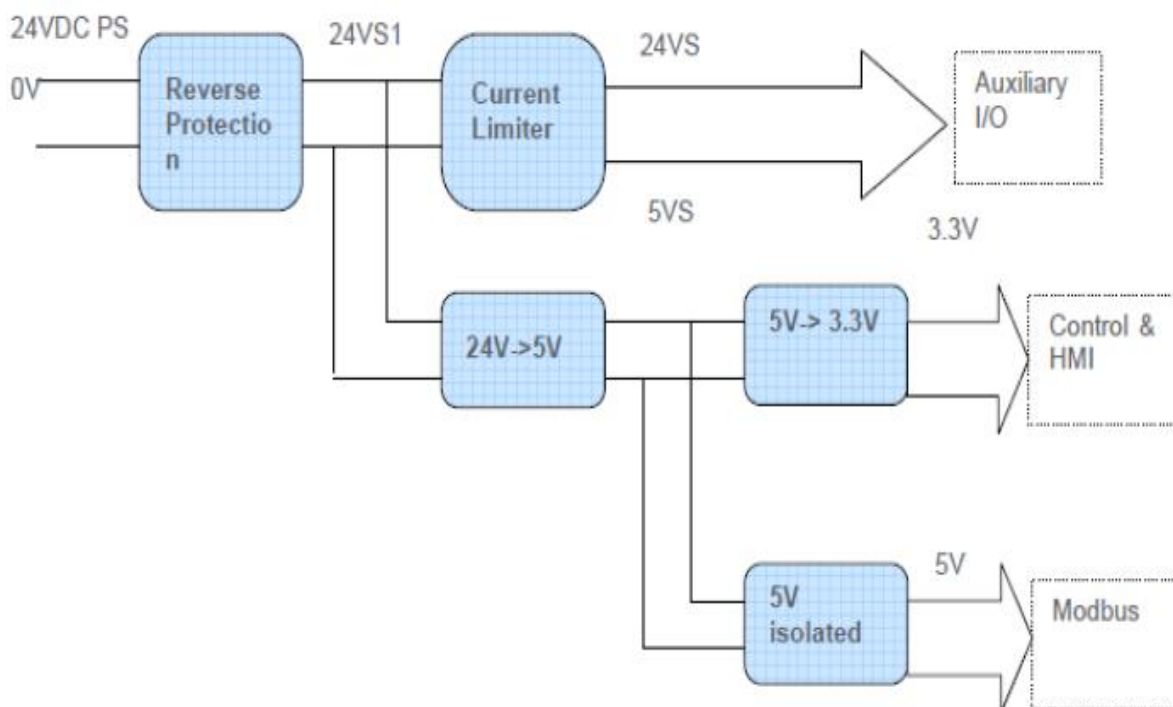
4.4.1 Contexto

Por regra, sabe-se que todo plano de alimentação é suscetível a irradiar energia, o que faz desta abordagem um excelente ponto de partida para começar a trabalhar com o *Smartlink Modbus*.

No domínio da EMC existem três pontos que não podem ser negligenciados: os planos de alimentação, os planos de massa ou terra e as capacitâncias de desacoplamento. Sendo assim, são utilizados modelos simplificados sem a necessidade de fazer simulações muito complexas.

O *Smartlink Modbus* é composto de três planos de alimentação: 3,3 V, 5 V e 24 V. Na Figura 19, um esquema simplificado da arquitetura de alimentação da placa é apresentado.

Figura 19 - Arquitetura de alimentação do *Smartlink Modbus*



A Figura 20 ilustra como esses planos de alimentação são distribuídos no PCB.

Figura 20 - Planos de alimentação do *Smartlink Modbus*



Fonte: Autor, 2017

Além disso, o *Smartlink Modbus* possui três planos de massa: GND_SIGNAL, GROUND e EARTH, que são apresentados na Figura 21.

Figura 21 - Planos de massa do *Smartlink Modbus*

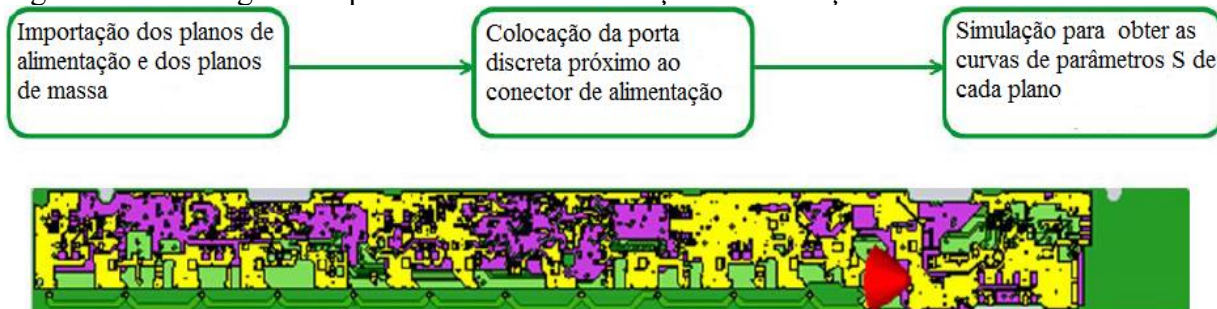


Fonte: Autor, 2017

4.4.2 Visão geral

Nesta primeira abordagem, a simulação se desenvolveu em três etapas. Primeiramente, cada plano de alimentação foi importado separadamente com seu respectivo plano de massa. Em seguida, uma porta discreta foi colocada entre os planos de alimentação e de massa. Por fim, os modelos simplificados foram simulados para obter as curvas de parâmetros S de cada plano para verificar se a energia irradiada por esses planos podem ser a causa do problema encontrado no *Smartlink Modbus*. A Figura 22 mostra uma visão geral do procedimento de simulação utilizado nesta primeira abordagem.

Figura 22 - Visão geral do procedimento de simulação: alimentação comutada



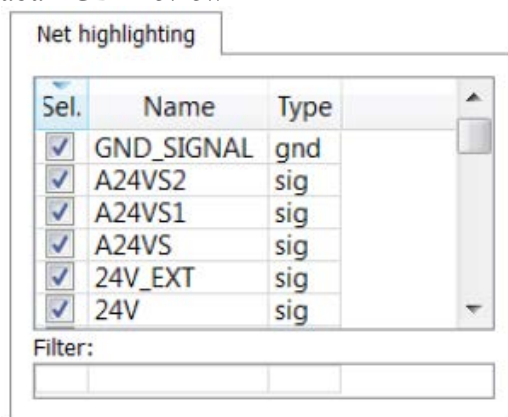
Fonte: Autor, 2017

4.4.3 Procedimento

A fim de verificar se a energia irradiada por estes planos é realmente significativa, somente os planos de alimentação e os planos de massa foram utilizados. Portanto, simulou-se um plano de cada vez para obter os resultados e realizar a comparação entre eles.

Primeiramente, o plano de 24 V foi simulado. Na aba *PCB Preview*, foi preciso importar todas as pistas referentes ao plano de 24 V e o GND_SIGNAL, como visto na Figura 23.

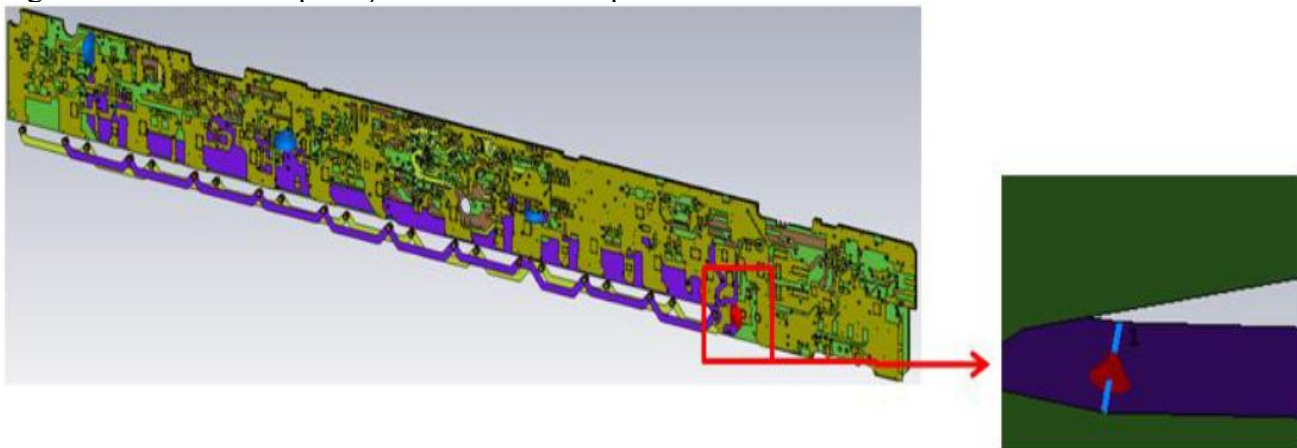
Figura 23 - Importação na aba *PCB Preview*



Fonte: Autor, 2017

Em seguida, a porta discreta foi colocada para simular e obter a curva de parâmetros S. A porta foi colocada entre os planos 24 V e GND_SIGNAL, ao nível do conector de alimentação como ilustrado pela Figura 24.

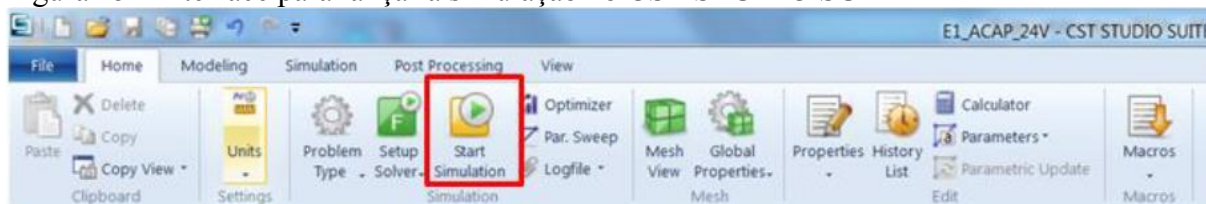
Figura 24 - Vista da importação do PCB com a porta discreta



Fonte: Autor, 2017

A simulação foi realizada com os parâmetros padrões, clicando no botão *Start Simulation*.

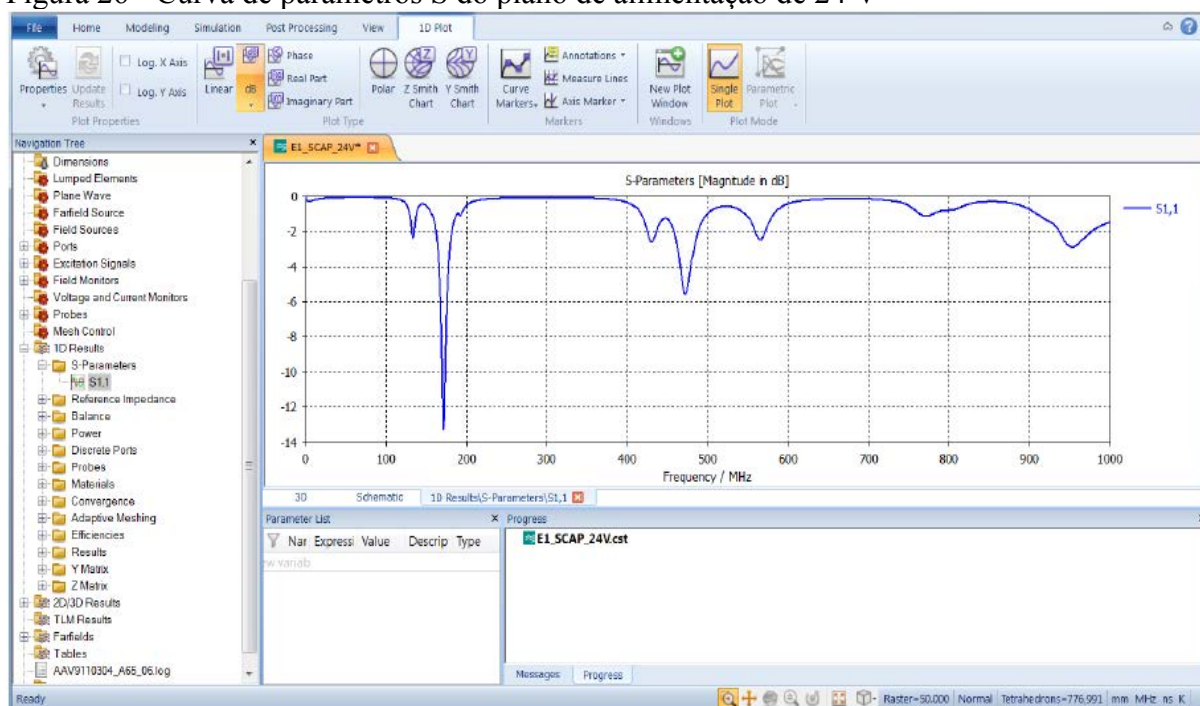
Figura 25 - Interface para lançar a simulação no CST STUDIO SUITE



Fonte: Autor, 2017

Logo que a simulação foi finalizada pôde-se observar na curva de parâmetros S, ilustrada na Figura 26, alguns pontos de perda de energia. Estas perdas são devidas ou ao efeito Joule ou a energia irradiada; como nenhuma resistência foi importada pode-se concluir que esta perda é devido à energia irradiada.

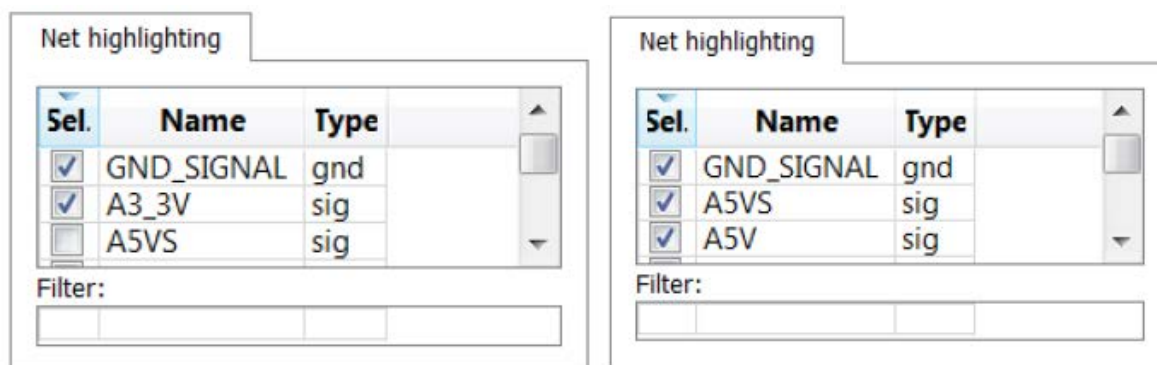
Figura 26 - Curva de parâmetros S do plano de alimentação de 24 V



Fonte: Autor, 2017

O mesmo procedimento foi seguido para os planos de alimentação 3,3 V e 5 V a fim de realizar uma comparação entre eles. A Figura 27 mostra as pistas que foram importadas para cada plano.

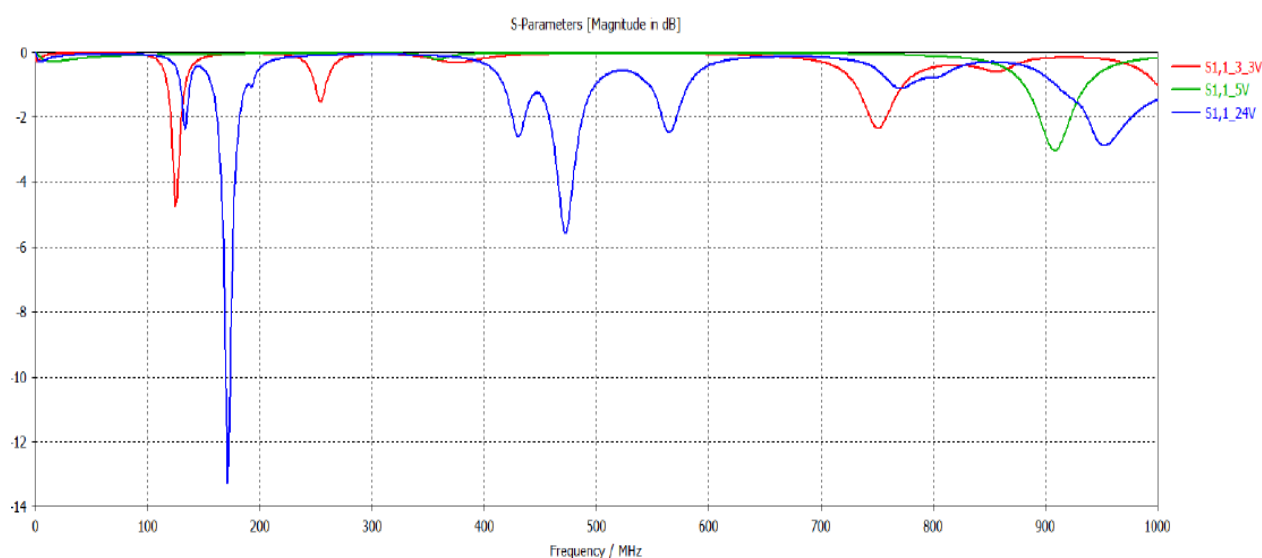
Figura 27 - Importação na aba *PCB Preview* para os planos de alimentação de 3,3 V e 5 V



Fonte: Autor, 2017

A Figura 28 mostra a comparação entre as curvas de parâmetros S entre os três planos de alimentação.

Figura 28 - Comparação entre as curvas de parâmetros S dos planos de alimentação



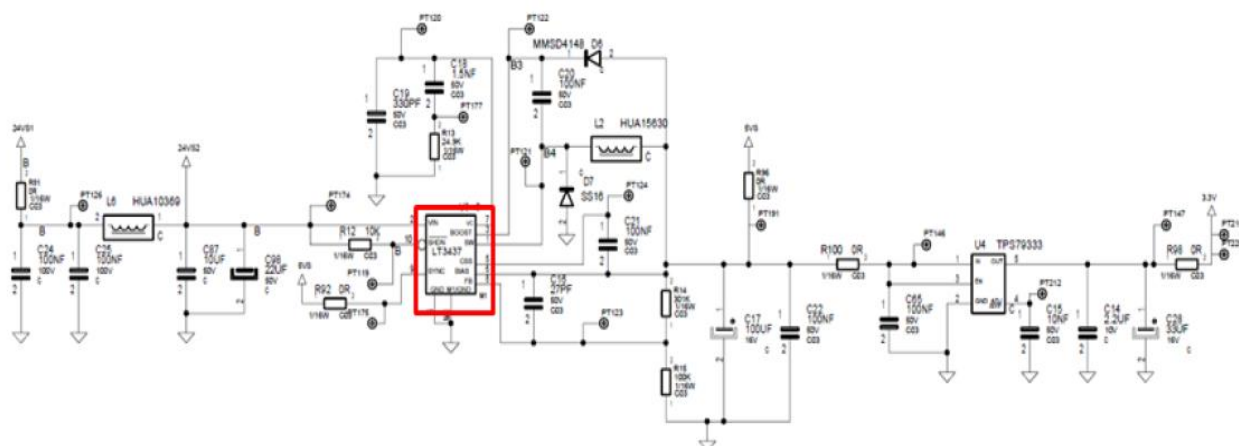
Fonte: Autor, 2017

Observa-se que o plano de 24 V irradia mais energia que os outros e que o ponto mais importante é em torno de 170 MHz, sendo muito longe da frequência de 460 MHz de onde vem o problema do *Smartlink Modbus*.

A fim de melhor compreender o que ocorre nesta primeira abordagem, é necessário analisar o esquema elétrico da alimentação comutada com o objetivo de encontrar a frequência de comutação.

O componente que fornece a frequência de comutação é o conversor Buck LT3437, visto na Figura 29. Ao verificar o datasheet do componente (**Anexo B**), encontrou-se uma frequência de comutação de 200 kHz.

Figura 29 - Esquema elétrico da alimentação comutada



Fonte: Autor, 2017

4.4.4 Análise da primeira abordagem

Pôde-se observar que apesar dos planos de alimentação irradiarem energia, ela não é significativa na frequência de 460 MHz. Isto se deve ao fato de que a frequência de comutação é de 200 kHz, não possuindo energia suficiente para provocar fenômenos a uma frequência 2300 vezes maior.

4.5 SEGUNDA ABORDAGEM: OSCILADOR DO MICROPROCESSADOR

Como não se obteve resultados satisfatórios com a alimentação comutada, uma segunda abordagem foi analisada: o oscilador de quartzo de 4 MHz do microprocessador.

4.5.1 Contexto

O oscilador é responsável por gerar a frequência de operação do microprocessador (μP) e, conseqüentemente, a energia gerada pelos harmônicos deve ser levada em conta.

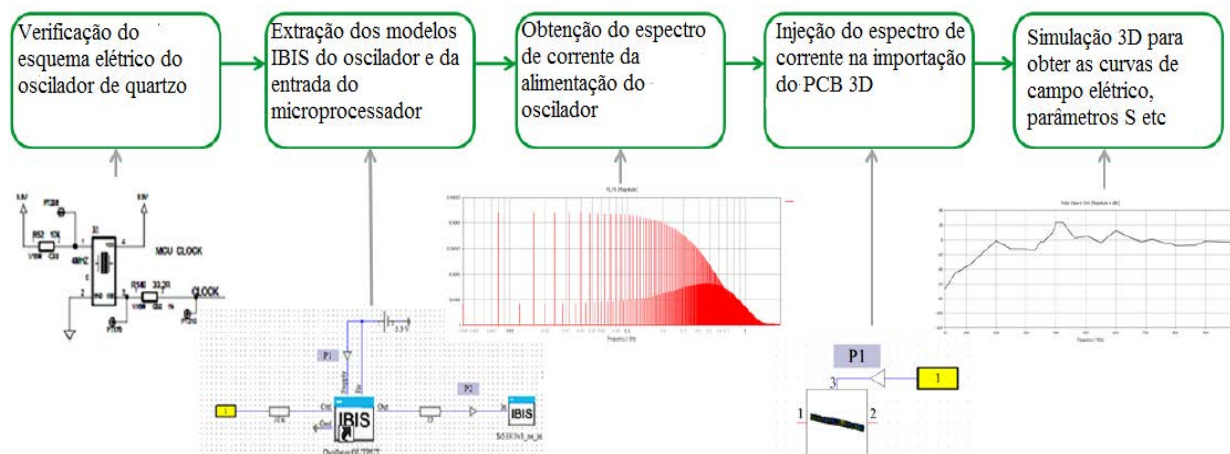
Nesta abordagem, foi utilizado o recurso de co-simulação disponível no CST STUDIO SUITE. A co-simulação permite utilizar um modelo em 2D e, depois combinar os resultados obtidos com o modelo 3D.

O objetivo foi de obter o espectro de corrente da alimentação do oscilador, em um modelo 2D, e injetá-lo no PCB 3D para se obter o campo elétrico irradiado. Diferentemente da primeira abordagem, onde utilizou-se a curva de parâmetro S para realizar a análise, nesta segunda, optou-se por analisar diretamente as curvas de campo elétrico, explorando assim outros recursos da ferramenta CST.

4.5.2 Visão Geral

Esta segunda abordagem se desenvolveu em cinco etapas. Em primeiro lugar, verificou-se no esquema elétrico tudo que estava ligado ao oscilador de quartzo do microprocessador. Em seguida, foram extraídos os modelos IBIS do oscilador e da entrada do microprocessador para modelar o circuito 2D. Depois, o circuito modelado foi simulado para obter o espectro de corrente da alimentação do oscilador. E por fim, injetou-se este espectro no PCB 3D e simulou-se para verificar o campo elétrico irradiado a 3 m da placa *Smartlink Modbus*. O esquema da Figura 30 mostra o procedimento que foi utilizado.

Figura 30 - Visão geral do procedimento de simulação: oscilador do microprocessador



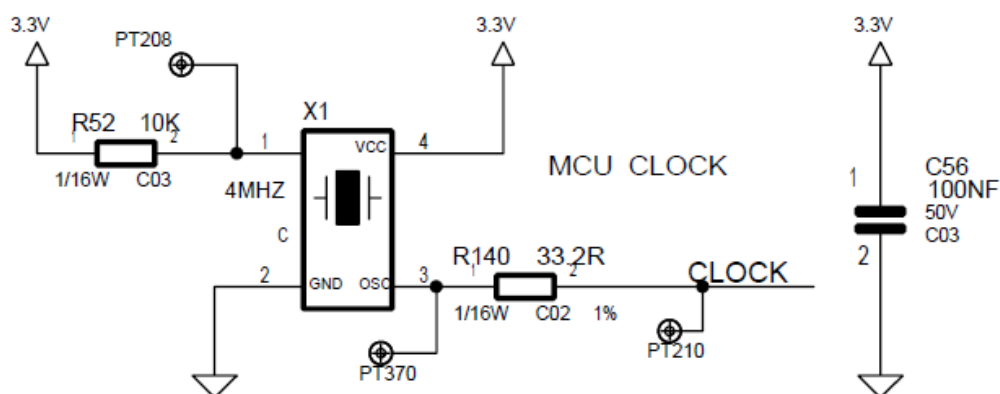
Fonte: Autor, 2017

O interesse pelo campo elétrico a 3 m da placa é devido ao ensaio prático realizado no *Smartlink Modbus*, de onde se obteve a curva da Figura 4. O campo elétrico neste tipo de ensaio é obtido a 3 m do equipamento.

4.5.3 Procedimento

Para realizar um modelo 2D adequado, foi preciso verificar tudo que estava conectado ao oscilador. A Figura 31 mostra o esquema do oscilador do microprocessador.

Figura 31 - Esquema do oscilador do microprocessador

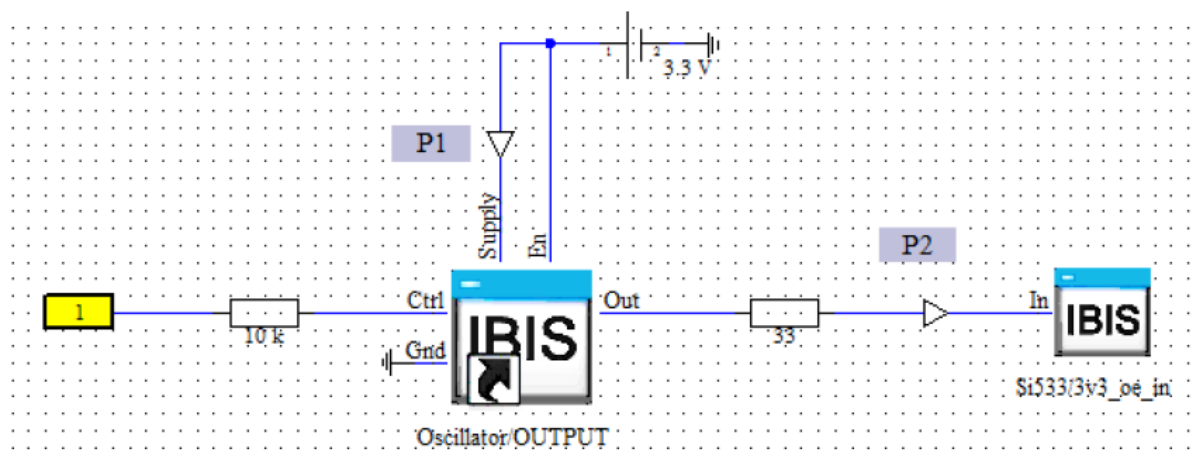


Fonte: Autor, 2017

Em seguida, extraiu-se os modelos IBIS do oscilador e da entrada do microprocessador o que facilita muito a concepção do modelo 2D. Um modelo IBIS é uma caixa preta que simula o funcionamento do componente, normalmente ela é fornecida pelo fabricante. O CST STUDIO SUITE fornece uma lista com diversos fabricantes que fornecem esse modelo.

Após a obtenção dos modelos IBIS, foi realizado o modelo 2D ilustrado na Figura 32.

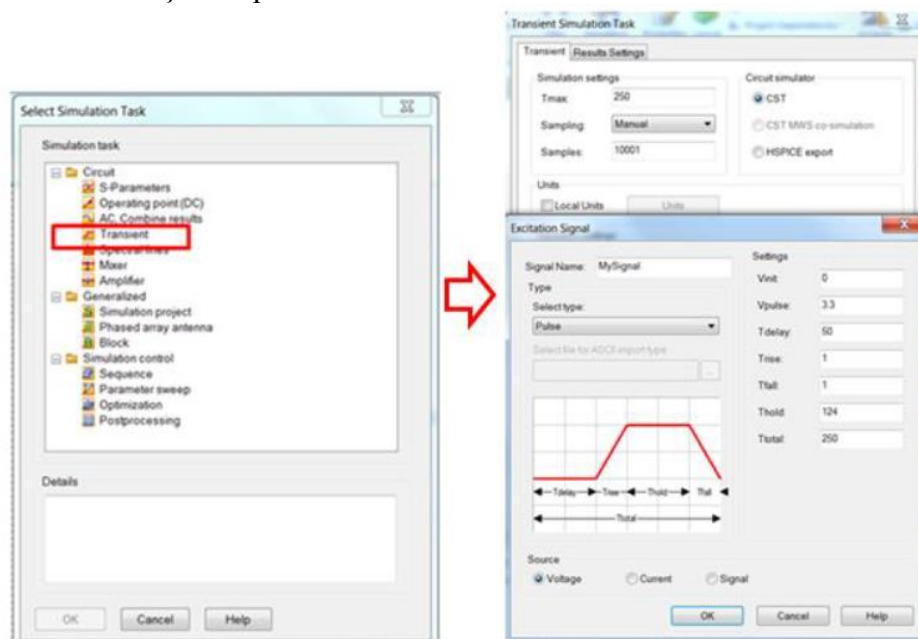
Figura 32 - Modelo 2D do circuito do oscilador utilizando modelos IBIS



Fonte: Autor, 2017

Para simular o funcionamento do oscilador, foi necessário criar uma *Simulation Transient Task* como mostrado pela Figura 33, onde se pôde modelar o sinal de entrada para porta 1. Entre diversas opções de sinais disponíveis, escolheu-se um impulso com amplitude de 3,3 V e um período de 250 s, que foi suficiente para representar todos os estados de funcionamento do componente.

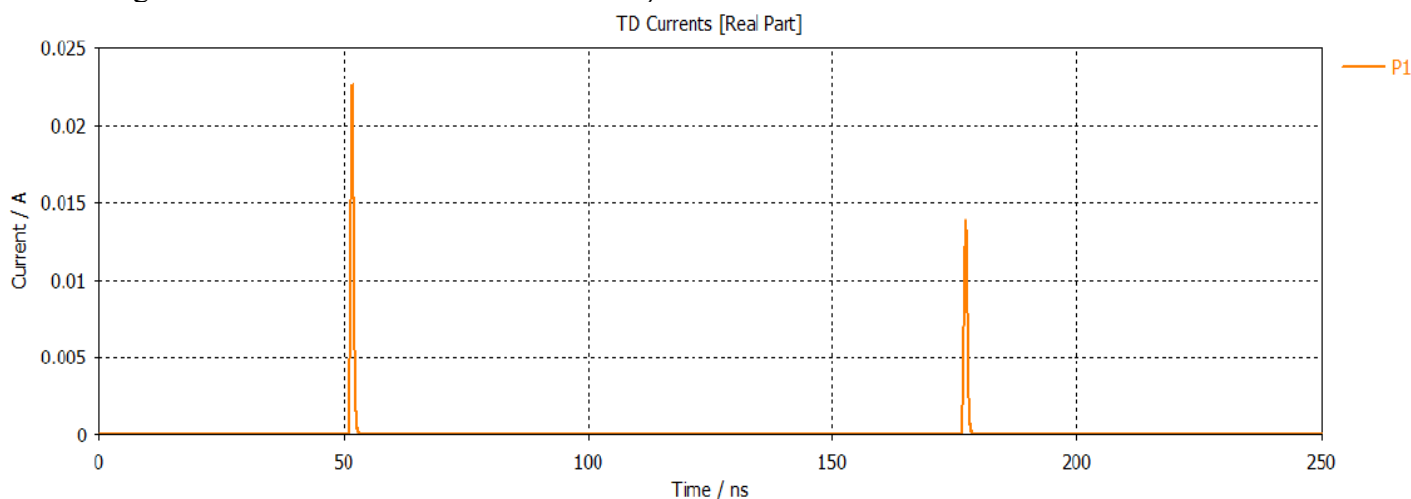
Figura 33 - Sinal de excitação da porta 1



Fonte: Autor, 2017

Através dessa tarefa, foi obtida a curva de corrente na alimentação do oscilador através da probe P1. A Figura 34 mostra a curva obtida.

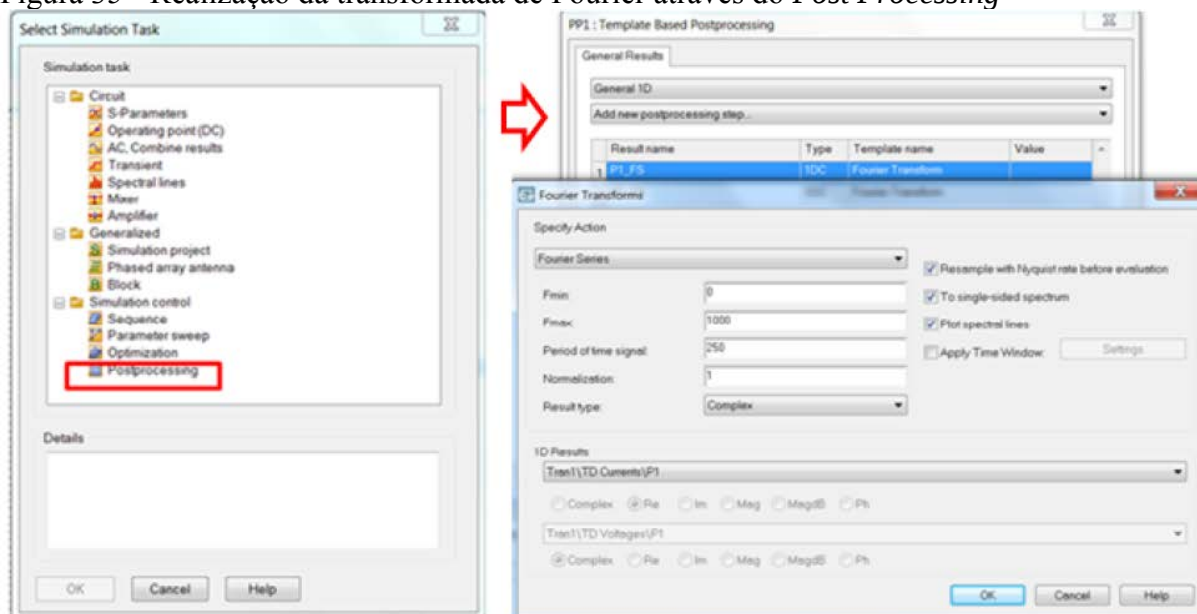
Figura 34 - Curva de corrente na alimentação do oscilador



Fonte: Autor, 2017

Para obter o espectro de corrente da curva acima foi preciso realizar a transformada de Fourier. Isso pôde ser feito com o uso do *Post Processing* que permite trabalhar com resultados que já foram obtidos. A Figura 35 mostra esse procedimento.

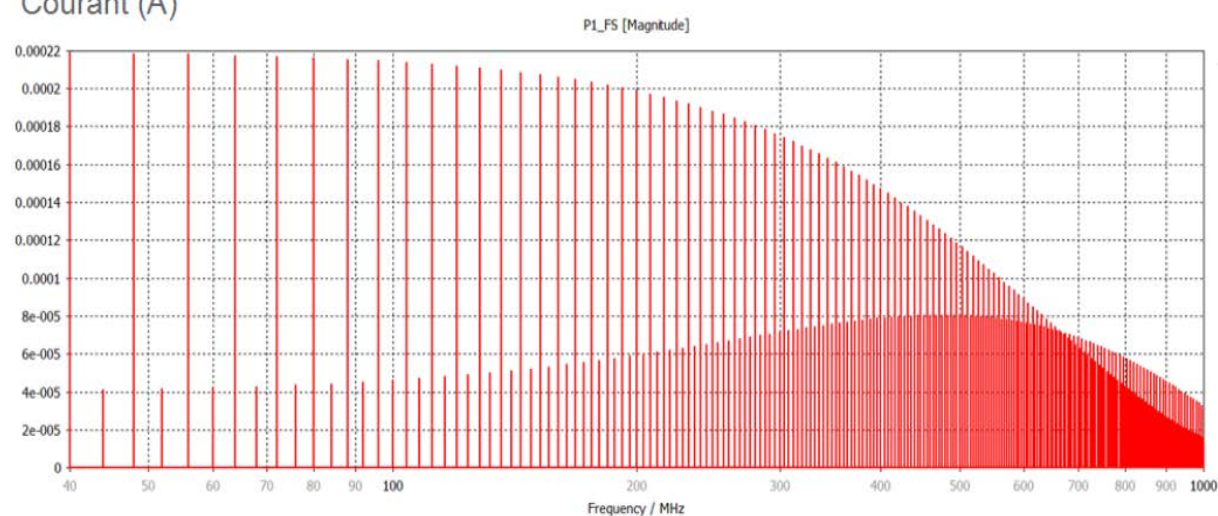
Figura 35 - Realização da transformada de Fourier através do *Post Processing*



Fonte: Autor, 2017

A Figura 36 apresenta o espectro de corrente obtido na alimentação do oscilador.

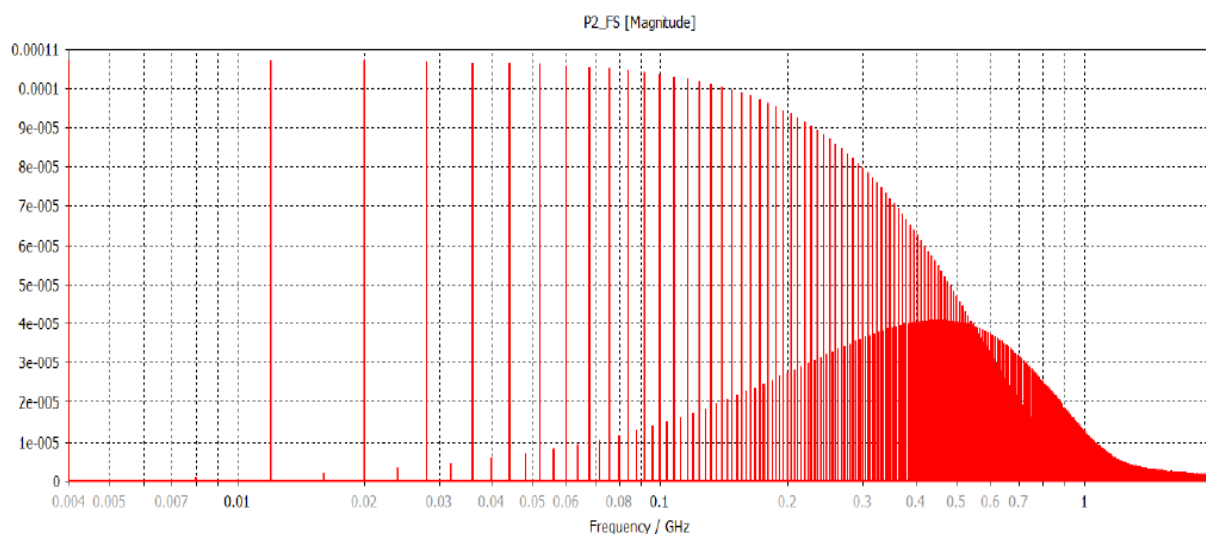
Figura 36 - Espectro de corrente na alimentação do oscilador
Courant (A)



Fonte: Autor, 2017

O mesmo procedimento foi realizado na probe 2 para obter o espectro de corrente na saída do oscilador, como mostrado na Figura 37.

Figura 37 - Espectro de corrente na saída do oscilador



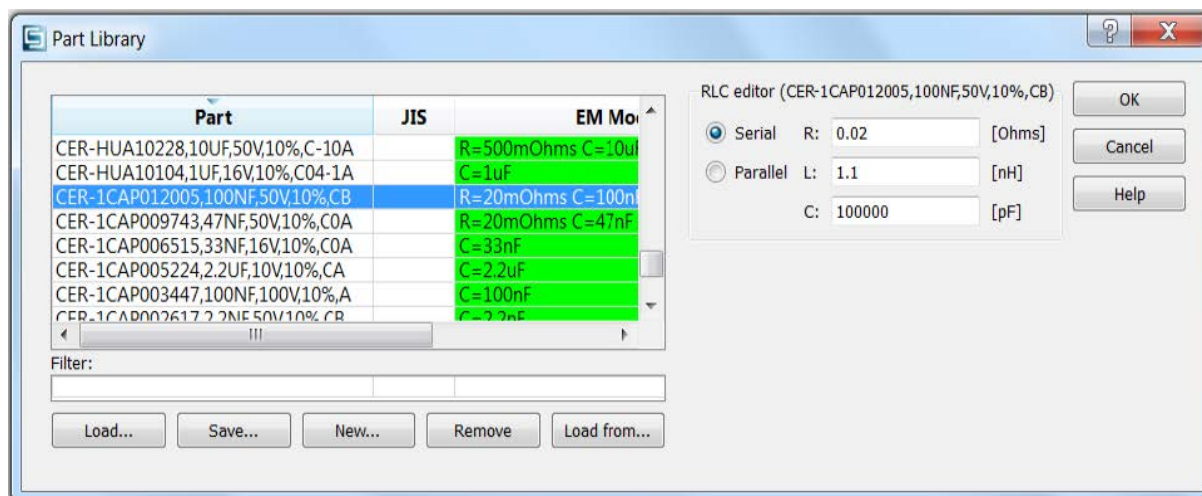
Fonte: Autor, 2017

Observa-se que devido à corrente assimétrica na alimentação (Figura 34), obteve-se um espectro com predominância de harmônicos pares (Figura 36). No entanto, os harmônicos pares diminuem em altas frequências, enquanto os harmônicos ímpares aumentam. No espectro de saída (Figura 37) tem-se uma predominância de harmônicos ímpares. Sendo assim, pode-se concluir que o microprocessador é uma grande fonte de harmônicos de corrente.

Antes de injetar o espectro no PCB 3D, foi necessário realizar a importação. A fim de realizar uma simulação mais precisa, importou-se todos os planos de alimentação com suas respectivas capacitâncias de desacoplamento.

Em seguida, caracterizou-se as capacitâncias de desacoplamento com valores típicos de resistência e indutância parasita, como apresentado na Figura 38. Essa caracterização é importante para evitar o curto em baixas frequências e deixar a simulação mais próxima da realidade.

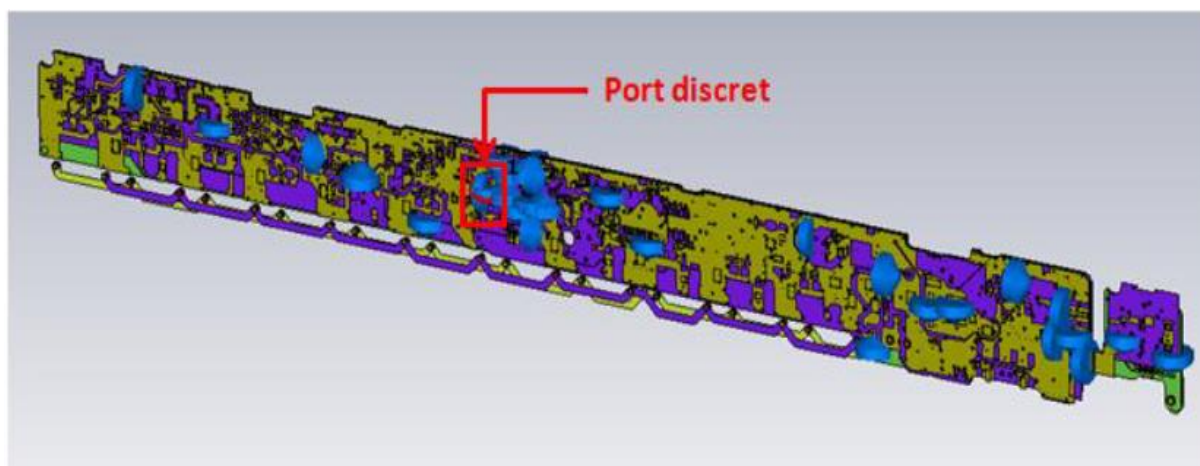
Figura 38 - Caracterização das capacitâncias de desacoplamento



Fonte: Autor, 2017

Colocou-se também uma porta discreta entre os planos 3,3 V e GND_SIGNAL para injetar o espectro de corrente da alimentação do oscilador. A porta foi colocada exatamente onde se encontra o oscilador de quartzo, conforme ilustrado na Figura 39.

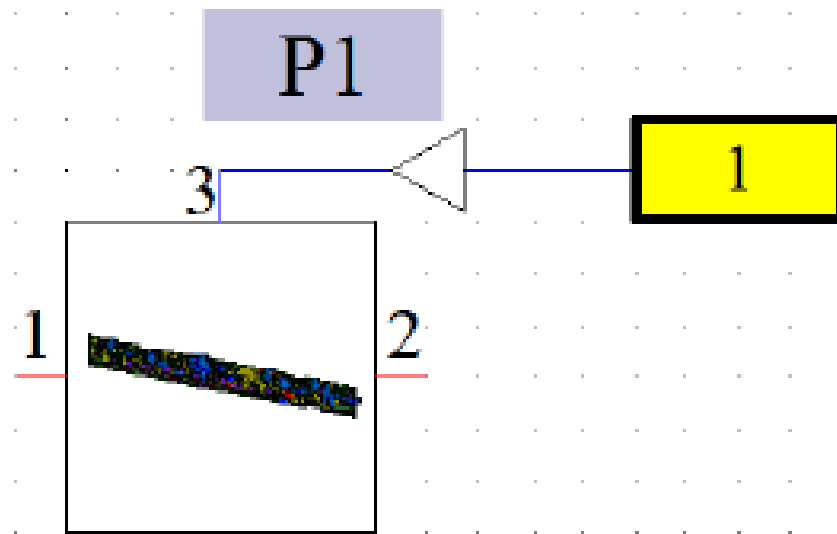
Figura 39 - Porta discreta entre os planos 3.3 V e GND_SIGNAL



Fonte: Autor, 2017

Após a fase de importação, o espectro de corrente foi injetado no PCB utilizando a função *AC. Combine Results*, que permite fazer uma combinação entre os resultados obtidos em 2D com a importação 3D. A Figura 40 mostra o esquema utilizado.

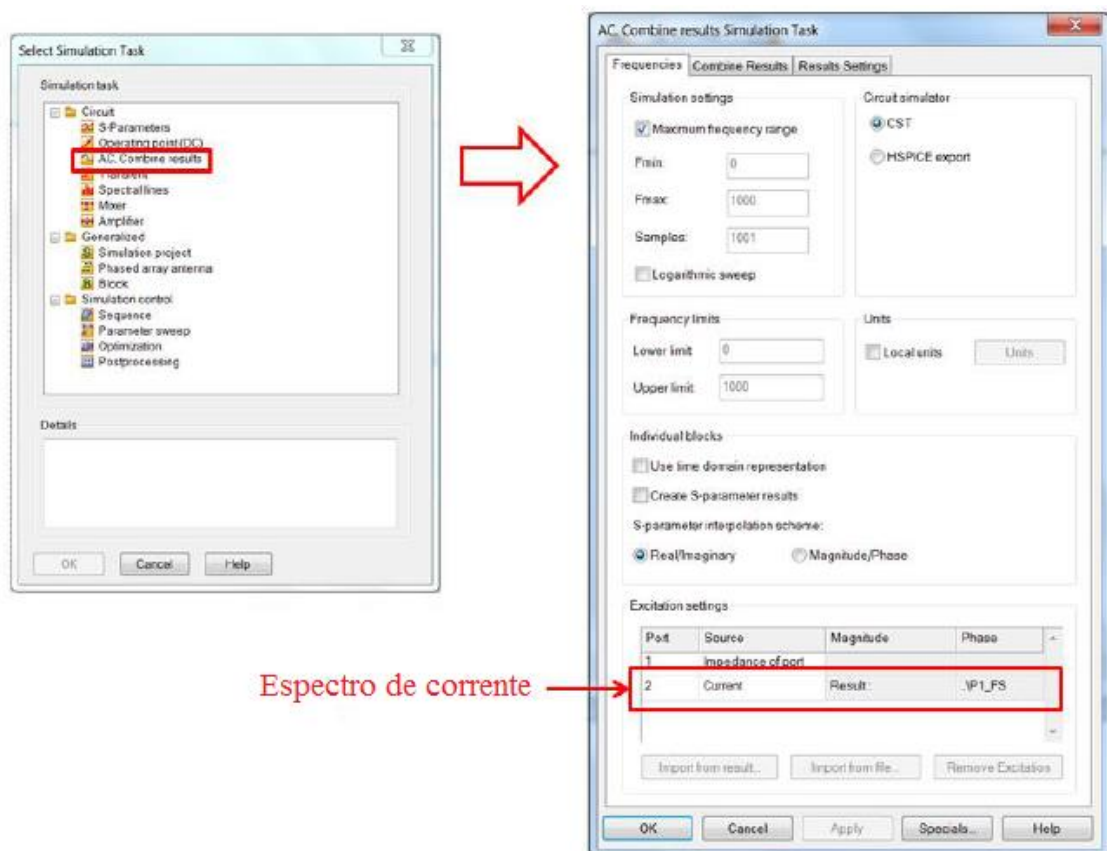
Figura 40 - Representação do PCB no esquema 2D



Fonte: Autor, 2017

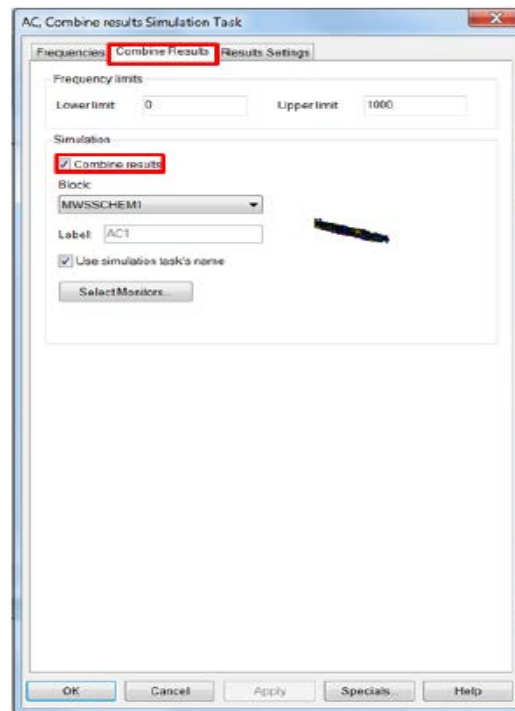
As Figuras 41 e 42 mostram os parâmetros utilizados na função *AC. Combine Results*.

Figura 41- Injeção do espectro de corrente no PCB 3D



Fonte: Autor, 2017

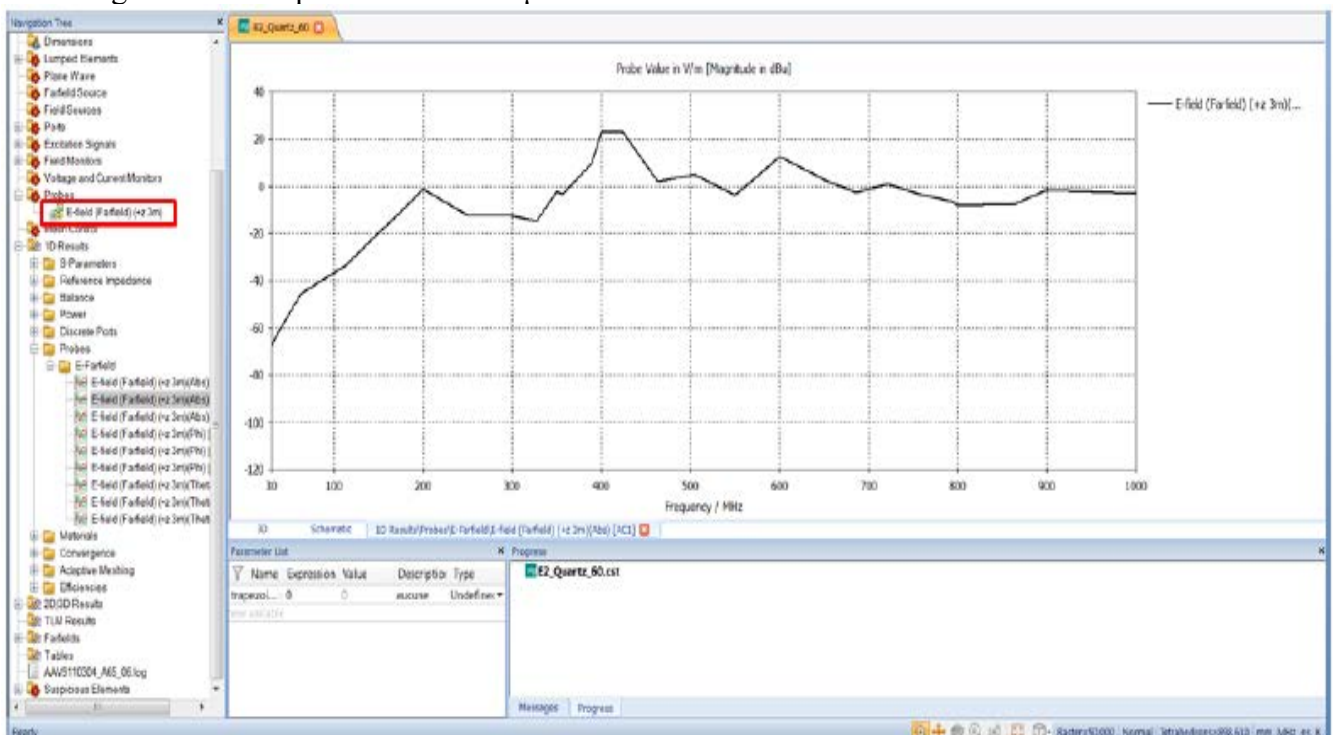
Figura 42 - Combinação de resultados com o PCB 3D



Fonte: Autor, 2017

Com isso obteve-se a curva de campo de campo elétrico a 3 m da placa, conforme ilustrado na Figura 43.

Figura 43 - Campo elétrico em dB μ V/m a 3 m do PCB



Fonte: Autor, 2017

4.5.4 Análise da segunda abordagem

Observou-se que o campo elétrico irradiado é mais forte na frequência de 400 MHz. No entanto, ainda está um pouco distante da frequência de 460 MHz e é fraco (próximo de 20 dB μ V), quando comparado ao que foi encontrado nos ensaios realizados (52,48 dB μ V).

Sendo assim, concluiu-se que o oscilador do microprocessador não é a principal causa dos problemas de emissão irradiada encontrado no *Smartlink Modbus*.

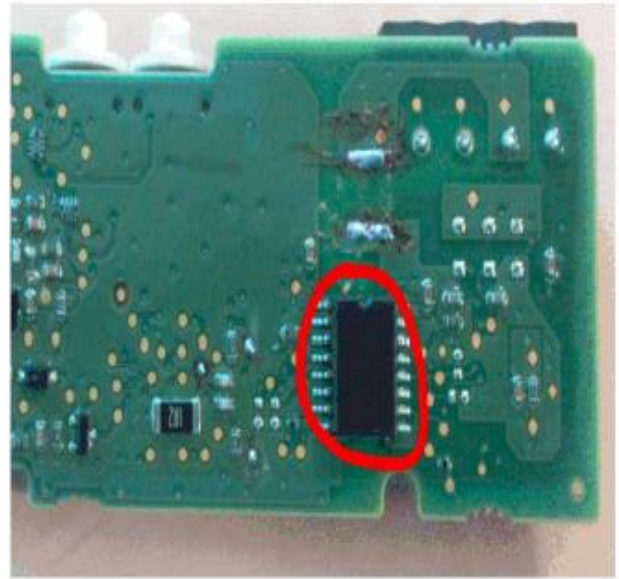
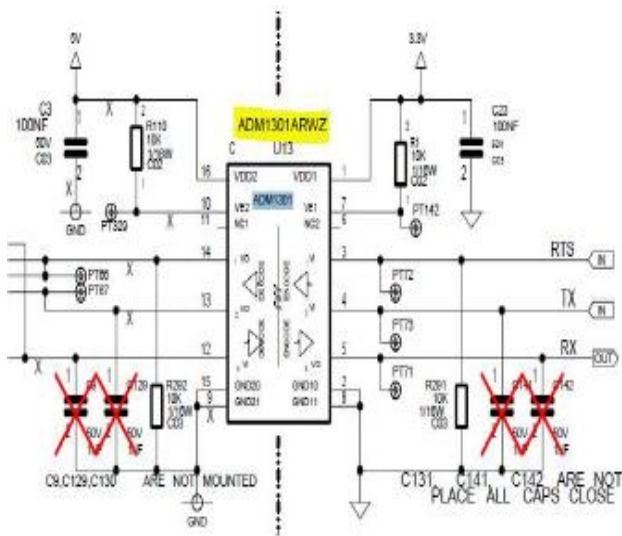
4.6 TERCEIRA ABORDAGEM: ADUM1301

Após uma discussão com os experts da *Schneider Electric* uma terceira abordagem foi investigada, o ADuM1301.

4.6.1 Contexto

O ADuM se trata de um componente ativo que permite a isolamento galvânica entre os lados Sinal e *Modbus*. Tomando como referência a Figura 21, o lado Sinal é aquele cujo o plano de massa é o GND_SIGNAL e o lado *Modbus* é aquele cujo o plano de massa é o GROUND. Sendo ainda mais específico, o lado Sinal é responsável pela comunicação com os dispositivos do *Smart Panel*, enquanto o lado *Modbus* é o que se comunica com o computador ou a nuvem. A Figura 44 apresenta seu esquema elétrico do componente e onde ele se encontra no PCB.

Figura 44 - Componente isolante: ADuM1301

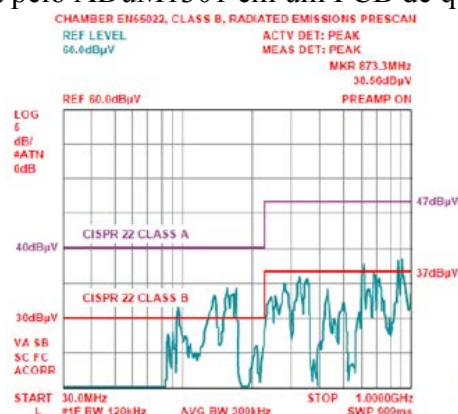


Fonte: Autor, 2017

O componente apresenta um comportamento perturbado em emissão conduzida que se traduz, em função do design do PCB, em uma emissão irradiada importante que pode ser resolvida com a adição de uma capacitância de Stitching entre 0V Modbus (GROUND) e o GND_SIGNAL, que são dois dos três planos de massa encontrados no *Smartlink Modbus*.

A Figura 45 apresenta a energia irradiada pelo componente em um PCB de quatro camadas.

Figura 45 - Energia irradiada pelo ADuM1301 em um PCB de quatro camadas



Fonte: Autor, 2017

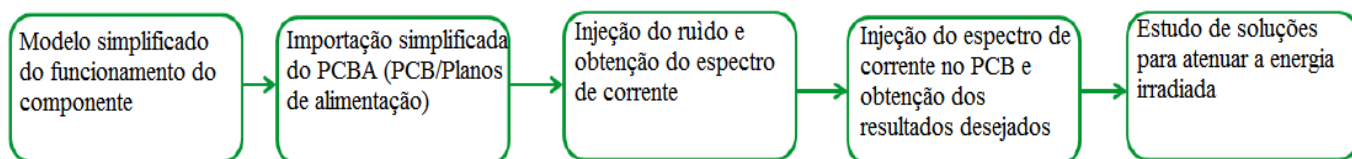
Inicialmente, verificou-se a possibilidade de se realizar uma caracterização em alta frequência (banda larga) do ADuM1301. No entanto, a metodologia não era simples e

demandava muito tempo. Sendo assim, optou-se por conceber um modelo simplificado baseado nos documentos disponíveis sobre o componente (datasheet, notas de aplicação etc.).

4.6.2 Visão geral

Esta terceira abordagem também se desenvolveu em cinco etapas. Primeiramente, foi realizado um modelo simplificado do funcionamento do ADuM1301. Em seguida, realizou-se a importação simplificada do PCBA e injetou-se nela o ruído gerado pelo componente entre os pinos VDDs e GNDs, que foi modelado na etapa anterior. Depois, foi necessário realizar a simulação para obter o espectro de corrente do ruído do componente. Este espectro foi injetado no PCB a fim de obter os resultados desejados (parâmetros S, campo elétrico etc.). Por fim, estudaram-se algumas hipóteses para atenuar a energia irradiada pelo componente. O esquema da Figura 46 mostra esse procedimento.

Figura 46 - Visão geral do procedimento de simulação: ADuM1301



Fonte: Autor, 2017

4.6.3 Procedimento

Nas notas de aplicação do componente encontram-se todas as informações necessárias para modelar o pulso de informação transmitido entre os dois lados do isolador. A Figura 47 apresenta uma parte dessas notas de aplicação do ADuM1301 que foram utilizadas para modelar o pulso.

Figura 47 - Notas de aplicação do ADuM1301



One Technology Way • P.O. Box 9106 • Norwood, MA 02062-9106, U.S.A. • Tel: 781.329.4700 • Fax: 781.461.3113 • www.analog.com

AN-1109
APPLICATION NOTE

Extracts

Data transitions at the input of *iCoupler* digital isolators are encoded as narrow pulses that are used to send information across the isolation barrier. These 1 ns pulses have peak currents of up to 70 mA and may cause radiated emissions and conducted noise if not considered during printed circuit board (PCB) layout and construction. This application note identifies the radiation mechanisms and offers specific guidance on

SOURCES OF CONDUCTED NOISE

Large currents and frequencies also generate conducted noise on the ground and power planes. This can be addressed with the same techniques for radiated emissions because the causes and remedies for both types of EMI can be improved with the same PCB ground and power structures.

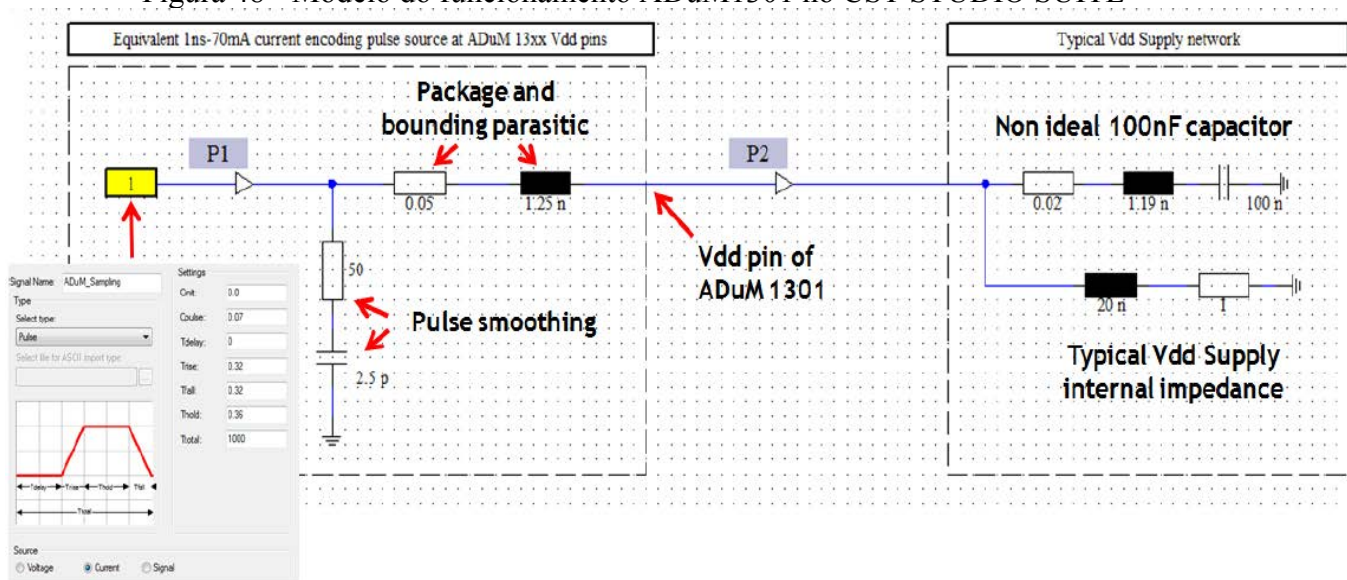
The inability of the bypass capacitors and ground/power planes to provide adequate high frequency current to the *iCoupler* device causes V_{DD} noise. The *iCoupler* isolator transmits data across the transformer in bursts of 1 ns pulses with an ampli-

tude of 70 mA. An ideal bypass capacitor of 100 nF should be adequate to supply the ac component of the current. However, bypass capacitors are not ideal and may connect to the ground or power planes through an inductive via. In addition, a large distance between ground and power planes creates a large inductance between them, which restricts the ability to supply current quickly. These factors may contribute to a large fraction of a volt of high frequency noise on the V_{DD} plane.

Fonte: Autor, 2017

A Figura 48 mostra o modelo simplificado do ADuM1301 no CST STUDIO SUITE.

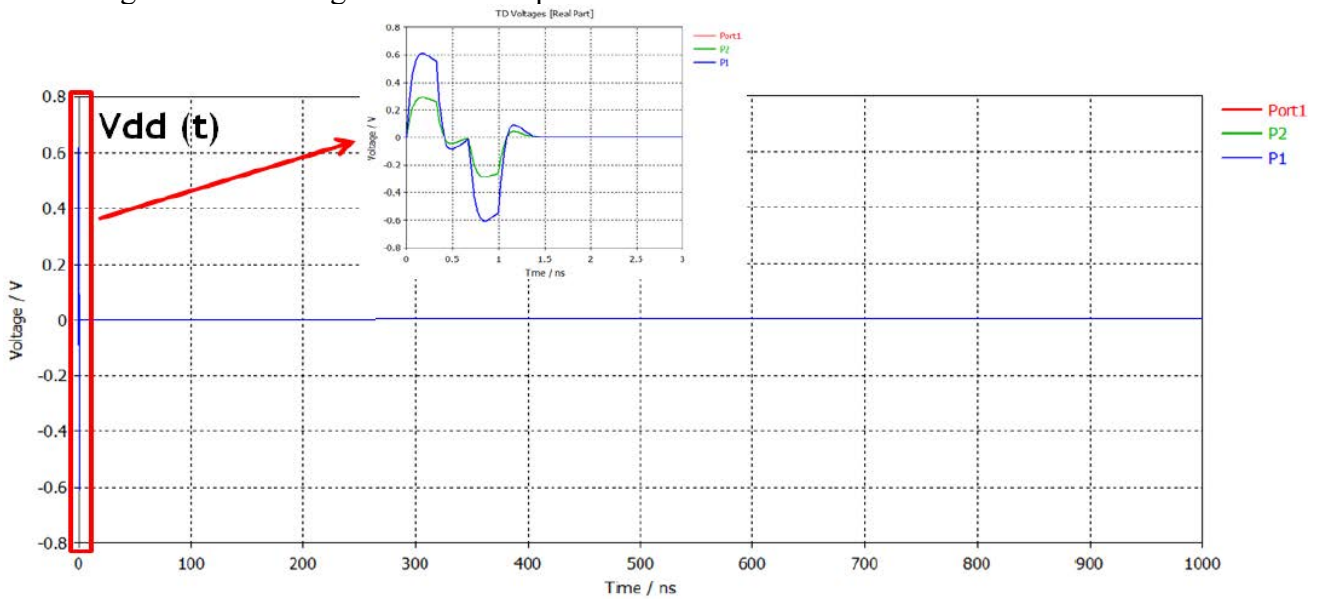
Figura 48 - Modelo do funcionamento ADuM1301 no CST STUDIO SUITE



Fonte: Autor, 2017

A probe P2 fornece o ruído gerado entre os pinos VDD e GND, como mostrado na Figura 49. Posteriormente, este ruído foi injetado no PCB 3D, a fim de verificar seu efeito na placa *Smartlink Modbus*.

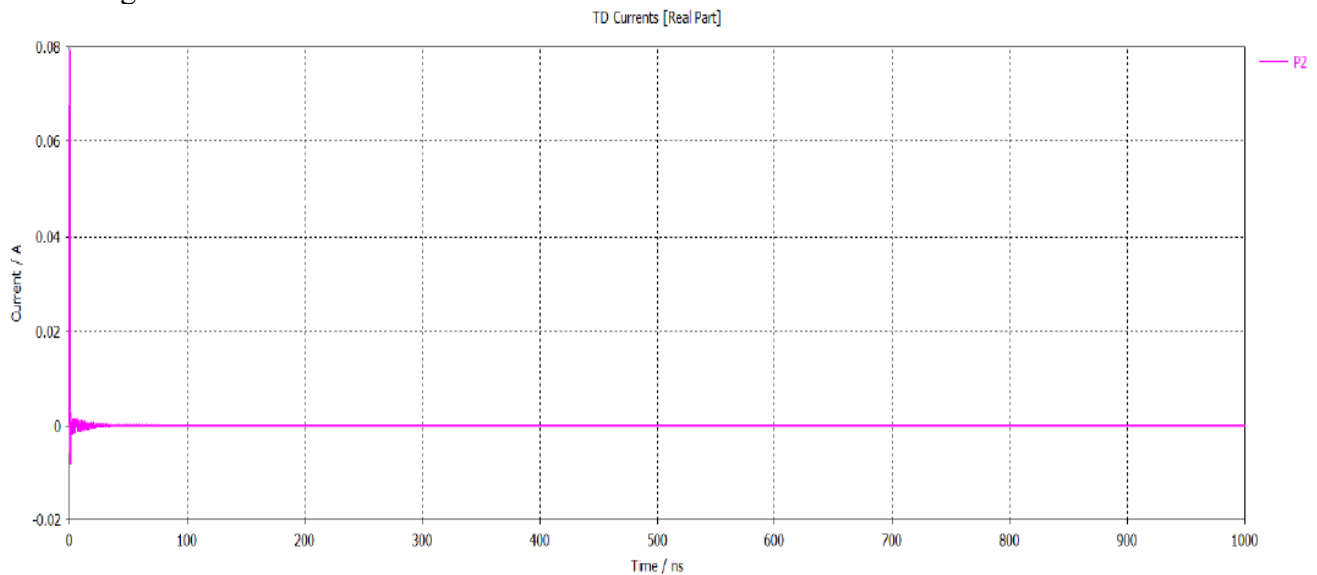
Figura 49 - Ruído gerado entre os pinos VDD e GND do ADuM1301



Fonte: Autor, 2017

Ao analisar a curva de corrente, mostrada pela Figura 50, observa-se um pico de corrente considerável em torno de 80 mA.

Figura 50 - Pico de corrente na saída do ADuM1301

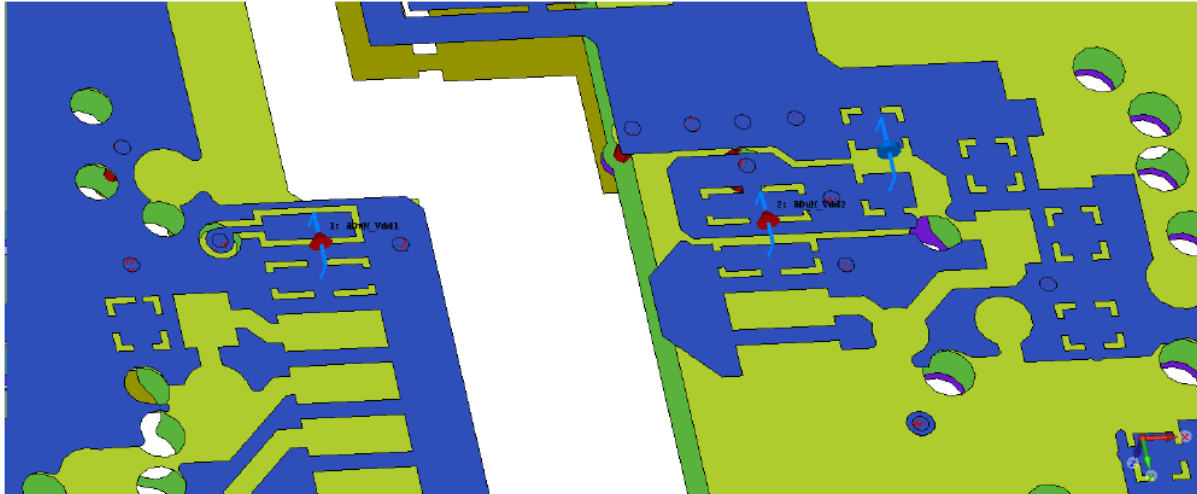


Fonte: Autor, 2017

Em seguida, o PCB foi importado com todos os planos de alimentação (3,3 V, 5 V e 24 V), os planos de massa (GND_SIGNAL, GROUND e EARTH) e as capacitâncias de desacoplamento. Além disso, duas portas discretas foram colocadas ao nível dos pinos

VDD1_GND1 (lado Sinal) e VDD2_GND2 (lado Modbus) do componente ADuM1301, como mostrado na Figura 51.

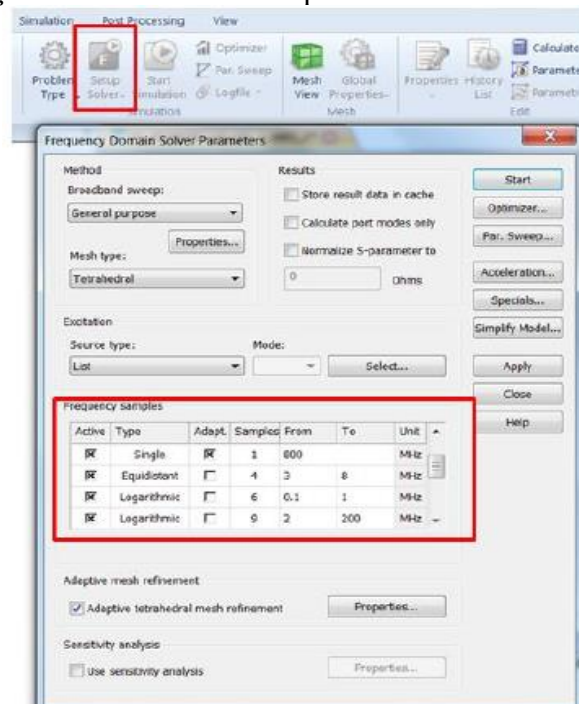
Figura 51 - Portas discretas ao nível componente ADuM1301



Fonte: Autor, 2017

A fim de obter uma melhor precisão nas curvas de parâmetro S e de campo elétrico, realizou-se uma parametrização da amostragem do solucionador frequencial. Há cinco tipos de amostragem que variam de acordo com o interesse do usuário, são eles: *Single*, *Equidistant*, *Logarithmic*, *Automatic* e *Monitors*, como mostrado na Figura 52.

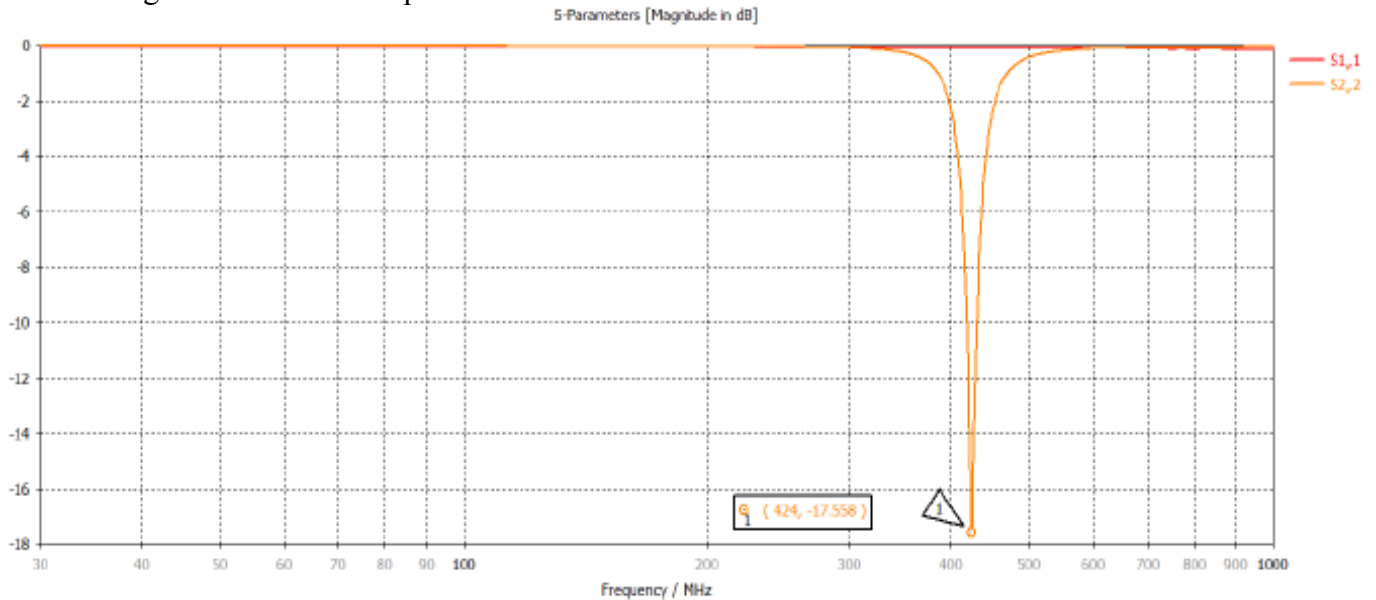
Figura 52 - Parametrização do solucionador frequencial



Fonte: Autor, 2017

Assim que a simulação foi feita, obteve-se a curva de parâmetro apresentada na Figura 53.

Figura 53 - Curvas de parâmetros S dos lados Sinal e Modbus

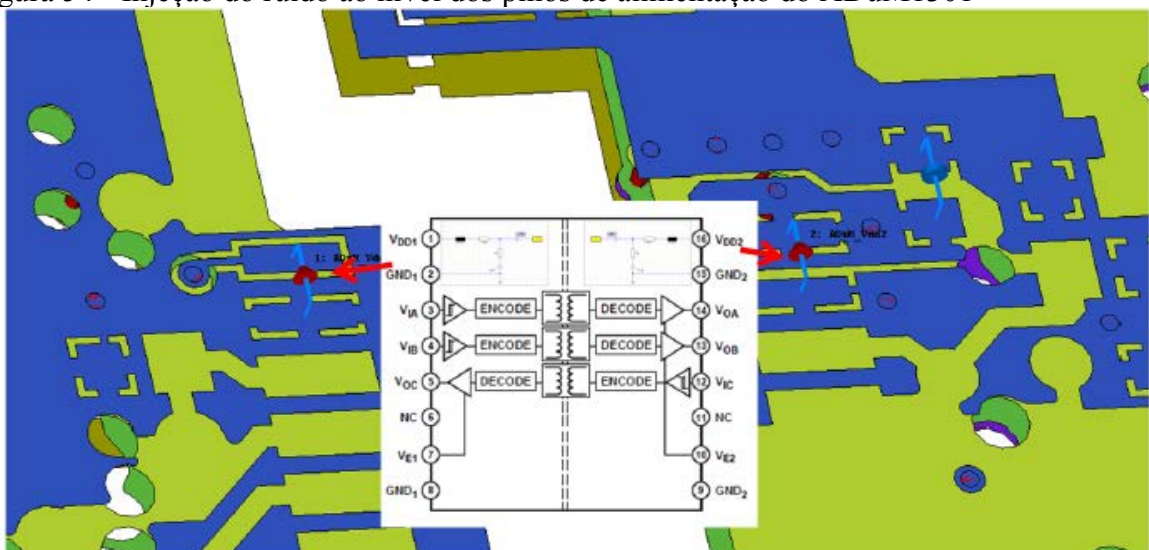


Fonte: Autor, 2017

Observou-se uma energia irradiada próximo a 424 MHz devido a perturbação conduzida sobre os pinos VDD2_GND2 (lado *Modbus*) que já está bem próximo do 460 MHz medidos na prática.

Em seguida, injetou-se o sinal de ruído no PCB ao nível dos pinos VDD1_GND1 e VDD2_GND2 do componente ADuM, como ilustrado na Figura 54.

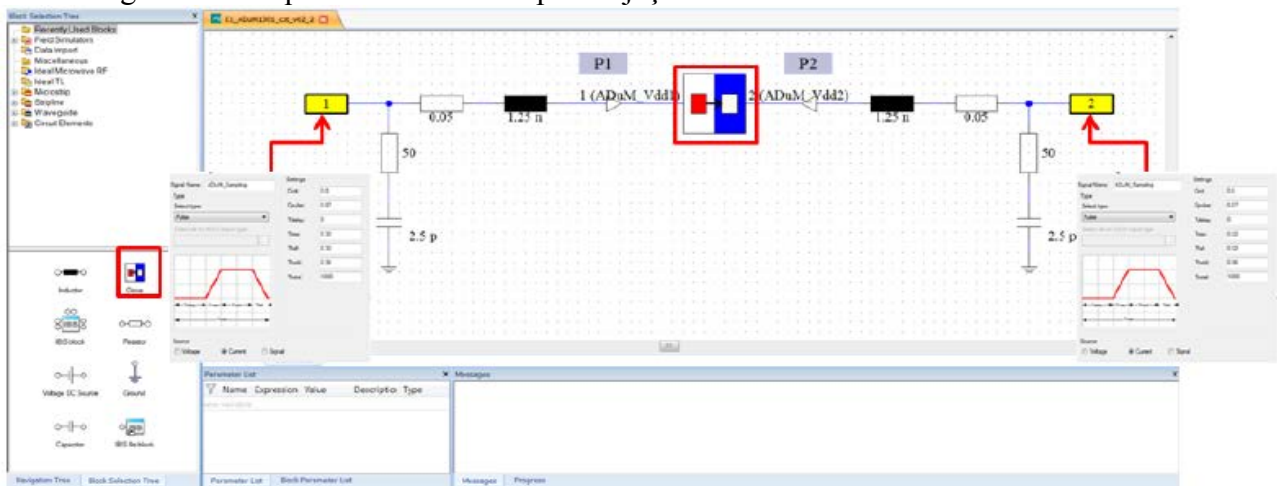
Figura 54 - Injeção do ruído ao nível dos pinos de alimentação do ADuM1301



Fonte: Autor, 2017

A injeção do ruído foi realizada em um esquema 2D com a ajuda de um bloco clone, como pode ser visto na Figura 55. Este bloco permite clonar o PCB para utilizá-lo quantas vezes for necessário.

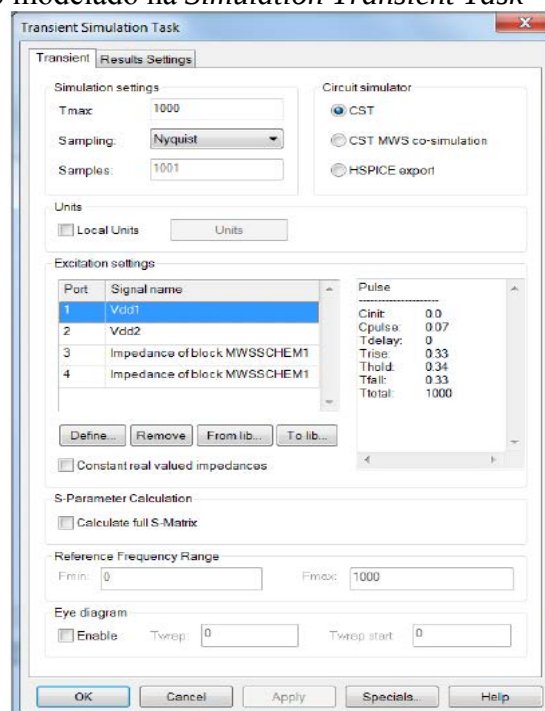
Figura 55 - Esquema 2D utilizado para injeção de ruído no PCB



Fonte: Autor, 2017

A Figura 56 mostra os parâmetros do sinal de ruído modelado na *Simulation Transient Task*. É importante ressaltar que este ruído foi modelado baseando-se na curva obtida pela probe P2.

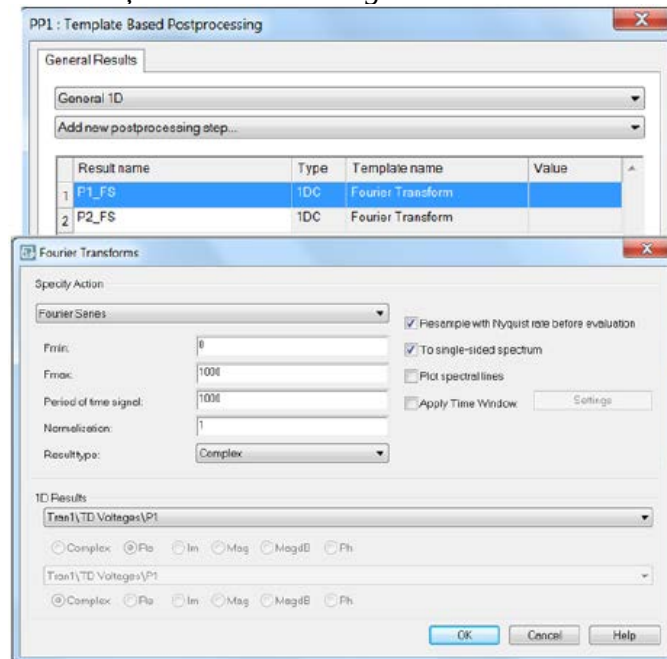
Figura 56 - Sinal de ruído modelado na *Simulation Transient Task*



Fonte: Autor, 2017

Para obter o espectro de corrente dos dois lados do PCB, foi preciso realizar a transformada de Fourier das curvas dadas pelas probes p1 e p2. Esse procedimento é feito através da função *Post Processing*, como ilustrado pela Figura 57.

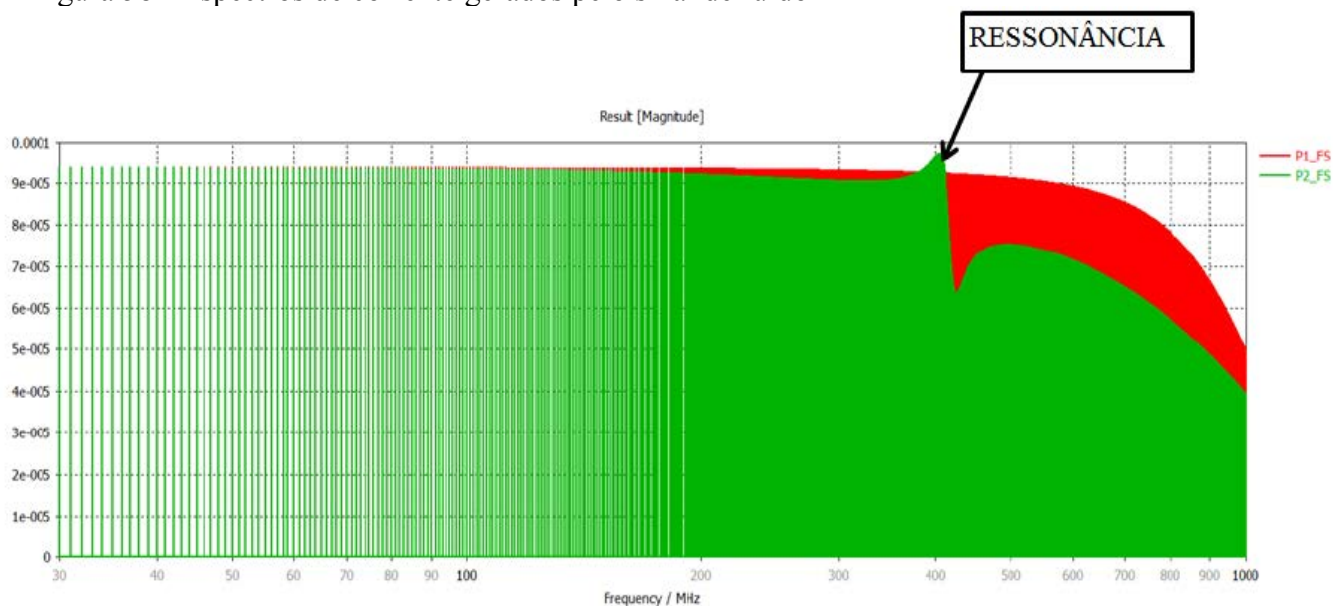
Figura 57 - Parâmetros da função *Post Processing*



Fonte: Autor, 2017

Os espectros de corrente dos dois lados da placa, Sinal (P1) e *Modbus* (P2), podem ser vistos na Figura 58. Observa-se uma ressonância a 424 MHz no lado *Modbus*.

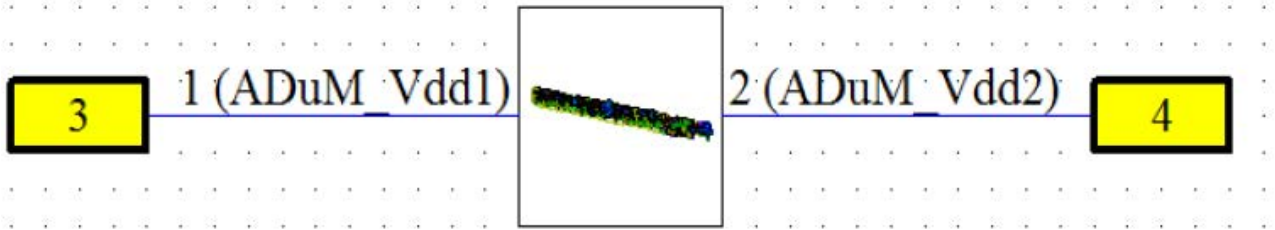
Figura 58 - Espectros de corrente gerados pelo sinal de ruído



Fonte: Autor, 2017

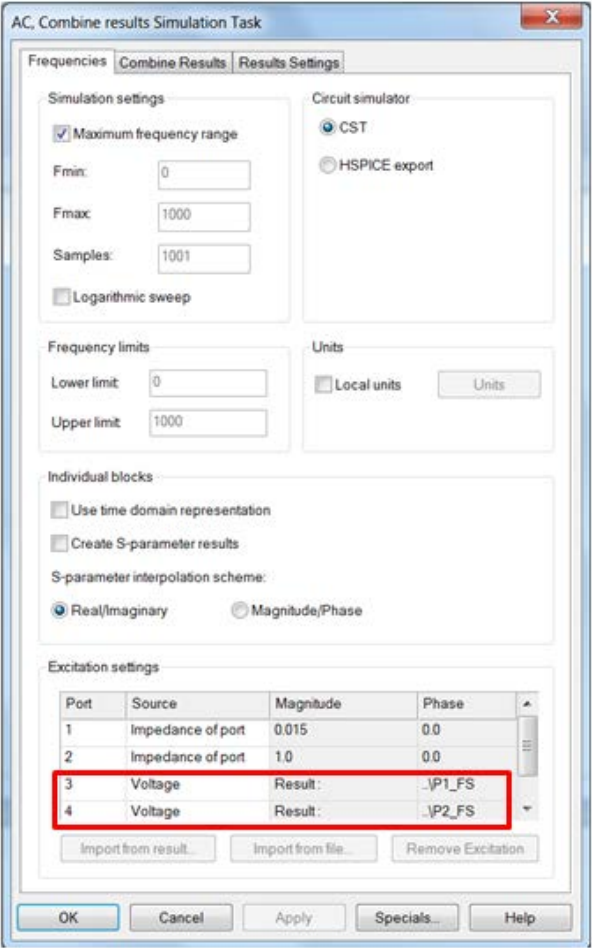
Para obtenção do campo elétrico, injetaram-se os espectros encontrados no PCB utilizando a função *AC. Combine Results*, como apresentado nas Figuras 59 e 60.

Figura 59 - Injeção do espectro de corrente no PCB



Fonte: Autor, 2017

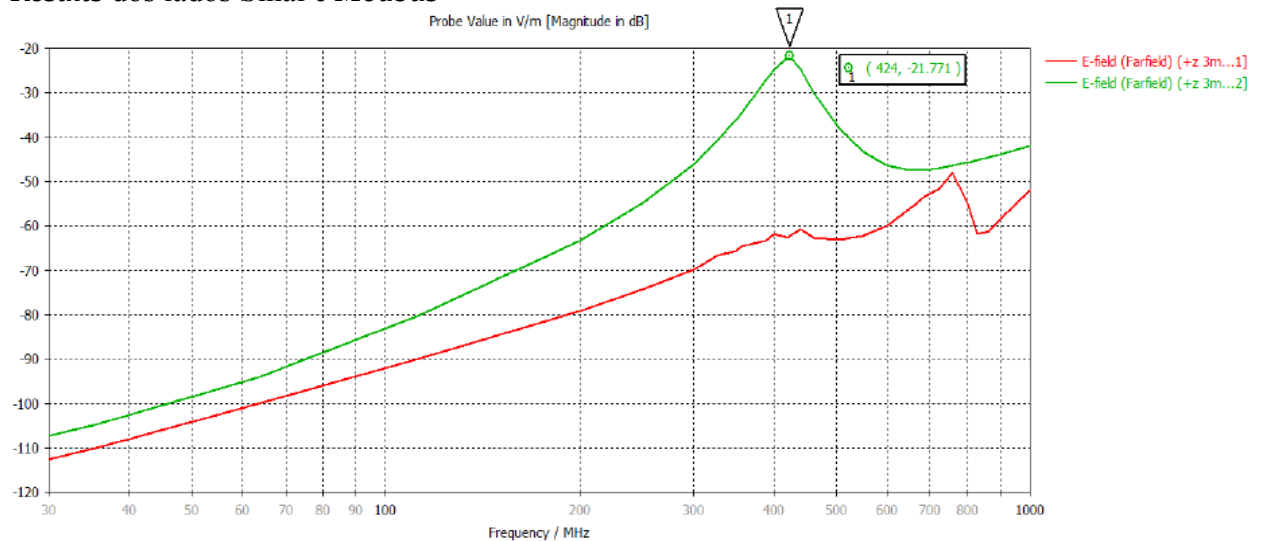
Figura 60 - Parâmetros da função *AC. Combine Results*



Fonte: Autor, 2017

A Figura 61 mostra as curvas de campo elétrico obtidas. Vê-se que o lado *Modbus* apresenta campo elétrico 40 dB maior do que a lado Sinal.

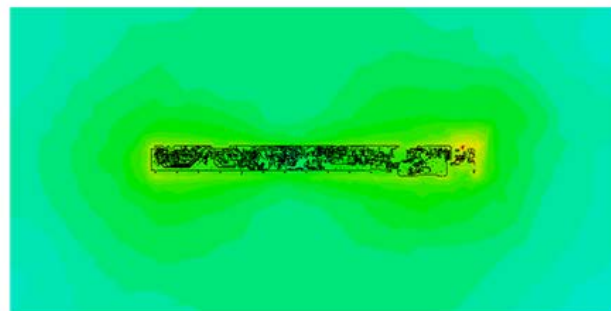
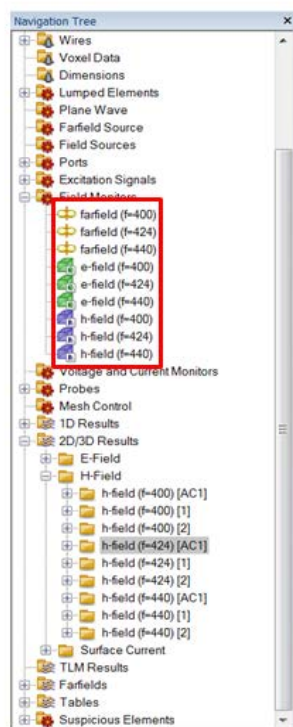
Figura 61 - Comparação das curvas de campo elétrico obtidas pela função *AC. Combine Results* dos lados *Sinal* e *Modbus*



Fonte: Autor, 2017

Com a ajuda de alguns monitores de campo é possível observar que os planos 5 V/GROUND ressonam a 424 MHz, gerando campos eletromagnéticos localizados. Estes campos estão presentes em todo o layout e observa-se uma estrutura similar a um dipolo como mostrado pela Figura 62.

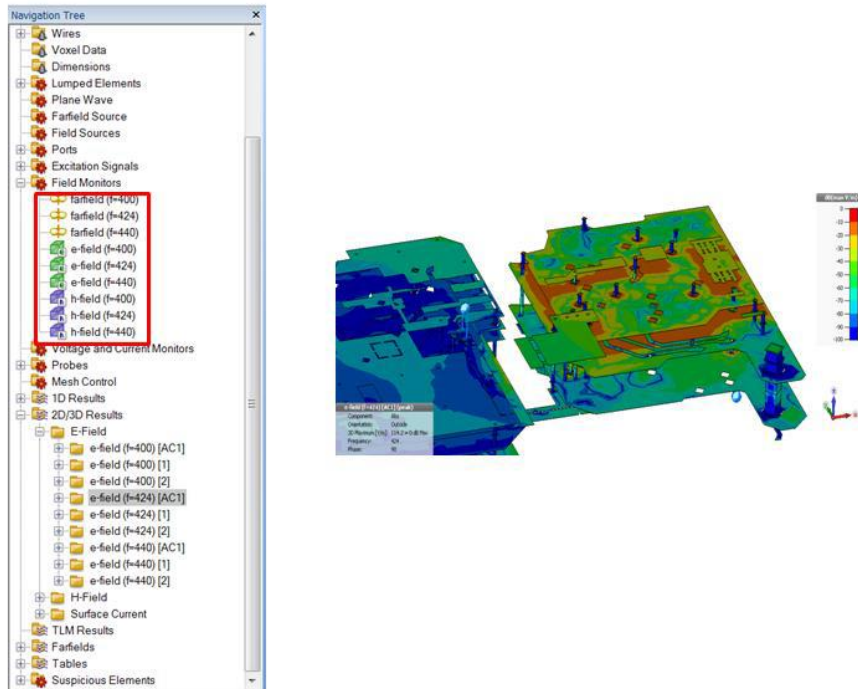
Figura 62 - Campos eletromagnéticos localizados a 424 MHz



Fonte: Autor, 2017

Na Figura 63 é possível observar as zonas das placas onde a presença de campo elétrico é mais forte. Pode-se perceber claramente um forte campo elétrico no lado *Modbus*, principalmente, próximo ao ADuM1301 e as capacitâncias de desacoplamento.

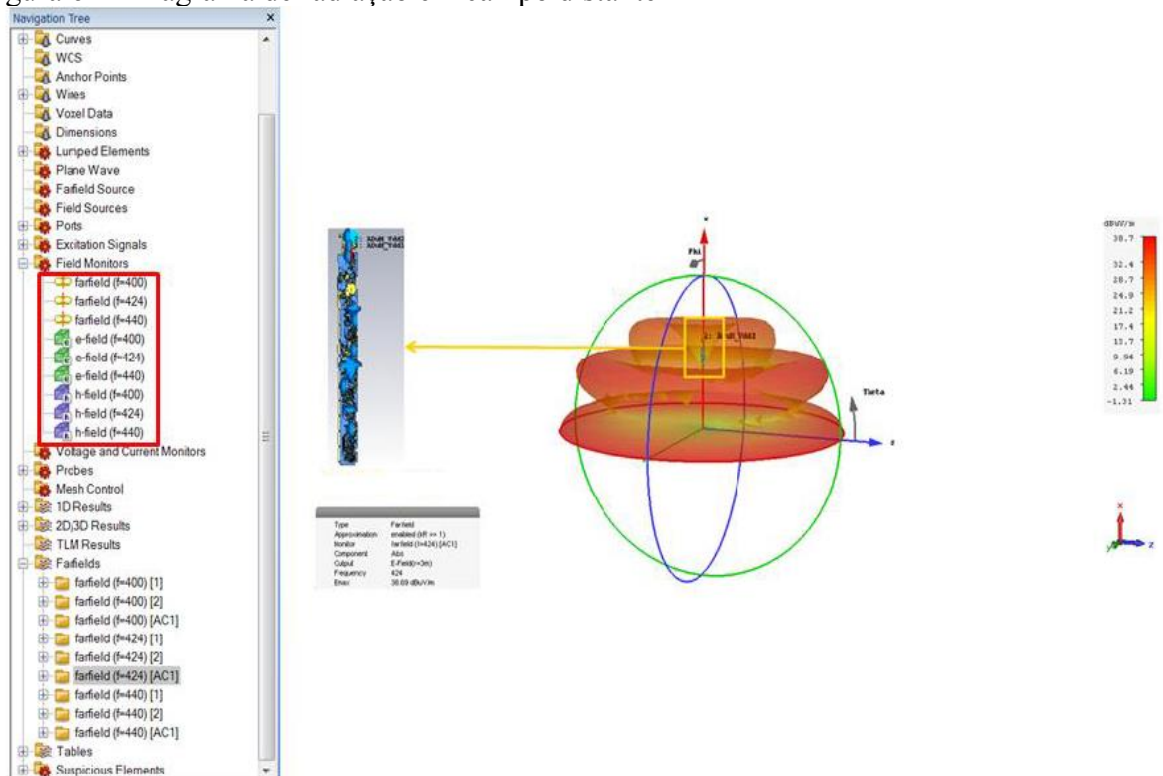
Figura 63 - Campo elétrico a 424 MHz no lado *Modbus*



Fonte: Autor, 2017

Além disso, obteve-se o diagrama de radiação em campo distante do *Smartlink Modbus* mostrado pela Figura 64.

Figura 64 - Diagrama de radiação em campo distante



Fonte: Autor, 2017

4.6.4 Análise da terceira abordagem

Esta abordagem permitiu concluir que o componente ADuM1301 é a principal causa do problema de emissão irradiada da placa *Smartlink Modbus*. Além disso, percebeu-se claramente que o problema está situado no lado *Modbus*, que irradia muito mais energia do que o lado Sinal do PCB.

4.7 SOLUÇÕES PARA ATENUAÇÃO DA ENERGIA IRRADIADA

Depois da identificação do ADuM1301 como fonte de energia causadora de problemas no *Smartlink Modbus*, algumas soluções para atenuar a energia irradiada pelo componente foram abordadas. Estas soluções levaram em conta alguns fatores como: a tecnologia dos componentes, a geometria e arquitetura do layout.

4.7.1 Mudança da tecnologia das capacitâncias de desacoplamento

Para todas as simulações mostradas até agora, as capacitâncias foram caracterizadas baseando-se nos datasheets. A fim de verificar a influência da indutância parasita, foram

utilizadas capacitâncias com baixa indutância parasita (*Low ESL*). Sendo assim, foram escolhidas capacitâncias da série GRM Murata que possuem uma indutância parasita de 0,3 nH. A Figura 65 apresenta a diferença entre as indutâncias parasitas das séries UA Nichicon, utilizada na placa, e GRM Murata.

Figura 65 - Comparação entre as capacitâncias das séries UA Nichicon e GRM Murata

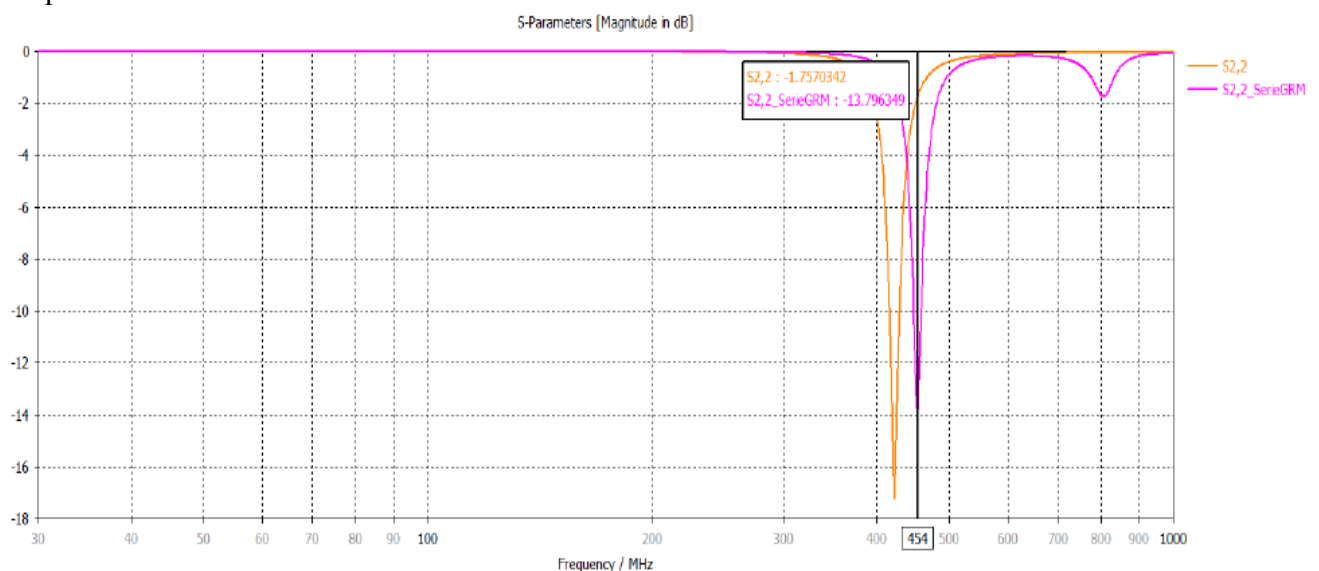
NHA8825522 A65 00(PCB1):C3		AAV9110304 A65 06(PCB1):C3	
Type	RLC Serial	Type	RLC Serial
R	0.02 Ohms	R	0.03 Ohms
L	1.1e-009 H	L	3e-010 H
C	1e-011 F	C	1e-007 F

Série UA Nichicon
Série GRM Murata

Fonte: Autor, 2017

Assim que todas as capacitâncias da série UA Nichicon foram substituídas pelas capacitâncias da série GRM Murata na simulação utilizada para a terceira abordagem (ADuM1301), foi realizada a simulação para obtenção da curva de parâmetros S. A Figura 66 mostra a comparação entre as curvas obtidas com os dois tipos de capacitâncias.

Figura 66 - Comparação entre curvas de parâmetros S para diferentes tecnologias de capacitâncias



Fonte: Autor, 2017

Observou-se uma atenuação próxima de 4 dB. Esta atenuação não é negligenciável, mas a alteração por capacitâncias de melhor qualidade poderá ser custosa. Sendo assim, uma

análise mais profunda deverá ser feita para verificar se compensa ou não, para a empresa, implementar essa mudança.

4.7.2 Modelo simplificado do Smartlink Modbus

Com a intenção de examinar a influência da geometria e da arquitetura do layout, criou-se um modelo simplificado do *Smartlink Modbus* que permitiu trabalhar de maneira simplificada no CST.

Anteriormente, observou-se que a energia radiada vem principalmente do plano de alimentação de 5 V da zona *Modbus*. O modelo simplificado teve, portanto, o *stackup* mostrado na Figura 67, onde todas as camadas, exceto a de 5 V, foram tratadas como GND.

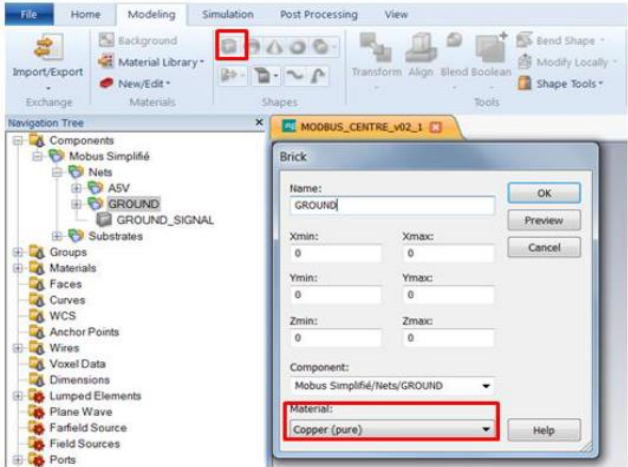
Figura 67 - Stackup do modelo simplificado

Signal		Modbus	
Layer	Net Class	Layer	Net Class
Top	GROUND_SIGNAL	Top	Not included
Layer 05	GROUND_SIGNAL	Layer 05	A5V
Layer 04	GROUND_SIGNAL	Layer 04	GROUND
Layer 03	GROUND_SIGNAL	Layer 03	GROUND
Layer 02	GROUND_SIGNAL	Layer 02	GROUND
Bottom	GROUND_SIGNAL	Bottom	GROUND

Fonte: Autor, 2017

Este modelo pôde ser criado facilmente com os recursos disponíveis no CST. É valido mencionar que as dimensões do *Smartlink Modbus* foram respeitadas e que o material utilizado para as camadas foi o cobre. A Figura 68 ilustra como as camadas foram modeladas no CST.

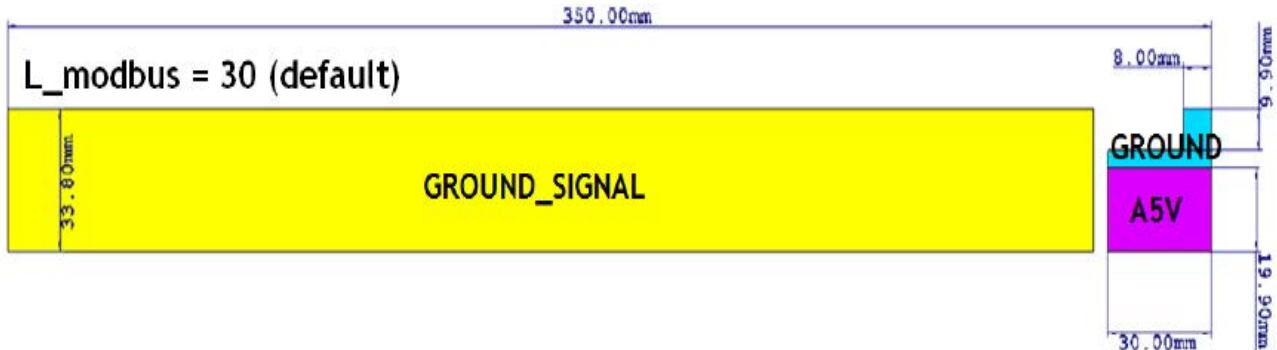
Figura 68 - Janela da criação de blocos no CST STUDIO SUITE



Fonte: Autor, 2017

A Figura 69 apresenta o modelo simplificado e cotado da placa *Smartlink Modbus*.

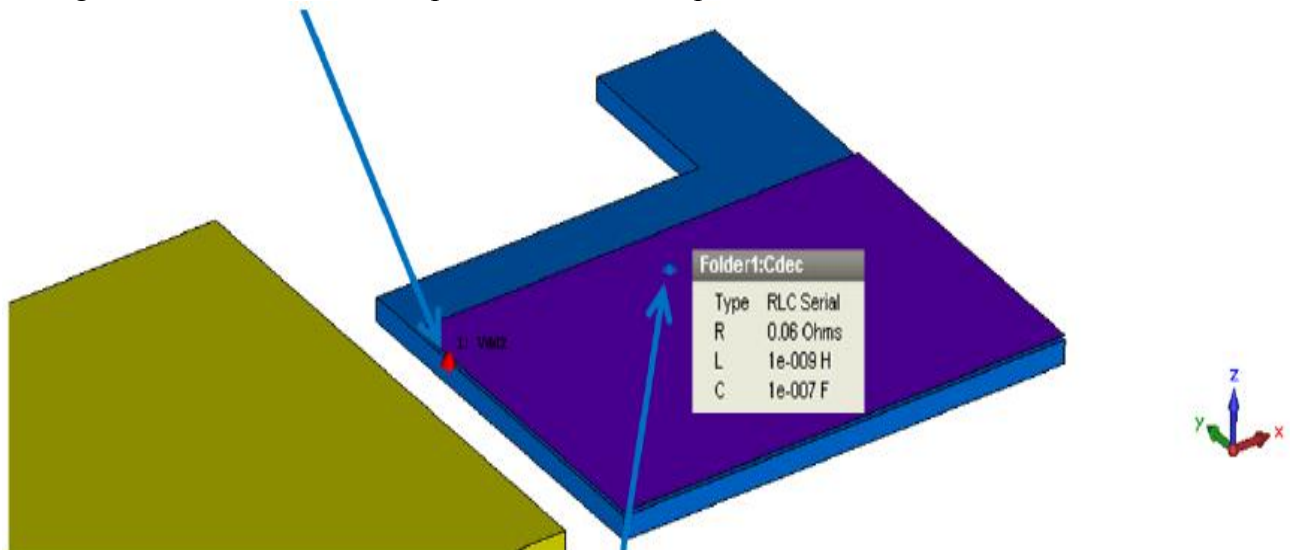
Figura 69 - Modelo simplificado da placa *Smartlink Modbus*



Fonte: Autor, 2017

Após o modelo finalizado, foi preciso colocar uma porta discreta e uma capacitância de desacoplamento entre o GROUND e o plano de 5 V, como mostrado na Figura 70, para realizar e otimizar a simulação respectivamente.

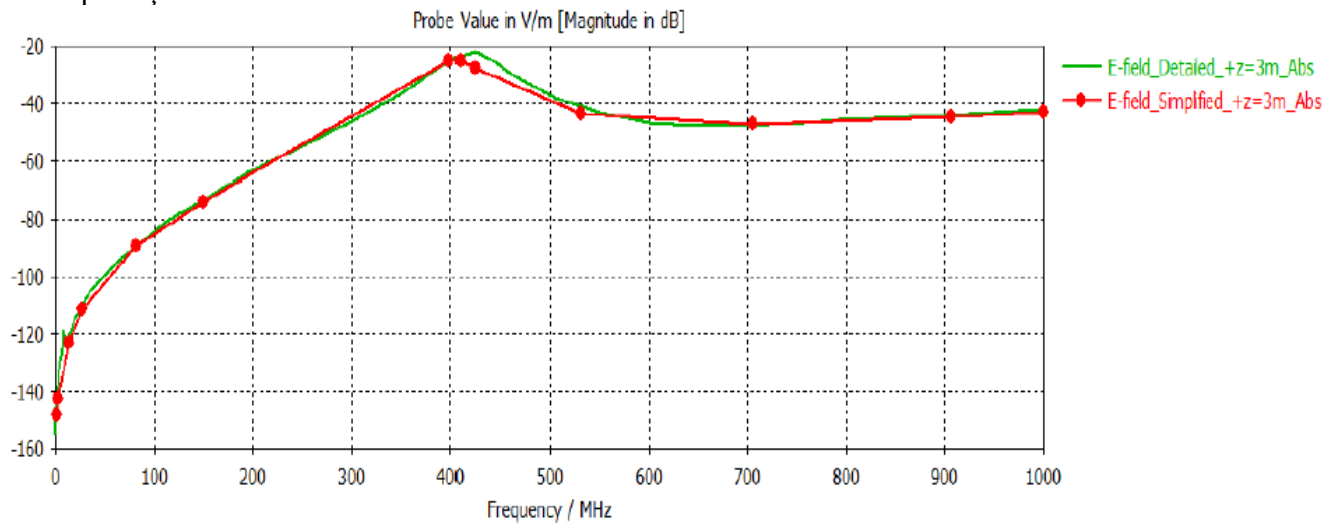
Figura 70 - Porta discreta e capacitância de desacoplamento entre o GROUND e o 5 V



Fonte: Autor, 2017

Com intuito de verificar a confiabilidade do modelo simplificado, uma comparação foi realizada entre os resultados obtidos com o modelo simplificado e a importação realizada no estudo para o ADuM1301. A Figura 71 apresenta a comparação feita entre as curvas de campo elétrico.

Figura 71 - Comparação entre as curvas de campo elétrico do modelo simplificado e da importação detalhada

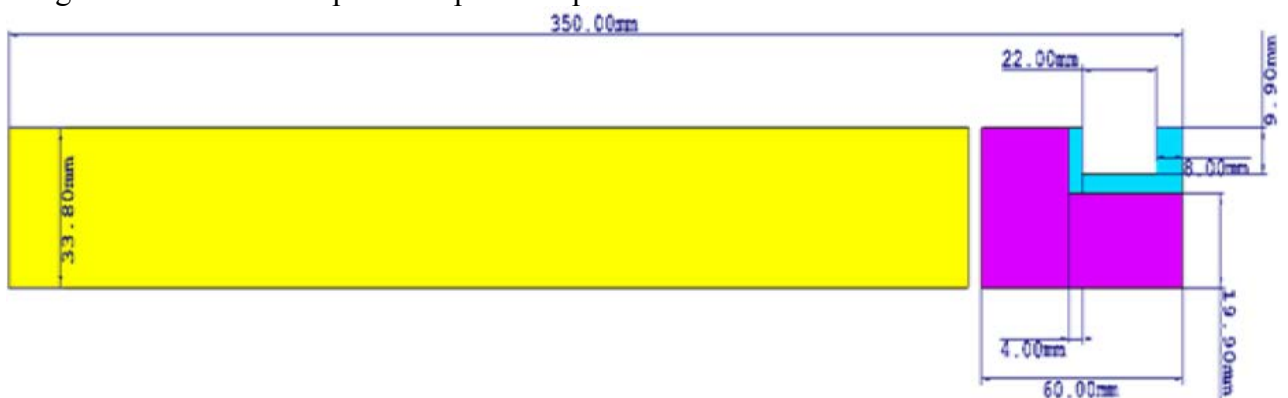


Fonte: Autor, 2017

Através dessa comparação conclui-se que o modelo simplificado feito é muito próximo da importação realizada. Portanto, a utilização de modelos simplificados pode ser muito útil não só para esse projeto, mas tem para projetos futuros da *Schneider Electric*, pois permite prever facilmente e com uma razoável precisão o comportamento eletromagnético do produto.

Após o modelo simplificado realizado, primeiramente modificou-se o comprimento do lado *Modbus*. Simulações foram realizadas para diferentes comprimentos, a fim de observar a influência deste parâmetro em relação à energia que é irradiada. A Figura 72 mostra o modelo simplificado para um comprimento de 60 mm do lado *Modbus*.

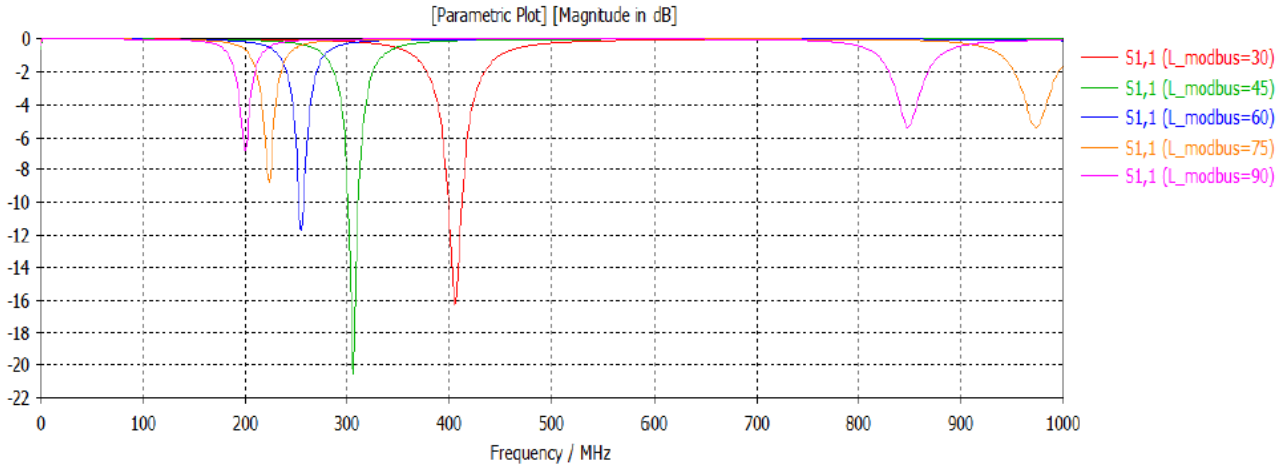
Figura 72 - Modelo simplificado para comprimento de 60 mm do lado *Modbus*



Fonte: Autor, 2017

A Figura 73 mostra a comparação entre as curvas de parâmetros S para diferentes comprimentos do lado *Modbus*.

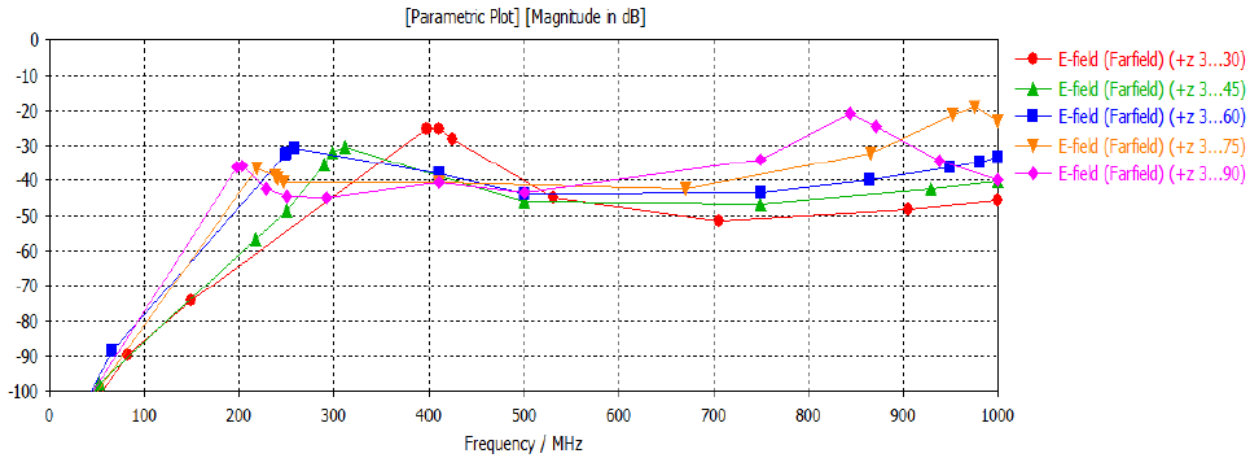
Figura 73 - Curvas de parâmetros S para diferentes comprimentos do lado *Modbus*



Fonte: Autor, 2017

A Figura 74 mostra as curvas de campo elétrico para os mesmos comprimentos do lado *Modbus* utilizados anteriormente.

Figura 74 - Curvas de campo elétrico para diferentes comprimentos do lado *Modbus*



Fonte: Autor, 2017

Nota-se que a frequência de ressonância se desloca para a direita conforme o aumento do comprimento do lado *Modbus*. É possível observar também que este parâmetro tem uma influência considerável na quantidade de energia irradiada.

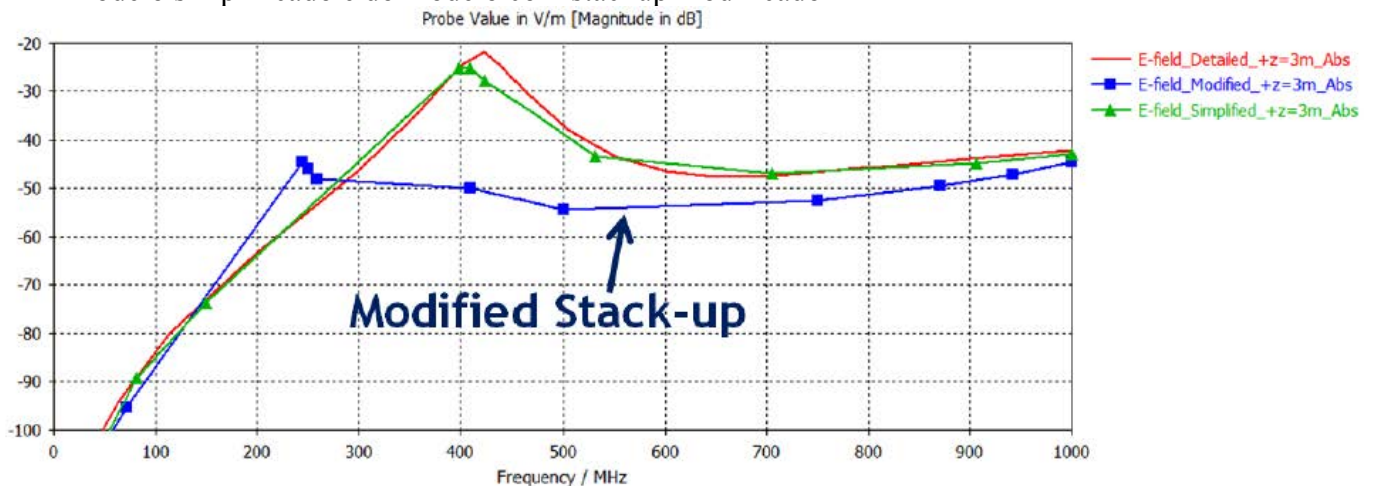
Em seguida, modificou-se a terceira camada do lado *Modbus* de GND para VDD, como mostrado pela Figura 75. O objetivo desta modificação é aumentar a absorção deste plano de alimentação de 5 V e, consequentemente, atenuar a energia irradiada por ele.

Figura 75 - *Stackup* modificado do modelo simplificado

Signal		Modbus	
Layer	Net Class	Layer	Net Class
Top	GROUND_SIGNAL	Top	Not included
Layer 05	GROUND_SIGNAL	Layer 05	A5V
Layer 04	GROUND_SIGNAL	Layer 04	GROUND
Layer 03	GROUND_SIGNAL	Layer 03	A5V
Layer 02	GROUND_SIGNAL	Layer 02	GROUND
Bottom	GROUND_SIGNAL	Bottom	GROUND

Fonte: Autor, 2017

Esta simulação permite constatar que é possível atenuar significativamente a energia irradiada pela placa *Smartlink Modbus* (curva azul) com uma modificação no *stackup* do PCB, como apresentado na Figura 76. É uma possibilidade que deve ser levada em conta, no caso de conceber um novo design para o PCB.

Figura 76 - Comparação entre as curvas de campo elétrico da importação detalhada, do modelo simplificado e do modelo com *stackup* modificado

Fonte: Autor, 2017

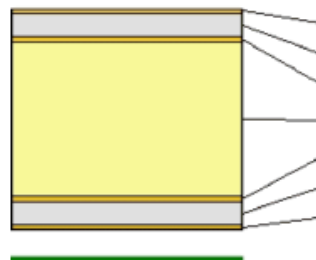
4.7.3 Placa de teste para o ADuM

Sabendo que o ADuM1301 é a principal causa do problema em emissão irradiada do *Smartlink Modbus*, realizou-se uma caracterização em banda larga do componente. Para isso, uma placa de teste foi desenvolvida para analisar as características do componente.

Assim que o arquivo brd foi importado, foi necessário parametrizar o *stackup* da placa de teste. A Figura 77 mostra o *stackup* definido para a placa de teste.

Figura 77 - *Stackup* da placa de teste para o ADuM1301

Visualisation des couches de votre circuit



Couches	Votre sélection	Epaisseur	Diélectrique
Vernis TOP	Votre sélection : Vernis vert	20 µm	4
Cu - 1	35µ / 1Oz	35 µm	
PP - 1	175 µm (7628)	175 µm	4.2 - -
Cu - 2	35µ / 1Oz	35 µm	
FR4 - 1	1200 µm (FR4-1.2)	1130 µm	4.4
Cu - 3	35µ / 1Oz	35 µm	
PP - 2	175 µm (7628)	175 µm	4.2 - -
Cu - 4	35µ / 1Oz	35 µm	
Vernis BOT	Votre sélection : Vernis vert	20 µm	4
Total thickness		1660	

Fonte: Autor, 2017

A Figura 78 mostra o *stackup* parametrizado no CST STUDIO SUITE.

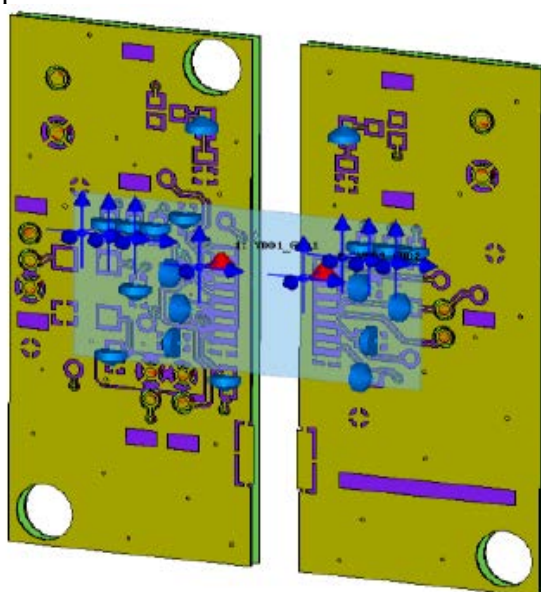
Figura 78 - Parametrização do *stackup* no CST STUDIO SUITE

Name	Material	cond. / tan del	Permittivity	Thickness	Elevation	illing fron	tch undercu	Etch factor
SOLDER_M...	FR4	0.02@0GHz	4	20	1640			
TOP	COPPER	5.959e+07	1	35	1605	above	none	1
DIELECTRIC_0	FR-4	0.035@0GHz	4.2	175	1430			
LAY2	COPPER	5.959e+07	1	35	1395	below	none	1
DIELECTRIC_1	FR-4	0.035@0GHz	4.4	1130	265			
LAY1	COPPER	5.959e+07	1	35	230	above	none	1
DIELECTRIC_2	FR-4	0.035@0GHz	4.2	175	55			
BOTTOM	COPPER	5.959e+07	1	35	20	below	none	1
SOLDER_M...	FR4	0.02@0GHz	4	20	0			

Fonte: Autor, 2017

Em seguida, colocaram-se as portas discretas entre os pinos VDD e GND do ADuM e as probes de campo sobre cada capacitância de desacoplamento, o que permitiu observar os campos elétricos e magnéticos de cada uma, como ilustrado pela Figura 79.

Figura 79 - Placa de teste para o ADuM1301

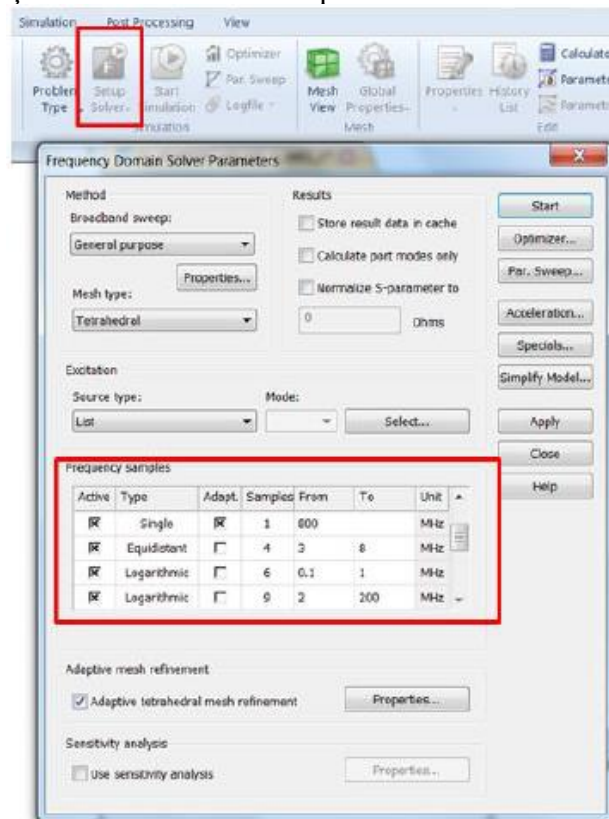


Fonte: Autor, 2017

As probes de campo foram colocadas 3 mm acima de cada capacitância para simular as condições de ensaio em campo próximo que foram realizados em parceria com a sociedade *Nexio*. Estes ensaios são explicados na seção 4.8.

Depois, a simulação foi parametrizada como ilustrado pela Figura 80. Com isso, pôde-se obter as curvas de parâmetros S.

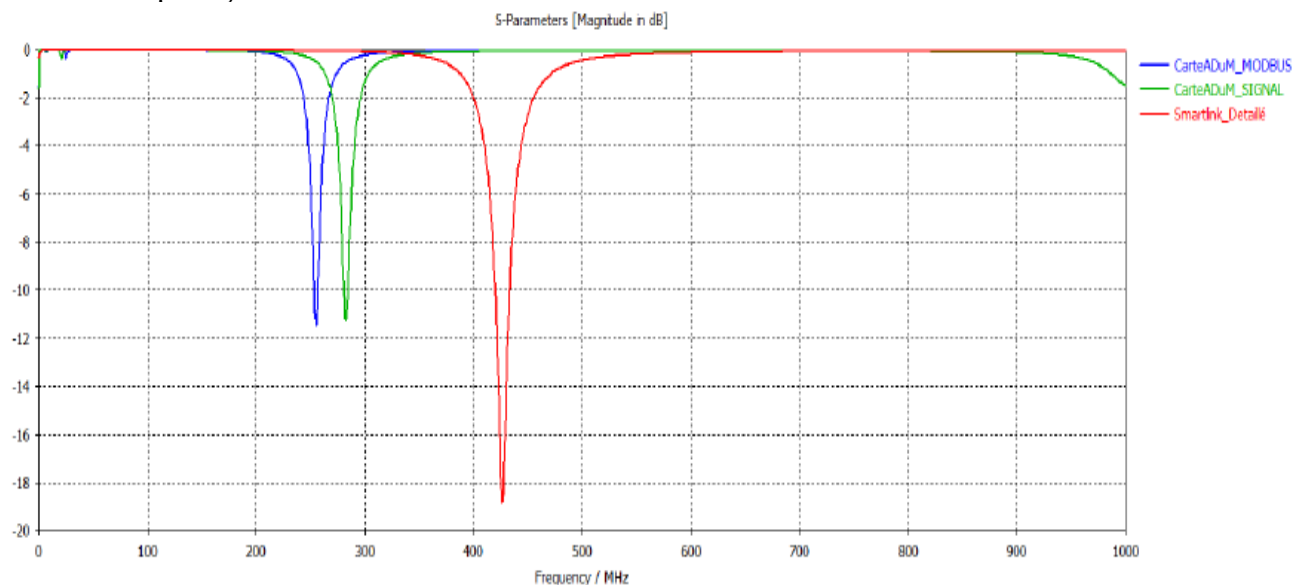
Figura 80 - Parametrização do solucionador frequencial



Fonte: Autor, 2017

A Figura 81 mostra a comparação entre as curvas de parâmetros S da placa de teste para o ADuM1301 (lados Sinal e *Modbus*) e da importação detalhada (lado *Modbus*).

Figura 81 - Comparação entre as curvas de parâmetros S da placa de teste para o ADuM1301 e da importação detalhada

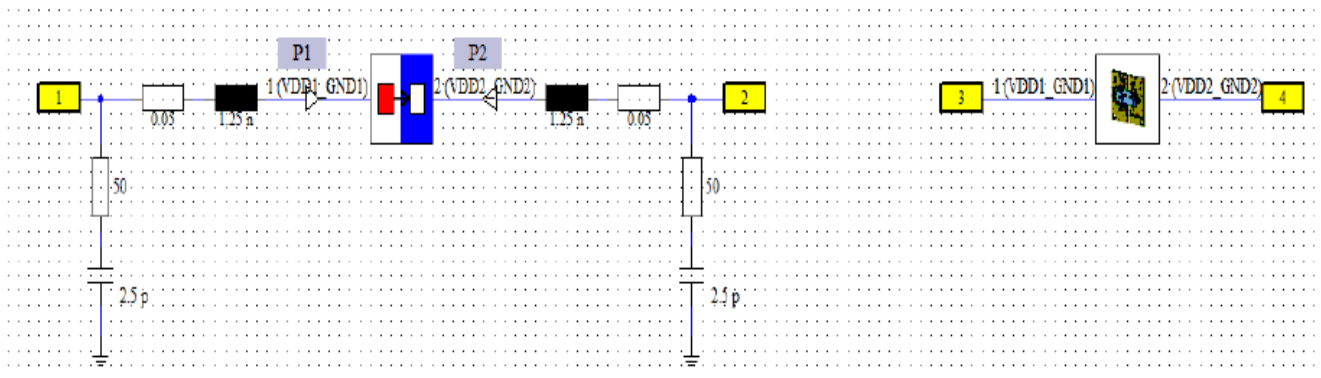


Fonte: Autor, 2017

Observa-se um deslocamento da frequência de ressonância (258 MHz para o lado *Modbus* e 292 MHz para o lado *Sinal*) e uma atenuação próxima de 7 dB. Por outro lado, percebe-se que os dois lados irradiam de forma similar na placa de teste, diferentemente da placa *Smartlink Modbus*, onde o lado *Modbus* irradia muito mais do que o lado *Sinal*. Isso se deve principalmente à perda do efeito antena.

Em seguida, injetou-se o ruído entre os pinos VDD e GND do ADuM1301 da mesma forma que foi feito na placa *Smartlink* (terceira abordagem). A Figura 82 ilustra essa injeção no modelo 2D.

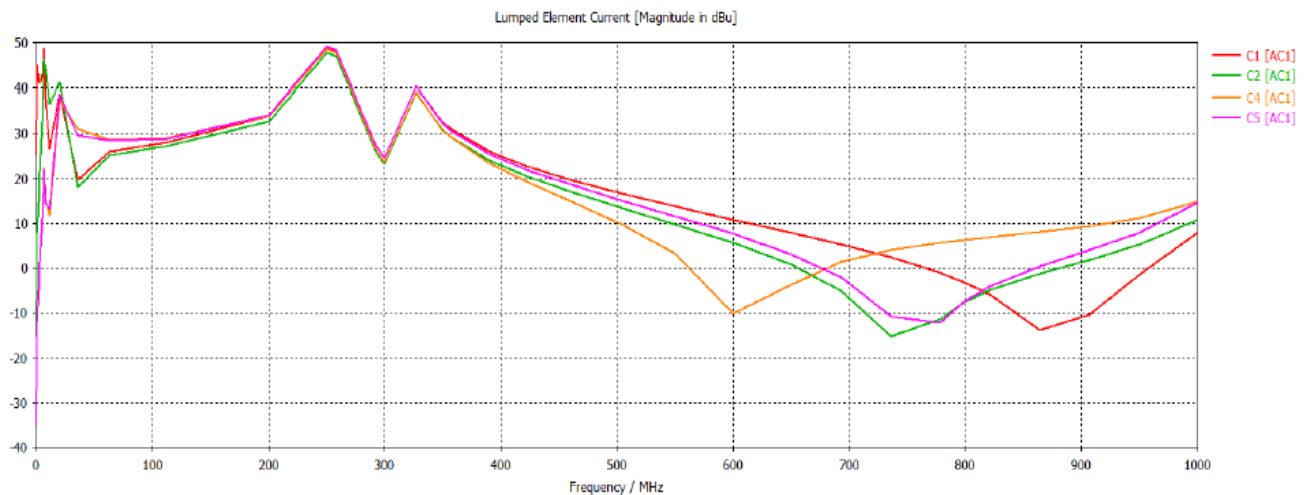
Figura 82 - Injeção do ruído na placa de teste



Fonte: Autor, 2017

É interessante observar que no lado sinal, as capacitâncias de desacoplamento C1, C2, C4 e C5 fornecem corrente para o ADuM de maneira equilibrada, como mostrado na Figura 83.

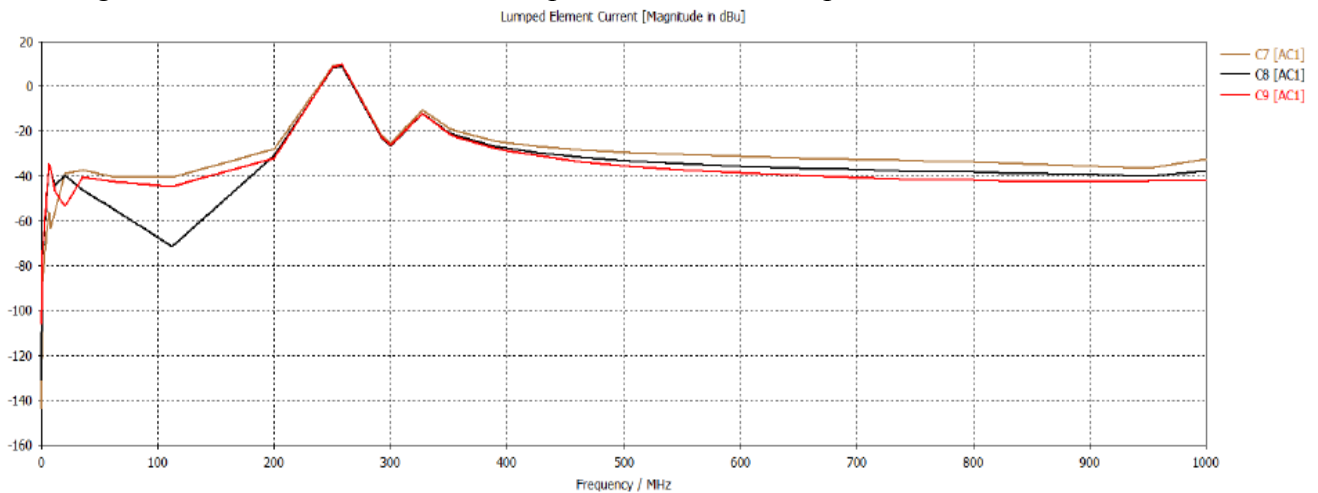
Figura 83 - Curvas de corrente das capacitâncias de desacoplamento no lado Sinal



Fonte: Autor, 2017

De modo similar, no lado *Modbus* as capacitâncias C7, C8 e C9 fornecem corrente para o ADuM de maneira equilibrada, como mostrado na Figura 84.

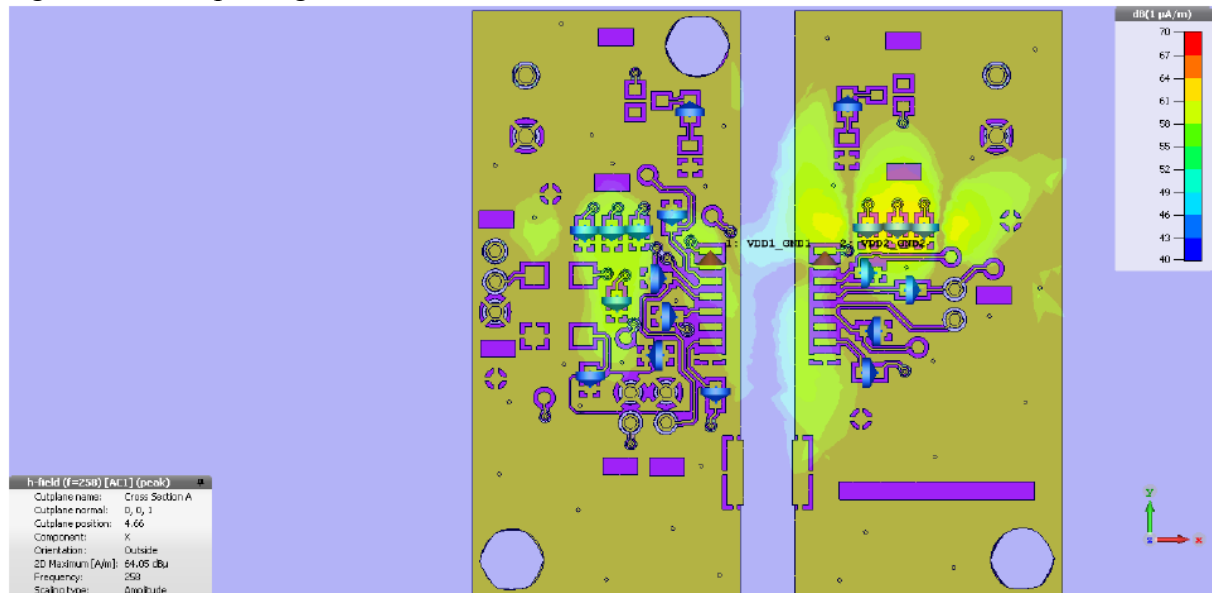
Figura 84 - Curvas de corrente das capacitâncias de desacoplamento no lado *Modbus*



Fonte: Autor, 2017

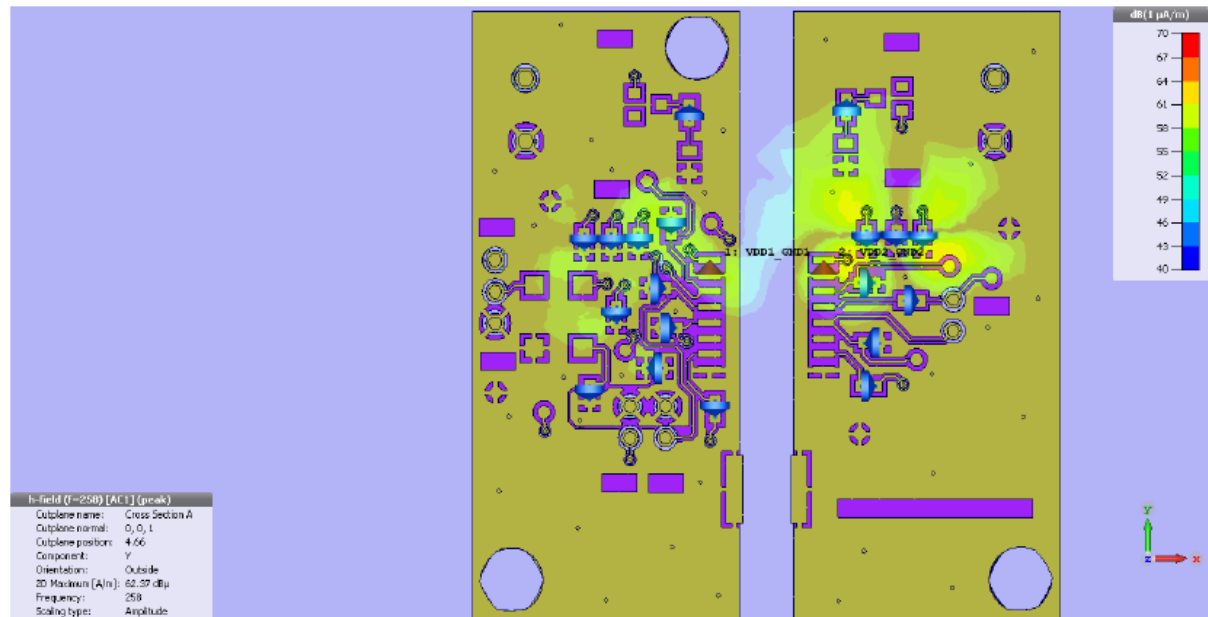
Com a ajuda de alguns monitores de campo magnético, é possível verificar as zonas que irradiam mais na placa de teste, como pode ser observado nas Figuras 85, 86, 87 e 88.

Figura 85 - Campo magnético Hx a 258 MHz



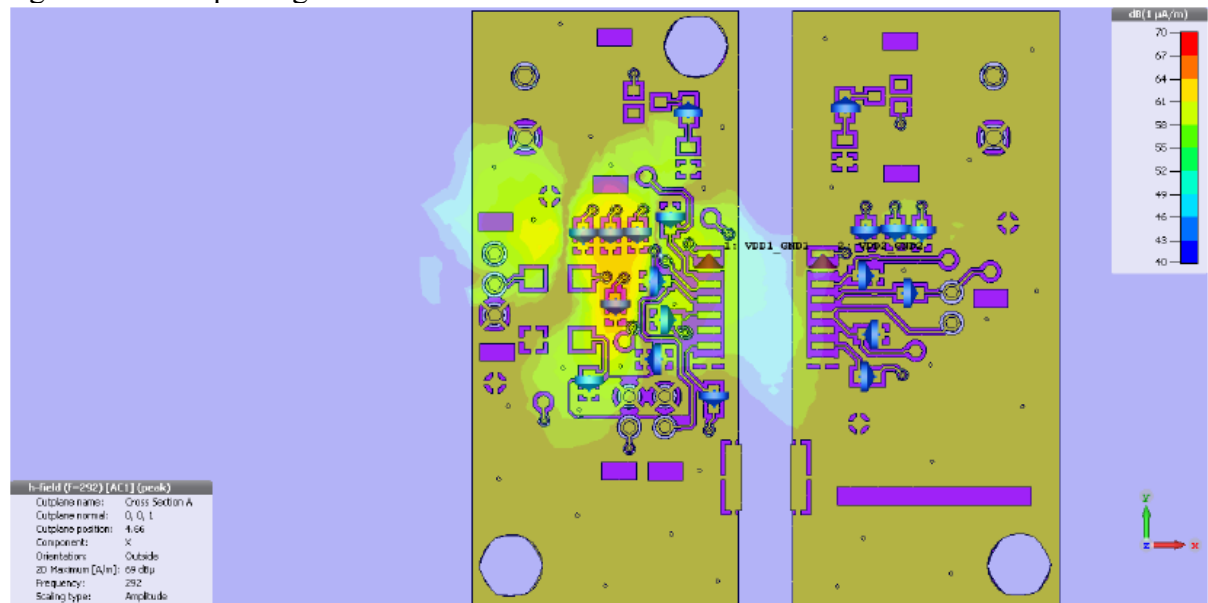
Fonte: Autor, 2017

Figura 86 - Campo magnético Hy a 258 MHz



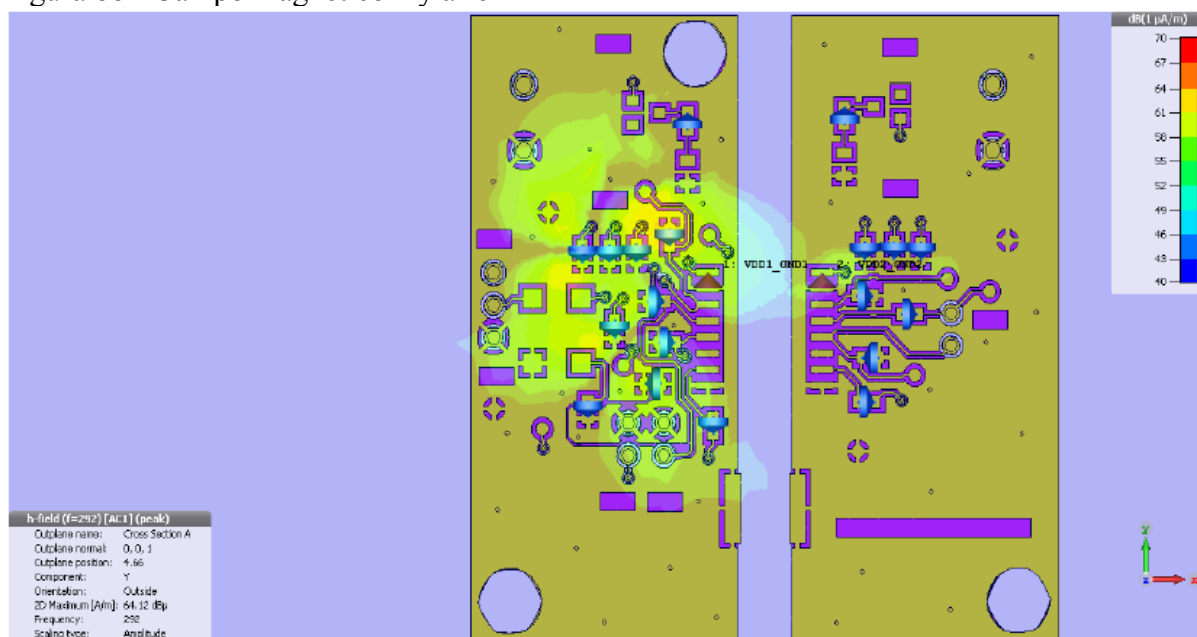
Fonte: Autor, 2017

Figura 87 - Campo magnético Hx a 292 MHz



Fonte: Autor, 2017

Figura 88 - Campo magnético Hy a 292 MHz



Fonte: Autor, 2017

A fim de verificar a precisão dos resultados obtidos, comparou-se esta simulação com os ensaios práticos em campo próximo realizados em parceria com a sociedade *Nexio*. Com isso, uma correlação poderá ser estabelecida entre as simulações e a prática, o que é essencial para maioria dos projetos.

4.8 ENSAIOS EM CAMPO PRÓXIMO

Em parceria com a sociedade *Nexio*, foram realizados alguns ensaios práticos com o intuito de se ter uma base de resultados concretos que permite fazer comparações com as simulações CST. Os testes foram realizados sobre o produto *Smartlink Modbus*, sem modificação do layout, com intuito de construir uma base de dados mais sólida e atualizada para futuros estudos e também sobre a placa de teste para o ADuM verificando assim a solução proposta na subseção 4.7.3. Os ensaios efetuados bem como os resultados obtidos são descritos nessa seção.

4.8.1 Contexto

O scanner de campo próximo da *Nexio* oferece diversas possibilidades de medição em emissão irradiada e em imunidade irradiada. Em um primeiro momento e para realizar uma prova de conceito, apenas as medições relacionadas a emissão irradiada foram utilizadas.

É importante ressaltar que o scanner de campo próximo não foi visado como uma ferramenta de pré-qualificação, o que permitiu ultrapassar o peso de certas campanhas de ensaio de EMC. Por outro lado, ele foi visado como uma ferramenta de design permitindo uma melhor compreensão dos problemas EMC.

Os resultados fornecidos pelo scanner permitirão realizar uma caracterização em banda larga em emissão irradiada do *Smartlink Modbus* e da placa de teste para o ADuM1301 e utilizar esses resultados para aperfeiçoar os modelos de simulação.

Enfim, é importante ressaltar que todas as medições foram realizadas de modo modular, o que significa que foram feitas só medições de amplitude e não de fase. Sendo assim, não é possível qualquer tentativa de dedução entre os fenômenos observados no campo próximo e os observados em campo distante.

A Figura 89 mostra o scanner de campo próximo utilizado durante os ensaios.

Figura 89 - Scanner de campo próximo *Nexio*



Fonte: Autor, 2017

4.8.2 Objetivo

Vários objetivos foram fixados tanto de ordem técnica quanto de ordem organizacional. O trabalho foi realizado principalmente em torno do *Smartlink Modbus* em razão dos problemas em emissão irradiada que ele apresentou durante sua fase de desenvolvimento, do trabalho já feito com o produto no *software* CST STUDIO SUITE.

Foram estabelecidas assinaturas deste produto na sua versão *Modbus* e da placa de teste para o ADuM1301.

4.8.3 Descrição de ensaios

Nesta seção, são descritos os ensaios que foram realizados sobre o produto *Smartlink Modbus* e sobre a placa de teste para o ADuM1301 durante dois dias de trabalho.

4.8.3.1 Ensaios sobre o produto *Smartlink Modbus*

Os ensaios sobre o *Smartlink Modbus* foram realizados de duas maneiras: sendo ele apenas alimentado, sendo ele solicitado por um equipamento que simula seu funcionamento. Este equipamento permite principalmente excitar o produto e detectar os erros de comunicação.

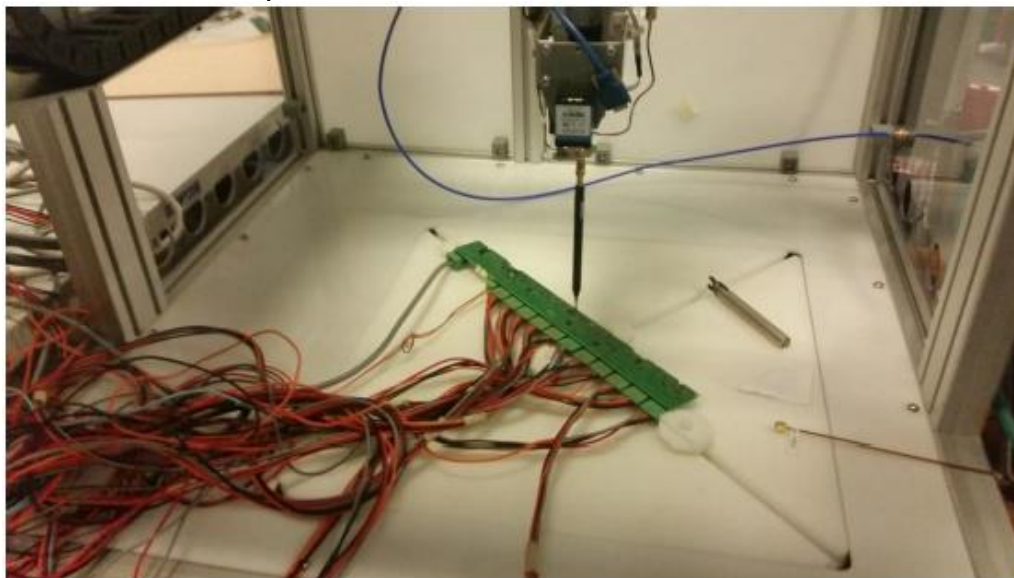
As medições foram realizadas em uma banda de frequência de [10 MHz – 1 GHz] e ao passo de 1 mm x 1 mm.

Quatro passos diferentes foram visados sobre o produto *Smartlink Modbus*, sempre na mesma banda de frequência e com o mesmo passo:

- Campo Magnético – *Smartlink* alimentado;
- Campo Magnético – *Smartlink* funcionando;
- Campo Elétrico – *Smartlink* alimentado;
- Campo Elétrico – *Smartlink* funcionando.

Um passo suplementar foi visado, que consiste em retirar a capacitância Y GND – GND e colocar três capacitâncias no lugar GND – *Modbus* – *Shield*. Estas medições são interessantes, pois permitem confrontar algumas hipóteses preventivas feitas em torno da análise EMC do produto, no entanto, não havia nenhum resultado anterior para utilizar como comparação. A Figura 90 mostra o produto *Smartlink Modbus* durante os ensaios.

Figura 90 – Ensaio sobre o produto *Smartlink Modbus*



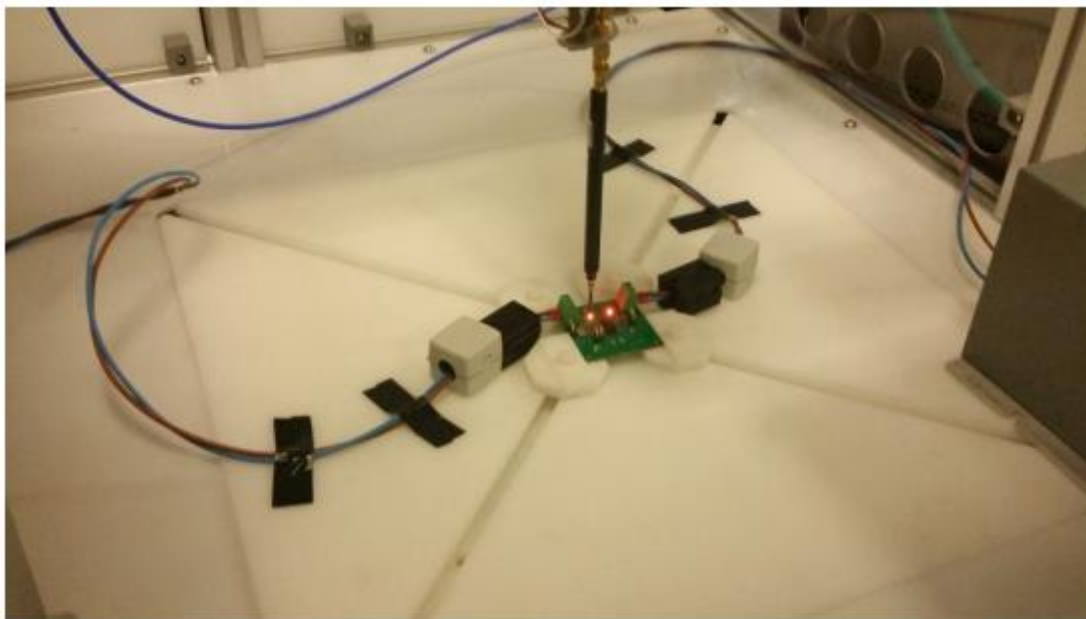
Fonte: Autor, 2017

4.8.3.2 Caracterização do componente ADuM1301

A caracterização do ADuM1301 através da placa de teste veio do estudo realizado sobre o *Smartlink Modbus* no CST STUDIO SUITE, que demonstrou que este componente é responsável em grande parte pela origem do ruído irradiado pelo produto final. O princípio dessa caracterização foi de extrair um comportamento preciso e realista do componente entre os planos de referência VDD e GND de uma parte à outra da isolação galvânica sobre a qual ele é montado.

A Figura 91 mostra a placa de teste para o ADuM1301 durante os ensaios.

Figura 91 – Ensaio sobre a placa de teste para o ADuM1301



Fonte: Autor, 2017

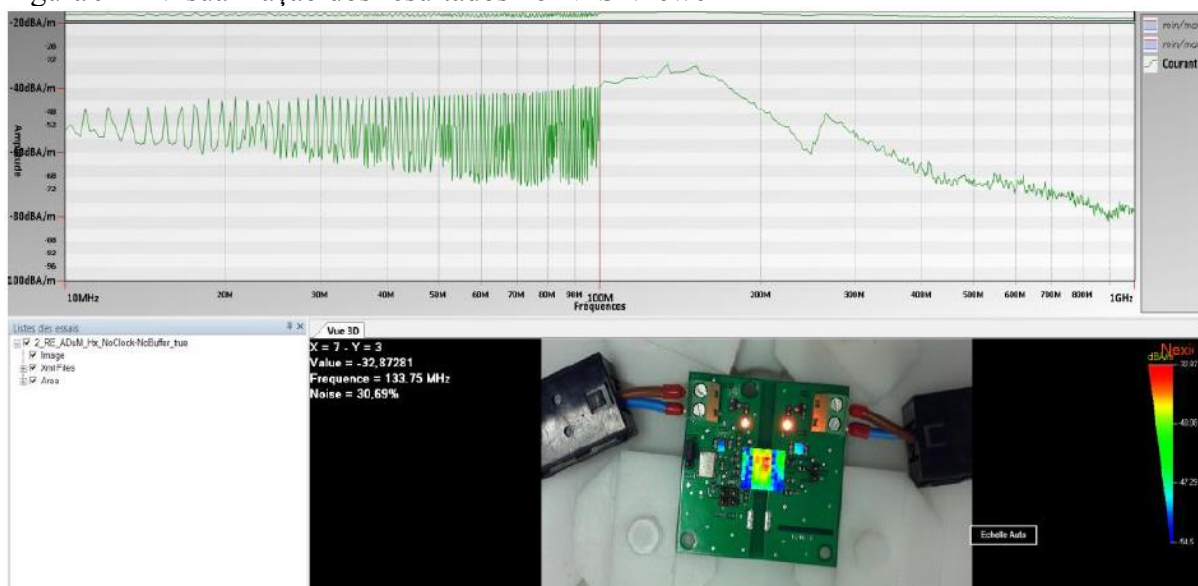
A caracterização da placa foi feita, em um primeiro momento, utilizando campo magnético, onde o foco principal foram os valores de corrente sobre as capacitâncias de desacoplamento. Além disso, uma caracterização em campo elétrico também foi feita, no entanto, para esta utilizou-se a placa inteira.

4.8.4 Comparação de resultados

Devido ao curto tempo de estágio, a comparação de resultados teve como objetivo, em primeiro momento, verificar a precisão dos resultados obtidos nas simulações CST. As caracterizações em banda larga, melhorias nos modelos de simulação e eventuais alterações no produto, poderão ser realizadas posteriormente pelos engenheiros da *Schneider Electric*.

Os resultados das simulações fornecidos pela sociedade *Nexio* vieram no formato **nfs**, portanto, para visualizá-los de forma simples e rápida utilizou-se o *software* NFS Viewer. A Figura 92 ilustra a leitura de um dos resultados.

Figura 92 - Visualização dos resultados no NFS Viewer



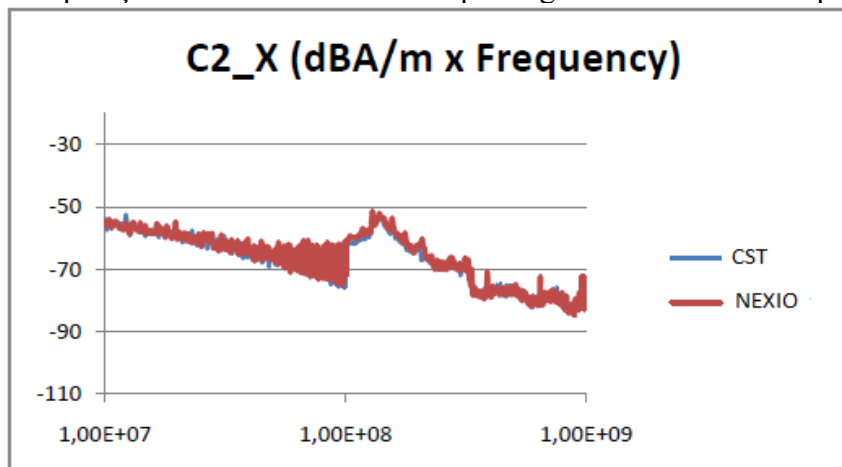
Fonte: Autor, 2017

Após abrir o arquivo dentro do NFS Viewer, é preciso apenas selecionar a zona da placa que se deseja ver a curva de campo eletromagnético. No entanto, o *software* é limitado pois não permite a sobreposição de curvas.

Além disso, os resultados CST são exportados em uma tabela ASCII que podem ser importados facilmente para o Excel. Sendo assim, escolheu-se importar os dados fornecidos pela sociedade e os resultados das simulações CST para o Excel, obtendo mais autonomia para trabalhar com os resultados.

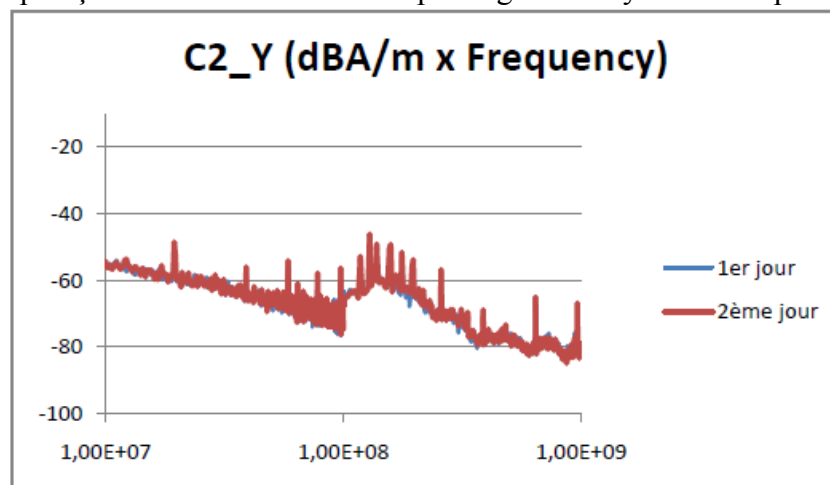
Como exemplo para verificação da precisão entre as simulações e os ensaios práticos tomou-se a medição do campo magnético sobre a capacitância C2 da placa de teste para o ADuM1301. As Figuras 93 e 94 ilustram a comparação entre a simulação e o ensaio prático.

Figura 93 - A comparação entre as curvas de campo magnético Hx sobre a capacitância C2



Fonte: Autor, 2017

Figura 94 - A comparação entre as curvas de campo magnético Hy sobre a capacitância C2



Fonte: Autor, 2017

Observou-se uma boa precisão entre a simulação e o ensaio prático. Quando se observa todos os pontos (800) de ambas as curvas, verifica-se as maiores diferenças não ultrapassam 4 dBA/m.

Devido à precisão dos resultados obtidos através destes ensaios, decidiu-se em um primeiro momento realizar um protótipo para o produto *Smartlink Modbus* utilizando a solução aplicada na placa de teste para o ADuM. Devido a confidencialidade dos dados e pelo fato do autor não possuir mais um vínculo empregatício com a empresa, os resultados não puderam ser anexados neste trabalho.

Além disso, a *Schneider Electric* optou por comprar uma licença do *software* CST STUDIO SUITE, pois verificou-se que através dele é possível identificar tendências e

problemas relacionados tanto a interferência quanto a compatibilidade eletromagnética nas etapas iniciais do projeto, economizando assim, tempo e dinheiro para empresa.

E por fim, um estudo está sendo realizado para analisar o custo-benefício da aquisição de um scanner de campo próximo da sociedade *Nexio*.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como propósito realizar um estudo sobre a compatibilidade eletromagnética em dispositivos de proteção, analisando sua importância e utilidade, bem como os principais problemas gerados quando a mesma é negligenciada e suas consequências.

Para estudo de caso de um dispositivo de proteção no domínio da EMC, foi escolhido o produto *Smartlink Modbus* com objetivo de mostrar um exemplo real de problema referente à EMC ocorrido em um produto industrial da *Schneider Electric* e de como o mesmo pode ser tratado, desde a identificação e caracterização da causa deste problema até a proposição de alternativas para solucioná-lo. Seus primeiros protótipos não passaram nos ensaios de emissão irradiada, devido ao pico de energia irradiada que ultrapassa o gabarito na frequência de 460 MHz. Para encontrar a fonte de energia que causa o problema nesta frequência, três abordagens foram estudadas: a alimentação comutada, o oscilador do microprocessador e o componente ADuM1301. Cada abordagem foi tratada separadamente e com uma metodologia diferente, o que permitiu explorar bem os recursos do *software* CST STUDIO SUITE.

Em termos de resultados, as simulações permitiram, para o caso do ADuM1301, encontrar a fonte do problema e trabalhar sobre algumas soluções para atenuar a energia irradiada pelo componente. Em seguida, uma placa de teste foi modelada para realizar uma caracterização em banda larga do mesmo. Além disso, ensaios práticos em campo próximo foram realizados sobre o *Smartlink Modbus* e a placa de teste em parceria com a sociedade *Nexio*. Isso permitiu comparar alguns resultados práticos com as simulações CST no Excel. Devido a positividade dos resultados obtidos, um protótipo foi criado aplicando a solução encontrada. Tudo isso levou a *Schneider Electric* a adquirir uma licença do *software* CST STUDIO SUITE e a estudar a possibilidade da aquisição de um scanner de campo próximo, mostrando assim, a preocupação que uma grande empresa possui em relação ao assunto tão complexo como esse.

Por tudo o que foi mencionado, percebe-se que a compatibilidade eletromagnética em dispositivos de proteção não pode ser negligenciada. Os problemas relacionados à EMC em dispositivos de proteção podem comprometer a vida útil dos equipamentos, a segurança da instalação e das pessoas. No entanto, devido a sua complexidade cada caso deve ter um tratamento específico.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Resolução nº 442, de 21 de julho de 2006. **Regulamento para certificação de equipamentos de telecomunicações quanto aos aspectos de compatibilidade eletromagnética.** Brasília, 2006. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2006/352-resolucao-442>>. Acesso em: 02 ago. 2016.

CALOY, Marcio Hugo. **A compatibilidade eletromagnética em equipamentos eletrônicos.** Gramado: Fundação de Ciência e Tecnologia, 2012. 51 slides, color. Disponível em: <http://www.cientec.rs.gov.br/upload/20121002152941compatibilidade_eletromagnetica_e_a_industria_eletroeletronica___marcio_hugo_caloy.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2016.

CASSIOLATO, César. **EMI: interferência eletromagnética em instalações industriais e muito mais.** Disponível em: <http://www.smar.com/brasil/artigostecnicos/newsletter/2014_07_15.html>. Acesso em: 02 ago. 2016.

CST. **CST studio suite.** Disponível em: <<https://www.cst.com/Products/CSTS2>>. Acesso em: 11 ago. 2016.

DELABALLE, Jacques. **EMC: electromagnetic compatibility.** Grenoble: Schneider Electric, 2001. Disponível em: <www.schneider-electric.com.br>. Acesso em: 02 ago. 2016.

ENGREY. **Cubículo SM6: solução compacta e segura para distribuição de média tensão.** 2016. Disponível em: <<http://www.engerey.com.br/blog/cubiculo-de-mt-sm6-solucao-compacta-e-segura-para-a-engenharia>>. Acesso em: 02 ago. 2016.

FREITAS, Luciana. Brasil busca por alinhamento às normas internacionais para compatibilidade eletromagnética: entenda como ocorrem as interferências ocasionadas por perturbações eletromagnéticas e conheça as principais normas relacionadas. **Lumière Electric**, São Paulo, v. 1, n. 146, p. 54-60, jun. 2010. Mensal. Disponível em: <http://www.jornaldainstalacao.com.br/index.php?id_secao=7>. Acesso em: 02 ago. 2016.

IBEC. **Apresentação do Laboratório de EMC & de Segurança.** Hortolândia: Instituto Brasileiro de Ensaio de Conformidade Ltda, 2015. 69 p. Disponível em: <<http://www.ibec.com.br/area-de-atuacao/laboratorio-de-emc-e-emi/>>. Acesso em: 08 ago. 2016.

LIMA, Thiago. **EMC: compatibilidade eletromagnética,** 2013. Disponível em: <<http://www.embarcados.com.br/emc-compatibilidade-eletromagnetica/>>. Acesso em: 02 ago. 2016.

RAIZER, Adroaldo. **Compatibilidade eletromagnética.** Florianópolis: UFSC, 2005. Disponível em: <<http://paginas.fe.up.pt/~ee05161/ficheiros/artigos/SlidesCEM-AdroaldoRaizer.pdf>>. Acesso em: 02 ago. 2016.

SCHNEIDER. **Sistema de comunicação acti9 smartlink modbus:** manual do utilizador. Grenoble: Schneider Electric Industries SAS, 2014. 128 p. Disponível em:

<<http://www.schneider-electric.com/products/br/bz/1600-dispositivos-modular-em-trilho-din/1630-supervisao-e-quadros-de-manobra-e-controle-acti-9/61356-acti9-smartlink/>>.
Acesso em: 02 ago. 2016.

WILLIAMS, Tim. **EMC for Product Designers**. 4. ed. Burlington: Newnes, 2007. 489 p.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ARMSTRONG, Keith. **EMC design techniques for electronic engineers**. United Kingdom: Nutwood Uk Ltd., 2010. 461 p.

ARMSTRONG, Keith. **EMC for printed circuit boards**: basic and advanced design layout techniques. United Kingdom: Nutwood Uk Ltd., 2007. 168 p.

DELABALLE, Jacques. **La CEM**: la compatibilité électromagnétique. France: Schneider Electric, 2001.

DORLIN, Flavien. **DES_06_A9C_Mctrl_product concept design**. France: Schneider Electric, 2011.

GROUP, Schaffner. **Basics in EMC and power quality**: introduction, annotations, applications. Switzerland: Schaffner Group, 2013. 53 p. Disponível em: <http://www.schaffner.com/fileadmin/media/downloads/brochure/Schaffner_Brochure_Basics_in_EMC_and_power_quality.pdf>. Acesso em: 18 mai. 2016.

KOUYOUMDJIAN, Ara. **Compatibilidade eletromagnetica**. São Paulo: Artliber, 1998. 184 p.

SCHNEIDER ELECTRIC INDUSTRIES SAS. **Système de communication acti 9 smartlink modbus**: manuel utilisateur. France, 2015.

WILLIAMS, Tim. **EMC for product designers**. 4. ed. Wareham: Newnes, 2007. 512 p.

ANEXO A – FUNÇÕES DO ACTI 9 SMARTLINK MODBUS

Configuração da comunicação Modbus

Funções do dispositivo Acti 9 Smartlink

Funções de verificação-controlo do aparelho Acti 9

Os produtos em questão são:

- iOF+SD24
- OF+SD24
- iACT24
- iATL24
- Reflex iC60
- RCA iC60

Função de aquisição do estado das entradas:

- Estado aberto/fechado (entrada I1 da interface TI24)
- Sinal de disparo (entrada I2 da interface TI24) para os aparelhos de protecção

Função de controlo de abertura e fecho:

Cada canal do Acti 9 Smartlink oferece uma saída (Q):

- A saída Q é definida para 1 forçando o bit do canal em questão para 1 no registo de activação (ON). O bit de registo do comando Modbus é automaticamente definido para 0 pelo Acti 9 Smartlink assim que a ordem tiver sido enviada para a saída Q.
- A saída Q é definida para 0 forçando o bit do canal em questão para 1 no registo de desactivação (OFF). O bit de registo do comando Modbus é automaticamente definido para 0 pelo Acti 9 Smartlink assim que a ordem tiver sido enviada para a saída Q.

Função de gestão do ciclo de vida da instalação:

- Acti 9 Smartlink armazena o número de mudanças de estado (ou de número de operações) para os aparelhos de controlo e de protecção, o que permite estimar o desgaste desses aparelhos. Para tal, Acti 9 Smartlink conta as mudanças de estado da entrada I1 (em flanco descendente) para cada canal.
- O Acti 9 Smartlink armazena o número de disparos do aparelho de protecção, realçando assim falhas na instalação eléctrica. Para tal, Acti 9 Smartlink conta as mudanças de estado da entrada I2 (em flanco descendente) para cada canal.
- O Acti 9 Smartlink armazena o tempo total em que os produtos de controlo estão fechados, o que permite estimar o desgaste em cargas controladas. Para tal, Acti 9 Smartlink conta as mudanças de estado da entrada I1 (estado OFF) para cada canal.
- A reposição destas informações (número de mudanças de estado, tempo de funcionamento) é possível, bem como a memorização da data de inicialização.

Funções de verificação-controlo de aparelhos fora da gama Acti 9

Função de aquisição do estado das entradas:

Todos os outros tipos de aparelhos oferecem I/O de baixo nível (24 VCC) podem ser ligados às 22 entradas e às 11 saídas oferecidas pelo Acti 9 Smartlink. Cada canal do Acti 9 Smartlink oferece 2 entradas (I1 e I2).

Função de comando:

Cada canal Acti 9 Smartlink oferece uma saída (Q).

- A saída Q é definida para 1 forçando o bit do canal em questão para 1 no registo de activação (ON). O bit de registo do comando Modbus é automaticamente definido para 0 pelo Acti 9 Smartlink assim que a ordem tiver sido enviada para a saída Q.
- A saída Q é definida para 0 forçando o bit do canal em questão para 1 no registo de desactivação (OFF). O bit de registo do comando Modbus é automaticamente definido para 0 pelo Acti 9 Smartlink assim que a ordem tiver sido enviada para a saída Q.

Funções de contagem

Schneider Electric medidores de energia com saída de impulsos:

- iEM2000T (o peso do impulso equivale a 10)
- iEM3110 (o peso do impulso pode ser configurado)
- iEM3155 (o peso do impulso pode ser configurado)
- iEM3210 (o peso do impulso pode ser configurado)
- iEM3255 (o peso do impulso pode ser configurado)

Acti 9 Smartlink calcula o consumo de energia e a potência média entre 2 impulsos.

Energia consumida = Número de impulsos contados × peso do impulso

Potência média entre 2 impulsos = $(3600 \times \text{peso do impulso})/t$; o resultado é expresso para uma hora.

Com t, o tempo em segundos entre os 2 últimos impulsos recebidos.

Outros tipos de medidores com saída de impulsos:

- medidores de água, de gás, etc.
- Qualquer tipo de medidor cuja saída de impulsos respeite a norma IEC 62053-21 (impulso mínimo 30 ms).

O peso do impulso pode ser configurado.

O Acti 9 Smartlink calcula o consumo e o fluxo médio entre 2 impulsos.

Consumo = Número de impulsos contados × peso do impulso

Fluxo médio = $(3600 \times \text{peso do impulso})/t$; o resultado é expresso para uma hora.

Com t, o tempo em segundos entre os 2 últimos impulsos recebidos.

Os dados de potência média (ou fluxo médio) entre 2 impulsos são repostos para 0:

- Após a duração $d = 3 \times t$; se $3 \times t$ for inferior a 5 segundos, então, a duração d é igual a 5 segundos
- Com t, o tempo em segundos entre os 2 últimos impulsos recebidos.
- Após 24 horas sem impulsos
- Após uma perda da tensão de entrada/saída de 24 VCC

A cada 10 minutos, os valores do medidor são guardados na memória EEPROM.

Sempre que mudar, o valor de cada impulso é guardado instantaneamente na memória EEPROM.

As datas de definição de parâmetros do medidor são guardadas instantaneamente na memória EEPROM.

Comportamento do sistema em caso de perda da alimentação de 24 VCC

Até uma duração de 10 ms, Acti 9 Smartlink é insensível às oscilações de tensão. Se a tensão for inferior a 19,2 VCC (24 VCC - 20%) durante mais de 10 ms, o Acti 9 Smartlink passa para o modo degradado:

- Todas as saídas são repostas a zero. Contudo, os auxiliares de controlo do Acti 9 (iACT24, iATL24, Reflex iC60, RCA iC60) distinguem o evento de perda de tensão por ordem. Não alteram, portanto, o estado.
- O tempo entre 2 operações de escrita na memória EEPROM é de 10 min. Os dados anteriormente escritos nesta memória não são alterados aquando da perda de tensão. Os valores guardados têm, portanto, no máximo, 10 min.
- Os valores de potência (ou de fluxo) calculados não são guardados. São repostos a zero.

Comportamento do sistema aquando da activação ou retorno da fonte de alimentação de 24 VCC

NOTA: A fonte de alimentação do Acti 9 Smartlink deve ter entre 19,2 VCC (24 VCC - 20%) e 28,8 VCC (36 VCC - 20%).

- As saídas mantêm-se a zero.
- Os auxiliares de controlo Acti 9 (iACT24, iATL24, Reflex iC60, RCA iC60) não mudam o estado uma vez que operam conforme o flanco ascendente ou descendente.
- Os dados armazenados na memória EEPROM são escritos nos registos correspondentes (peso de impulsos, contadores de eventos, contadores de impulsos, contadores de tempo de funcionamento, datas de reposição de contadores). Os valores nos registos são, como tal, os da última vez que a memória EEPROM foi guardada. Esses valores podem ser diferentes dos últimos valores lidos nos registos antes do corte de alimentação.

NOTA: Se os selectores rotativos do Acti 9 Smartlink forem definidos para zero durante a perda de tensão, o Acti 9 Smartlink é reposto quando a alimentação voltar. Para mais informações, consulte Reposição com parâmetros de fábrica ([ver página 60](#)).

Funções Modbus

Descrição geral

O protocolo Modbus propõe funções que permitem ler ou escrever dados na rede Modbus. Este protocolo oferece igualmente funções de diagnóstico e de gestão de rede.

Apenas as funções Modbus geridas pelo aparelho Acti 9 Smartlink são descritas aqui.

Tabela das funções Modbus

A tabela seguinte indica o detalhe das funções suportadas pelos aparelhos Acti 9 Smartlink:

Código função	Código subfunção	Nome da função
01	–	Leitura de n bits de saída ou internos
02	–	Leitura de n bits de entrada
03	–	Leitura de n palavras de saída ou internas
05	–	Escrita de 1 bit
06	–	Escrita de 1 palavra
08	(1)	Diagnóstico Modbus
15	–	Escrita de n bits
16	–	Escrita de n palavras
43	14 ⁽²⁾	Leitura identificação
	15 ⁽³⁾	Leitura da data e da hora
	16 ⁽⁴⁾	Escrita da data e da hora
100	4 ⁽⁵⁾	Leitura de n palavras não contíguas com $n \leq 100$. NOTA: Graças à função de leitura de registos de reposição distribuídos, o utilizador pode: - evitar ler um grande bloco de palavras contíguas quando apenas algumas palavras são necessárias. - evitar uma utilização múltipla da função 3, a fim de ler palavras não contíguas.
(1) Para mais detalhes, ver o anexo que descreve a função 8 (ver página 112) (2) Para mais detalhes, ver o anexo que descreve a função 43-14 (ver página 113) (3) Para mais detalhes, ver o anexo que descreve a função 43-15 (ver página 115) (4) Para mais detalhes, ver o anexo que descreve a função 43-16 (ver página 116) (5) Para mais detalhes, ver o anexo que descreve a função 100-4 (ver página 117)		

NOTA: Para mais informações, uma descrição detalhada do protocolo Modbus está disponível em www.modbus.org.



ANEXO B – DATASHEET LT3437

LT3437

ELECTRICAL CHARACTERISTICS The ● denotes the specifications which apply over the -40°C to 125°C temperature range, otherwise specifications are at $T_J = 25^{\circ}\text{C}$. $V_{IN} = 12\text{V}$, $\text{SHDN} = 12\text{V}$, $\text{BIAS} = 5\text{V}$, $\text{FB} = 1.25\text{V}$, $C_{SS}/\text{SYNC} = 0\text{V}$ unless otherwise noted.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNITS
I _{VIN}	Supply Quiescent Current	BIAS = 0V, FB = 1.15V, V _C = 0.8V, SYNC = 2V			1.35	2	mA
		BIAS = 5V, FB = 1.15V, V _C = 0.8V, SYNC = 2V			0.475	1	mA
	Minimum BIAS Voltage (Note 5)				2.7	3.15	V
I _{BIAS}	BIAS Sleep Current (Note 4)		●		110	180	μA
I _{BIAS}	BIAS Quiescent Current	SYNC = 2V			0.75	1	mA
	Minimum Boost Voltage (Note 6)	I _{SW} = 500mA			1.8	2.5	V
	Input Boost Current (Note 7)	I _{SW} = 0.5A			11	16	mA
		I _{SW} = 0.25A			8	13	mA
V _{REF}	Reference Voltage (V _{REF})	3.3V < V _{VIN} < 80V	●	1.225	1.25	1.275	V
I _{FB}	FB Input Bias Current				50	200	nA
	EA Voltage Gain (Note 8)				900		V/V
	EA Voltage g _m	dI(V _C)= ±10μA			650		μMho
	EA Source Current	FB = 1.15V		15	35	55	μA
	EA Sink Current	FB = 1.35V		15	30	55	μA
	V _C to SW g _m				1		A/V
	V _C Switching Threshold	V _{SYNC} = 2V			500		mV
	V _C High Clamp			1.5	1.75	2.1	V
I _{PK}	SW Current Limit		●	500	650	900	mA
SW V _{CESAT}	Switch Saturation Voltage (Note 9)	I _{SW} = 250mA	●		200	400	mV
		I _{SW} = 500mA	●		400	800	mV
	Switching Frequency		●	165	200	240	kHz
	Maximum Duty Cycle				95		%
	Minimum SYNC Amplitude				1.5	2	V
	SYNC Frequency Range			240		700	kHz
	SYNC Input Impedance				50		kΩ
I _{CSS}	C _{SS} Current Threshold (Note 10)	FB = 0V		4	10	16	μA

ELECTRICAL CHARACTERISTICS The ● denotes the specifications which apply over the -40°C to 140°C temperature range, otherwise specifications are at $T_J = 25^{\circ}\text{C}$. $V_{IN} = 12\text{V}$, $\text{SHDN} = 12\text{V}$, $\text{BIAS} = 5\text{V}$, $\text{FB} = 1.25\text{V}$, $C_{SS}/\text{SYNC} = 0\text{V}$ unless otherwise noted.