

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

**Vanessa Borsato de Souza Lima**

**OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO DE  
AMPLIFICADORES DE RADIOFREQUÊNCIA  
BANDA LARGA: UMA ABORDAGEM  
EXPERIMENTAL**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para obtenção do título de *Mestre em Engenharia de Produção*.

**Orientador:** Prof. Pedro Paulo Balestrassi, Dr.

**Co-orientador:** Prof. Anderson Paulo de Paiva, Dr.

**Itajubá, Julho de 2010**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –  
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB\_6/1700

L732o

Lima, Vanessa Borsato de Souza

Otimização do desempenho de amplificadores de radiofrequên\_  
cia banda larga: uma abordagem experimental / Vanessa Borsato de  
Souza Lima. -- Itajubá, (MG) : [s.n.], 2010.

121 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Paulo Balestrassi.

Coorientador: Prof. Dr. Anderson Paulo de Paiva.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Amplificador de radiofrequência (RF). 2. Intermodulação. 3.  
Confiabilidade. 4. DOE. I. Balestrassi, Pedro Paulo, orient. II. Pai\_  
va, Anderson Paulo de, coorient. III. Universidade Federal de Ita\_  
jubá. IV. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

**Vanessa Borsato de Souza Lima**

**OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO DE  
AMPLIFICADORES DE RADIOFREQUÊNCIA  
BANDA LARGA: UMA ABORDAGEM  
EXPERIMENTAL**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 06 de julho de 2010, conferindo ao autor o título de *Mestre em Engenharia de Produção*.

**Banca Examinadora:**

Prof. Pedro Paulo Balestrassi, Dr. (Orientador)

Prof. Prof. Anderson Paulo de Paiva, Dr.

Prof. Prof. Maurício Silveira, Dr.

**Itajubá, Julho de 2010**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais Souza e Cidinha, aos meus irmãos Bruno e Érica, e aos meus amigos, pelo incentivo e cooperação, pelo carinho e compreensão. Além de terem me apoiado durante todo o curso, compartilharam comigo os momentos difíceis e também as alegrias nesta etapa que, com a graça de Deus, está sendo vencida.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos professores do curso, especialmente ao professor Pedro, pela contribuição e orientação deste trabalho, aos colegas de turma, à equipe da UNIFEI e a empresa Linear Equipamentos Eletrônicos SA que gentilmente cedeu seus laboratórios para o levantamento dessas medidas.

# SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA</b>	iv
<b>AGRADECIMENTOS</b>	v
<b>SUMÁRIO</b>	vi
<b>RESUMO</b>	vii
<b>ABSTRACT</b>	viii
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	ix
<b>LISTA DE TABELAS</b>	x
<b>LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS</b>	xi
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1. Espectro de radiofrequência	14
1.2. Eficiência energética	20
1.3. Justificativa e objetivo	21
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>25</b>
2.1. Processo de manufatura e avaliação de amplificadores de RF	25
2.2. Respostas do processo	27
2.2.1. Intermodulação de saída	27
2.2.2. Eficiência	29
2.3. Fatores	30
2.3.1. Corrente de polarização	31
2.3.2. Classes de operação	32
2.3.3. Potência e intermodulação de entrada	33
2.3.4. Faixa de frequência ou canal de operação	36
2.3.5. Temperatura de operação	37
2.3.6. Montadora manual	39
2.3.7. Ruído na alimentação DC	40
2.3.8. Tipo do transistor	40
2.3.9. Linearização	41
2.3.9.1. Realimentação negativa	42
2.3.9.2. <i>Feedforward</i>	43
2.3.9.3. Pré-distorção	44
2.3.9.4. LINC	45
<b>3. DESENVOLVIMENTO</b>	<b>47</b>
3.1. Descrição da abordagem de pesquisa utilizada	47
3.2. Experimentos exploratórios	54
3.3. Metodologia de superfície de resposta	59
3.4. Experimentos confirmatórios	70
<b>4. CONCLUSÕES</b>	<b>75</b>
<b>APÊNDICE A</b>	<b>81</b>
<b>APÊNDICE B</b>	<b>109</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>116</b>
<b>BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR</b>	<b>120</b>

## RESUMO

Neste trabalho, buscou-se elaborar um arranjo experimental eficiente para avaliar o comportamento de amplificadores de radiofrequência (RF) de potência em aplicações de telecomunicações. Uma estratégia experimental foi empregada resultando na otimização de um conjunto de fatores responsáveis pelo aumento da linearidade e eficiência geral do amplificador durante o processo produtivo, reduzindo com isto as intermodulações geradas e a interferência em serviços adjacentes. Estes resultados permitiram a manufatura de amplificadores banda larga de alta eficiência, garantindo assim maior produtividade e confiabilidade. Os fatores analisados através da metodologia de superfície de resposta foram a corrente de polarização dos transistores, a potência de entrada e a frequência de operação. Os valores ótimos obtidos para estes fatores foram 8,99A para a corrente, -4,04dBm para a potência de entrada e 42 para o canal de operação. Com estes valores ótimos para os fatores de entrada, foi possível obter uma intermodulação de -49,41dB e uma eficiência de 40,27%, refletindo uma melhoria de desempenho se comparado com o cenário inicial.

## **ABSTRACT**

*This paper develops an efficient experimental arrangement to evaluate radio frequency (RF) power amplifiers behavior for telecommunications applications. An experimental strategy was employed resulting in the optimization of a number of factors responsible for increasing the overall efficiency and linearity of amplifiers during production process, reducing total intermodulation and interference in adjacent channels. These results enabled broadband amplifiers manufacturing with high efficiency, thus ensuring increased productivity and reliability. The factors analyzed by response surface methodology were the bias current of the transistors, the input power and operating frequency. The optimal values obtained for this factor were 8.99 A for the current, -4.04 dBm for input power and 42 for the channel operation. With these optimum values for the input factors, it was possible to obtain an intermodulation of -49.41 dB and an efficiency of 40.27%, reflecting an improved performance compared to the initial scenario.*



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> – Um esquema eletrônico de um amplificador de potência	26
<b>Figura 2.2</b> – Diagrama em blocos de um transmissor de RF	27
<b>Figura 2.3</b> – Intermodulação de duas portadoras após amplificação	28
<b>Figura 2.4</b> – Máscara para intermodulação exigida pelo FCC para televisão digital	29
<b>Figura 2.5</b> – Conceito de eficiência	30
<b>Figura 2.6</b> – Efeito da polarização no sinal de entrada a ser amplificado	31
<b>Figura 2.7</b> – <i>Classe A x Classe AB</i>	33
<b>Figura 2.8</b> – Variação do ganho típica para um amplificador na faixa de UHF	34
<b>Figura 2.9</b> – Curva de ganho para um amplificador qualquer	35
<b>Figura 2.10</b> – Diferença entre harmônicos, espúrios e intermodulação	36
<b>Figura 2.11</b> – Resposta em frequência comum em circuitos amplificadores	37
<b>Figura 2.12</b> – Temperatura da junção <i>versus</i> vida útil	38
<b>Figura 2.13</b> – Resultados obtidos após o uso de técnica de linearização	42
<b>Figura 2.14</b> – Diagrama em blocos de um sistema com realimentação negativa	43
<b>Figura 2.15</b> – Linearização por <i>feedforward</i>	44
<b>Figura 2.16</b> – Resposta de um sistema de linearização por pré-distorção	45
<b>Figura 2.17</b> – Amplificação linear baseada na técnica LINC	46
<b>Figura 2.18</b> – Fatores envolvidos e sua relação com o modelo físico do amplificador	46
<b>Figura 3.1</b> – Sequência adotada na pesquisa	53
<b>Figura 3.2</b> – Processo produtivo do amplificador de RF de potência sujeito a otimização	54
<b>Figura 3.3</b> – Dados históricos para intermodulação e eficiência	55
<b>Figura 3.4</b> – Processo de medidas	57
<b>Figura 3.5</b> – Análise dos efeitos principais	58
<b>Figura 3.6</b> – Experimento central composto com dois fatores	61
<b>Figura 3.7</b> – Gráfico de superfície e resíduos para intermodulação e eficiência	67
<b>Figura 3.8</b> – <i>Desirability</i> de Derringer	68
<b>Figura 3.9</b> – Algumas formas da função <i>Desirability</i>	69
<b>Figura 3.10</b> – <i>Desirability</i> de Derringer e Suich	70
<b>Figura 3.11</b> – Resultados após a otimização para a eficiência	74
<b>Figura 3.12</b> – Resultados após a otimização para a intermodulação	74

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 3.1</b> – Análise exploratória dos fatores potenciais influentes no processo	55
<b>Tabela 3.2</b> – Respostas esperadas	56
<b>Tabela 3.3</b> – Matriz de Plackett-Burman	56
<b>Tabela 3.4</b> – Decisão sobre os fatores de estudo a partir do DOE de Plackett-Burman	58
<b>Tabela 3.5</b> – Fatores e níveis do estudo experimental	61
<b>Tabela 3.6</b> – Matriz de experimento e respostas	62
<b>Tabela 3.7</b> – Análise estatística para Intermodulação	65
<b>Tabela 3.8</b> – Análise estatística para Eficiência	65
<b>Tabela 3.9</b> – Experimento de confirmação para eficiência	72
<b>Tabela 3.10</b> – Experimento de confirmação para intermodulação	72
<b>Tabela 3.11</b> – Tabela de fatores ótimos para eficiência	73
<b>Tabela 3.12</b> – Tabela de fatores ótimos para intermodulação	73

## LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

3G	Terceira Geração da telefonia móvel
4G	Quarta Geração da telefonia móvel
AM	<i>Amplitude Modulation</i>
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
B	Largura de faixa de 3 dB do ruído, em Hz
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BGA	<i>Ball Grid Array</i>
BJT	Transistor de Junção Bipolar
CCD	<i>Central Composite Design</i>
CTQ	<i>Critical to Quality</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DMAIC	<i>Define, Measure, Analyze, Improve and Control</i>
DOE	<i>Design of Experiments</i>
EUA	Estados Unidos da America
ERB	Estação Radio Base
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
GaAs FET	<i>Gallium Arsenide field-effect transistor</i>
$G_M$	Transcondutância
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
IGFET	<i>Insulated-Gate Field Effect Transistor</i>
IMD	Intermodulação
$IP_3$	<i>Third-order intercept point</i>
ISDB-T <sub>B</sub>	<i>Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial for Brazil</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>

JFET	<i>Junction Field Effect Transistor</i>
K	Constante de Boltzman
LDMOS	<i>Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor</i>
LIN	Linearizado
LINC	<i>Linear amplification using nonlinear components</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
MPEG	<i>Motion Picture Experts Group</i>
N	Potência de ruído
NF	<i>Noise figure</i> ou Figura de ruído
NPN	Transistor montado justapondo-se uma camada N, uma P e outra N
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
OMC	Organização Mundial do Comércio
PA	<i>Power Amplifier</i>
PAR	<i>Peak to Average Ratio</i>
PNP	Transistor montado justapondo-se uma camada P, uma N e outra P
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
RF	Radiofrequência
T	Temperatura absoluta em Kelvin
TIA	<i>Telecommunications Industry Association</i>
$T_J$	Temperatura da junção
TV	Televisão
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
WIMAX	<i>Worldwide interoperability for microwave access</i>
WRC	<i>World Radio Conferences</i>

# Capítulo 1

## 1. Introdução

As grandes economias vêm se concentrando durante muitos anos na implantação de redes de banda larga e serviços de comunicações digitais como uma questão crítica para a indústria de comunicações e como um grande estímulo das economias nacionais e globais. A implantação de redes de banda larga de próxima geração irá trazer grandes avanços na educação, saúde, trabalho a distância (*home office*), comércio eletrônico, segurança pública e privada. Estas alternativas irão equipar as pessoas com as ferramentas necessárias para competir ao longo do século 21, tornando-as mais produtivas, aumentando os seus padrões de vida e reforçando a segurança econômica e física. Os benefícios da banda larga serão possíveis somente se esta for largamente disponibilizada e dentro de um período razoável de tempo.

Além disto, as novas tecnologias como a televisão digital, o rádio digital, os aparelhos celulares com cada vez mais recursos e as cidades digitais representam uma demanda crescente para a implantação de uma infra-estrutura adequada, de qualidade e com baixos custos para suportar tal demanda. Esta infra-estrutura envolve diversos tipos de equipamentos como cabos coaxiais, antenas, codificadores, transmissores de radiofrequência, links em microondas, conectores, torres, abrigos, estabilizadores de tensão, entre outros. Para que a implantação final seja feita com qualidade, cada um destes elementos precisa, por si só, atender a requisitos mínimos de forma confiável.

Este trabalho abordará um dos elementos mais relevantes desta cadeia: os equipamentos de transmissão em radiofrequência (RF). Diante do exposto, os dois pilares que motivaram esta dissertação são descritos abaixo e detalhados na seqüência:

1. Uso racional do espectro de radiofrequência de tal forma a viabilizar um maior número de novas tecnologias com rapidez, qualidade e gerando retorno positivo para a economia.
2. Maior eficiência energética para os dispositivos transmissores que provêm acesso as comunicações digitais e telecomunicações, como resultado da preocupação com o correto uso dos recursos naturais do país.

## 1.1 Espectro de radiofrequência

De acordo com a associação das indústrias de telecomunicações dos EUA (TIA – *Telecommunications Industry Association*), a receita no mercado americano de *wireless* em 2005 foi de \$174,7 bilhões de dólares. Quase dois terços da população americana já haviam adquirido um serviço *wireless* e 88% pretendia adquirir um novo serviço até o ano de 2009 (JEONG, 2006). Embora os serviços de voz via celular já estivessem bem disseminados, a demanda por mais serviços e maior capacidade de tráfego de dados fez com que este mercado continuasse a se desenvolver, culminando nas novas tecnologias de transmissão como *3G* (terceira geração da telefonia móvel), *4G* (quarta geração da telefonia móvel) e *Wimax* (*worldwide interoperability for microwave access*). Além disso, outras tecnologias apareceram como *LTE* (*long term evolution*), televisão e rádios digitais. Em outras palavras, os serviços banda larga para voz, dados e vídeo se tornaram disponíveis em qualquer lugar, a qualquer momento e a um preço acessível.

Uma vez que o espectro de RF está bastante saturado e com poucas frequências restantes, estas novas tecnologias estão utilizando modulações altamente eficientes em termos de ocupação de banda e capacidade de transporte de dados. Estas modulações, em sua maioria do tipo *QAM* (*quadrature amplitude modulation*) ou *OFDM* (*orthogonal frequency-division multiplexing*), trazem uma grande economia de espectro, porém, dificultam a construção dos sistemas de transmissão por exigirem projetos mais eficientes, principalmente dos amplificadores de potência.

Devido ao comportamento não linear dos dispositivos de potência usados na transmissão de sinais digitais e as metas estabelecidas mundialmente para que as transmissões passem de analógica para digital em curto espaço de tempo, surge a necessidade de um estudo mais detalhado sobre o assunto. Atendendo a estas exigências, um número muito grande de pesquisas envolvendo modelos não lineares vem sendo desenvolvido em muitos laboratórios e institutos de pesquisa, ao redor do mundo (SILVA, 2006). Este novo cenário vem forçando a indústria

fabricante de equipamentos de transmissão a desenvolver equipamentos que atendam às novas regulamentações, cada vez mais restritivas, resultando em equipamentos de maior qualidade, maior confiabilidade (operação 24 horas por dia, 7 dias por semana), mas sem aumento de custos, tanto no processo de manufatura quanto para o usuário final. Dada a complexidade dos pontos citados acima, a qualidade dos equipamentos de transmissão passa a ser uma preocupação constante e recorrente para que se possa atender de forma satisfatória a todos os requisitos. E sendo o amplificador de potência o elemento chave de qualquer sistema de transmissão, esse passa a ser o foco das atenções.

Nos últimos anos, as modulações digitais vêm ganhando destaque como o modelo mais eficiente e confiável de viabilizar as telecomunicações. Assim como em outros sistemas de comunicação, o elemento mais crítico e dispendioso nos transmissores para sinais digitais é o amplificador de RF de potência. Uma das principais preocupações no projeto de amplificadores de RF de potência é a não linearidade do mesmo, que pode degradar a qualidade do sinal transmitido, aumentando a taxa de erro de bit (*BER – Bit Error Rate*) e a interferência em canais adjacentes. O controle da não-linearidade, também chamada de *spectrum regrowth*, é especificado por diversos órgãos regulamentadores. Tradicionalmente, a não linearidade de um amplificador é descrita usando o ponto de interseção de terceira ordem ( $IP_3$  – *third-order intercept point*). Em experimentos e análises, descobriu-se que, em alguns casos, usar apenas o  $IP_3$  não é preciso o suficiente para descrever o *spectrum regrowth*, especialmente quando a intermodulação de quinta ordem é relativamente significativa comparada com a intermodulação de terceira ordem. Quantitativamente, considerando a literatura disponível atualmente, não há uma relação explícita ou expressão que relacione os níveis de emissão fora da banda e a descrição tradicional da não-linearidade do amplificador operando com sinais digitais. O que se dispõe são os dados levantados experimentalmente para cada sinal de interesse. A falta de tal relação traz dificuldades para os projetistas de amplificadores no momento da escolha dos componentes a serem utilizados (LIU *et al*, 2001). Estes tópicos serão detalhados no Capítulo 2.

A linearidade em amplificadores de RF de potência tem sido um dos requisitos mais importantes nos últimos anos para as diversas aplicações existentes em telecomunicações, dada a escassez de espectro para atender estas demandas em acentuado crescimento. Outro requisito de extrema importância é a eficiência elétrica de tais elementos, uma vez que o consumo de energia é um ponto bastante relevante para o cliente no momento de decisão da compra. Para aplicações de *handset*, alta linearidade com baixo consumo de potência também é muito importante (LEE, 2000). Estes dois requisitos básicos para qualquer amplificador – linearidade e eficiência – são afetados e controlados por diversos fatores, os quais agem direta ou indiretamente no resultado

final obtido. Isto implica desde o correto atendimento às especificações e critérios de qualidade, até defeitos que levarão ao mau funcionamento, falhas intermitentes ou até falhas generalizadas, que culminarão, muitas vezes, na queima de componentes.

Acredita-se que a gestão prospectiva do espectro de radiofrequências é essencial para a meta de tornar os serviços de telecomunicações acessíveis às pessoas e garantir que o público obtenha o máximo benefício de seu uso. O espectro de radiofrequências é um recurso finito, que pode acomodar apenas um número limitado de usuários simultâneos. Esta limitação exige um planejamento e gestão cuidadosos a fim de maximizar o seu valor para os serviços públicos e privados (SGRIGNOLI, 2003).

Ouvir a voz do mercado a respeito das novas tecnologias em estudo ou implantação permite um melhor planejamento para o uso do espectro de frequências. Um aumento da confiança nas forças de mercado, ao invés da única e exclusiva supervisão do governo, poderá resultar na utilização mais eficiente do espectro, no desenvolvimento de tecnologias mais inovadoras e na implantação universal de serviços sem fio. É difícil para qualquer entidade reguladora do governo prever com grande confiabilidade que serviços específicos o público vai exigir no futuro. É também um desafio para um órgão regulador acompanhar a rápida evolução tecnológica, ou prever quais os serviços que estarão disponíveis dentro de uma faixa de frequência particular, mesmo em um horizonte de poucos anos para frente. Modificar decisões reguladoras desatualizadas torna-se um processo caro e demorado que, em última análise, desestimula o investimento e inibe a inovação, uma vez que há pouco incentivo para ser pioneiro na comercialização de uma nova tecnologia ou para iniciar novos usos do espectro (*Standards & Technology*. Disponível em: <http://www.tiaonline.org/standards/>. Acesso em: 10 jan 2010).

Se o espectro puder ser utilizado para os serviços de maior demanda, as empresas terão uma maior motivação (possibilidade de maiores lucros) para entrar no mercado sem fio. Desta forma, as forças de mercado poderão incentivar uma utilização eficiente, inovadora e flexível do espectro e servirão como o melhor árbitro entre tecnologias concorrentes e os serviços que prestam.

Um cenário de gestão de espectro que se baseia em forças de mercado não exclui necessariamente o importante papel dos órgãos governamentais nesse âmbito. Há, de fato, tarefas essenciais e específicas que o regulador precisa adotar. Estas incluem determinar a melhor forma de distribuir o espectro entre os serviços mutuamente exclusivos e entre os serviços licenciados e não licenciados, os serviços de manutenção para o bem-estar público, assegurando a igualdade de condições entre os concorrentes, as redes de proteção contra interferências, e proteger a saúde pública de todos os efeitos potencialmente prejudiciais de transmissões de rádio. No entanto,



outras decisões relativas ao espectro, como os tipos de serviços específicos oferecidos, tecnologias utilizadas, os preços de consumo e desempenho da rede, parece ser a melhor opção deixar para o mercado escolher, uma vez que este é o viabilizador do negócio, seja pela infraestrutura de transmissão e recepção ou pelos serviços prestados (SGRIGNOLI, 2003).

Outro ponto relevante é a alocação de espectro de forma neutra e flexível. Os órgãos reguladores estabelecem o âmbito geográfico e a largura de banda inicial das licenças, tendo em conta as diferentes características das diferentes frequências, a compatibilidade eletromagnética, a segurança pública, e, em geral, as diferentes necessidades de espectro de cada categoria de serviço. Essa abordagem flexível permite desenvolvimentos tecnológicos que podem tornar mais eficiente a utilização da largura de banda prevista para determinados serviços e a introdução de novos serviços.

A flexibilidade técnica confere aos utilizadores do espectro capacidade e incentivo para desenvolver e instalar espectros inovadores e eficientes, e tecnologias de baixo custo que respondam às necessidades dos consumidores. Isso dá aos prestadores de serviços a capacidade de competir com base no que eles acreditam ser a melhor tecnologia com o melhor valor para o consumidor.

A atribuição de espectro sem um entendimento do mercado e das exigências técnicas pode levar a mercados fraturados, aumento dos custos de equipamentos, pesquisa e desenvolvimento de produtos atrasados e aumento do tempo de chegada ao mercado, bem como uma maior possibilidade de interferência entre os usuários. Em alguns casos, pode-se até mesmo prejudicar os objetivos de interesse público. Além disso, muitos dos novos serviços terrestres e por satélite são globais na cobertura e, portanto, requerem espectro harmonizado a nível mundial. Este potencial conflito pode ser resolvido uma vez que os envolvidos trabalhem em conjunto com as entidades de normalização e tentem chegar a um acordo sobre uma ou várias normas harmonizadas para os mercados específicos. As forças de mercado vão levar os agentes de mercado a adotar o melhor conjunto de normas voluntariamente (*Standards & Technology*. Disponível em: <http://www.tiaonline.org/standards/>. Acesso em: 10 jan 2010).

Neste contexto, uma atribuição economicamente eficiente dos espectros de frequência passa a ser um ponto muito importante. Quando for atribuir um espectro, os reguladores precisam distribuir as licenças de forma rápida e com o mínimo de custos administrativos, e de uma forma que garanta que a entidade ganhadora da licença irá fazer o melhor uso deste recurso público.

Apesar dos leilões de espectro serem uma ferramenta eficaz de atribuição de licenças para determinados serviços, essa ferramenta deve ser aplicada com uma racional adequada. Ou

seja, deve haver primeiramente a determinação se existe a necessidade para o espectro e se a atribuição deste espectro gera aplicações mutuamente exclusivas.

Os leilões de frequências não devem ser um substituto para as decisões de atribuição de espectro ou utilizado apenas como um meio de geração de receita. Os custos dos leilões e a realocação de associados colocam um enorme fardo financeiro para os operadores, que chega até aos usuários finais. Permitir que o ente que dê o maior lance determine a utilização do espectro causa inconsistência e incerteza, que por sua vez aumenta o custo dos equipamentos para os usuários, nega a economia de escala, retarda o investimento do fabricante, aumenta as interferências em potencial e ameaça os investimentos dos operadores existentes. Além disso, a realização de leilões de espectro pode inadvertidamente desencorajar alocações de espectro de uso benéfico e que não geram receitas como, por exemplo, os sistemas de segurança pública. No caso de serviços de satélite global, e outros serviços que precisam ser fornecidos numa base transnacional, leilões podem inibir seriamente a evolução do mercado e da tecnologia (*Standards & Technology*. Disponível em: <http://www.tiaonline.org/standards/>. Acesso em: 10 jan 2010).

Considerando a complexidade dos pontos apresentados até este momento, percebe-se a necessidade de uma grande flexibilidade nas ações dos órgãos reguladores. Uma vez que o espectro é um recurso limitado, os reguladores precisam considerar a reorganização do espectro que está subutilizado, reconhecendo os custos inerentes de realocar os usuários existentes para outras bandas de frequências, se necessário. A associação das indústrias de telecomunicações dos EUA (TIA) incentiva os reguladores a continuar a transição de atribuição de espectros não utilizados, ou subutilizados, do governo para uso comercial.

Quanto ao espectro que foi alocado e está atualmente em uso comercial, a realocação deve ser minimizada, pois aumenta os riscos dos negócios de prestadores de serviços sem fio e, conseqüentemente, aumenta o custo do capital, enquanto desencoraja o investimento na indústria de serviços sem fio. Flexibilidade, regimes de licenciamento de longo prazo e um ambiente regulamentar mais seguro proporciona aos operadores acesso mais fácil aos mercados de capitais, quando necessário, e apóia a implantação contínua de serviços avançados de rádio no mundo.

Outro ponto relevante é com relação aos tipos de procedimentos utilizados para a liberação do uso de faixas de espectro. Procedimentos abertos, transparentes, objetivos e não-discriminatórios são uma exigência da Organização Mundial do Comércio (OMC) para acordos em telecomunicações e refletem comprometimento entre as nações.

Procedimentos abertos e transparentes oferecem aos prestadores de serviços e fabricantes uma compreensão mais clara das regras e regulamentos pertinentes. Tais procedimentos devem

permitir a entrada de todas as partes interessadas durante o processo de regulamentação. Procedimentos objetivos são equitativos e razoáveis e não deve ser mais pesados do que o necessário para garantir a qualidade do serviço. Ao aderir aos procedimentos não-discriminatórios, os reguladores não só irá melhorar a eficiência econômica e preparar o caminho para a recepção das novas tecnologias, mas também estará em melhor posição para pedir aos seus parceiros comerciais para seguirem procedimentos similares (*Standards & Technology*. Disponível em: <http://www.tiaonline.org/standards/>. Acesso em: 10 jan 2010).

Em termos regionais e internacionais, os reguladores precisam coordenar as questões relacionadas com a utilização do espectro, com o objetivo de estimular a inovação, gerando economia de escala para os fabricantes de equipamentos, reduzindo o tempo para o mercado para produtos e atendendo às necessidades dos usuários, tais como o *roaming* regional e global. Na medida do possível, as políticas nacionais precisam apoiar sistemas globais e uniformidade nas redes internacionais, tanto em sistemas terrestres e por satélite, sem excluir outros usos e tecnologias. Sempre que alguma banda de frequência for de uso provável para um determinado serviço em todo o mundo, as administrações precisam aperfeiçoar o uso da banda relevante para esse serviço, sem excluir outras utilizações de espectro, impedindo o mercado de re-configurar o espectro ou limitando a capacidade de prestadores de serviço de usar os padrões e tecnologias que possuem para satisfazer as necessidades de seus clientes.

A ITU (*International Telecommunication Union*) desempenha um papel fundamental na coordenação do espectro e da globalização, bem como no desenvolvimento de normas. Os governos são incentivados a participar ativamente nos Grupos de Estudo da ITU e das Conferências Mundiais de Rádio (*WRC – World Radio Conferences*) de tal forma a alcançar todos os reguladores mundiais no sentido de desenvolver uma visão comum. As consultas precisam ser alargadas a outras instâncias internacionais e regionais para construir um consenso sobre as questões relevantes que afetam a indústria de telecomunicações (SGRIGNOLI, 2003).

Em resumo, as políticas de atribuição de espectro formam a base sobre a qual as empresas tomam decisões sobre os investimentos em capital, tecnologia e manufatura, e, por sua vez, ajudam a impulsionar a demanda por produtos e serviços. Tais políticas precisam basear-se em:

- Confiança nas forças do mercado;
- Mecanismos dinâmicos de atribuição de espectro que promovam a utilização eficiente do espectro e da introdução de novas tecnologias para o mercado, e

- A participação ativa dos órgãos reguladores em fóruns internacionais e regionais, com vista para a construção de um consenso mundial sobre questões importantes de telecomunicações. No Brasil este órgão é a ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações).

## 1.2 Eficiência energética

As tecnologias de comunicações utilizadas exercem um importante papel na criação de um futuro sustentável para o planeta. Elas podem aumentar as possibilidades de crescimento econômico e de bem-estar para a população, minimizando os gastos operacionais dos provedores de serviços de comunicação e reduzindo os impactos ambientais.

O maior impacto ambiental do setor de telecomunicações vem do consumo de energia relacionado ao uso de seus produtos. Assim, tornam-se importantes ações como aumentar a eficiência de energia dos produtos, usar fontes de energia renováveis, otimizar o planejamento de rede e o gerenciamento de operações, compartilhar recursos de rede, entre outros.

A ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) estipulou um ganho de 3% do consumo por meio de ações de eficiência energética, o que equivale a remoção de 21TW/h da demanda entre 2008 e 2018. Se isto for possível, a eficiência energética do Brasil estará entre 5% e 7% até 2018. Na Europa, a meta é reduzir 20% do consumo de energia até 2020, o que representa uma economia de 1,5% ao ano (*Projetos de Eficiência Energética no Brasil*. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 04 fev 2010).

Como os dispositivos semicondutores utilizados nos equipamentos de transmissão geram calor, muitas vezes é necessário utilizar métodos para retirada do calor do ambiente onde o equipamento se encontra. Isto representa um custo adicional, pois além das perdas do próprio equipamento, ainda é necessário retirar o calor do ambiente para que não haja uma elevação demasiada na temperatura de operação dos semicondutores, o que pode levar a danos permanentes. Assim, tem sido uma requisição constante para os fabricantes de equipamentos de transmissão entregar equipamentos com refrigeração a base de líquidos, o que permite eliminar o uso de ar-condicionado e ventiladores.

É também uma realidade que a maior parte das perdas de energia elétrica encontra-se no seu transporte e distribuição, podendo chegar a 20% em alguns estados do Brasil (*Projetos de Eficiência Energética no Brasil*. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 04 fev 2010). Mesmo assim, é importante que os equipamentos finais tenham o seu consumo otimizado para que já se tenha algum ganho de imediato.

De uma maneira geral, pode-se afirmar que a eficiência energética aumenta quando se consegue realizar um serviço ou produzir um bem com uma quantidade de energia inferior à que era usualmente consumida. Neste sentido, ser eficiente do ponto de vista energético equivale a gastar uma menor quantidade de energia para se obter um mesmo resultado final. Ou ainda, gastar a mesma quantidade de energia e obter maiores rendimentos ou um melhor resultado final. Por exemplo, uma possibilidade é gerar o mesmo nível de bem-estar com menos energia, o que pode ser obtido através de mudanças tecnológicas, alterações nas estruturas setoriais, valorização do transporte coletivo, instalação de indústrias de menor consumo e, finalmente, mudanças comportamentais da sociedade.

O conceito de eficiência energética embute, assim, outros conceitos relacionados a características técnicas dos equipamentos de geração de energia, dos processos produtivos, dos bens produzidos, dos equipamentos de uso final e também as características econômicas.

### **1.3 Justificativa e objetivo**

Segundo Jeong, as novas tecnologias que estão surgindo no mercado como Wimax, LTE, 3G, TV Digital entre outras, o crescimento do acesso a internet banda larga, bem como as telecomunicação para defesa civil e militar, levam a uma maior demanda por equipamentos para transmissão de voz, dados e vídeo. A linearidade em amplificadores de radiofrequência (RF) de potência tem sido um dos requisitos mais importantes nos últimos anos para as diversas aplicações existentes em telecomunicações, dada a escassez de espectro para atender estas demandas em acentuado crescimento. Cada nova tecnologia exige uma nova frequência para transmissão, o que, com o passar do tempo, está levando ao congestionamento dos espectros, principalmente nas grandes cidades. O efeito deste congestionamento é a degradação da qualidade dos serviços oferecidos aos clientes, como por exemplo interferências ou interrupções na área de cobertura. Outro requisito de extrema importância é a eficiência elétrica de tais elementos, uma vez que o consumo de energia é um ponto bastante relevante para o cliente no momento de decisão da compra.

Desta forma, as indústrias fornecedoras de transmissores de radiofrequência ou microondas vêm enfrentando grandes desafios para oferecer equipamentos que:

- não interfiram em serviços adjacentes e;
- que possuam alta eficiência elétrica .

Estes dois requisitos básicos para qualquer amplificador – linearidade e eficiência – são afetados e controlados por diversos fatores, os quais agem direta ou indiretamente no resultado final obtido. A definição de tais requisitos afeta questões relacionadas:

- ao correto atendimento às especificações e critérios de qualidade;
- aos defeitos que levarão ao mau funcionamento dos amplificadores;
- e as falhas intermitentes ou até falhas generalizadas, que culminarão, muitas vezes, na queima de componentes.

Os processos de manufatura de amplificadores de RF são eminentemente multivariados, por se estabelecerem relacionamentos funcionais para as múltiplas características de saída a partir de um conjunto de fatores de entrada. Na indústria este comportamento pode levar a perdas significativas de qualidade e recursos, em face de eventuais processos complexos incontroláveis devido ao efeito desses fatores e ou de suas interações.

Considerando o exposto, julgou-se relevante o estudo aprofundado de amplificadores de RF de potência, dada a sua importância nas telecomunicações e os impactos positivos, tanto para o cliente final quanto para a indústria de manufatura, de um amplificador de alta qualidade. Devido ao elevado número de fatores e interações presentes no processo produtivo, freqüentemente observa-se dispersões que levam a perdas de qualidade, rejeição de peças, ou até, em casos não detectados internamente ao sistema produtivo, a falhas em serviço. Um dos problemas decorrentes desta eventual falta de controle é a ocorrência de variações muito grandes no desempenho dos amplificadores, levando a dificuldades para se utilizar o mesmo amplificador ao longo de uma ampla faixa de freqüência (amplificadores banda larga) e aumento na complexidade da especificação dos demais circuitos adjacentes ao amplificador, tais como filtros de canal e fontes de alimentação.

Este trabalho tem como objeto de estudo os amplificadores de potência utilizados para televisão digital na faixa de UHF utilizando uma abordagem experimental. Diversos são os fatores que podem ser considerados no processo de amplificação, com o objetivo de reduzir a intensidade das intermodulações e aumentar a eficiência, sendo alguns deles o canal ou freqüência de operação, a corrente de polarização, o *back-off* de potência, as técnicas de linearização adotadas, a qualidade dos componentes do circuito, a qualidade da manufatura, a quantidade de ruído na fonte de alimentação, a temperatura ambiente, etc.

Visando atender os requisitos de qualidade, é necessário traduzir cada um dos requisitos em um parâmetro sujeito a otimização. O parâmetro que melhor expressa a não interferência em serviços adjacentes é a Intermodulação e o parâmetro que expressa alta eficiência elétrica é chamado simplesmente de Eficiência. **Assim, o objetivo desta pesquisa é a otimização dos**

fatores envolvidos durante o desenvolvimento, produção e avaliação de amplificadores de RF de potência no que diz respeito ao seu desempenho com relação as intermodulações geradas e eficiência ao longo de uma faixa ou banda de frequências. Isto garante a padronização dos tempos de produção, bem como o aumento da confiabilidade dos produtos entregues aos clientes pela diminuição da variabilidade dos parâmetros de desempenho. A Figura 1.1 ilustra um amplificador de RF.

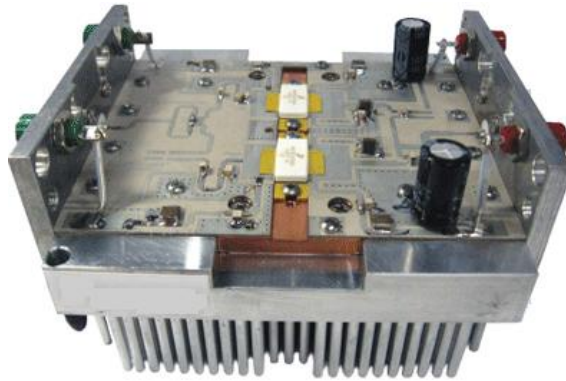


Figura 1.1 – Amplificador de RF de potência.

Para se obter grandes áreas de cobertura para sistemas de telecomunicação, como cobertura de TV Digital ou Wimax, faz-se necessário o uso de estações transmissoras com elevadas potências de saída. E para se obter estas elevadas potências, faz-se uso de um grande número de amplificadores de potência. Assim, o objeto de estudo desta pesquisa é o amplificador de RF de Potência. O foco da pesquisa será o amplificador utilizado em sistemas de TV Digital, dado o início da sua implantação do Brasil. A Figura 1.2 ilustra um transmissor de TV Digital para o padrão brasileiro. Este cenário de implantação de novas tecnologias representa uma grande oportunidade de crescimento para as empresas de telecomunicações, pois a demanda por amplificadores de potência vem aumentando expressivamente.



Figura 1.2 – Transmissor de TV Digital para o padrão brasileiro.

Esse trabalho está dividido da seguinte forma: uma descrição sobre o tema é descrita no capítulo 2, uma abordagem experimental para o problema é desenvolvida no capítulo 3 e as conclusões são apresentadas no capítulo 4.



# Capítulo 2

## 2. Fundamentação Teórica

Como exposto no Capítulo 1, um dos principais elementos para viabilizar a rápida expansão dos serviços de telecomunicações é a disponibilidade de transmissores de radiofrequência com a qualidade exigida pelo mercado e a um preço acessível. Por sua vez, o elemento crítico da maioria dos transmissores é o amplificador de potência.

De um modo geral, os amplificadores de RF de alta potência para estações transmissoras operam em classe AB, para melhor eficiência. Como resultado, em adição a distorção por intermodulação de terceira ordem (IMD), uma significativa quantidade de distorções de maior ordem são geradas (KIM *et al*, 2000).

Nas telecomunicações, é usual definir um sistema linear como aquele que tendo determinado espectro na entrada, o coloca na saída com determinado fator de escala (ganho) sem acrescentar nem retirar nenhuma componente a esse espectro. Porém não são todos os circuitos que apresentam a característica de linearidade, incluindo os amplificadores. As não-linearidades podem introduzir componentes indesejáveis no sinal ou ainda retirar componentes do sinal desejado (SILVA *et al*, 2004). Desta forma, o objetivo deste capítulo é explicitar os principais fatores e características envolvidos no processo de amplificação de sinais de RF.

### 2.1 Processo de manufatura e avaliação de amplificadores de RF

O amplificador de potência é um elemento ativo, de natureza predominantemente não-linear, cuja principal função é entregar em sua saída um sinal com amplitude maior que ao de entrada, conforme mostra a Figura 2.1. Esta figura destaca as redes de casamento de impedâncias, os componentes de polarização e de desacoplamento necessários para todo circuito

amplificador. A diferença entre a amplitude de saída e a amplitude de entrada é chamada de ganho do amplificador. Para se obter grandes áreas de cobertura para sistemas de telecomunicação, como cobertura de telefonia celular ou *Wimax*, faz-se necessário o uso de estações transmissoras com elevadas potências de saída e, portanto, amplificadores com alto ganho. E para se obter estas elevadas potências, faz-se uso de um grande número de amplificadores de potência.

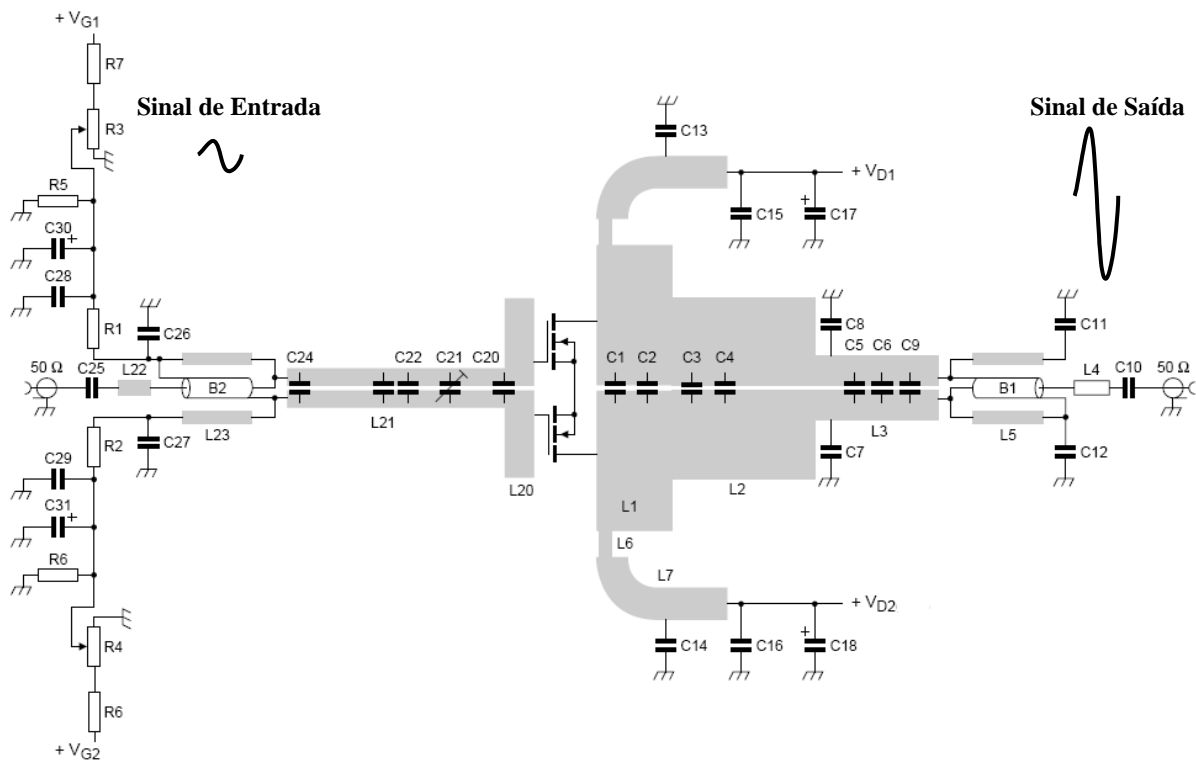


Figura 2.1 – Um esquema eletrônico de um amplificador de potência.

Fonte: Linear Equipamentos Eletrônicos SA

Este cenário representa uma grande oportunidade de crescimento para as empresas de telecomunicações, pois a demanda por amplificadores de potência vem aumentando expressivamente. Entretanto, o modelo tradicional de projeto e produção destes elementos leva a produtividade e confiabilidade baixas, dado o aspecto ainda bastante artesanal de manufatura. A Figura 2.2 mostra a localização do amplificador dentro de um equipamento transmissor de RF.

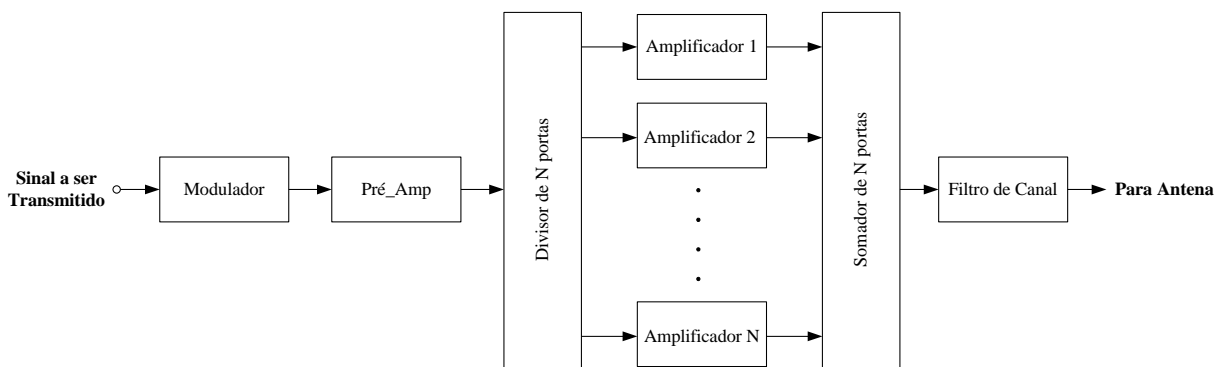


Figura 2.2 – Diagrama em blocos de um transmissor de RF.

O modelo tradicional de projeto de amplificadores utilizado no Brasil é o ensaio e erro, dilatando o tempo de desenvolvimento, aumentando os custos e o número de falhas. O modelo tradicional de produção inclui o uso de diversos componentes eletrônicos não disponíveis para montagem em máquinas, o posicionamento manual de transistores, a longa seqüência de testes elétricos e a combinação de um grande número de amplificadores são também alguns dos fatores que levam a uma grande dispersão nos resultados obtidos ao final de uma linha de produção de amplificadores.

Desta forma, percebe-se a necessidade de uma abordagem mais otimizada tanto para o desenvolvimento de novos amplificadores quanto para a produção dos mesmos. Economias mais evoluídas como a dos Estados Unidos e China já perceberam os ganhos oriundos de otimizações nestas áreas e estão, por sua vez, oferecendo produtos mais competitivos no mercado brasileiro.

## 2.2 Respostas do processo

À medida que as comunicações digitais têm sua utilização cada vez mais difundida, a linearidade dos amplificadores de RF se torna uma questão relevante. O grau de linearidade de um amplificador pode ser expresso através de sua intermodulação de saída. Quanto mais linear for um amplificador, menores serão as intermodulações em sua saída.

Entretanto, para que um amplificador seja comercializado, não basta que o mesmo seja apenas linear, devendo possuir também uma boa eficiência. Estes dois fatores, intermodulação de saída e eficiência, são as respostas deste processo de otimização e estão detalhados a seguir.

### 2.2.1 Intermodulação de Saída

É desejável que o amplificador tenha o maior ganho possível. Porém, não é possível amplificar o sinal sem gerar distorções. O que se pode fazer é projetar o amplificador para que

ele gere o menor número de distorções possíveis. Dentre as distorções geradas pelo amplificador, a que mais impacta o atendimento às máscaras de emissão é a intermodulação.

A intermodulação ocorre quando um sinal composto por mais de uma frequência é submetido a meios não lineares, como em um amplificador. Várias outras frequências são geradas como resultado das combinações lineares das frequências originais. Como outras frequências são geradas, o sinal amplificado passa a ocupar uma banda, ou largura de faixa, maior do que o sinal original. A Figura 2.3 traz um exemplo de intermodulação gerada ao se passar duas portadoras, ou dois sinais com frequências diferentes, por um mesmo amplificador.

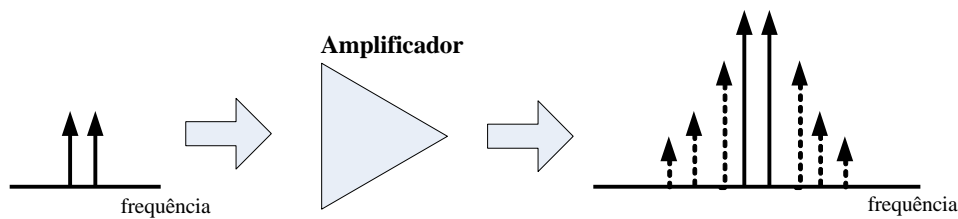


Figura 2.3 – Intermodulação de duas portadoras após amplificação.

A fundamentação matemática para a geração de outras componentes espectrais na saída do amplificador é que o mesmo pode ser modelado segundo um polinômio de grau  $n$ , conforme mostra a equação 1. A componente fundamental é expressa pela variável com grau 1. A segunda harmônica é expressa pela variável com grau 2, bem como os demais graus pares. As intermodulações são expressas pelas variáveis de grau ímpar, sendo a intermodulação de terceira ordem (grau 3) geralmente a de maior intensidade.

$$y(t) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot x(t) + \alpha_2 \cdot x(t)^2 + \alpha_3 \cdot x(t)^3 + \alpha_4 \cdot x(t)^4 + \dots + \alpha_n \cdot x(t)^n \quad (1)$$

onde  $x(t)$  é o sinal a ser amplificado,  $y(t)$  é o sinal de saída amplificado e  $\alpha_i$  são coeficientes da série de Taylor, que diferem de amplificador para amplificador. Diversas técnicas têm sido desenvolvidas para se estimar com precisão os coeficientes de um dado amplificador. Esta é uma tarefa difícil, pois os coeficientes se alteram com a temperatura de operação, com a potência máxima desenvolvida, com os sinais que precederam a amplificação (efeito de memória) e ao longo do tempo (envelhecimento do dispositivo). Isto por si só torna o projeto e produção de amplificadores um processo bastante complexo.

As máscaras de emissão são elaboradas pelos órgãos reguladores responsáveis para delimitar os níveis adequados de intermodulação e emissões espúrias que um sistema de telecomunicações pode gerar. A Figura 2.4 exemplifica qual o nível de intermodulação exigido pelo FCC (*Federal Communications Commission*) e, portanto, o nível de intermodulação que os

amplificadores devem atender para a aplicação em televisão digital, neste caso 47dB de atenuação.

Este parâmetro irá refletir o quanto um sinal, após a amplificação, ficará confinado dentro da largura de banda a ele destinado, não interferindo em serviços ou canais adjacentes. Quanto menor a intermodulação final, menor a interferência em outros serviços e melhor a qualidade do sinal para o usuário final. Quanto mais linear for o amplificador, menor será a intermodulação gerada em sua saída.

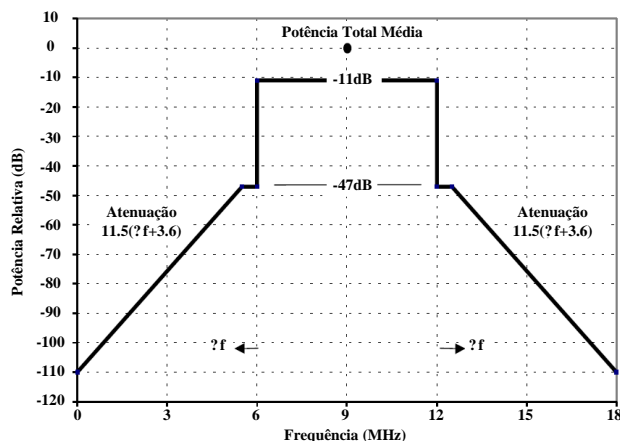


Figura 2.4 – Máscara para intermodulação exigida pelo FCC para televisão digital.

Fonte: Documento A/64B ATSC, página 7.

A interferência em canais adjacentes não é uma mera formalidade dos órgãos reguladores, como detalhado no capítulo 1, mas reflete em diversos aspectos de uma economia, desde a segurança pública até a rentabilidade e possibilidade de expansão dos negócios. Segurança pública no que diz respeito a não interferência em sistemas de controle de vôos, radar e comunicações militares. E rentabilidade no que diz respeito ao uso mais racional do espectro de frequências disponível.

## 2.2.2 Eficiência

Recentemente, a preocupação com os recursos energéticos tem sido constante e recorrentemente discutida pelos principais governantes e pela mídia. Como resultado, todo dispositivo que faz uso de algum recurso energético para operar passou a ter a sua forma de operação sob discussão, visando avaliar se o mesmo encontra-se no estado da arte em termos de conversão de energia.

Como os transmissores de potência são grandes consumidores de energia elétrica, logo se tornaram foco de exigências cada vez mais rígidas quanto a sua taxa de conversão energética, o que implica diretamente nas especificações de eficiência para os amplificadores que o compõe.

A potência fornecida pela fonte de alimentação ( $P_{\text{FONTE}}$ ) é enviada à carga ( $P_{\text{CARGA}}$ ) através do circuito amplificador que, devido às suas não linearidades, dissipará parte desta potência em forma de calor, como mostra a Figura 2.5. Sendo assim, quanto maior for a eficiência de um amplificador, maior será o aproveitamento da potência fornecida pela fonte e menor será a potência dissipada ou perdida.

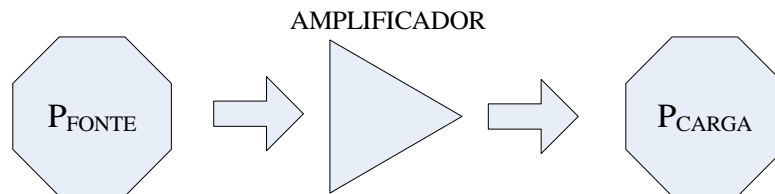


Figura 2.5 – Conceito de eficiência.

Este parâmetro mostra a capacidade que um determinado sistema tem de transformar a potência consumida em potência útil, e é representado abaixo pela equação 2:

$$\eta_{\%} = \frac{P_{\text{CARGA}}}{P_{\text{FONTE}}} \times 100 \quad (2)$$

A eficiência irá refletir no consumo de energia do amplificador e, por consequência, no consumo total do equipamento de telecomunicações do qual ele fizer parte. É importante que se obtenha a maior potência final amplificada consumida com a menor energia elétrica possível, ou seja, a maior taxa de conversão de kVA consumido da rede elétrica em potência eficaz (Watt) entregue para a carga.

Outros pontos relacionados a eficiência costumam ser avaliados em conjunto, como o fator de potência ou  $\cos \varphi$ . O fator de potência é um parâmetro de medição da defasagem entre a tensão e a corrente que circulam por uma rede elétrica. Ele é o cosseno do ângulo dessa defasagem. Se a defasagem for de um oitavo de ciclo ( $45^\circ$ ), o fator de potência é o cosseno de  $45^\circ$  que é 0,71. A maior defasagem que se pode ter, tanto a corrente estando à frente da tensão quanto estando atrás, é de  $0^\circ$  ou  $180^\circ$ . Sendo assim, o fator de potência sempre estará entre 0 e 1, sendo desejável estar o mais próximo possível de 1, o que representa menores perdas e, portanto, maior eficiência. Toda carga puramente resistiva possui fator de potência igual a 1. Toda carga puramente indutiva ou puramente capacitiva possui fator de potência igual a 0. O amplificador é uma carga mista, sendo necessário o uso de técnicas de correção do fator de potência da fonte de alimentação para aproximar o fator de potência de 1. Valores típicos obtidos são em torno de 0,96.

## 2.3 Fatores

Diversos são os fatores que devem ser considerados no processo produtivo de amplificadores de RF de potência, passíveis de interferirem nas respostas desejadas de intermodulação de saída e eficiência. Usando o conhecimento de especialistas e de literatura especializada, os seguintes fatores (e suas possíveis interações) podem ser considerados fundamentais.

### 2.3.1 Corrente de polarização

Polarização em eletrônica é o nome que se dá ao método de estabilização de tensão ou corrente pré-determinadas em vários pontos de um circuito eletrônico para definir um ponto de operação adequado. O ponto de operação de um dispositivo, também conhecido como ponto quiescente ou simplesmente ponto Q, é a quantidade pela qual a média de um conjunto de valores de saída se afasta de um valor de referência. O termo é comumente usado em conexão com dispositivos como transistores (LIU, 2001).

Para qualquer transistor operar adequadamente, é necessário realizar a sua polarização, que consiste na definição de uma tensão contínua a partir da qual o sinal a ser amplificado irá excursionar, conforme mostra a Figura 2.6.



Figura 2.6 – Efeito da polarização no sinal de entrada a ser amplificado.

A corrente de polarização irá definir o ponto de operação do transistor, bem como sua classe. O fabricante geralmente especifica um valor ótimo para esta corrente, mas a sua alteração traz reflexos no desempenho final do amplificador e pode ser alterada, dentro de limites seguros. É importante que o amplificador tenha um circuito de correção da transcondutância ( $G_M$ ), pois a mesma varia com o envelhecimento do transistor e com a variação da temperatura de trabalho, afetando diretamente a corrente de polarização.

Circuitos lineares envolvendo transistores normalmente requerem tensões e correntes DC específicas para operarem corretamente, o que pode ser conseguido através de um circuito de polarização adequado. Em amplificadores lineares, um pequeno sinal de entrada provoca um sinal de maior amplitude na saída, sem qualquer alteração na forma de onda (baixa distorção): o

sinal de entrada faz com que o sinal de saída varie para cima e para baixo sobre o ponto quiescente de uma maneira estritamente proporcional ao sinal de entrada. No entanto, como o transistor é um dispositivo não-linear, o amplificador a transistor apenas se aproxima de uma operação linear. Para baixa distorção, o transistor deve ser polarizado de tal forma que a excursão do sinal de saída não conduza o transistor em uma região de operação extremamente não-linear. Para um amplificador com transistor bipolar, este requisito significa que o transistor deve ficar no modo ativo, e evitar o corte ou saturação. A mesma exigência aplica-se a um amplificador MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*), embora a terminologia seja um pouco diferente: o MOSFET tem que ficar no modo ativo (ou modo de saturação), e evitar o corte fora do modo triodo.

### 2.3.2 Classes de operação

O elemento ativo do amplificador, o transistor, tem uma curva de operação, isto é, uma curva que indica a relação funcional entre a entrada e a saída. O nível de polarização e os níveis máximos e mínimos do sinal de entrada definem a faixa da curva em que o amplificador irá operar. Diferentes faixas de operação implicam diferentes resultados em termos de eficiência, distorção, intermodulação, entre outros. Às faixas comuns de operação de amplificadores dá-se o nome de classe de operação.

A classe de operação do amplificador tem influência direta na quantidade de intermodulação gerada. Amplificadores operando em *Classe A* apresentam a menor intermodulação de saída, porém são extremamente ineficientes. São, portanto, comumente utilizados para amplificação de pequenos sinais.

Já para amplificadores de potência, faz-se necessário o uso de amplificadores mais eficientes, como os em *Classe AB*. A consequência disto é uma maior quantidade de intermodulação na saída. Isto acontece pelo fato de nesta classe o transistor operar em uma região mais não linear (LIU, 2001). A Figura 2.7 exemplifica a diferença entre *Classe A* e *Classe AB*.



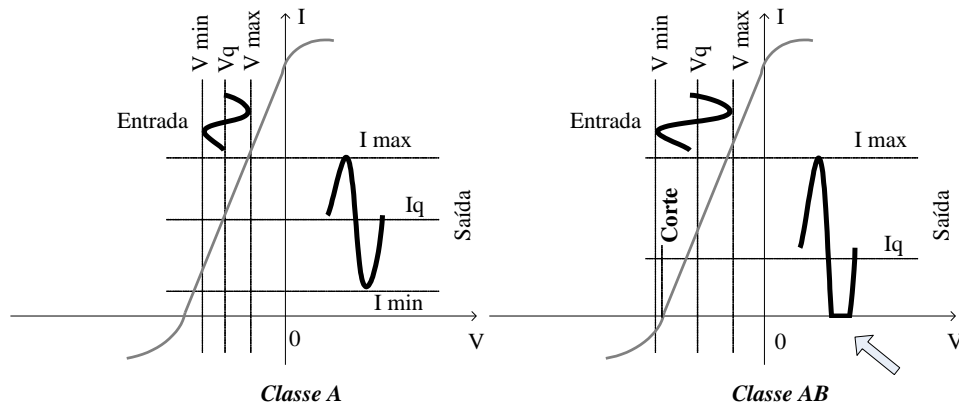


Figura 2.7 – Classe A x Classe AB.

Pode-se perceber que mesmo operando em *Classe AB*, é importante escolher cuidadosamente a corrente de polarização, pois ela irá definir a faixa de excursão do sinal de saída. Se houver ceifamento (*clipping*) do sinal de saída, haverá distorção e, portanto, maior intermodulação na saída. O amplificador em *Classe AB* é geralmente utilizado na configuração *push-pull* para superar um efeito colateral da operação em *Classe B* chamado distorção de *crossover*.

Na operação em *push-pull*, um divisor de fase é usado na entrada para fornecer sinais para o amplificador de estágio único que utiliza dois transistores internamente. Esses transistores são configurados de tal forma que as duas saídas se combinem, com  $180^\circ$  de diferença de fase entre si. Isto permite obter um ganho maior do que um único transistor pode fornecer sozinho. Este tipo de amplificador é utilizado quando saída de alta potência e boa fidelidade são necessárias, como no caso de estágios de saída de receptores e moduladores de AM (*Amplitude Modulation*), por exemplo.

A distorção de *crossover* é um tipo de distorção causada pela comutação entre os dispositivos de condução de carga, no caso da operação combinada entre dois transistores. É geralmente observada em estágios amplificadores *push-pull* em *Classe B*, embora seja também observada ocasionalmente em outros tipos de circuito. O termo *crossover* vem de “*crossing over*”, ou seja, a passagem do sinal entre dispositivos. Neste caso, do transistor superior para o inferior, e vice-versa (LIU, 2001).

Existem outras classes de operação, porém as mais utilizadas em amplificadores para transmissores de televisão são as apresentadas acima.

### 2.3.3 Potência e intermodulação de entrada

Uma vez que o amplificador possui um dado ganho conhecido ao longo de sua faixa de operação, é possível estimar os limites para a potência de entrada a ser oferecida ao sistema, considerando a máxima potência que um transistor pode entregar em sua saída. O ganho é definido como a relação entre a potência de saída e a potência de entrada, em dB, conforme mostra abaixo a equação 3:

$$\text{Ganho de Potência (dB)} = 10 \text{ Log} \left( \frac{\text{Potência de Saída}}{\text{Potência de Entrada}} \right) \quad (3)$$

Como o ganho dos amplificadores varia ao longo da sua faixa de operação, é preciso definir a máxima potência de entrada em termos do ponto de maior ganho, adotando-se uma margem de segurança. A Figura 2.8 exemplifica esta variação de ganho, tipicamente em torno em 1dB para a faixa de UHF (MARTINS, 2004).

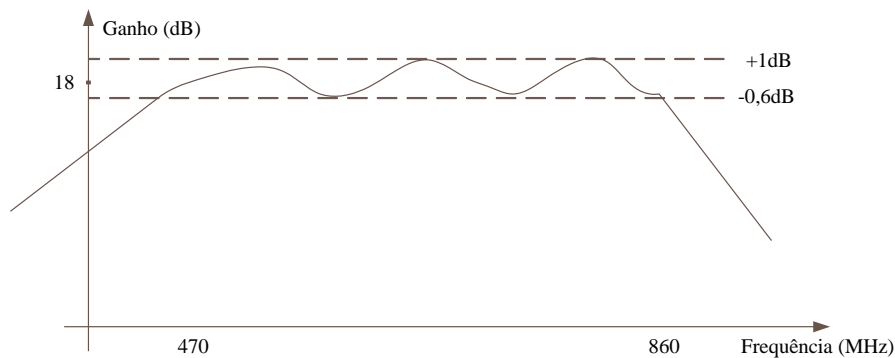


Figura 2.8 – Variação do ganho típica para um amplificador na faixa de UHF.

Dada a ordem de grandeza dos ganhos de transistores, adotou-se como padrão a sua especificação em decibels (conforme equação 3). Desta forma, tornam-se mais diretos os cálculos se as potências de entrada e saída forem expressas em dBm, conforme mostra a Figura 2.9. Esta figura exemplifica também a variação do ganho com a variação do nível de entrada, exemplificando que, em um dado ponto, haverá a saturação da saída e, conseqüentemente, redução do ganho. O ponto em que o ganho é reduzido de 1dB em relação ao previsto idealmente é chamado de Ponto de Compressão de 1dB. Uma vez atingido este ponto, a intermodulação na saída do amplificador cresce substancialmente.

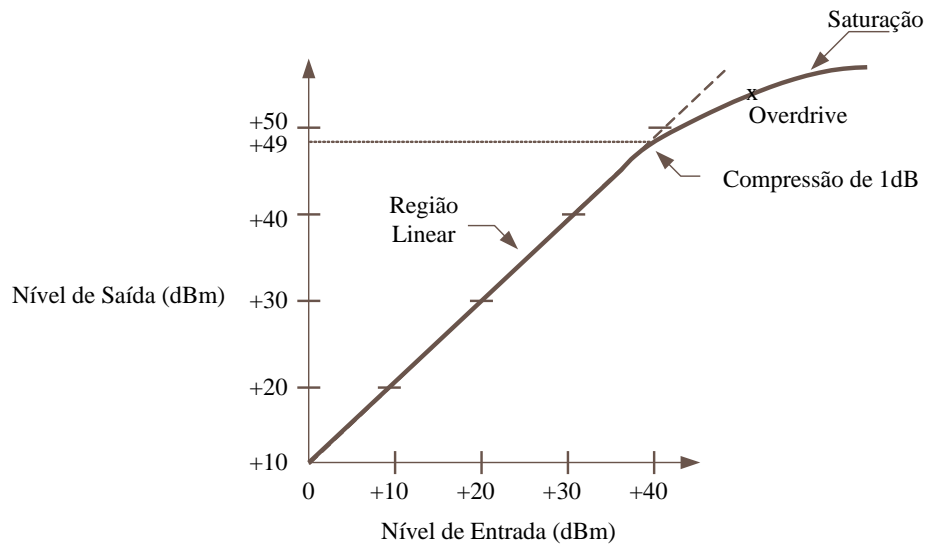


Figura 2.9 – Curva de ganho para um amplificador qualquer.

É importante notar que a potência total de entrada de um amplificador será formada pelo sinal principal que se deseja amplificar e pelos demais componentes que ele possui, tais como harmônicos, espúrios e produtos de intermodulação. A Figura 2.10 exemplifica a diferença entre estes três sinais, sendo que dBc significa dB abaixo da portadora principal. Assim, se o sinal a ser amplificado possuir elevados níveis de potência em outras componentes que não a fundamental, o amplificador terá sua entrada carregada com um maior nível de potência total e aplicará ganho em todas as componentes, uma vez que se trata de um sistema banda larga. Desta forma, ao invés de ter-se todo o ganho aplicado na componente fundamental, este será distribuído entre as demais componentes indesejadas, o que reduzirá a potência de saída final para o serviço de transmissão de interesse. Além disso, a presença de mais componentes espectrais na entrada do sistema levará a geração de outros sinais na saída do amplificador, uma vez que este é um sistema de natureza não-linear, levando a um espectro de saída poluído. A não ser pelos produtos de intermodulação, um amplificador não gera sinais, a menos que esteja instável (MARTINS, 2004).

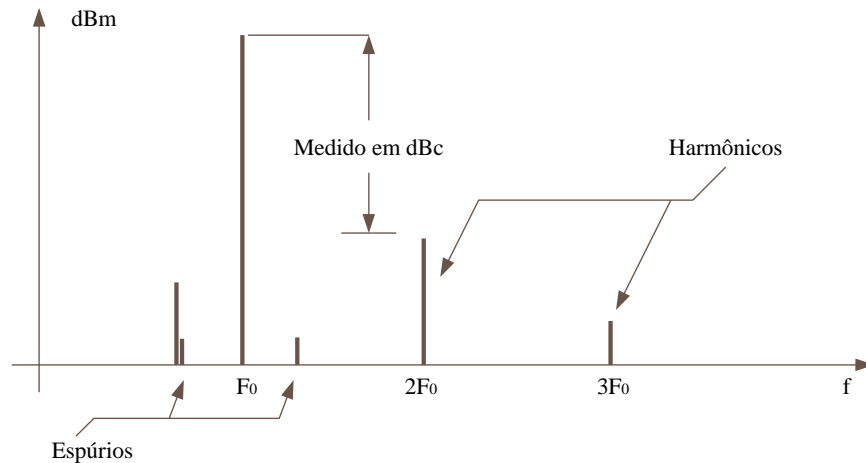


Figura 2.10 – Diferença entre harmônicos, espúrios e intermodulação.

Desta forma, a potência de entrada do amplificador é um dado importante, pois o sistema que irá anteceder o amplificador de potência já apresenta uma quantidade de intermodulação inerente, por não se tratar de um sistema ideal. Assim, é importante conhecer este fator, pois quanto mais linear for a fonte de sinal, mais caro fica o sistema. É importante também conhecer o maior valor de intermodulação e de potência de entrada que o sistema pode suportar para dimensionar o sistema para o menor custo, ou seja, para que se possa utilizar um circuito pré-amplificador o mais simples possível.

### 2.3.4 Faixa de frequência ou canal de operação

O propósito essencial de um amplificador é aceitar um sinal de entrada e fornecer uma versão melhorada do mesmo como um sinal de saída. No entanto, há uma relação fundamental entre a frequência do sinal e o ganho, uma vez que um dado ganho não pode ser mantido uma faixa de frequência arbitrariamente grande. Fisicamente, é preciso tempo para que a carga elétrica em um dispositivo se redistribua em resposta a um sinal de controle e, por isso, a resposta de um dispositivo para um sinal de controle torna-se inevitavelmente confusa para sinais que variam muito rapidamente. Este é um limite final para a resposta de um circuito, mas a degradação da resposta pode começar em frequências mais baixas do sinal devido a atrasos associados com outros componentes de circuito. Os componentes do circuito podem introduzir degradação na resposta em frequência do sistema tanto em baixas frequências como em altas frequências (LIU, 2001). Em geral, a resposta em frequência de circuitos amplificadores tem o comportamento apresentado na Figura 2.11.

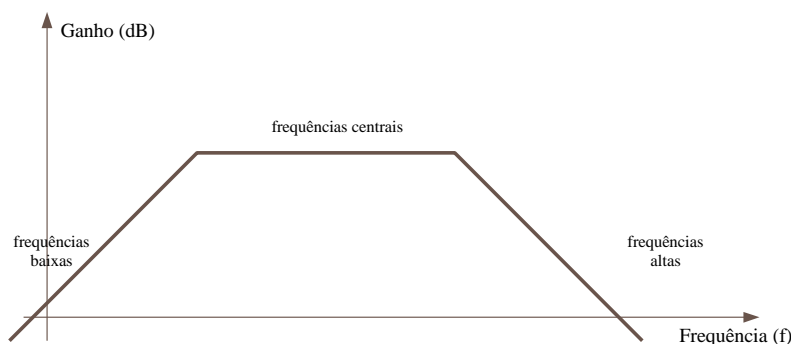


Figura 2.11 – Resposta em frequência comum em circuitos amplificadores.

Há uma banda central de operação para a qual o ganho é substancialmente independente da frequência, sendo esta banda central delimitada pelas faixas de alta e baixa frequências nas quais o ganho é degradado. Um amplificador é banda larga se a diferença entre o início da faixa de degradação de alta frequência e uma correspondente faixa de degradação de baixa frequência é relativamente grande.

A quantidade de intermodulação gerada também varia de acordo com a frequência fundamental do sinal, ou seja, com o canal de operação do amplificador. Para uma mesma aplicação em telecomunicações, é desejável que o mesmo amplificador de potência seja usado para cobrir uma grande faixa de frequências. Isto facilita o processo produtivo e o controle de qualidade, além de reduzir o número de itens de estoque. Dependendo da aplicação em telecomunicações, os órgãos reguladores destinam frequências de operação variadas. Este parâmetro deve ser levado em consideração, pois o comportamento do transistor muda ao longo do tempo e da frequência.

Tornar o amplificador banda larga, ou seja, capaz de cobrir uma ampla faixa de frequências de operação, é uma característica altamente desejável pela indústria, porém bastante complexa de ser atingida. É comum ver um mesmo amplificador customizado para diversas bandas pelo fato de não ter sido possível torná-lo banda larga. Porém, isto provoca um aumento de estoque, dilata o tempo de produção e torna o controle de qualidade mais complexo.

### 2.3.5 Temperatura de operação

Todo semicondutor trabalha com átomos dopados, ou seja, com elétrons inseridos ou retirados da última camada de valência. Desta forma, seu comportamento é fortemente afetado pela temperatura do ambiente no qual ele opera. Assim, deve-se analisar o comportamento do amplificador para diferentes condições de operação do semicondutor. A temperatura ambiente afetará diretamente a temperatura da junção, ou seja, a temperatura interna de trabalho do transistor. Esta, em sua quase totalidade, não deve ultrapassar 200°C, sob pena de dano

permanente no componente. A temperatura também afeta a corrente de polarização do transistor, sendo necessário o uso de circuitos para compensar a variação do comportamento do dispositivo com a variação da temperatura (MARTINS, 2004). Quanto mais baixa for a temperatura da junção do transistor, maior será a sua vida útil, conforme mostra a Figura 2.12.

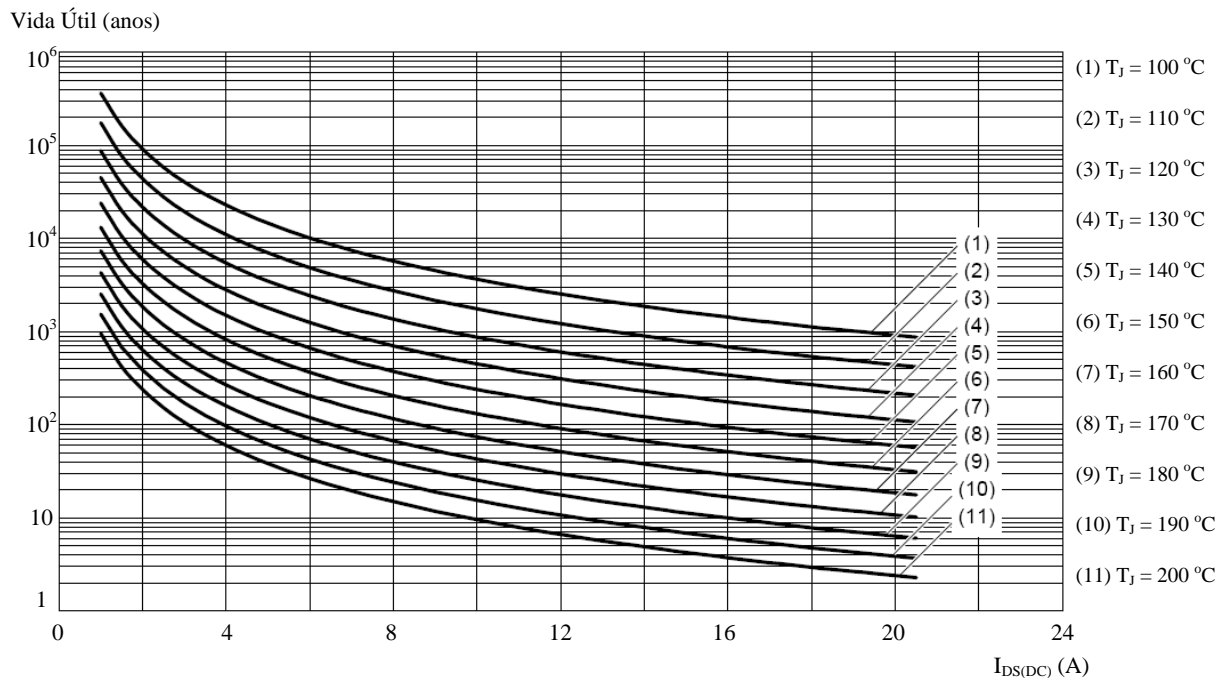


Figura 2.12 – Temperatura da junção *versus* vida útil.

Fonte: Folha de dados do BLF878, NXP.

A temperatura da junção é limitada pela relação entre a temperatura e a vida útil, e também pelas características dos materiais que compõem o transistor. Além disso, os transistores usam portadores minoritários que são facilmente afetados pela temperatura. Em particular, se a temperatura subir em uma junção polarizada reversamente, os portadores passam a ser gerados sem relação com o sinal de entrada, o ponto de operação se desloca e, na pior das hipóteses, ocorre a corrida térmica e o transistor se danifica. Por esta razão, o circuito deve ser concebido de modo a evitar que a temperatura de junção suba demasiadamente. A degradação do transistor ocorre rapidamente quando a temperatura de junção sobe.

Para reduzir a temperatura da junção, faz-se uso de métodos de refrigeração do circuito. Os módulos do circuito que mais aquecem são arrefecidos pela condução do calor em um dissipador térmico. Geralmente um composto térmico é aplicado sob os componentes críticos para assegurar uma resistência térmica mínima na interface de contato. Também é típico o uso de circuitos de proteção contra sobrecarga térmica na maioria dos amplificadores.

O resfriamento de amplificadores pode ser realizado de quatro maneiras básicas:

1. *Condução*: A placa do amplificador é montada diretamente no dissipador. O dissipador de calor deve ser concebido de tal forma que a temperatura máxima especificada para o transistor, normalmente  $71^{\circ}\text{C}$ , não é ultrapassada, valor este que leva a uma temperatura de junção adequada para uma boa vida útil.

2. *Convecção*: O amplificador descansa sobre um dissipador de calor com aletas muito grandes. A superfície é grande o suficiente para dissipar o calor em um ambiente de ar parado. Os materiais geralmente utilizados neste tipo de dissipador são o alumínio e o cobre.

3. *Ar Forçado*: Ar frio é dirigido para um dissipador de calor com aletas sob o amplificador. A circulação do ar frio se encarrega de acelerar a troca de calor com o ambiente.

4. *Refrigeração líquida*: O líquido de arrefecimento é bombeado através de uma serpentina de cobre sob amplificador ou através de micro-canais usinados no próprio dissipador. O trocador de calor de resfriamento é externo ao amplificador e se encarrega de decrementar a temperatura do líquido em alguns graus Celsius em relação a temperatura ambiente, promovendo assim o resfriamento do amplificador.

### 2.3.6 Montadora manual

Dispositivos de RF para altas potências como transistores, bobinas e capacitores não são comercializados em encapsulamentos compatíveis com montagem a máquina. Assim, estes componentes são colocados na placa de circuito impresso de forma manual. Desta forma, há variações entre as diversas montadoras manuais na finalização da manufatura, que devem ser observadas afim de manter um mesmo padrão de qualidade.

A seguir estão alguns dos problemas associados com a colocação manual de componentes:

- A maioria dos componentes passivos não tem qualquer marcação e, portanto, a possibilidade de misturar partes é muito elevada.
- Colocação de componentes nas orientações erradas devido a erros relacionados ao operador.
- A precisão do posicionamento depende do operador e é muito difícil obter uma boa precisão com posicionamento manual.

### 2.3.7 Ruído na alimentação DC

Os amplificadores trabalham com tensão de alimentação contínua (DC) já regulada e filtrada. Se a quantidade de filtragem aplicada na fonte de alimentação não for bem dimensionada ou for de má qualidade, isto refletirá na qualidade do sinal final amplificado, pois o ruído estará sobreposto na tensão e corrente de polarização e poderá deslocar o ponto de operação do transistor (LIU, 2001).

Os ruídos podem também ser provenientes de raios ou surtos na rede elétrica, sendo, portanto, importante utilizar bons circuitos de desacoplamento, blindagem adequada e instalação apropriada para os amplificadores.

A figura de ruído (*Noise Figure – NF*) de um sistema de RF qualquer pode ser descrita como mostra a equação 4:

$$NF = \frac{(S_o/N_o)}{(S_i/N_i)} \quad (4)$$

Onde  $S_o/N_o$  é a relação sinal-ruído (*signal to noise ratio*) na saída do sistema e  $S_i/N_i$  é a relação sinal-ruído na entrada do sistema ou na fonte de sinal. Para calcular a potência de ruído (*Noise Power*) de um sistema utiliza-se a equação 5.

$$N = \text{Potência de Ruído} = kTB \quad (5)$$

Onde:

K = Constante de Boltzman =  $1,38 \times 10^{-23}$  Joules/Kelvin

T = Temperatura absoluta, em Kelvin ( $0^\circ\text{C} = 273\text{K}$ )

B = Largura de faixa de 3 dB do ruído, em Hz

### 2.3.8 Tipo do transistor

Os transistores são especificados por diversos requisitos, como detalhado abaixo:

- Material do semicondutor: germânio, silício, arseneto de gálio, carboneto de silício etc;
- Estrutura: BJT, JFET, IGFET (MOSFET), IGBT etc;
- Polaridade: NPN ou PNP (BJTs), Canal N ou Canal P (FETs) etc;
- Potência máxima: baixa, média e alta;
- Máxima frequência de operação: baixa, média, alta, RF e microondas; (Nota: a máxima frequência efetiva de um transistor é denotada pelo termo  $f_T$ , uma abreviatura de "frequência de transição". A frequência de transição é a frequência na qual o transistor fornece ganho unitário);



- Aplicação: chave, amplificador de propósito geral, amplificação de áudio, fontes chaveadas, isolador (*buffer*) etc;
- Embalagem física: *through hole* de metal, *through hole* de plástico, de montagem em superfície, *ball grid array* (BGA), módulos de potência etc;
- Fatores de amplificação: ganho, parâmetros S, impedância etc.

Assim, um transistor em particular pode ser descrito como de silício, de montagem em superfície, BJT, NPN, de baixa potência, operando como chaveador de alta frequência. Para cada aplicação em telecomunicações existe um transistor mais adequado em termos da frequência de operação e a máxima potência de saída possível de se obter. Existem diversos fabricantes de transistores no mercado e é de extrema importância, ao se iniciar um novo projeto, escolher de forma precisa o componente que traga a melhor relação custo/benefício.

Para aplicações em UHF para televisão digital, o tipo de transistor mais utilizado é o LDMOS (*Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor*). Transistores LDMOS são usados em amplificadores de potência nas faixas de RF e microondas. Esses transistores são fabricados através de uma camada de silício epitaxial sobre um substrato de silício mais altamente dopado. Tais FETs à base de silício são amplamente utilizados em amplificadores de potência para estações radiobase (ERBs), onde a exigência é de alta potência de saída com uma correspondente tensão de ruptura dreno-fonte geralmente acima de 60 volts. Entretanto, possuem menor ganho máximo de potência em relação a outros dispositivos tais como GaAs FETs. Os fabricantes de dispositivos LDMOS mais conhecidos incluem RFMD, Freescale Semiconductor, TriQuint Semiconductor, Inc Cree, NXP Semiconductors e Polyfet. Os dispositivos LDMOS do tipo *Single* sofrem de eficiência relativamente pobre quando usados em aplicações para 3G e 4G (LTE), devido à elevada potência de pico-a-média (*PAR – Peak to Average Ratio*) das modulações utilizadas nestas redes. A eficiência dos amplificadores de potência com LDMOS pode ser potencializada com uso da configuração Doherty ou com técnicas do tipo rastreamento de envelope (*Envelope Tracking*) (YI *et al*, 2000).

É importante ressaltar que todas as características citadas anteriormente estão diretamente relacionadas ao transistor utilizado. Se houver mudança no transistor empregado, todos estes fatores deverão ser reavaliados. Na indústria é comum realizar a troca de transistores uma vez por ano. A cada troca de transistores deve-se atentar para que não haja degradação do desempenho pré-estabelecido.

### **2.3.9 Linearização**

Um recurso amplamente utilizado para se obter maior linearidade, ou menor intermodulação, dos amplificadores é o chamado *back-off* de potência. O *back-off* restringe a excursão do sinal de saída através da redução da potência amplificada final. Este recurso reduz a intermodulação, porém degrada enormemente a eficiência do amplificador, portanto, não pode ser considerado como solução comercial.

Um artifício amplamente utilizado para conciliar redução de intermodulação com o aumento de eficiência elétrica é a linearização. Este artifício consiste em manipular o sinal a ser entregue ao amplificador de potência de tal forma que ele contenha uma distorção contrária a distorção a ser inserida pelo amplificador. Assim, quando o sinal for amplificado, a intermodulação resultante será expressivamente reduzida, como mostra a Figura 2.13.

Atualmente, é praticamente impossível estar em conformidade com as legislações vigentes para emissões fora da banda sem o uso de alguma técnica de linearização. Há diversas técnicas amplamente difundidas no mercado como *digital pre-distortion*, *feed forward*, *RF pre-distortion* etc, sendo cada uma delas mais aplicável em determinado circuito. Deve-se, portanto, escolher o método mais aconselhável durante a fase de projeto do amplificador. Na sequência será apresentado um breve descritivo das principais técnicas de linearização atualmente utilizadas.

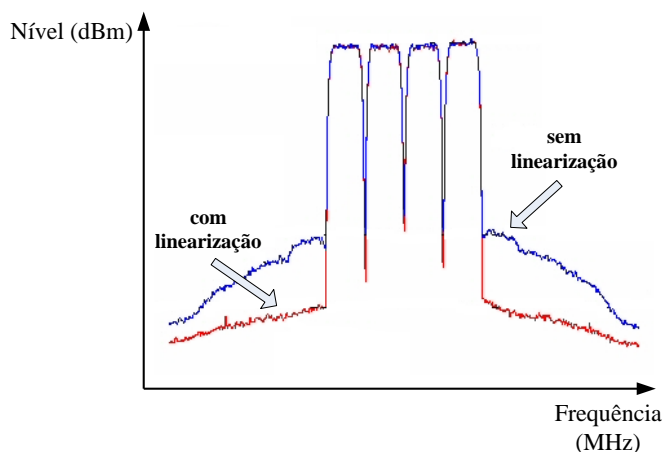


Figura 2.13 – Resultados obtidos após o uso de técnica de linearização.

### 2.3.9.1 Realimentação negativa

Uma das técnicas mais usadas para minimizar as distorções baseia-se no princípio da realimentação negativa. Este método é usado extensivamente no controle de processos industriais e em aplicações eletrônicas de uso geral como é o caso dos amplificadores de baixa frequência (MARTINS, 2004). A idéia base desta técnica consiste em injetar na entrada uma amostra do sinal de saída já processado pelo sistema. Este procedimento traduz-se no aumento da

linearidade do circuito à custa da redução do ganho e da eficiência em potência. Outro aspecto a ter em conta no processo de linearização é o da estabilidade. Com efeito, as características de módulo e fase do sinal de saída re-injetado na entrada têm que ser controladas para que o circuito seja estável.

A cadeia de realimentação pode abranger apenas o estágio de saída ou um sistema completo, sendo o sinal de realimentação tratado diretamente na banda de frequência da portadora ou, em banda base decomposto nas suas componentes polares (módulo e fase) ou cartesianas (I e Q). As principais desvantagens deste método quando aplicado a sistemas de RF são a pequena largura de banda e a redução de ganho do sistema. A limitação do ganho é um ponto determinante que torna este método impraticável à medida que se sobe na frequência, visto que, diminui exponencialmente com o aumento da frequência. Desta forma, o projeto de sistemas de RF deve ser orientado no sentido da maximização do ganho disponibilizado por um dado dispositivo, sendo este objetivo difícil de conciliar com a linearização à custa de realimentação. A Figura 2.14 ilustra esta técnica. São destacados o sinal de entrada,  $X(t)$ , o sinal de distorção,  $d(t)$ , e o sinal de erro,  $X_e(t)$ , aplicado ao amplificador, que resulta em um sinal de saída,  $Y(t)$ , com intermodulações reduzidas. O sinal  $X_e(t)$  é gerado a partir da versão atrasada da saída,  $Y_r(t)$ , combinado com o sinal de entrada,  $X(t)$ .

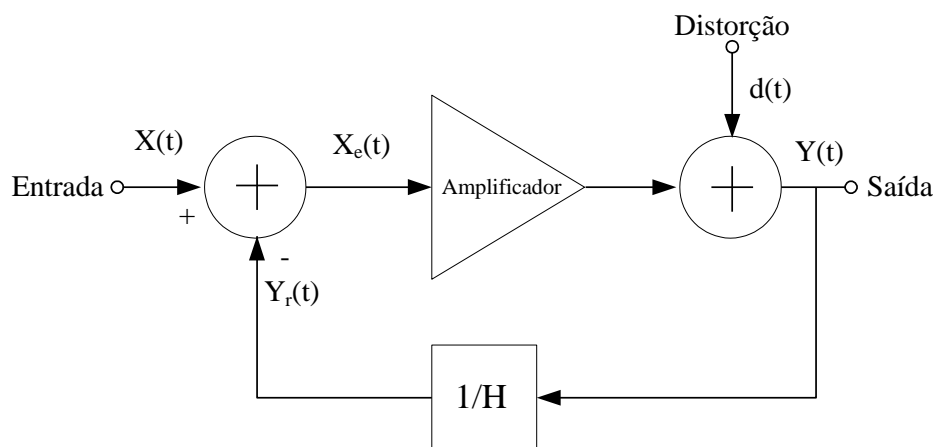


Figura 2.14 – Diagrama em blocos de um sistema com realimentação negativa.

### 2.3.9.2 Feedforward

A popularidade da técnica de *feedforward* deve-se ao fato de conseguir bons níveis de cancelamento de intermodulação para sinais de banda larga e multi-portadora (MARTINS, 2004). A correção é efetuada com base no sinal a cada instante. Assim sendo, a linearização é teoricamente independente do atraso nos vários elementos do sistema. Os conceitos que estão na base deste método são simples, contudo, a sua implementação prática pode tornar-se complexa e

onerosa. A sua versão base é constituída por dois caminhos principais, conforme mostra a Figura 2.15, um em que flui a componente principal do sinal, e outro dedicado ao sinal de cancelamento de erro.

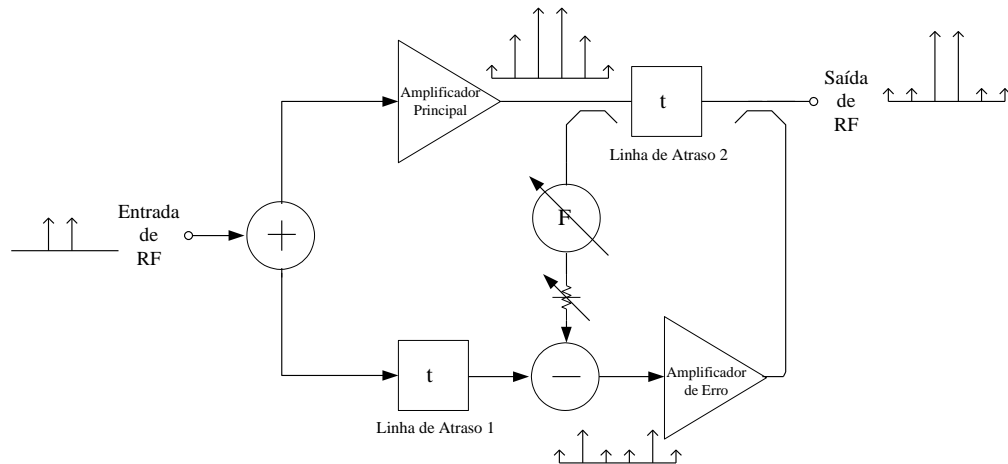


Figura 2.15 – Linearização por *feedforward*.

O sinal à entrada do circuito é dividido em dois ramos. Uma parte da potência de entrada é injetada numa linha de atraso de  $180^\circ$ . A outra parte do sinal é injetada no amplificador de potência. A porcentagem de potência que é injetada no ramo inferior deve ser baixa de forma a não afetar significativamente o desempenho do sistema. A distorção que se pretende cancelar é gerada no amplificador de potência. Todos os outros componentes do sistema são considerados lineares não contribuindo para as componentes de intermodulação. O sinal à saída do amplificador de potência é amostrado e combinado com a versão atrasada do sinal de entrada. O ajuste efetuado no sinal proveniente do amplificador tem como finalidade alterar o módulo e a fase para que após os sinais serem combinados, a componente fundamental desapareça restando apenas as componentes de distorção geradas no amplificador de potência. Este sinal é condicionado por um amplificador de erro que deve ser altamente linear, normalmente operando em classe A. De acordo com o diagrama da Figura 2.15, o sinal de RF à saída do amplificador de potência está contaminado com distorção. No ramo inferior à saída do somador, tem-se apenas o sinal de distorção gerado pelo amplificador de potência. A linha de atraso introduzida no ramo superior tem como função compensar o atraso provocado pelo amplificador de erro do ramo inferior. Os sinais de ambos os ramos são combinados à saída do sistema e, considerando que as componentes de distorção do sinal direto e do sinal de realimentação estão em oposição de fase, obtém-se uma saída sem distorção.

### 2.3.9.3 Pré-distorção

A pré-distorção é uma das técnicas de linearização mais utilizadas em aplicações práticas. Este fato deve-se à simplicidade de implementação embora os resultados finais não sejam tão bons comparativamente com outros métodos. A idéia base deste método consiste em distorcer o sinal de entrada do dispositivo não linear para que a distorção gerada por este seja cancelada pela do sinal de entrada. A distorção do sinal de entrada é gerada num bloco operando a baixa potência no caso de um sistema de amplificação. Assim, as perdas neste bloco não são críticas. Esta técnica tem algumas variantes em termos de implementação, pois o módulo de pré-distorção pode ser implementado em RF, FI ou banda base.

A base da pré-distorção consiste em criar à entrada do dispositivo a ser linearizado uma distorção de maneira que esta seja inversa daquela gerada posteriormente pelo sistema (MARTINS, 2004). A característica ideal do bloco de pré-distorção deverá ser inversa à do bloco a linearizar para que o resultado final seja uma característica linear. Este processo é representado na Figura 2.16.

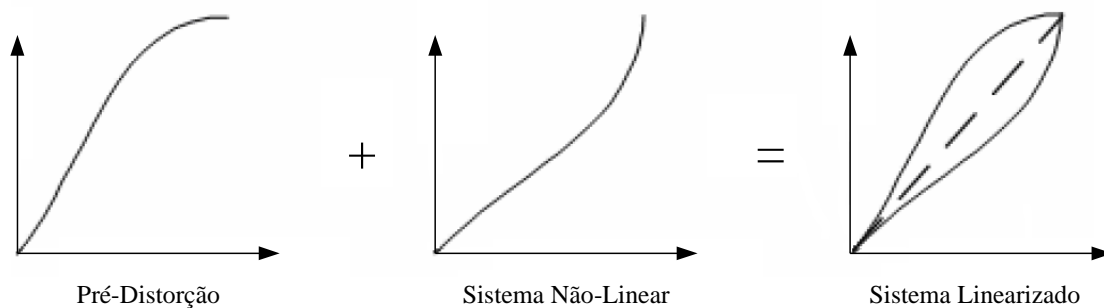


Figura 2.16 – Resposta de um sistema de linearização por pré-distorção.

#### 2.3.9.4 LINC

A técnica LINC (“*linear amplification using nonlinear components*”) permite o processamento de sinais com envelope não constante por amplificadores otimizados para ter a máxima eficiência em potência, apresentado contudo uma forte componente de distorção não-linear. A amplificação é efetuada recorrendo a dois amplificadores polarizados em classe C, D ou E. Em cada amplificador é injetado um sinal obtido através da separação em duas componentes com amplitude constante do sinal de entrada convertido para a banda de RF. Esta separação pode ser efetuada em banda base ou em qualquer banda intermédia, conforme mostra a Figura 2.17.

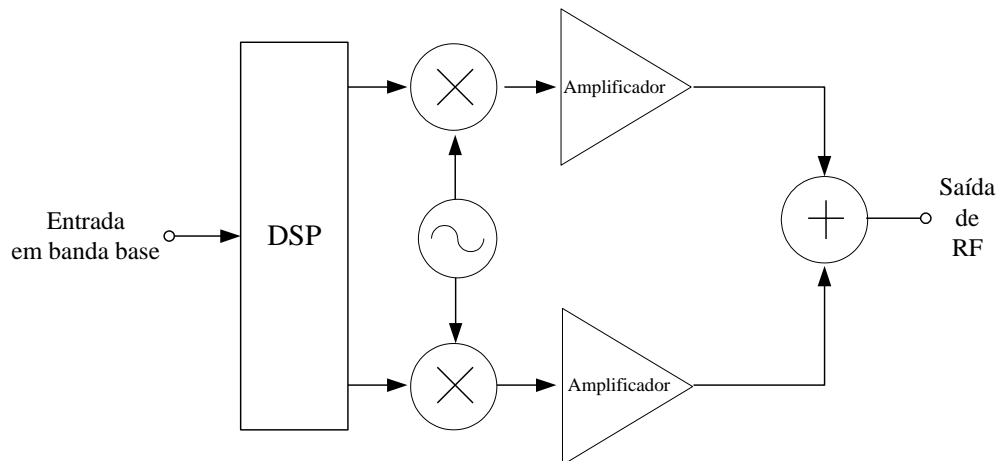


Figura 2.17 – Amplificação linear baseada na técnica LINC.

Devido às capacidades de processamento existentes atualmente, é favorável efetuar esta operação em banda base recorrendo a técnicas digitais. A distorção gerada nos amplificadores é baixa visto que o sinal apresenta amplitude constante. Por outro lado, as componentes de distorção à saída encontram-se em oposição de fase cancelando-se mutuamente. O acoplador que adiciona a saída dos dois amplificadores é um componente crítico, uma vez que as perdas neste ponto limitam a eficiência em potência. Por outro lado, os desajustes de amplitude e de fase na saída são fatores críticos que limitam o nível de cancelamento de distorção.

Desta forma, como há muitos fatores envolvidos, faz-se necessário utilizar uma abordagem otimizada para projetar e produzir amplificadores de RF, visando acelerar o desenvolvimento e avaliação destes, levando em consideração os fatores citados. Estes fatores são de extrema importância durante a fase de projeto do amplificador, mas também devem ser monitorados durante o processo produtivo, pois a observação constante poderá indicar dispersões dignas de atenção. A Figura 2.18 mostra como os fatores apresentados se relacionam fisicamente com o amplificador de RF.

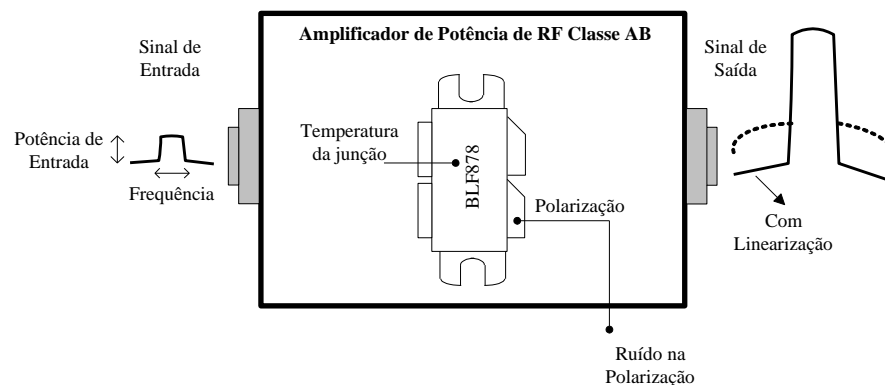


Figura 2.18 – Fatores envolvidos e sua relação com o modelo físico do amplificador.

# Capítulo 3

## 3. Desenvolvimento

### 3.1 Descrição da abordagem de pesquisa utilizada

Quando se planeja executar uma experiência, geralmente tem-se em mente obter uma melhor compreensão da relação existente entre os fatores de entrada de interesse (ou variáveis exploratórias) e a resposta de interesse.

Uma vez que é necessário tomar decisões-chave sobre a forma de executar uma experiência, na ausência do conhecimento espera-se ganhar ao finalizar o teste, o pesquisador muitas vezes se vê em uma difícil situação. Se o mesmo soubesse de antemão quais fatores são importantes, que faixa de valores desses fatores é mais vantajosa, e qual o modelo mais razoável para caracterizar a relação entre a resposta e os fatores, isto tornaria o experimento muito mais direto. Provavelmente não é possível ou razoável pensar em termos de conceber uma única experiência que permita aprender tudo de importância sobre o produto ou processo de interesse. Portanto, o conceito de experimentação seqüencial, muitas vezes faz mais sentido.

Às vezes, devido as condições de trabalho disponíveis, o pesquisador pode se ver forçado a executar uma única experiência. No entanto, em muitas aplicações industriais, esta restrição de tempo não existe, e o pesquisador é livre para coletar dados em várias etapas muito bem planejadas. Muitos artigos sobre planejamento de experimentos demonstram ser muito fácil se concentrar em um único projeto de experimentos como a solução para a compreensão de um processo, e os papéis dos diferentes tipos de experimentação podem ser facilmente esquecidos.

Pode-se pensar em experimentação seqüencial como uma série de exercícios de pequenas coletas de dados: em cada etapa o pesquisador se esforça para aprender a partir do conhecimento adquirido pela experiência anterior e aperfeiçoar o modelo estimado para responder com mais precisão a questão de interesse.

A progressão típica deste tipo de experimentação pode seguir as seguintes etapas:

- a) Planejamento preliminar para assegurar que o exato problema seja resolvido.
- b) Uma análise exploratória ou experimento de varredura para considerar os muitos fatores de entrada possíveis que podem ser influentes e refinar o conjunto de fatores para um menor conjunto de fatores mais importantes.
- c) Deslocar a região de interesse para perto de um ótimo alterando os intervalos das variáveis restantes até o ponto ótimo estar contido na região em que a próxima experimentação irá ocorrer.
- d) Um experimento utilizando a metodologia de superfície de resposta (*RSM – response surface methodology*) para estimar com mais precisão a relação entre os fatores importantes e a resposta, e para identificar a localização mais provável para o processo ou produto ser otimizado.
- e) Um experimento de confirmação para verificar se as informações obtidas nas fases anteriores estão corretas e dados futuros podem ser coletados com a melhor combinação dos fatores de entrada.

Na seqüência, cada um dos tópicos acima são detalhados.

- **Planejamento preliminar:** *brain-storming*, estudos históricos e uma experiência-piloto preliminar podem ajudar a definir e refinar algumas das questões de definição e medição associadas a um problema de pesquisa: Qual é a característica de interesse? Pode-se encontrar uma medida numérica adequada para essa característica? Pode-se medi-la com precisão? Quais são alguns dos fatores de entrada a serem considerados como potencialmente importantes?
- **Experimento exploratório ou experimento de varredura:** Esta fase começa com uma lista de fatores potencialmente importantes e pretende explorar a importância relativa destes em mudar as respostas de interesse. Aqui o pesquisador está provavelmente mais interessado na magnitude dos efeitos brutos e em determinar quais das diversas variáveis explicativas inicialmente exploradas podem ser descartadas em uma análise mais aprofundada.
- **Deslocamento da região de interesse para próximo do ótimo:** um modelo de primeira ordem ou um modelo de primeira ordem com interação é geralmente uma escolha adequada para a fase de exploração. Idealmente, o pesquisador gostaria de eliminar os fatores que contribuem substancialmente menos para alterações na resposta dos fatores dominantes ou mais significantes.



- **Experimento RSM:** o coração do estudo é freqüentemente o projeto de RSM, que leva o subconjunto mais influentes dos fatores iniciais e explora a estreita relação entre os fatores e a resposta. Um modelo de ordem superior (como segunda ou terceira ordem) é comumente necessário, porque próximo do ponto ótimo da resposta pode haver uma considerável curvatura da superfície modelada.
- **Experimento de confirmação:** uma vez que o projeto RSM e a análise estatística têm sugerido uma ou mais combinações de fatores importantes em que a resposta ótima é estimada em uma dada localização, deve-se executar um pequeno experimento para verificar a confirmação de que o modelo e os dados produziram um resultado verificável e do qual se pode depender para uma execução de longo prazo e em escala de produção.

Esta noção de experimentação seqüencial pode ser usada em vários pontos dentro da evolução global dos experimentos. Em algumas situações, faz sentido executar um planejamento central composto durante a fase de RSM, com blocagem, mesmo quando isto não é exigido pelas restrições no número de ensaios possíveis de uma só vez.

Um exemplo desta situação pode ser representado por um cientista planejando uma experiência que envolve três fatores. O objetivo é compreender uma resposta de interesse – neste exemplo, um dado rendimento – sob as condições atuais de funcionamento. As excursões atuais dos três valores de cada fator foram determinadas através de tentativa e erro, e foram determinadas para produzir uma resposta estável e um rendimento satisfatório. A robustez dessas condições não é conhecida. Pode facilmente haver ganhos no rendimento movendo-se na região em entorno do espaço atual do projeto. No entanto, não há razão para acreditar que o projeto continue estável se o pesquisador mudar os três fatores muito dramaticamente. Neste caso, um planejamento composto central composto de oito observações a partir de um fatorial  $2^3$ , com seis pontos axiais e vários ensaios centrais pode ser uma escolha lógica para a compreensão de mudanças no rendimento em função dos três fatores de entrada. Entretanto, decidir sobre as faixas de valores de cada fator – centradas em torno das condições de funcionamento atuais – revela-se bastante difícil, pois o pesquisador não tem certeza se a estabilidade do processo seria permanecer.

Neste tipo de situação, a execução do experimento em dois blocos provê algumas das vantagens da aprendizagem seqüencial, primeiramente com a execução da parte fatorial do projeto (os vértices do cubo) com dois ensaios centrais. Com base no comportamento observado nas bordas da região, a escala de níveis para cada fator axial poderia ser determinada antes da

execução do segundo bloco do experimento. Essa abordagem talvez contribua para evitar escolher valores que provavelmente são:

- Muito extremos e resultam em um ensaio perdido por causa da instabilidade do processo;
- Não muito próximos das atuais condições a ponto de ser redundante ao conhecimento já existente.

Embora não seja normalmente apresentado como tendo flexibilidade para escolher diferentes valores axiais para cada um dos três fatores, o planejamento composto central pode ser facilmente adaptado para acomodar esta situação. O único subproduto dessa falta de simetria é uma precisão diferente para cada um dos parâmetros estimados e um projeto menos flexível na predição da região do projeto.

Ao executar os ensaios centrais em cada um dos dois blocos, tem-se alguma capacidade de avaliar diretamente o efeito da blocagem e obter uma estimativa do erro puro. O tamanho do experimento completo não foi afetado pela escolha de executá-lo em dois blocos, mas potencialmente permite ao pesquisador adquirir informações valiosas que o ajudarão a evitar o desperdício de ensaios experimentais com combinações de fatores não-produtivas.

Sempre que possível, no planejamento de experimentos industriais, faz sentido buscar por oportunidades para incorporar as abordagens seqüenciais. As respostas a partir de experimentos industriais com frequência podem ser obtidas em um curto espaço de tempo. O processo de experimentação seqüencial permite adaptar o projeto de experimentos na medida em que se aprende com o mesmo, reduzindo o desperdício e melhorando a qualidade dos resultados.

É importante destacar uma nota de advertência sobre a experimentação seqüencial: embora existam muitas vantagens em usar essa abordagem – como a melhoria da qualidade do entendimento, mesmo gastando menos tempo através da coleta de dados mais enxuta – deve-se ter cuidado ao combinar os resultados das diferentes fases de experimentação para modelar devidamente as mudanças no processo ao longo do tempo com os efeitos da blocagem. Quando experimentações seqüenciais são viáveis, elas podem levar a enormes ganhos de eficiência e guiam a aprendizagem para dar respostas mais precisas às perguntas de interesse.

Devido ao elevado número de fatores envolvidos no processo e a complexidade das potenciais interações entre estes para controle e robustez do processo de projeto e produção de amplificadores de RF de potência, o uso de Delineamento de Experimentos (*Design of Experiments* – DOE) é a metodologia natural a ser adotada. Coleman e Montgomery (1993) sugerem que a solução de problemas de processos industriais pode ser alcançada com mais

facilidade e robustez quando o experimento é planejado e as respostas analisadas com métodos e técnicas estatísticas, assim como indicam uma seqüência ou passos adequados para a condução dos trabalhos de investigação e melhoria:

- a. *Reconhecimento e estabelecimento (definição) do problema;*
- b. *Escolha de fatores, níveis e faixas de trabalho;*
- c. *Seleção da variável resposta;*
- d. *Seleção da matriz experimental (projeto de experimentos);*
- e. *Realização dos experimentos;*
- f. *Análise estatística dos dados;*
- g. *Conclusão e recomendações.*

Em síntese, tais passos são descritos a seguir:

*a. Reconhecimento e estabelecimento do problema:* Parece óbvio do ponto de vista industrial ou de engenharia, entretanto nem sempre isto é tão simples como parece. Nesta fase é primordial o envolvimento de especialistas das diversas áreas – Qualidade, Manufatura, Pesquisa e Desenvolvimento etc. Estes especialistas muitas vezes podem ter pontos de vista conflitantes. Conhecer o problema melhora substancialmente o foco da equipe e contribui em muito para a solução do mesmo.

*b. Escolha de fatores, níveis e faixas de trabalho.* Nesta fase devem-se selecionar os fatores de controle (variáveis independentes), fatores de ruído e os níveis de ajuste que serão experimentados. O conhecimento prático do processo, aliado à compreensão teórica do processo, são fundamentais nesta etapa. Também se deve definir o método de medição dos fatores, assim como a escala numérica utilizada.

*c. Seleção da variável resposta.* Variáveis de resposta são variáveis dependentes que sofrem algum efeito nos testes, quando estímulos são introduzidos propositalmente nos fatores que regulam ou ajustam os processos de fabricação. Para experimentos industriais, a escolha de uma variável resposta factível, tal como intermodulação, potência ou eficiência envolve primeiro a relação intrínseca de evidenciar quando há o problema, ou seja, estar relacionada ao mesmo, assim como envolve um adequado estudo de capacidade e capacidade do meio de medição, de modo a ser possível detectar variações advindas dos experimentos, sem introduzir demasiado ruído no sistema.

*d. Seleção da matriz experimental (projeto de experimentos):* O termo projeto denota uma matriz

onde as colunas representam os  $n$  fatores de controle e cada linha representa uma combinação de  $k$  níveis destes fatores. Quando diversos fatores são potencialmente importantes, a melhor estratégia é planejar algum tipo de experimento fatorial, Montgomery (1993). Ao selecionar ou construir a matriz experimental, devem ser considerados o número de fatores de controle, o número de níveis e os fatores não controláveis (ruídos) do processo. Um projeto fatorial clássico pode ter  $n$  níveis e  $k$  fatores, levando a um número de combinações ou linhas de  $n^k$ . Esta etapa requer cuidado e apoio estatístico. Experimentos fatoriais quando envolvem um número significativo de fatores são de grande tamanho e quantidade de corridas elevados, que podem ser limitados ou não factíveis pela disponibilidade de recursos ou de tempo requeridos. Alguns *softwares* como Minitab, Statistica, SPSS, JMP, Matlab, entre outros, podem ajudar na escolha e análise desses projetos experimentais. Usando nos fatores e seus níveis a experiência dos especialistas, para avaliar por simulação se os modelos e fatores escolhidos estão adequados, pode-se economizar muito tempo e reduzir custos, ao assumirem algumas possíveis simplificações. Ainda nesta fase são definidas as seqüências das corridas, o número de réplicas, as restrições dos experimentos e as possíveis interações entre os fatores que estão sendo avaliados.

*e. Realização dos experimentos:* Nesta etapa é muito importante que o processo seja acompanhado para assegurar que todas as premissas e procedimentos sejam executados conforme o plano. É desejável que o responsável tenha um bom conhecimento prático e técnico do processo em estudo. Este responsável deve acompanhar os testes com um diário de bordo, anotando quaisquer fatos ou mudanças que possam interferir nos experimentos, assim como quaisquer observações que possam ser relevantes. Montgomery (1993) considera a pesquisa experimental como um processo iterativo, ou seja, informações e respostas colhidas nas primeiras rodadas ou corridas de teste são utilizadas como dados de entrada para demais corridas e até para reavaliação da matriz escolhida e dos fatores.

*f. Análise estatística dos dados:* Nesta etapa os dados são compilados e analisados. Métodos gráficos e numéricos, análise de resíduos e a adequação de modelos empíricos podem ser utilizados para avaliar efeitos principais e de interações entre fatores de processo. Os softwares previamente mencionados ajudam na busca de adequadas matrizes experimentais e a executar análises. Os conceitos estatísticos são aplicados para a correta interpretação dos resultados, para avaliar e obter indicações dos fatores de controle e seus efeitos nas respostas observadas.

*g. Conclusões e recomendações:* Ao finalizar a etapa de análise de dados, devem-se extrair conclusões práticas dos resultados, assim como recomendações para melhoria de processo de

fabricação. Podem ainda levantar novas questões para trabalhos futuros e também propor testes e experimentos confirmatórios com relação ao projeto de experimentos verificado, de modo a validar as melhores combinações encontradas e o modelo empírico.

A seqüência experimental proposta é normalmente interativa e pouco rígida. Alguns passos podem ser feitos simultaneamente, ou até em ordem invertida, sem haver prejuízo aos resultados esperados. Os passos *a*, *b* e *c* são considerados de planejamento pré-experimentais, enquanto os passos *d*, *e* e *f* constituem o núcleo da fase experimental propriamente dita. Estes passos serão descritos ao longo deste capítulo. O passo *g* será apresentado no Capítulo 4. A Figura 3.1 sintetiza a seqüência adotada nesta pesquisa.

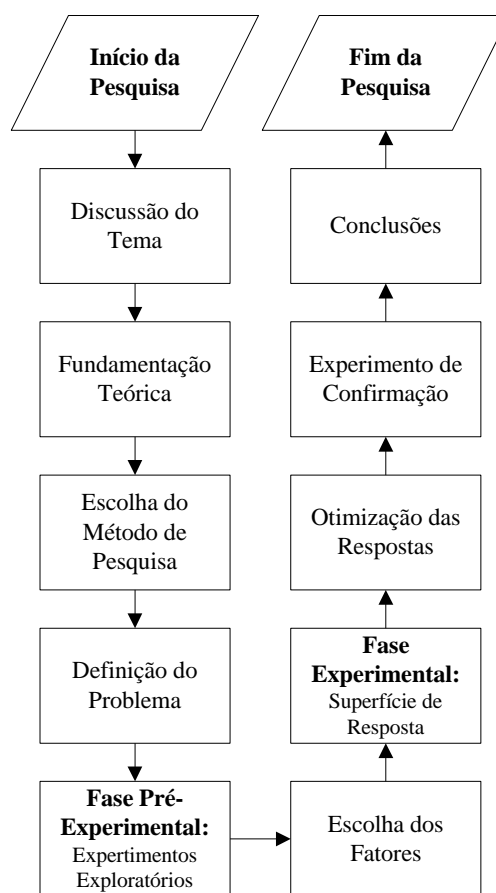


Figura 3.1 – Seqüência adotada na pesquisa.

Dada a demanda apresentada pelo setor de telecomunicações por amplificadores mais eficientes, mais lineares e capazes de atender o maior número de aplicações possíveis, ou seja, serem banda larga para atenderem uma ampla faixa de frequências de operação, vê-se a necessidade de analisar a questão e propor uma metodologia para melhoria do processo produtivo. Em suma, o presente trabalho de pesquisa pode ser assim sintetizado:

A existência de altos níveis de intermodulação em amplificadores de RF de potência pode comprometer a qualidade do produto final e/ou gerar falhas catastróficas com severas conseqüências para os usuários finais. As principais questões a serem investigadas nesse estudo são: i) Quais fatores envolvidos no processo de amplificação são responsáveis pelo aumento de intermodulações? ii) Como esses fatores se relacionam com a eficiência? iii) Como estes fatores podem ser controlados visando aumentar a qualidade do produto e a produtividade? iv) Como um mesmo amplificador pode ser utilizado para atender o maior número possível de cliente, ou seja, ser banda larga?

A Figura 3.2 mostra o ambiente industrial no qual este estudo é realizado.

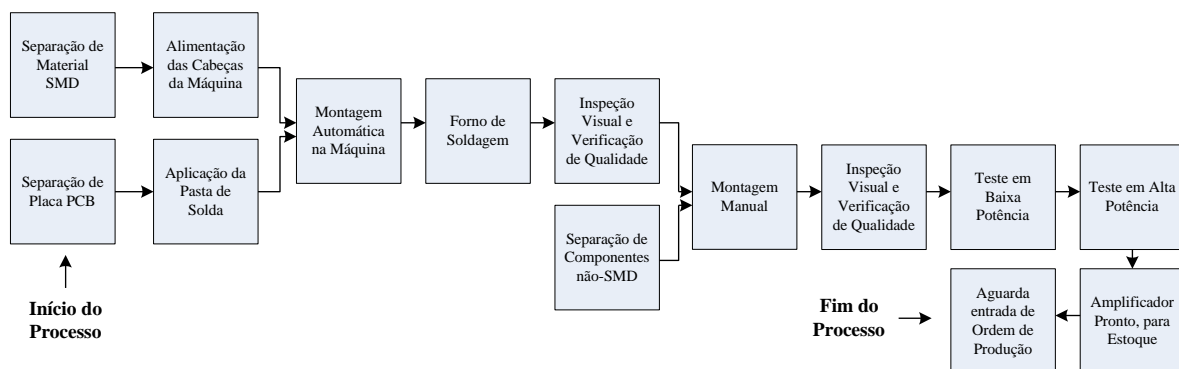


Figura 3.2 – Processo produtivo do amplificador de RF de potência sujeito a otimização.

A Figura 3.3 mostra um conjunto de dados históricos obtidos de um amplificador. Pode-se observar nesta figura que há uma grande dispersão dos valores de intermodulação e eficiência dentro da faixa de frequências de UHF, que são representadas numericamente pelos canais de número 14 a 69. Isto faz com que este amplificador não possa ser considerado um amplificador banda larga, havendo a necessidade de customizá-lo para cada frequência de operação, ou seja, não é possível utilizar o mesmo amplificador para todas as frequências de UHF. O ideal seria obter um mesmo valor de intermodulação e eficiência para todos os canais com mínima variabilidade.

## 3.2 Experimentos exploratórios

O objetivo na primeira fase experimental é varrer rapidamente e eficientemente um grande conjunto de potenciais fatores importantes e identificar os fatores que são de fato importantes. Isto é feito através de um experimento exploratório em que os efeitos de todos os

componentes são analisados simultaneamente. Experimentos fatoriais fracionários (*FFD – Fractional Factorial Designs*) são economicamente úteis na realização deste objetivo. O princípio de Pareto – segundo a qual apenas um pequeno subconjunto de fatores e suas interações serão importante – norteia esta fase exploratória. Assim, muitas interações podem ser excluídas *a priori*, aumentando a eficiência da pesquisa. O uso de DOE e da função Desirability de Derringer parecem adequados para este problema, pois eficiência e intermodulação são respostas conflitantes.

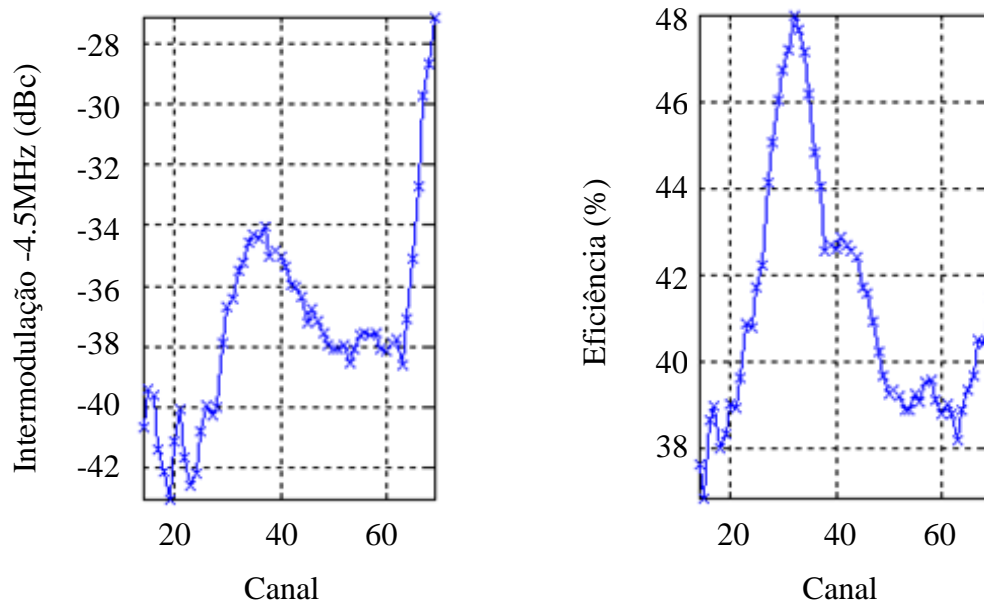


Figura 3.3 – Dados históricos para intermodulação e eficiência.

Os diversos fatores considerados na seção anterior foram classificados por um grupo de especialistas do ramo de telecomunicações em seções de *brainstorm*, conforme mostra a Tabela 3.1. Este grupo também definiu e atribuiu um índice denominado de *sensibilidade* associada ao controle dos fatores no processo (fatores de médio controle (1) e controláveis (2)).

Tabela 3.1 – Análise exploratória dos fatores potenciais influentes no processo.

Fator	Sensibilidade	Fator	Sensibilidade
Tipo do Transistor	2	Uso de Linearização	2
Corrente de Polarização	2	Temperatura de Operação	1
Potência de Entrada	2	Montadora Manual	1
Canal de Operação	2	Ruído na Alimentação DC	1
Classe de Operação	1	Obs.: 1=Médio controle, 2=Controlável	

A equipe decidiu pela investigação experimental de todos os fatores utilizando um planejamento de experimentos exploratórios onde as respostas na saída de cada amplificador são mostradas na Tabela 3.2. Estas respostas são afetadas diretamente, em maior ou menor grau, pelos fatores listados na Tabela 3.1.

Tabela 3.2 – Respostas esperadas.

<b>Y</b>	<b>Nome</b>	<b>Tipo de Resposta</b>
Y <sub>1</sub>	Intermodulação de Saída (dBc)	Menor Melhor
Y <sub>2</sub>	Eficiência (%)	Maior Melhor

Os projetos experimentais de Taguchi e de Plackett-Burman são naturais candidatos a projetos exploratórios. Optou-se pela abordagem tradicional de Plackett-Burman devido a característica de ortogonalidade, o que permite que os efeitos principais de cada fator sejam determinados individualmente, admitindo-se que os efeitos de interação sejam desprezíveis. Este modelo, além de ser adequado para situações exploratórias, também pode ser utilizado em pesquisas economicamente enxutas, pois permite com  $n$  experimentos investigar  $n-1$  fatores e utiliza-se de fatores “fantasmas”, os quais servem para fazer a estimativa do erro experimental (BARROS, SCARMÍNIO E BRUNS, 2003). Assim como os experimentos de Taguchi, os experimentos de Plackett-Burman podem ser considerados de resolução III, onde os efeitos principais dos fatores estão confundidos com os efeitos de interações de segunda ordem. Esse é um custo a se pagar para se analisar um grande número de fatores. Os resultados exploratórios, contudo, indicam uma nova fase experimental a ser projetada.

A matriz de Plackett-Burman gerada com os respectivos resultados de Intermodulação (Y<sub>1</sub>) e Eficiência (Y<sub>2</sub>), considerando os nove fatores definidos na Tabela 3.1 e seus respectivos níveis, são mostrados na Tabela 3.3. Em cada ensaio, uma combinação de fatores diferentes foi utilizada e a intermodulação e a eficiência resultantes foi medida e registrada na tabela. A combinação destes fatores foi gerada segundo a racional de Plackett-Burman.

Tabela 3.3 – Matriz de Plackett-Burman.

<b>Ensaio</b>	<b>Linear.</b>	<b>Temp.</b>	<b>Pot.</b>	<b>Transistor</b>	<b>Ruído</b>	<b>Montad.</b>	<b>Corrent.</b>	<b>Classe</b>	<b>Canal</b>	<b>Y<sub>1</sub></b>	<b>Y<sub>2</sub></b>
1	On	20°C	-5,8 dBm	BLF878	Alto	IV	7,7 A	AB	69	-48,55	0,41
2	On	20°C	-5,8 dBm	MRF3450H	Baixo	I	7,7 A	A	14	-52,23	0,34
3	On	35°C	-2,6 dBm	BLF878	Baixo	IV	9,8 A	A	69	-53,20	0,32
4	Off	20°C	-2,6 dBm	BLF878	Baixo	IV	7,7 A	A	14	-40,58	0,25
5	Off	35°C	-5,8 dBm	BLF878	Alto	I	9,8 A	A	14	-51,94	0,32
6	Off	35°C	-2,6 dBm	MRF3450H	Alto	IV	7,7 A	AB	14	-41,34	0,34
7	On	20°C	-2,6 dBm	BLF878	Alto	I	9,8 A	AB	14	-51,83	0,46



8	On	35 °C	-5,8 dBm	MRF3450H	Baixo	IV	9,8 A	AB	14	-57,60	0,49
9	Off	20 °C	-5,8 dBm	MRF3450H	Alto	IV	9,8 A	A	69	-46,01	0,29
10	Off	35 °C	-5,8 dBm	BLF878	Baixo	I	7,7 A	AB	69	-39,80	0,34
11	Off	20 °C	-2,6 dBm	MRF3450H	Baixo	I	9,8 A	AB	69	-43,29	0,33
12	On	35 °C	-2,6 dBm	MRF3450H	Alto	I	7,7 A	A	69	-48,29	0,26

A Figura 3.4 mostra a seqüência de realização das medições das duas respostas consideradas para os doze ensaios aleatorizados da matriz de Plackett-Burman.

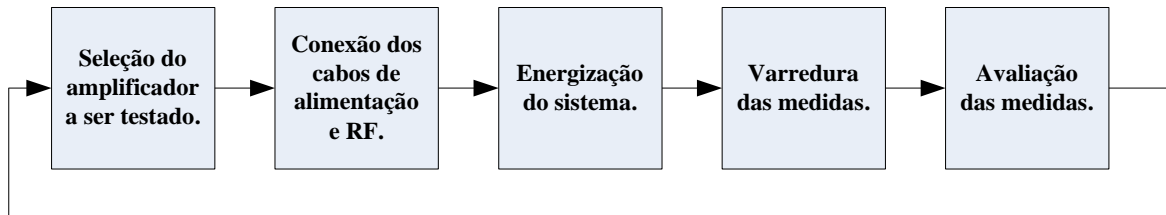


Figura 3.4 – Processo de medidas.

A Figura 3.5 mostra os resultados de análise dos efeitos principais dos fatores envolvidos no experimento exploratório. Para a resposta  $Y_1$  (Intermodulação) os fatores Linearização, Temperatura, Potência, Corrente, Classe e Canal se mostraram significativos (Valor  $P < 0.005$ ). Para a resposta  $Y_2$  (Eficiência) os fatores Linearização, Potência, Corrente, Classe e Canal também se mostraram significativos. Os demais fatores foram considerados insignificantes. Os projetos de Plackett-Burman são um dos chamados projetos de varredura. Tais projetos são tradicionalmente utilizados para a identificação de fatores importantes, dentre muitos fatores em potencial. Na análise destes projetos, normalmente, apenas os principais efeitos são estimados.

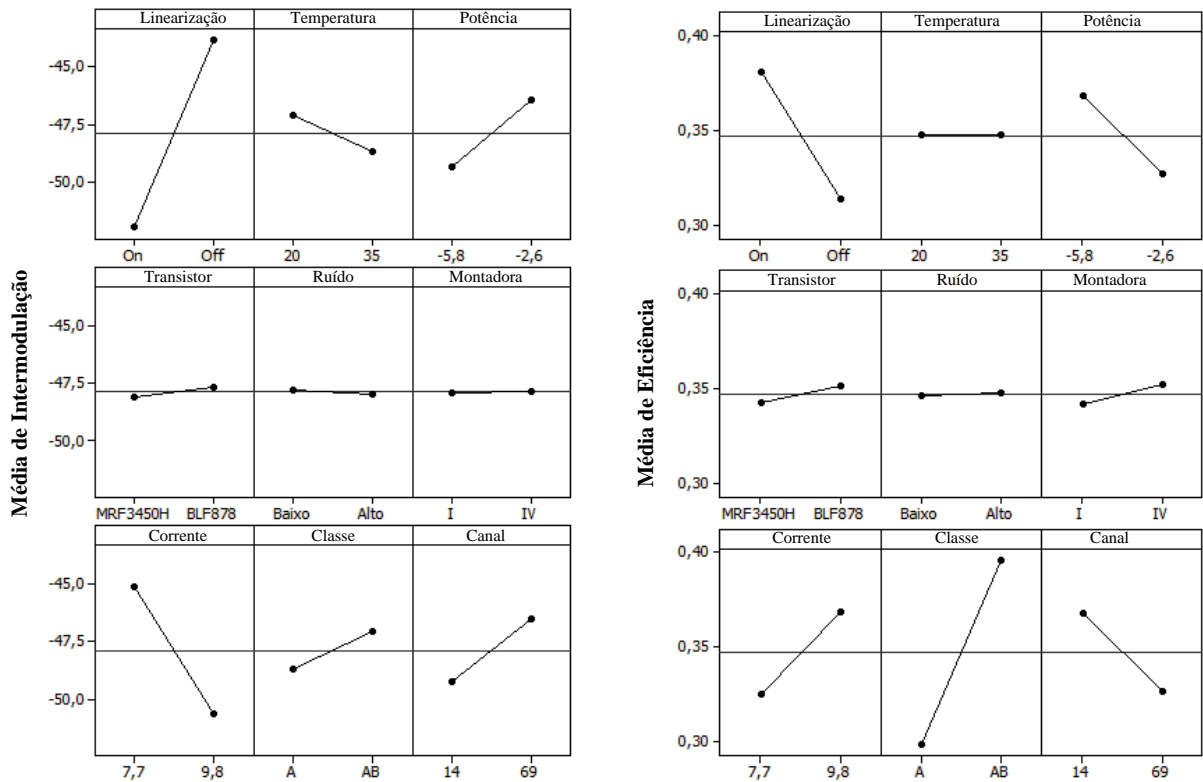


Figura 3.5 – Análise dos efeitos principais.

A partir dos resultados obtidos no experimento exploratório, foi possível desprezar os fatores que menos impactaram nas respostas desejadas em um estudo consecutivo. Os fatores excluídos foram mantidos sob controle, fixando-os em um nível de fácil controle e de baixo custo. Os principais fatores significativos foram fixados em seus níveis no sentido de otimizar as duas respostas desejadas. Alguns fatores, passíveis de terem seus efeitos confundidos com interações foram selecionados para uma segunda fase experimental. A Tabela 3.4 sintetiza os resultados obtidos pelo DOE exploratório de Plackett-Burman.

Tabela 3.4 – Decisão sobre os fatores de estudo a partir do DOE de Plackett-Burman.

Fator	Justificativa	Decisão
Tipo do Transistor	Seleção do BLF878, pela maior eficiência	Fixar
Corrente de Polarização	Analisar em um segundo DOE	Analisar
Potência de Entrada	Analisar em um segundo DOE	Analisar
Canal de Operação	Analisar em um segundo DOE	Analisar
Classe de Operação	Seleção da Classe AB, pela maior eficiência	Fixar
Uso de Linearização	Seleção por ON, pelo ganho nas duas respostas	Fixar
Temperatura de Operação	Fixação na temperatura ambiente de 25°C	Fixar
Montadora Manual	Fixação na montadora 2	Fixar
Ruído DC	Fixação em ruído baixo	Fixar

### 3.3 Metodologia de superfície de resposta

Desde os primórdios da investigação científica, realizavam-se experimentos para validar teorias e para levantar novas hipóteses sobre um mundo desconhecido. Mas foi a partir da década de 20, com os trabalhos de R. A. Fisher, que se passou a ter uma metodologia confiável para planejar experimentos e analisar os seus dados. Grande parte dos trabalhos de Fisher eram voltados à agricultura, onde buscavam encontrar uma combinação adequada dos elementos de um fertilizante considerando o cultivo, o clima e o tipo de solo.

Na área industrial, especialmente nas duas últimas décadas, as técnicas de planejamento de experimentos passaram a fazer parte de programas de melhoria da qualidade. Esta prática deve-se muito aos trabalhos de Box, Hunter e Huter (1978) e Taguchi (1987) que popularizaram os chamados projetos experimentais do tipo fatorial fracionado, os quais permitem avaliar grande número de fatores com poucos ensaios. Montgomery (1997) oferece uma apresentação bastante didática destes projetos.

A aplicação da metodologia de planejamento de experimentos na avaliação de sistemas computacionais é razoavelmente recente. Contudo, Jain (1991) já elegia o planejamento de experimentos como uma das principais ferramentas na avaliação de desempenho de sistemas computacionais. Muitos trabalhos, também, apóiam-se em sistemas computacionais para simular dados de algum processo, como descrito em Welch (1992), Mayer e Benjamin (1992) e Shang e Tadikamalla (1998), os quais projetam a simulação e realizam a análise dos dados sob a metodologia de planejamento de experimentos.

A metodologia de superfície de resposta pode ser entendida como uma combinação de técnicas de planejamento de experimentos, análise de regressão e métodos de otimização. Tem larga aplicação nas pesquisas industriais, particularmente em situações onde um grande número de variáveis de um sistema influencia alguma característica fundamental deste sistema.

Box e Draper (1987) apresentam a RSM como uma metodologia que consiste num grupo de técnicas usadas em estudos empíricos. Estas técnicas relacionam uma ou mais respostas, tais como produção, tonalidade e viscosidade com variáveis de entrada, tais como tempo, temperatura, pressão e concentração. A RSM tem sido usada para responder questões do tipo:

- Como uma resposta particular é afetada por um conjunto de variáveis de entrada sobre uma região de interesse?
- Quais conjuntos de entradas geram um produto satisfazendo simultaneamente várias especificações desejadas?

- Quais os valores de entradas que produzem o valor máximo para uma resposta específica e como se comporta a resposta em torno deste máximo?

Dado um processo ou sistema, com vários fatores de entrada ( $x = x_1, x_2, \dots, x_k$ ) e uma resposta  $y$ , a RSM normalmente consiste em:

a) planejar um experimento que permita estimar uma equação de regressão (superfície de resposta) do tipo mostrado na equação 6:

$$E(\mathbf{y}|\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\beta}), \quad \mathbf{x} \in D \subset \mathfrak{R}^k \quad (6)$$

onde:

- $E(\mathbf{y}|\mathbf{x})$  representa o valor esperado de  $\mathbf{y}$ , condicionado a pontos  $\mathbf{x} \in D$ ;
- $f$  é uma função (usualmente um polinômio de grau não superior a 2);
- $\mathbf{x}$  é o vetor de variáveis de entrada;
- $\boldsymbol{\beta}$  é um vetor de parâmetros a ser estimado a partir dos dados do experimento e
- $D \subset \mathfrak{R}^k$  é a região especificada para a investigação.

b) com os dados do experimento, estimar o vetor de parâmetros  $\boldsymbol{\beta}$ , avaliando a significância estatística de seus componentes e

c) estudar o comportamento da função  $f$  (por exemplo, se é desejado o maior valor possível para a resposta  $y$ , um dos interesses é obter que maximiza  $f$ , caso ele exista).

No contexto do planejamento de experimentos, é possível caracterizar a relação entre uma ou mais respostas a um conjunto de fatores de interesse. Para o nosso caso a relação apropriada é mostrada na equação 7:

$$(\text{Intermodulação, Eficiência}) = f(\text{corrente, potência, canal}) \quad (7)$$

O conhecimento da forma funcional de  $f$ , freqüentemente obtido com a modelagem de dados provenientes de experimentos planejados, permite tanto sumarizar os resultados do experimento quanto prever a resposta para valores dos fatores. Assim, a função  $f$  define a superfície de resposta. Pode-se então definir a superfície de resposta como sendo a representação geométrica obtida quando uma resposta é traçada como uma função de um ou mais fatores quantitativos.

No planejamento de experimentos para estudar ou ajustar superfícies de resposta, a função de resposta é caracterizada em uma região de interesse do pesquisador, para que seja possível utilizá-la na prática. Após o ajuste do modelo aos dados, é possível estimar a

sensibilidade da resposta aos fatores, além de determinar os níveis dos fatores nos quais as respostas são ótimas (por exemplo, máxima ou mínima).

Dentre as diversas metodologias existentes, temos a metodologia de experimentos centrais compostos (*CCD – Central Composite Design*), através da qual podemos criar experimentos centrais com ou sem blocos. Como exemplo, um *CCD* com dois fatores é mostrado na Figura 3.6. Os pontos no diagrama representam os ensaios experimentais que são realizados.

A metodologia de superfície de resposta é, atualmente, o mais popular conjunto de técnicas para otimização. A primeira etapa desta técnica consiste na escolha de um delineamento experimental seguida de modelagem matemática, que é realizada ajustando-se modelos lineares ou quadráticos a resultados experimentais, obtidos através de planejamentos fatoriais com ou sem ampliação (BARROS, SCARMINIO E BRUNS, 1996). Após esta etapa é possível deslocar-se sobre a superfície de resposta ajustada, a fim de localizar regiões que satisfaçam condições de interesse.

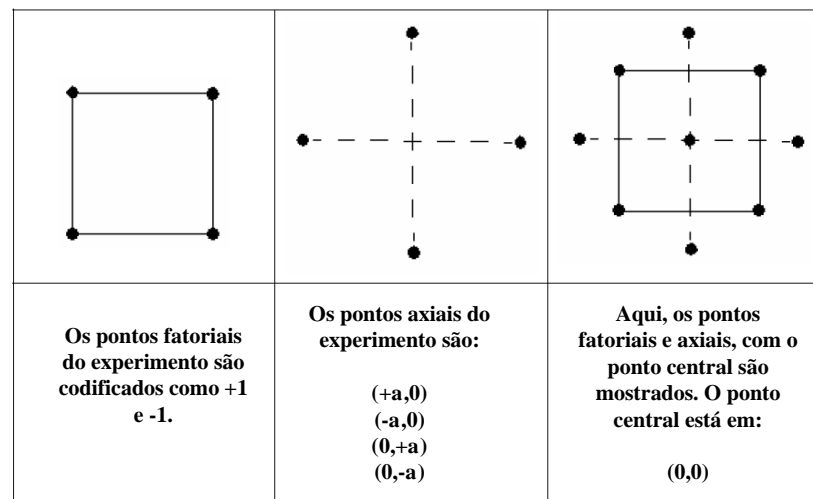


Figura 3.6 – Experimento central composto com dois fatores.

Fonte: Steel e Torrie, 1960.

A partir do experimento exploratório, o grupo decidiu por uma investigação dos fatores quantitativos possíveis de serem confundidos com interações envolvendo superfícies de resposta. Estes níveis foram escolhidos também com a premissa de cobrirem as especificações de um amplificador banda larga. A Tabela 3.5 apresenta os fatores de estudo e os níveis selecionados para a fase experimental da superfície de resposta.

Tabela 3.5 – Fatores e níveis do estudo experimental.

Fator de Estudo	Nível -	Nível +
Corrente de Polarização (A)	8,1	9,3

Potência de Entrada (dBm)	-4,6	-3,8
Canal de UHF ou Frequência	28	49

Iniciou-se o projeto elaborando uma matriz de experimento e repostas segundo a metodologia de experimentos centrais compostos, para  $k=4$ , considerando os fatores Corrente, Potência, Canal e Montadora. Isto resultou em 16 pontos fatoriais, 7 pontos centrais e 8 pontos axiais, totalizando 31 ensaios. O número de experimentos foi escolhido para favorecer superfícies de resposta considerando termos quadráticos e termos de interação. Porém, verificou-se que algumas das combinações apresentadas não seriam possíveis de ensaiar e/ou medir. Além disto, optou-se por excluir o fator Montadora, pelas racionais já expostas anteriormente. A Tabela 3.6 mostra a tabela final de experimentos gerada, através de um DOE customizado.

Tabela 3.6 – Matriz de experimento e repostas.

Ensaio	Corrente	Potência	Frequência	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>
1	9,7	-5,8	14	-48,8	0,375
2	9,2	-4,8	21	-49,0	0,391
3	8,0	-4,8	28	-49,6	0,440
4	7,8	-5,4	35	-47,5	0,464
5	8,4	-4,2	42	-48,3	0,433
6	8,9	-4,7	49	-49,2	0,400
7	9,3	-3,6	56	-49,3	0,397
8	8,4	-3,8	69	-44,2	0,384
9	9,7	-5,3	14	-49,8	0,376
10	8,9	-4,4	21	-49,0	0,389
11	8,1	-4,1	28	-50,0	0,450
12	7,9	-4,8	35	-47,3	0,461
13	8,5	-3,9	42	-49,0	0,426
14	9,0	-4,7	49	-50,0	0,396
15	9,2	-3,9	56	-50,0	0,390
16	8,8	-2,9	69	-41,7	0,414
17	9,5	-5,2	14	-49,6	0,371
18	9,1	-4,2	21	-49,1	0,406
19	7,9	-4,0	28	-50,0	0,459
20	7,7	-4,6	35	-46,5	0,474
21	8,4	-3,7	42	-47,8	0,436

<b>22</b>	9,3	-4,2	49	-49,1	0,399
<b>23</b>	9,5	-3,2	56	-49,0	0,378
<b>24</b>	8,8	-3,1	69	-42,9	0,418
<b>25</b>	9,5	-5,0	14	-49,1	0,371
<b>26</b>	9,0	-4,2	21	-49,4	0,407
<b>27</b>	7,9	-4,2	28	-49,8	0,460
<b>28</b>	7,9	-4,7	35	-46,8	0,464
<b>29</b>	8,5	-4,6	42	-48,9	0,421
<b>30</b>	9,3	-5,2	49	-49,4	0,383
<b>31</b>	9,8	-3,5	56	-49,6	0,375

As Tabelas 3.7 e 3.8 trazem as análises estatísticas deste experimento, apresentando os coeficientes de regressão linear estimados para intermodulação e eficiência, respectivamente. Primeiramente, os *Valores-P* determinam quais dos efeitos do modelo são estatisticamente significativos.

Pela análise de variância, têm-se evidências suficientes de que o modelo utilizado é adequado para explicar a relação desses fatores com a resposta. O valor de R-Sq, que representa a proporção da variação na resposta explicada pelo modelo, é de 97,6% para a Eficiência e de 86,5% para a Intermodulação, o que também mostra a adequação deste modelo. Os *Valores-P* mostram que a Intermodulação é afetada pela Corrente e Canal. A Eficiência é afetada pela Corrente e Potência. As interações Corrente-Potência e Corrente-Canal mostram-se significantes para a Intermodulação. Termos quadráticos também estão presentes nos modelos. Valores em negrito de *Valores-P* mostram os fatores significativos dos modelos para as duas respostas.

O valor de R-Sq (adj) é de 90,1% para a eficiência e de 79,3% para a intermodulação. Nas estatísticas, o coeficiente de determinação R-Sq (ou  $R^2$ ) é usado no contexto de modelos estatísticos, cuja principal finalidade é a previsão de resultados futuros com base em outras informações relacionadas. Ele representa a proporção da variabilidade em um conjunto de dados que é explicada pelo modelo estatístico (Steel e Torrie, 1960) e fornece uma medida de quão bem os resultados futuros podem ser previstos pelo modelo.

Existem várias definições diferentes de  $R^2$  que são equivalentes apenas algumas vezes, como nos casos de regressão linear. Neste caso,  $R^2$  é simplesmente o quadrado do coeficiente de correlação da amostra entre os resultados e os seus valores previstos, ou, no caso de regressão linear simples, entre o resultado e os valores que estão sendo utilizados para a previsão. Nesses casos, os valores variam de 0 a 1. De uma forma geral,  $R^2$  pode ser visto relacionado com a

variância inexplicável.  $R^2$  é uma estatística que fornece algumas informações sobre a qualidade do ajuste de um modelo. Na regressão, o coeficiente de determinação  $R^2$  é uma medida estatística de quão bem a linha de regressão se aproxima dos pontos de dados reais. Um  $R^2$  de 1 indica que a linha de regressão se encaixa perfeitamente nos dados.

Valores de  $R^2$  fora do intervalo de 0 a 1 podem ocorrer quando este é utilizado para medir a concordância entre valores observados e modelados, e quando os valores modelados não são obtidos por regressão linear, dependendo também da formulação de  $R^2$  é usada. Em muitas (mas não em todas) instâncias onde  $R^2$  é usado, os preditores são calculados através da regressão por mínimos quadrados ordinários. Neste caso,  $R^2$  aumenta na medida em que aumentar o número de variáveis no modelo ( $R^2$  não irá diminuir). Isso ilustra um inconveniente para um possível uso de  $R^2$ , onde se pode tentar incluir mais variáveis no modelo até que não haja mais melhorias. Isso leva à abordagem alternativa de olhar para o  $R^2$  ajustado. A explicação para essa estatística é quase a mesma do  $R^2$ , mas penaliza a estatística quando variáveis extras são incluídas no modelo.

$R^2$  ajustado não tem a mesma interpretação que  $R^2$ . Como tal, é preciso ter cuidado na interpretação e elaboração de relatórios desta estatística.  $R^2$  ajustado é particularmente útil na fase de seleção de fatores para construção de modelos.  $R^2$  ajustado não é sempre melhor do que  $R^2$ :  $R^2$  ajustado será mais útil apenas se o  $R^2$  é calculado com base em uma amostra, e não com base em toda a população (BARBETTA, RIBEIRO E SAMOBYL, 2000).

Nagelkerke (1991) generaliza a definição do coeficiente de determinação  $R^2$  como:

- Um coeficiente de determinação generalizado deve ser coerente com o coeficiente de determinação clássico quando ambos puderem ser calculados.
- Seu valor também deve ser maximizado pela estimativa da probabilidade máxima de um modelo.
- Deve ser, pelo menos assintoticamente, independente do tamanho da amostra.
- Sua interpretação deve ser a proporção da variação explicada pelo modelo.
- Deve estar entre 0 e 1, com 0 indicando que o modelo não explica qualquer variação e 1 denotando que explica perfeitamente a variação observada.
- Ele não deve ter nenhuma unidade.

O  $R^2$  não diz nada a respeito se:

- as variáveis independentes são a verdadeira causa das mudanças na variável dependente;
- variáveis omitidas existem;



- a regressão correta foi utilizada;
- o conjunto mais adequado de variáveis independentes foi escolhido;
- há colinearidade presente nos dados
- o modelo pode ser melhorado usando versões transformadas do conjunto atual de variáveis independentes.

Tabela 3.7 – Análise estatística para Intermodulação.

<b>Termo</b>	<b>Coef</b>	<b>SE Coef</b>	<b>T</b>	<b>P</b>
Constante	-49,3966	0,3991	-123,782	<b>0,000</b>
Corrente	-2,8551	0,3866	-7,385	<b>0,000</b>
Potência	0,4776	0,6211	0,769	0,451
Canal	3,1657	0,7791	4,063	<b>0,001</b>
Corrente*Corrente	0,4945	0,8679	0,570	0,575
Potência*Potência	1,7101	1,3385	1,278	0,216
Canal*Canal	3,3172	1,2826	2,586	<b>0,018</b>
Corrente*Potência	1,7528	0,7973	2,198	<b>0,040</b>
Corrente*Canal	-4,5883	1,4267	-3,216	<b>0,004</b>
Potência*Canal	-1,5300	1,9615	-0,780	0,445

Tabela 3.8 – Análise estatística para Eficiência.

<b>Termo</b>	<b>Coef</b>	<b>SE Coef</b>	<b>T</b>	<b>P</b>
Constante	0,411077	0,002849	144,291	<b>0,000</b>
Corrente	-0,053600	0,002760	-19,420	<b>0,000</b>
Potência	0,012715	0,004434	2,868	<b>0,010</b>
Canal	0,007106	0,005562	1,278	0,216
Corrente*Corrente	0,022293	0,006196	3,598	<b>0,002</b>
Potência*Potência	0,006423	0,009556	0,672	0,509
Canal*Canal	-0,001667	0,009157	-0,182	0,857
Corrente*Potência	-0,000602	0,005692	-0,106	0,917
Corrente*Canal	-0,021972	0,010186	-2,157	<b>0,043</b>
Potência*Canal	-0,016817	0,014003	-1,201	0,244

Procedendo à análise estatística dos dados, muitas estatísticas e gráficos podem ser utilizados. Quando a superfície de resposta é uma função de dois ou mais fatores, como nesse caso, os resultados podem ser descritos graficamente. Gráficos de contorno e superfície são úteis para estabelecer condições de operação para se obter valores desejáveis da resposta. Em um

gráfico de superfície, os valores dos dois fatores são representados nos eixos  $x$  e  $y$ , enquanto os valores da resposta são representados no eixo  $z$ . Esse gráfico fornece uma visão tridimensional que pode exibir um desenho mais claro da superfície de resposta.

Uma condição necessária para o uso de DOE consiste na análise estatística dos resíduos, através do gráfico de probabilidade normal dos resíduos, para verificar se estes não se desviam de forma substancial de uma distribuição normal. Se os resíduos seguem uma distribuição normal, os pontos descreverão, aproximadamente, uma linha no gráfico de probabilidade. Para esses dados, o gráfico de probabilidade normal dos resíduos mostra que se pode pressupor que estes resíduos seguem uma distribuição normal. Testes de resíduos usando a estatística de Anderson-Darling também confirmam os achados gráficos. A normalidade também pode ser avaliada através do histograma. A Figura 3.7 mostra os gráficos de superfície e resíduos para as resposta, gerados pelo software Minitab.

Tipicamente, na análise de dados industriais existem muitas variáveis de resposta (ou características físicas do produto final) que estão sob investigação ao mesmo tempo. Relações entre essas respostas são bastante comuns e o analista deve decidir que respostas são as mais importantes, normalmente em detrimento de outras respostas. Avaliando as respostas, o analista pode então determinar o conjunto de condições de operação para fazer o produto com a melhor resposta global. Este conjunto de condições de operação é chamado de condição ideal para o processo. Uma vasta gama de técnicas de otimização de múltiplas respostas, às vezes também chamadas de técnicas multi-critério para tomada de decisão (*MCDM – Multicriteria Decision Making techniques*), pode ser encontrada na literatura. Duas técnicas, a sobreposição de curvas de nível (*overlaying contour plots*) e a função de utilidade (*desirability*) têm resistido ao teste do tempo devido ao equilíbrio entre facilidade de uso e a capacidade de localizar um ponto ótimo (DEL CASTILLO, MONTGOMERY E MCCARVILLE, 1996).

### Superfícies de Resposta para Intermodulação

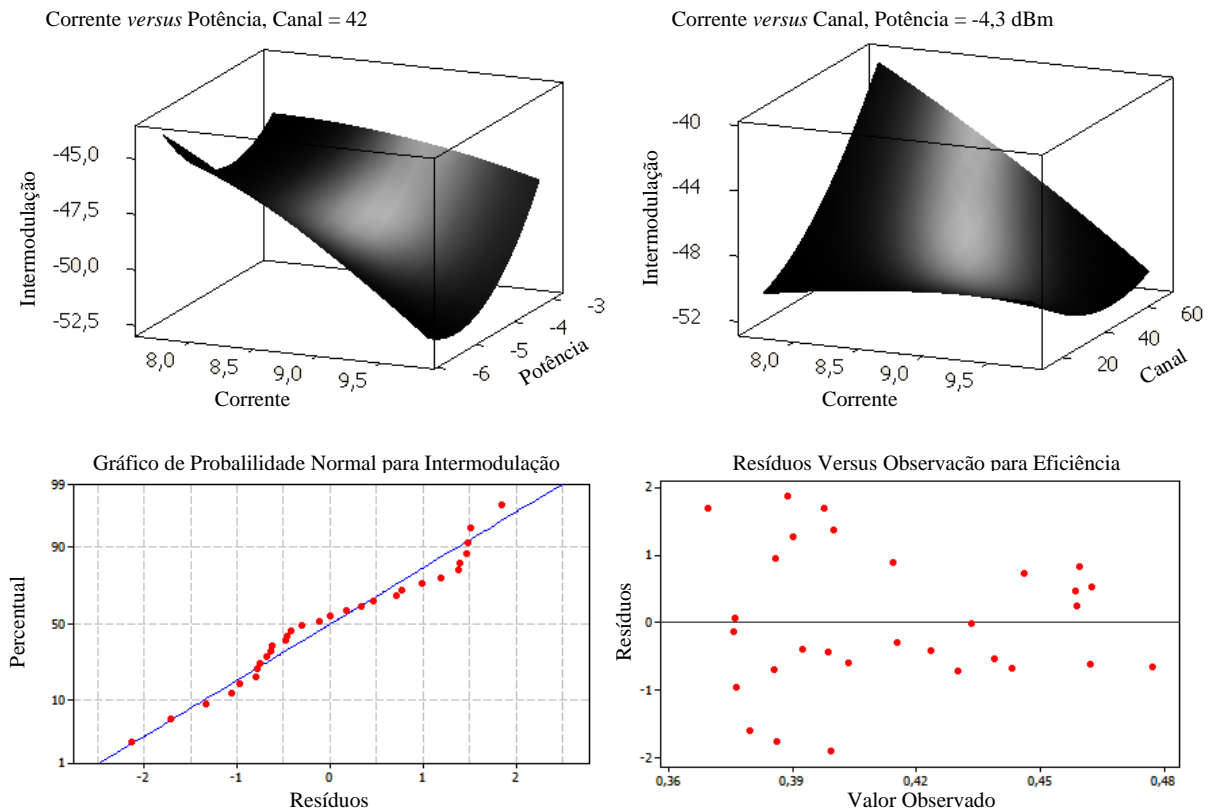


Figura 3.7 – Gráfico de superfície e resíduos para intermodulação e eficiência.

É possível modelar cada uma das respostas esperadas individualmente com grau bastante elevado de precisão. Entretanto, a otimização de cada resposta raramente leva a uma solução de compromisso que atende a maioria dos objetivos. Uma abordagem eficiente desse problema exige a sistematização de técnicas computacionais que possam estimar a melhor combinação dos fatores que resulte na melhor combinação possível das respostas, considerando a importância relativa de cada resposta para o sistema estudado. O emprego da função *desirability* é uma das técnicas que permite uma resolução para esse tipo de problema, que foi proposta inicialmente por Harrington e, posteriormente modificada por Derringer e Suich (1980).

Geralmente, a otimização múltiplas respostas é complexa e considerada uma atividade de tentativa e erro. Atentos a este tipo de problema de otimização de respostas e seguindo a idéia de agregação de múltiplos objetivos, Derringer e Suich (1980) propuseram um algoritmo para otimização simultânea de várias respostas, as quais dependem de um dado número de fatores independentes ou de um conjunto de condições. Com esta abordagem, a transformação é conduzida para cada uma das  $p$  respostas resultando em uma função *desirability* individual  $d_i$ , com  $0 \leq d_i \leq 1$ . Neste método, o modelo estatístico é primeiramente obtido usando mínimos quadrados ordinários (*ordinary least square*). Os valores individuais obtidos através da

transformação são então combinados utilizando média geométrica, compondo o índice de *desirability* global ( $D$ ), como mostra a equação 8:

$$D = \left[ \prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \left( \hat{Y}_i \right) \right]^{\frac{1}{W}} \quad (8)$$

onde  $w_i$  é o peso individual da resposta  $\hat{Y}_i$  e  $W$  leva a média geométrica. O peso define a forma da função de *desirability* para cada resposta. Para cada resposta é possível selecionar um peso de 0,1 a 10 para diminuir ou aumentar a ênfase em cada alvo. A Figura 3.8 ilustra este conceito. A abordagem da função de *desirability* é um dos métodos mais amplamente utilizados na indústria para a otimização dos processos de resposta múltipla. Ela é baseada na idéia de que a qualidade de um produto ou processo que tem múltiplas características de qualidade, com uma delas fora de algum dos limites desejados, é totalmente inaceitável. O método verifica as condições de funcionamento que oferecem "os mais desejáveis" valores para as respostas. A abordagem da função de *desirability* consiste das seguintes etapas:

1. Conduzir experiências e ajustar modelos de resposta para todas as  $\hat{Y}_i$  respostas;
2. Definir as funções de *desirability* individuais para cada resposta;
3. Maximizar (ou minimizar, ou atingir o alvo) o interesse geral  $D$  com relação aos fatores controláveis.

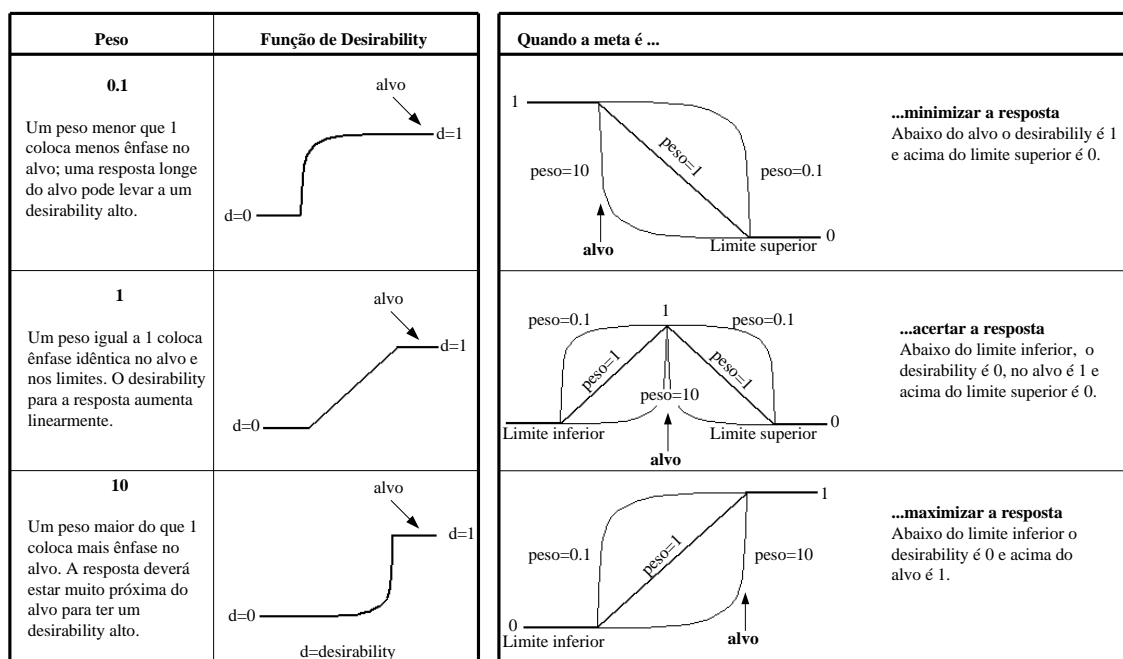


Figura 3.8 – *Desirability* de Derringer.

A função *desirability* é uma transformação da variável resposta a uma escala de 0 a 1. A resposta transformada, chamada  $d_i$ , pode possuir muitas formas diferentes. Independentemente da forma, uma resposta de 0 representa uma resposta totalmente indesejável, e 1 representa a resposta mais desejável. Criar essas funções *desirability* requer algum conhecimento prévio do analista uma vez que a forma pode ser extremamente flexível, conforme mostra a Figura 3.9.

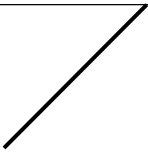

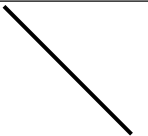
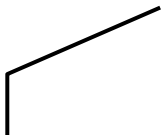
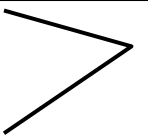

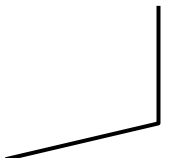
Para obter:	Forma da Desirability:	Para obter:	Forma da Desirability:
Maximizar (maior é melhor)		Máximo Retorno Diminuindo (o produto é melhorado para um ponto, após o qual a melhoria é vista mas não tão forte)	
Minimizar (menor é melhor)		Minimum Plateau (nenhum valor até um certo ponto)	
Alvo (um valor específico é melhor)		Mínimo Retorno Diminuindo (pequena melhoria até um ponto, e então uma rápida melhoria)	
Maximum Plateau (o produto é melhorado para um ponto, além do qual não é importante)			

Figura 3.9 – Algumas formas da função *Desirability*.

O valor de  $D$  leva a solução de compromisso e está restrito ao intervalo  $[0,1]$ .  $D$  é próximo de 1 quando as respostas estão perto das especificações. O tipo de transformação depende da direção da otimização desejada. Para a Intermodulação o alvo é a minimização da resposta, com alvo fixado em -48 dBc, máximo de -46dBc e peso de 0,1. Para a Eficiência o alvo é a maximização da resposta, com alvo fixado em 0,4, mínimo de 0,36 e peso de 0,1. Foi dada a mesma importância para as duas respostas.

A solução otimizada para minimizar a Intermodulação e maximizar a Eficiência pode ser obtida usando a função *desirability* de Derringer e Suich, conforme mostra a Figura 3.10. A *desirability composta* prevista foi de 1, onde o valor 1 representa um perfeito ponto de ótimo, e a solução global para o problema proposto pode ser então dada por:

- Canal = 42
- Potência de Entrada = -4,04 dBm
- Corrente = 8,99A

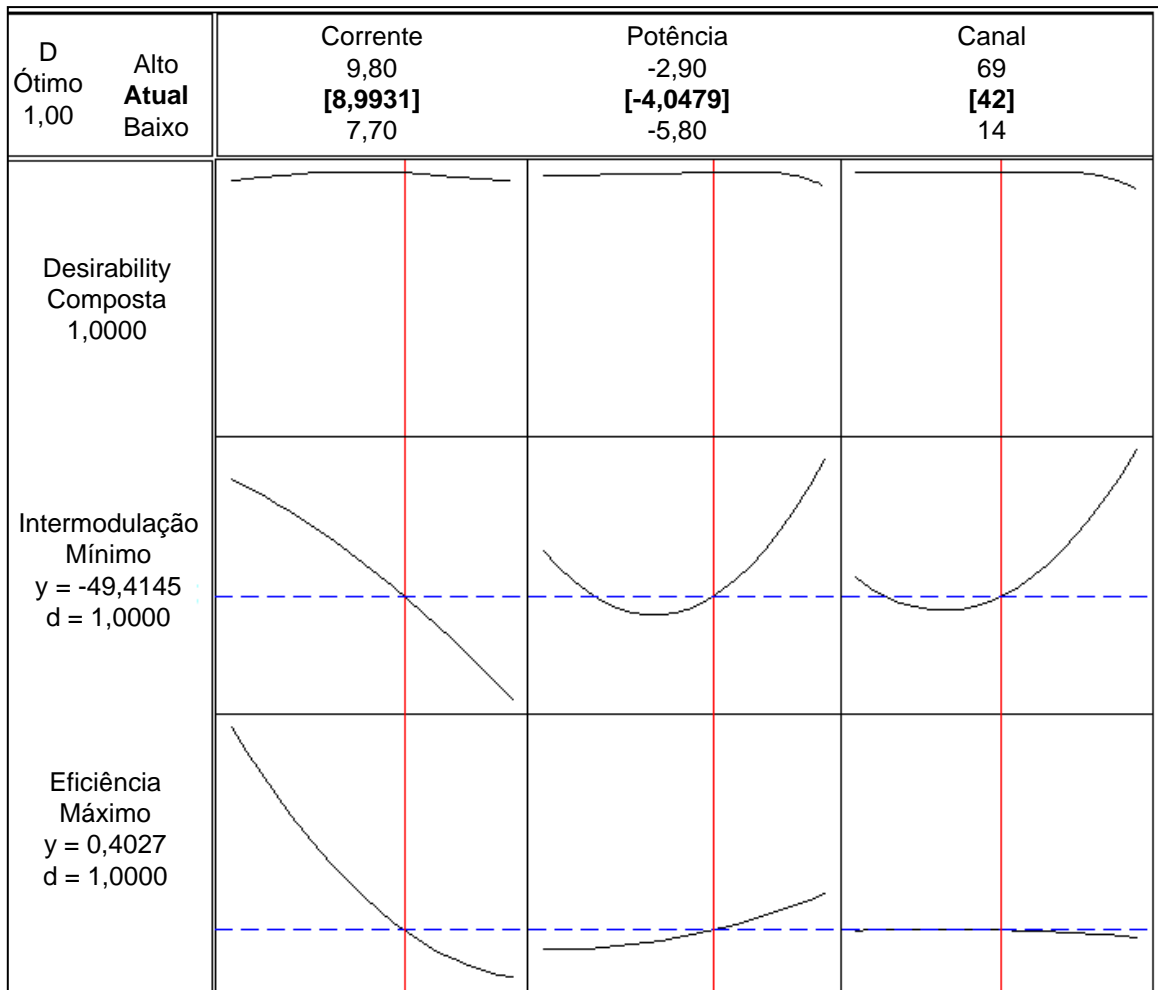


Figura 3.10 – *Desirability* de Derringer e Suich.

### 3.4 Experimentos confirmatórios

Quando a análise do experimento é finalizada, deve-se verificar se as previsões são boas. Estes são os chamados ensaios ou experimentos de confirmação. A maioria dos trabalhos experimentais na atmosfera científica é de natureza exploratória, e experimentos de confirmação formais raramente são realizados. As experiências de confirmação são aquelas que reproduzem uma experiência anterior com instruções específicas de hipóteses, testes, medições e análise de estratégias e resultados esperados. Tais experiências são especialmente importantes quando os resultados de um experimento exploratório proporcionam uma base estatística para uma hipótese que surgiu durante a análise dos dados. Um experimento confirmatório geralmente testa uma única hipótese *versus* a hipótese nula, sob condições experimentais totalmente determinadas.

A interpretação e as conclusões de um experimento devem incluir a melhor configuração a ser usada para se atender aos objetivos do experimento. Mesmo que este "melhor cenário" já estivesse incluído no projeto, deve-se executá-lo novamente como parte da confirmação para se

certificar de que nada mudou e que os valores de resposta estão perto de seus valores previstos. Em um ambiente industrial, é muito desejável que se tenha um processo estável. Portanto, deve-se executar mais de um teste com as melhores configurações. Um mínimo de três ensaios deve ser conduzido, permitindo uma estimativa da variabilidade dessas configurações. Se o tempo entre executar o experimento inicial e a condução do experimento de confirmação for muito longo, o pesquisador deve ter cuidado para garantir que nada mudou desde a coleta de dados original.

O experimento de confirmação deve ser executado em um ambiente o mais semelhante possível à experiência original. Por exemplo, se a experiência fosse realizada no período da tarde e os equipamentos se alteram com o aquecimento, a confirmação deve ser realizada no período da tarde com os equipamentos aquecidos. Outros fatores externos que podem alterar ou afetar os resultados dos ensaios de confirmação são o operador do equipamento, temperatura, umidade, parâmetros de máquinas, matérias-primas etc.

Se o experimento de confirmação não produzir os resultados esperados, recomenda-se:

- verificar se nada mudou desde a coleta de dados original;
- verificar se foram utilizadas as configurações corretas para o ensaio de confirmação;
- rever o modelo para verificar as melhores configurações a partir da análise estatística;
- verificar se está correto o valor previsto para o ensaio de confirmação.

Se não for possível encontrar a resposta depois de verificar o quatro itens acima, o modelo não pode prever muito bem na região definida como sendo a melhor possível. Mesmo assim, o pesquisador terá aprendido com a experiência e usará as informações obtidas a partir desta experiência para projetar outro experimento para dar prosseguimento a pesquisa.

Para uma indústria de telecomunicações, de nada adianta ter um amplificador customizado para um único ponto ótimo, pois é preciso suprir o mercado com amplificadores banda larga que acomodem todas as situações possíveis nas instalações de equipamentos. Assim, é necessário levar todos os canais de UHF para o ponto ótimo, garantindo um bom desempenho em toda a faixa de frequência e aumentando a confiabilidade e a produtividade dos amplificadores por uma menor dispersão dos valores de Eficiência e Intermodulação.

Uma hipótese estatística é uma afirmativa a respeito de um parâmetro de uma distribuição de probabilidade. A afirmação é chamada de hipótese e o procedimento de tomada de decisão sobre a hipótese é chamado de teste de hipóteses. Esse é um dos mais úteis aspectos da inferência estatística, uma vez que muitos tipos de problemas de tomada de decisões, teste ou

experimentos, no mundo da engenharia, podem ser formulados como problemas de teste de hipóteses. Utilizando esta abordagem foi realizado um experimento de confirmação para oito canais de operação e testes de hipóteses foram aplicados para avaliar os resultados, conforme mostram as Tabelas 3.9 e 3.10.

Tabela 3.9 – Experimento de confirmação para eficiência.

<b>Canal</b>	<b>Valores Estimados</b>	<b>Valores Obtidos</b>	<b>Valores Originais</b>
14	0,41	0,42	0,38
21	0,42	0,41	0,39
28	0,43	0,42	0,44
35	0,42	0,41	0,46
42	0,42	0,42	0,43
49	0,41	0,42	0,40
56	0,42	0,41	0,40
69	0,41	0,40	0,38

Tabela 3.10 – Experimento de confirmação para intermodulação.

<b>Canal</b>	<b>Valores Estimados</b>	<b>Valores Obtidos</b>	<b>Valores Originais</b>
14	-52	-53	-48,8
21	-53	-54	-49,0
28	-52	-53	-49,6
35	-53	-54	-47,5
42	-53	-55	-48,3
49	-54	-54	-49,2
56	-52	-53	-49,3
69	-52	-52	-44,2

É importante ressaltar que hipóteses são sempre afirmações sobre a população ou distribuição sob estudo, não afirmações sobre a amostra. O valor do parâmetro especificado da população na hipótese nula é geralmente determinado de uma das três maneiras. Primeiro, ele pode resultar de experiência passada ou de conhecimento do processo ou mesmo de testes ou experimentos prévios. O objetivo, então, de teste de hipóteses é geralmente determinar se o valor do parâmetro variou. Segundo, esse valor pode ser determinado a partir de alguma teoria ou do modelo relativo ao processo sob estudo. Aqui, o objetivo do teste de hipóteses é verificar a teoria ou o modelo. Uma terceira situação aparece quando o valor do parâmetro da população resulta de considerações externas, tais como projeto ou especificações de engenharia. Nessa situação, o objetivo usual do teste de hipóteses é obedecer ao teste. Procedimentos de testes de hipóteses usam informações de uma amostra aleatória proveniente da população de interesse. Se essa informação for consistente com a hipótese, então se conclui que a hipótese é verdadeira. No



entanto, se essa informação for inconsistente com a hipótese, conclui-se que a hipótese é falsa (MONTGOMERY, 1997).

As hipóteses levantadas foram se as médias, tanto da intermodulação quanto da eficiência, haviam se alterado se comparadas ao cenário inicial. Para isto, foi utilizado o teste *One Sample-t*. Os resultados destes testes são apresentados nas Tabelas 3.11 e 3.12. Os *Valores-P* menores que 0,05 mostram que houve aumento da Eficiência, quando comparada com o valor médio de 41%, e houve redução da Intermodulação, quando comparada com a média de -48,2 dBc. Pode-se verificar através do teste de hipóteses a diferença entre os valores estimados pelo conceito de Derringer e Suich (1980) e os valores obtidos na prática, ou seja, a diferença entre o comportamento original do amplificador sem o uso de nenhuma técnica de otimização e o resultado final obtido. Esta otimização foi realizada para os canais dentro da faixa de UHF, mas pode ser utilizada para as demais frequências do espectro de televisão. As Figuras 3.11 e 3.12 mostram graficamente os resultados antes e após a otimização.

Tabela 3.11 – Tabela de fatores ótimos para eficiência.

Variável	N	Média	DP	Média SE	95% Limite Inferior	T	P
Valores Estimados	8	0,41750	0,00707	0,00250	0,41276	3,00	<b>0,010</b>
Valores Obtidos	8	0,41375	0,00744	0,00263	0,40877	1,43	<b>0,099</b>
Valores Originais	8	0,4100	0,0298	0,0105	0,3901	0,00	0,500

Tabela 3.12 – Tabela de fatores ótimos para intermodulação.

Variável	N	Média	DP	Média SE	95% Limite Inferior	T	P
Valores Estimados	8	-52,625	0,744	0,263	-52,127	-16,82	<b>0,000</b>
Valores Obtidos	8	-53,500	0,926	0,327	-52,880	-16,19	<b>0,000</b>
Valores Originais	8	-48,238	1,759	0,622	-47,059	-0,06	0,477

Neste ponto se encerram todos os passos propostos para esta pesquisa, finalizando a etapa experimental e dando início ao detalhamento das conclusões obtidas, apresentadas no Capítulo 4.

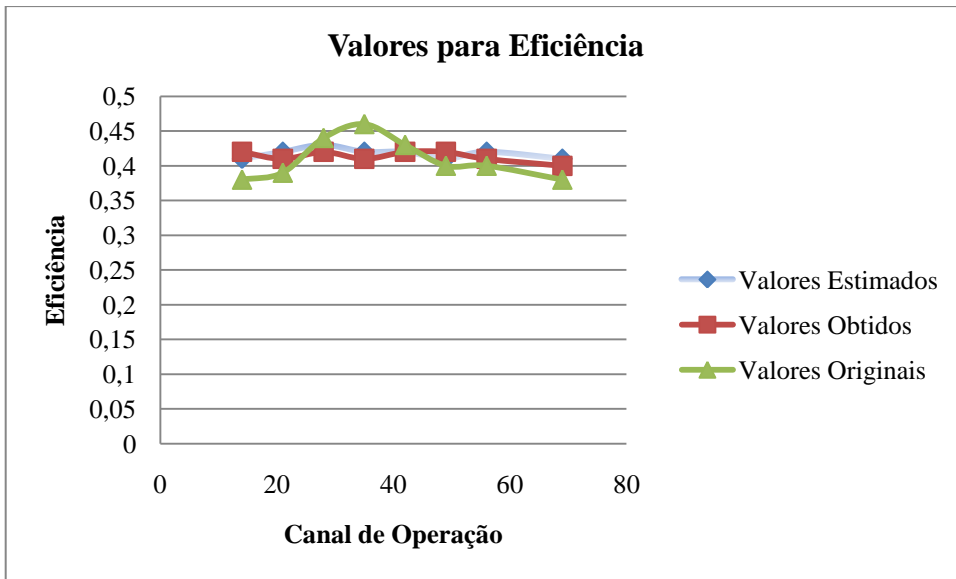


Figura 3.11 – Resultados após a otimização para a eficiência.

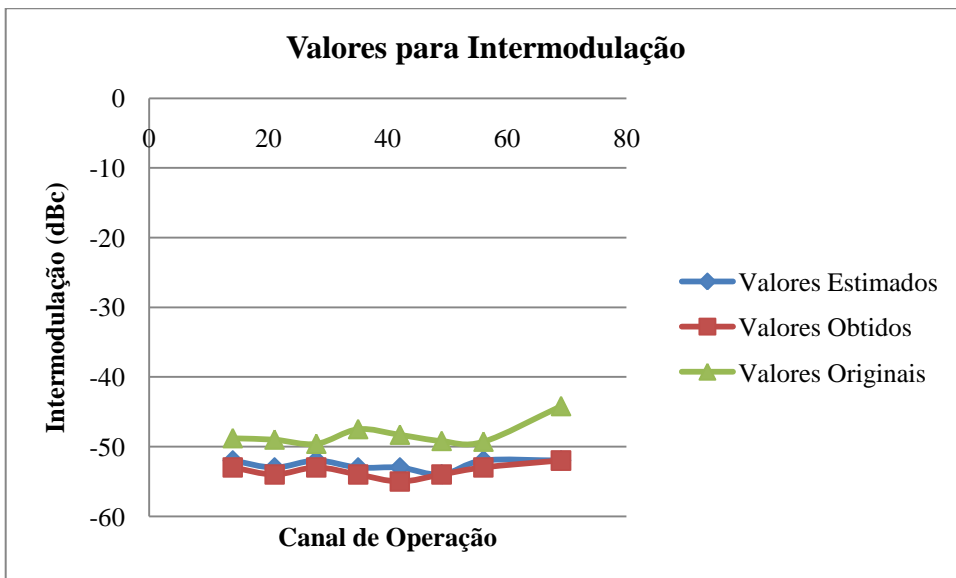


Figura 3.12 – Resultados após a otimização para a intermodulação.

# Capítulo 4

## 4. Conclusões

Atualmente para a sobrevivência de qualquer negócio é necessário conquistar e, principalmente, manter os clientes. Os produtos oferecidos estão muito similares ou são facilmente copiáveis o que requer um diferencial para as empresas manterem-se competitivas. Essa realidade provocou profundas mudanças nas empresas. As exigências requeridas aliadas as novas necessidades dos clientes, que hoje mais do que nunca sabem o que querem, somadas à dinâmica provocada pela evolução científica e tecnológica, tem forçado as empresas a assumirem novas posturas de competição.

Neste sentido, tanto a qualidade quanto a competitividade deixaram de ser apenas uma diferença entre as companhias para se tornarem fator de sobrevivência no mercado global. Neste cenário, colocar o produto certo, no local certo, na hora certa, pelo menor preço é a grande meta a ser alcançada.

É difícil cumprir os rigorosos requisitos de desempenho que hoje são necessários no competitivo mercado de circuitos de RF. O processo de desenvolvimento acaba se tornando uma série de escolhas feitas pela avaliação dos prós e contras do desempenho do circuito. Infelizmente, o processo de fazer essas escolhas é mais uma arte que uma ciência, devido às relações complexas que regem as respostas de um circuito. As relações entre as respostas fazem os *trade-offs* do projeto serem difíceis de quantificar e, portanto, raramente são utilizadas a favor do projetista. Além disto, os otimizadores de desempenho agravam o problema por serem extremamente sensíveis as ponderações feitas pelo usuário para cada um dos objetivos.

Rotinas de otimização executadas em softwares dedicados podem criar combinações de parâmetros de circuito impossíveis, respostas de circuitos que são muito sensíveis às variações

dos parâmetros, ou acabam ficando presas em um mínimo local sem atingir os objetivos de otimização desejados (Carroll e Chang, 1996). No entanto, observou-se que a técnica estatística de DOE pode ser usada em adição aos processos de concepção atuais, a fim de fazer o projeto do circuito mais fácil e a abordagem mais sistemática. Deve-se ressaltar que esta metodologia estatística de projeto é uma alternativa útil, e não é um substituto para as ferramentas de projeto atuais já disponíveis para o engenheiro.

A comunidade de qualidade, durante muito tempo, ignorou uma questão importante na melhoria do produto: como melhorar os produtos do ponto de vista de relações de compromisso das características esperadas? O problema é otimizar o balanceamento das características esperadas e este surge, pois uma característica é melhorada muitas vezes à custa de uma ou mais outras características. O problema de balanceamento é particularmente crônico em produtos gerados a partir de formulações, tais como adesivos, borracha, plásticos, tintas, pastas e ligas. Não é incomum ter que balancear 20 ou mais fatores para formulação de tais produtos. É possível modificar ligeiramente alguns fatores afim de obter uma melhor resposta. Mas esta mudança também pode resultar em processos de produção mais complexos e elevados custos de produção. O problema torna-se consideravelmente mais complexo quando vários fatores são variados simultaneamente. Problemas desta natureza se mostraram adequados para serem modelados e estudados através do uso combinado de superfícies de resposta e de otimização simultânea de respostas pela função *Desirability* de Derringer e Suich (1980).

Um produto robusto é aquele que é resistente às fontes de variabilidade tanto na sua fabricação quanto no seu uso. Redução de variância tornou-se um *slogan* que captura a essência do desenvolvimento robusto de um produto, ou seja, fazer um produto resistente a variabilidade. Um produto de formulação ideal é representado por um valor máximo de  $D$ . Em outras palavras, representa o topo de uma curva de *Desirability*.

Muitos dos conceitos de DOE foram popularizados pelas contribuições de Taguchi para a metodologia de projeto de qualidade. A base para essa abordagem é minimizar os prejuízos "para a sociedade", que ocorrem quando o desempenho de um produto varia de um alvo especificado pelos clientes (Carroll e Chang, 1996). As idéias de Taguchi para projetos de parâmetro e de tolerância evoluíram para o que a indústria rotulou como delineamento de experimentos para o projeto de produtos robustos.

Talvez a aplicação mais empolgante da abordagem estatística para a indústria de telecomunicações é a redução da variabilidade da resposta dos circuitos. Todos os circuitos que são produzidos têm alguma variabilidade inerente. Uma grande variação no circuito tende a causar perdas de produtividade alta. A variabilidade da resposta é devido a dois tipos de fatores:

variação dos fatores controláveis e ruído do ambiente de operação. O efeito da variação dos fatores controláveis é facilmente visto pelos gráficos de Pareto. O segundo tipo de variabilidade circuito é devido ao ambiente ou ao ruído, variáveis tais como mudanças nas tensões de polarização, parâmetros do FET para pequenos sinais, temperatura, envelhecimento dos componentes etc. Todas estas variações resultarão na degradação da intermodulação e da eficiência.

E por que a intermodulação é importante? Abaixo são descritos alguns pontos:

- **A intermodulação é importante, pois ela custa caro ao operador da infra-estrutura de telecomunicações.** Os novos sinais que são gerados quando um sinal passa através de um componente não-linear ou circuito são referidos como produtos de intermodulação e harmônicos. Em uma instalação de telecomunicações, a intermodulação pode ser gerada em quaisquer e inúmeros locais, tais como conectores, combinadores, cabos, filtros, antenas e amplificadores. Mesmo estruturas, como torres e esteiras de cabo podem contribuir para o problema através da interação com os campos magnéticos do sistema. Se não forem mantidos sob controle, os produtos de intermodulação eventualmente tornam-se fortes o suficiente para interferirem com outros equipamentos e distorcer sinais. A maior ameaça em uma estação radio-base, por exemplo, é a frequência de recepção. Uma vez atingidas, a estação começa a perder chamadas, diminuindo consideravelmente a capacidade do operador e perdendo dinheiro. A intermodulação deverá ser tão baixa quanto o número de chamadas que a operadora de rede estiver disposta a perder.
- **A intermodulação engana o operador de rede de telecomunicações.** A intermodulação não é facilmente medida em uma instalação de telecomunicações, o que explica muitas vezes ser mais fácil “fingir” que ela não está realmente lá e não fazer nada a respeito. Ela também é resultado de um processo gradual, que se perdura durante longos períodos de tempo, outra razão pela qual muitas vezes é ignorada por completo. No entanto, lentamente, mas seguramente, os efeitos serão sentidos. É apenas uma questão de tempo.
- **A intermodulação pode ser combatida.** Para superar ou reduzir os efeitos da intermodulação, há pelo menos duas coisas que o usuário precisa realizar. A primeira é a utilização de equipamentos de qualidade, e a segunda é a manutenção das boas condições de operação, incluindo monitorações periódicas dos valores obtidos.

E por que a eficiência é importante? Os produtos que são energeticamente eficientes produzem impactos positivos durante sua vida útil. As razões são as seguintes:

- Menores custos operacionais: os usuários se beneficiam de menores contas de luz e custos de manutenção.
- Aumento de confiabilidade: são mais confiáveis que os produtos ordinários.
- Maior vida útil: geralmente duram mais tempo que os produtos ordinários. Os usuários não precisam substituir esses aparelhos com tanta frequência.
- Menor risco de curto-circuito: os produtos com eficiência elétrica demandam menos energia, o que ajuda a reduzir o risco de curtos-circuitos e blecautes, assim como os desperdícios extraordinários que podem resultar das interrupções de energia.
- Mais capital para investimentos: ao usar produtos eficientes, a economia com as contas elétricas, o menor custo de manutenção e a maior vida útil dos produtos podem ser usados para investimentos empresariais estratégicos, que permitam às companhias crescer e prosperar.

Neste trabalho duas variáveis respostas - Intermodulação e Eficiência - foram analisadas e otimizadas utilizando a abordagem experimental proposta neste trabalho, permitindo realizar as seguintes afirmações com relação às questões levantadas na seção 3.

- i) Os fatores envolvidos no processo de amplificação que mais contribuem para o aumento de Intermodulações são o Canal de operação e a Corrente de polarização. Para esta resposta, há uma forte interação entre a Corrente e a Potência, e entre a Corrente e o Canal.
- ii) A Eficiência também é afetada pela Corrente e pela Potência, mas a melhoria obtida na otimização desta resposta foi menos significativa que a obtida para a Intermodulação.
- iii) É possível escolher valores ótimos para os fatores envolvidos no processo de amplificação de tal forma a obter Intermodulações reduzidas e melhores Eficiências. A escolha ótima destes fatores permite obter amplificadores com melhor desempenho e, por consequência, maior qualidade. O aumento da qualidade é percebido com a diminuição dos refugos na linha de produção por não atendimento aos requisitos técnicos, aumentando assim a produtividade.
- iv) Verificou-se ser possível utilizar um mesmo amplificador para atender toda a faixa de frequência de UHF (canais 14 a 69) com desempenho satisfatório, desde que os valores ótimos dos fatores estudados sejam escolhidos. Desta forma, para o transistor utilizado neste estudo, foi possível obter um amplificador banda larga capaz de atender um maior número de clientes com um mesmo produto.

O experimento aqui apresentado foi realizado em amplificadores para televisão digital na faixa de UHF, mas a mesma abordagem pode ser utilizada para qualquer outro amplificador em outras faixas de frequência. A inovação deste trabalho está na utilização de DOE e análises estatísticas para avaliação e otimização de circuitos eletrônicos, ferramentas normalmente não utilizadas nesta área, mas que se mostraram adequadas também para este tipo de problema e mais eficientes do que o método tradicional de tentativa e erro.

As curvas de otimização representam julgamentos de engenharia a respeito de como as propriedades individuais ou as respostas se traduzem em qualidade do produto. Eles vêm tanto de decisões individuais quanto de consensos do grupo. Se as curvas de otimizações são especificadas por uma pessoa, essa pessoa deve conhecer profundamente o produto. Idealmente, entretanto, o processo de atribuição de curvas de otimizações e seus pesos é melhor feito por consenso nas fases iniciais da concepção do produto. A reunião para se estabelecer o consenso deve incluir a presença de um perito facilitador e representantes de todas as áreas funcionais envolvidas com o produto, incluindo *marketing*, vendas, produção e, em alguns casos, atendimento ao cliente. O produto sob análise levará a um conjunto de decisões sobre as curvas de otimização e aos respectivos pesos atribuídos. Chegar a um consenso acerca do que realmente é importante garante que a equipe de desenvolvimento do produto tenha um objetivo bem definido antes de gastar tempo e dinheiro desenvolvendo este produto.

Para o cliente final a característica mais desejada para um amplificador é a eficiência elétrica, pois isto impacta diretamente nos gastos mensais do mesmo. Já a característica de banda larga é uma vantagem competitiva para a indústria fornecedora de amplificadores, pois um menor número de produtos pode atender a um maior número de clientes, resultando em menores prazos de entrega e estoques reduzidos.

Diante deste contexto, a gestão de estoque representa uma poderosa arma que pode afetar a satisfação do consumidor. Os estoques são materiais que uma empresa mantém, seja para vender ou para fornecer insumos ou suprimentos para o processo de produção e constituem uma parte substancial dos ativos totais. No entanto, manter estoques gera custos. Assim, a redução de estoques sem afetar o processo produtivo e sem aumentar os custos é um dos grandes desafios que as empresas deparam-se. Neste sentido, a gestão de estoques em ambientes cada vez mais complexos, exigentes e competitivos vem despertando a atenção das empresas devido ao fato de ser uma tarefa de difícil gerência.

A fim de garantir a manutenção da qualidade dos amplificadores com o passar do tempo, novas coletas e análises de dados devem ser realizadas para garantir a eficácia do processo produtivo. Além disso, pode-se realizar um estudo de viabilidade econômica para demonstrar a

redução de custos que esta abordagem pode trazer pela redução do tempo de produção e pela redução do estoque.



# Apêndice A

Artigo submetido e aprovado no periódico nacional Produção, em julho de 2010.

## OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO DE AMPLIFICADORES DE RADIOFREQUÊNCIA BANDA LARGA: UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL

Lima, V. B. S.  
Linear Equipamentos Eletrônicos SA  
[vanessa@linear.com.br](mailto:vanessa@linear.com.br)

Balestrassi, P. P.  
UNIFEI  
[pedro@unifei.edu.br](mailto:pedro@unifei.edu.br)

Paiva, A. P.  
UNIFEI  
[appaiva@unifei.edu.br](mailto:appaiva@unifei.edu.br)

### Resumo

*Neste trabalho buscou-se avaliar o comportamento de amplificadores de radiofrequência (RF) de potência em aplicações de telecomunicações. Uma estratégia experimental foi empregada resultando na otimização de um conjunto de fatores responsáveis pelo aumento da linearidade e eficiência geral do amplificador durante o processo produtivo, reduzindo com isto as intermodulações geradas e a interferência em serviços adjacentes. Estes resultados permitiram a manufatura de amplificadores banda larga de alta eficiência, garantindo assim maior produtividade e confiabilidade.*

**Palavras-chave:** *amplificador de radiofrequência (RF), intermodulação, confiabilidade, DOE.*

## RADIO FREQUENCY BROADBAND AMPLIFIERS PERFORMANCE OPTIMIZATION: AN EXPERIMENTAL APPROACH

### Abstract

*This paper evaluates radio frequency (RF) power amplifiers behavior for telecommunications applications. An experimental strategy was employed resulting in the optimization of a number of factors responsible for increasing the overall efficiency and linearity of amplifiers during*

*production process, reducing total intermodulation and interference in adjacent channels. These results enabled broadband amplifiers manufacturing with high efficiency, thus ensuring increased productivity and reliability.*

**Keywords:** *radio frequency (RF) amplifier, intermodulation, reliability, DOE.*

## **1. Introdução**

A linearidade em amplificadores de radiofrequência (RF) de potência tem sido um dos requisitos mais importantes nos últimos anos para as diversas aplicações existentes em telecomunicações, dada a escassez de espectro para atender estas demandas em acentuado crescimento. Outro requisito de extrema importância é a eficiência elétrica de tais elementos, uma vez que o consumo de energia é um ponto bastante relevante para o cliente no momento de decisão da compra. Estes dois requisitos básicos para qualquer amplificador – linearidade e eficiência – são afetados e controlados por diversos fatores, os quais agem direta ou indiretamente no resultado final obtido. A definição de tais requisitos afeta questões relacionadas ao correto atendimento às especificações e critérios de qualidade, aos defeitos que levarão ao mau funcionamento dos amplificadores, e as falhas intermitentes ou até falhas generalizadas, que culminarão, muitas vezes, na queima de componentes.

Os processos de manufatura de amplificadores de RF são eminentemente multivariados, por se estabelecerem relacionamentos funcionais para as múltiplas características de saída a partir de um conjunto de fatores de entrada. Na indústria este comportamento pode levar a perdas significativas de qualidade e recursos, devido aos processos complexos incontrolláveis e ao efeito desses fatores e ou de suas interações.

Com o elevado número de fatores e interações presentes no processo produtivo, freqüentemente observa-se dispersões que levam a perdas de qualidade, rejeição de peças, ou até, em casos não detectados internamente ao sistema produtivo, a falhas em serviço. Um dos problemas decorrentes desta eventual falta de controle é a ocorrência de grandes variações no desempenho dos amplificadores, levando a dificuldades para se utilizar o mesmo amplificador ao longo de uma ampla faixa de frequência (amplificadores banda larga) e aumento na complexidade da especificação dos demais circuitos adjacentes ao amplificador, tais como filtros de canal e fontes de alimentação.

Este trabalho tem como objeto de estudo os amplificadores de potência utilizados para televisão digital na faixa de UHF. Utilizando uma abordagem experimental, diversos fatores são considerados no processo de amplificação, com o objetivo de reduzir a intensidade das

intermodulações e aumentar a sua eficiência. Isto garante a padronização dos tempos de produção, bem como o aumento da confiabilidade dos produtos entregues aos clientes pela diminuição da variabilidade dos parâmetros de desempenho.

Esse trabalho está dividido da seguinte forma: uma descrição sobre o tema é descrita na seção 2, uma abordagem experimental para o problema é desenvolvida na seção 3 e as conclusões são apresentadas na seção 4.

## **2. Processo de manufatura e avaliação de amplificadores de RF**

De acordo com a associação das indústrias de telecomunicações dos EUA (*TIA – Telecommunications Industry Association*), a receita no mercado americano de *wireless* em 2005 foi de \$174,7 bilhões de dólares. Quase dois terços da população americana já haviam adquirido um serviço *wireless* e 88% pretendia adquirir um novo serviço até o ano de 2009 (Jeong, 2006). Embora os serviços de voz via celular já estivessem bem disseminados, a demanda por mais serviços e maior capacidade de tráfego de dados fez com que este mercado continuasse a se desenvolver, culminando nas novas tecnologias de transmissão como *3G* (terceira geração da telefonia móvel), *4G* (quarta geração da telefonia móvel) e *Wimax* (*worldwide interoperability for microwave access*). Além disso, outras tecnologias apareceram como *LTE* (*long term evolution*), televisão e rádios digitais. Em outras palavras, os serviços banda larga para voz, dados e vídeo se tornaram disponíveis em qualquer lugar, a qualquer momento e a um preço acessível.

Uma vez que o espectro de RF está bastante saturado e com poucas frequências restantes, estas novas tecnologias estão utilizando modulações altamente eficientes em termos de ocupação de banda e capacidade de transporte de dados. Estas modulações, em sua maioria do tipo *QAM* (*quadrature amplitude modulation*) ou *OFDM* (*orthogonal frequency-division multiplexing*), trazem uma grande economia de espectro, porém, dificultam a construção dos sistemas de transmissão por exigirem projetos mais eficientes, principalmente dos amplificadores de potência.

O amplificador de potência é um elemento ativo, de natureza predominantemente não-linear, cuja principal função é entregar em sua saída um sinal com amplitude maior que ao de entrada, conforme mostra a Figura 1. A diferença entre a amplitude de saída e a amplitude de entrada é chamada de ganho do amplificador. Para se obter grandes áreas de cobertura para sistemas de telecomunicação, como cobertura de telefonia celular ou *Wimax*, faz-se necessário o

uso de estações transmissoras com elevadas potências de saída e, portanto, amplificadores com alto ganho. E para se obter estas elevadas potências, faz-se uso de um grande número de amplificadores de potência.

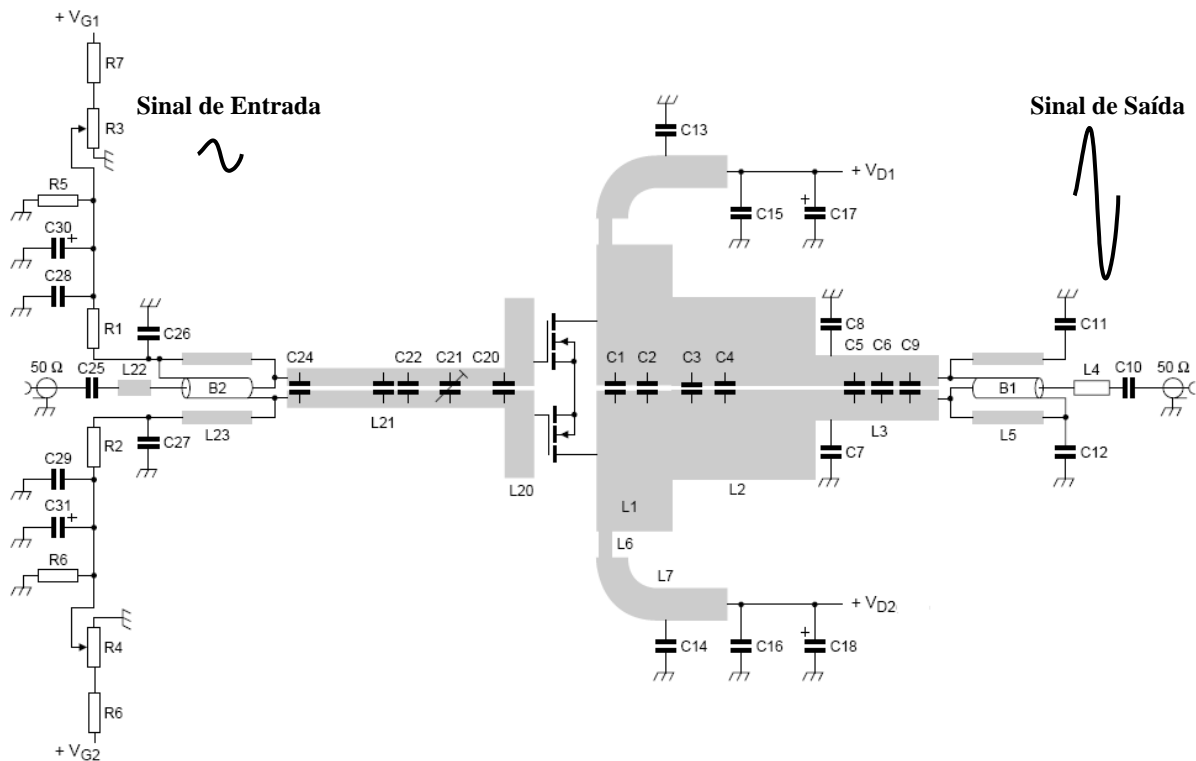


Figura 1. Um esquema eletrônico de um amplificador de potência.

Fonte: Linear Equipamentos Eletrônicos SA

Este cenário representa uma grande oportunidade de crescimento para as empresas de telecomunicações, pois a demanda por amplificadores de potência vem aumentando expressivamente. Entretanto, o modelo tradicional de projeto e produção destes elementos leva a produtividade e confiabilidade baixas, dado o aspecto ainda bastante artesanal de manufatura. O uso de diversos componentes eletrônicos não disponíveis para montagem em máquinas, o posicionamento manual de transistores, a longa seqüência de testes elétricos e a combinação de um grande número de amplificadores são alguns dos fatores que levam a uma grande dispersão nos resultados obtidos ao final de uma linha de produção.

## 2.1 Respostas do processo

À medida que as comunicações digitais têm sua utilização cada vez mais difundida, a linearidade dos amplificadores de RF se torna uma questão relevante. O grau de linearidade de um amplificador pode ser expresso através de sua intermodulação de saída. Quanto mais linear for um amplificador, menores serão as intermodulações em sua saída.

Entretanto, para que um amplificador seja comercializado, não basta que o mesmo seja apenas linear, devendo possuir também uma boa eficiência. Estes dois fatores, intermodulação de saída e eficiência, são as respostas deste processo de otimização e estão detalhados a seguir.

- **Intermodulação de Saída**

É desejável que o amplificador tenha o maior ganho possível. Porém, não é possível amplificar o sinal sem gerar distorções. O que se pode fazer é projetar o amplificador para que ele gere o menor número de distorções possíveis. Dentre as distorções geradas pelo amplificador, a que mais impacta o atendimento às máscaras de emissão é a intermodulação.

A intermodulação ocorre quando um sinal composto por mais de uma frequência é submetido a meios não lineares, como em um amplificador. Várias outras frequências são geradas como resultado das combinações lineares das frequências originais. Como outras frequências são geradas, o sinal amplificado passa a ocupar uma banda, ou largura de faixa, maior do que o sinal original. A Figura 2 traz um exemplo de intermodulação gerada ao se passar duas portadoras, ou dois sinais com frequências diferentes, por um mesmo amplificador.

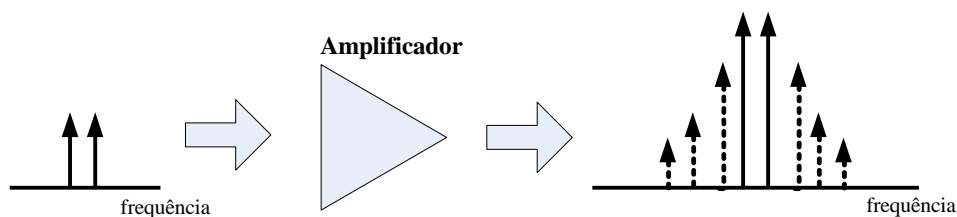


Figura 2. Intermodulação de duas portadoras após amplificação.

As máscaras de emissão são elaboradas pelos órgãos reguladores responsáveis para delimitar os níveis adequados de intermodulação e emissões espúrias que um sistema de telecomunicações pode gerar. A Figura 3 exemplifica qual o nível de intermodulação exigido pelo FCC (*Federal Communications Commission*) e, portanto, o nível de intermodulação que os amplificadores devem atender para a aplicação em televisão digital.

Este parâmetro irá refletir o quanto um sinal, após a amplificação, ficará confinado dentro da largura de banda a ele destinado, não interferindo em serviços ou canais adjacentes. Quanto

menor a intermodulação final, menor a interferência em outros serviços e melhor a qualidade do sinal para o usuário final. Quanto mais linear for o amplificador, menor será a intermodulação gerada em sua saída.

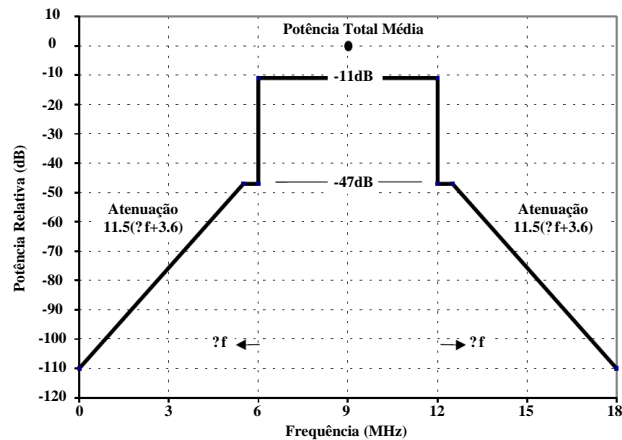


Figura 3. Máscara para intermodulação exigida pelo FCC para televisão digital.

Fonte: Documento A/64B ATSC, página 7.

- **Eficiência**

A potência fornecida pela fonte de alimentação ( $P_{\text{FONTE}}$ ) é enviada à carga ( $P_{\text{CARGA}}$ ) através do circuito amplificador que, devido às suas não linearidades, dissipará parte desta potência em forma de calor, como mostra a Figura 4. Sendo assim, quanto maior for a eficiência de um amplificador, maior será o aproveitamento da potência fornecida pela fonte e menor será a potência dissipada ou perdida.

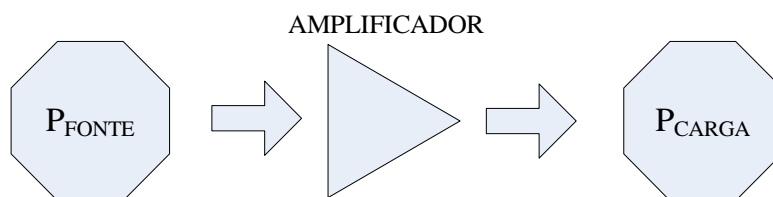


Figura 4. Conceito de eficiência.

Este parâmetro mostra a capacidade que um determinado sistema tem de transformar a potência consumida em potência útil, e é representado pela relação abaixo:

$$\eta_{\%} = \frac{P_{\text{CARGA}}}{P_{\text{FONTE}}} \times 100 \quad (1)$$

A eficiência irá refletir no consumo de energia do amplificador e, por conseqüência, no consumo total do equipamento de telecomunicações do qual ele fizer parte. É importante que se obtenha a maior potência final amplificada consumida com a menor energia elétrica possível, ou seja, a maior taxa de conversão de kVA consumido da rede elétrica em potência eficaz entregue para a carga.

## 2.2 Fatores

Diversos são os fatores que devem ser considerados no processo produtivo de amplificadores de RF de potência, passíveis de interferirem nas respostas desejadas de intermodulação de saída e eficiência. Usando o conhecimento de especialistas e de literatura especializada, os seguintes fatores (e suas possíveis interações) podem ser considerados fundamentais.

- *Corrente de Polarização*

Para qualquer transistor operar adequadamente, é necessário realizar a sua polarização, que consiste na definição de uma tensão contínua a partir da qual o sinal a ser amplificado irá excursionar, conforme mostra a Figura 5.

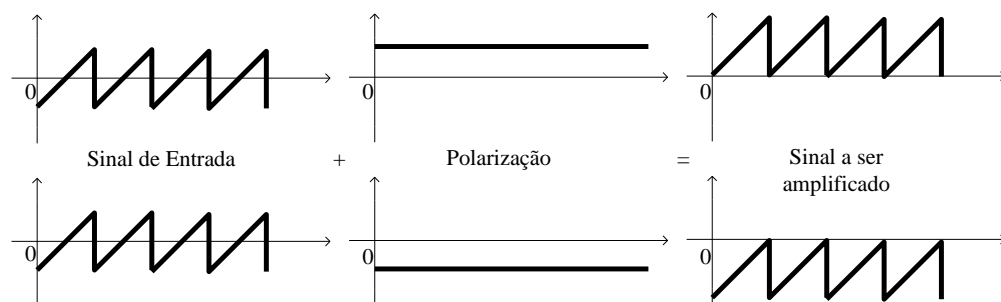


Figura 5. Efeito da polarização no sinal de entrada a ser amplificado.

A corrente de polarização irá definir o ponto de operação do transistor, bem como sua classe. O fabricante geralmente especifica um valor ótimo para esta corrente, mas a sua alteração traz reflexos no desempenho final do amplificador e pode ser alterada, dentro de limites seguros. É importante que o amplificador tenha um circuito de correção da transcondutância ( $G_M$ ), pois a mesma varia com o envelhecimento do transistor e com a variação da temperatura de trabalho, afetando diretamente a corrente de polarização.

- *Classes de Operação*

O elemento ativo do amplificador, o transistor, tem uma curva de operação, isto é, uma curva que indica a relação funcional entre a entrada e a saída. O nível de polarização e os níveis máximos e mínimos do sinal de entrada definem a faixa da curva em que o amplificador irá operar. Diferentes faixas de operação implicam diferentes resultados em termos de eficiência, distorção, intermodulação, entre outros. Às faixas comuns de operação de amplificadores dá-se o nome de classe de operação.

A classe de operação do amplificador tem influência direta na quantidade de intermodulação gerada. Amplificadores operando em *Classe A* apresentam a menor intermodulação de saída, porém são extremamente ineficientes. São, portanto, comumente utilizados para amplificação de pequenos sinais.

Já para amplificadores de potência, faz-se necessário o uso de amplificadores mais eficientes, como os em *Classe AB*. A consequência disto é uma maior quantidade de intermodulação na saída. Isto acontece pelo fato de nesta classe o transistor operar em uma região mais não linear. A Figura 6 exemplifica a diferença entre *Classe A* e *Classe AB*.

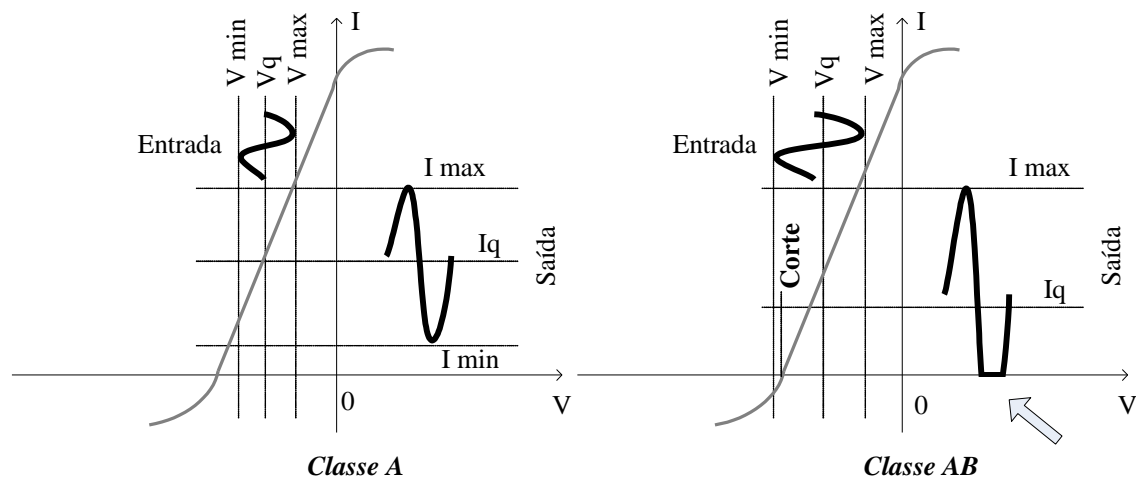


Figura 6. *Classe A* x *Classe AB*.

Pode-se perceber que mesmo operando em *Classe AB*, é importante escolher cuidadosamente a corrente de polarização, pois ela irá definir a faixa de excursão do sinal de saída. Se houver ceifamento (*clipping*) do sinal de saída, haverá distorção e, portanto, maior intermodulação na saída.



Existem outras classes de operação, porém as mais utilizadas em amplificadores para transmissores de televisão são as duas apresentadas acima.

- ***Potência e intermodulação de entrada***

A potência de entrada do amplificador é um dado importante, pois o sistema que irá anteceder o amplificador de potência já apresenta uma quantidade de intermodulação inerente, por não se tratar de um sistema ideal. Assim, é importante conhecer este fator, pois quanto mais linear for a fonte de sinal, mais caro fica o sistema. É importante conhecer o maior valor de intermodulação e de potência de entrada que o sistema pode suportar para dimensionar o sistema para o menor custo.

- ***Faixa de frequência ou canal de operação***

A quantidade de intermodulação gerada também varia de acordo com a frequência fundamental do sinal, ou seja, com o canal de operação do amplificador. Para uma mesma aplicação em telecomunicações, é desejável que o mesmo amplificador de potência seja usado para cobrir uma grande faixa de frequências. Isto facilita o processo produtivo e o controle de qualidade, além de reduzir o número de itens de estoque. Dependendo da aplicação em telecomunicações, os órgãos reguladores destinam frequências de operação variadas. Este parâmetro deve ser levado em consideração, pois o comportamento do transistor muda ao longo do tempo e da frequência.

Tornar o amplificador banda larga, ou seja, capaz de cobrir uma ampla faixa de frequências de operação, é uma característica altamente desejável pela indústria, porém bastante complexa de ser atingida. É comum ver um mesmo amplificador customizado para diversas bandas pelo fato de não ter sido possível torná-lo banda larga. Porém, isto provoca um aumento de estoque, dilata o tempo de produção e torna o controle de qualidade mais complexo.

- ***Temperatura de Operação***

Todo semicondutor trabalha com átomos dopados, ou seja, com elétrons inseridos ou retirados da última camada de valência. Desta forma, seu comportamento é fortemente afetado pela temperatura do ambiente no qual ele opera. Assim, deve-se analisar o comportamento do amplificador para diferentes condições de operação do semicondutor. A temperatura ambiente afetará diretamente a temperatura da junção, ou seja, a temperatura interna de trabalho do

transistor. Esta, em sua quase totalidade, não deve ultrapassar 200°C, sob pena de dano permanente no componente. A temperatura também afeta a corrente de polarização do transistor, sendo necessário o uso de circuitos para compensar a variação do comportamento do dispositivo com a variação da temperatura. Quanto mais baixa for a temperatura da junção do transistor, maior será a sua vida útil.

- ***Montadora Manual***

Dispositivos de RF para altas potências como transistores, bobinas e capacitores não são comercializados em encapsulamentos compatíveis com montagem a máquina. Assim, estes componentes são colocados na placa de circuito impresso de forma manual. Desta forma, há variações entre as diversas montadoras manuais na finalização da manufatura, que devem ser observadas afim de manter um mesmo padrão de qualidade.

- ***Ruído na Alimentação DC***

Os amplificadores trabalham com tensão de alimentação contínua (*DC*) já regulada e filtrada. Se a quantidade de filtragem aplicada na fonte de alimentação não for bem dimensionada ou for de má qualidade, isto refletirá na qualidade do sinal final amplificado, pois o ruído estará sobreposto na tensão e corrente de polarização e poderá deslocar o ponto de operação do transistor.

Os ruídos podem também ser provenientes de raios ou surtos na rede elétrica, sendo, portanto, importante utilizar bons circuitos de desacoplamento, blindagem adequada e instalação apropriada para os amplificadores.

- ***Tipo do Transistor***

Para cada aplicação em telecomunicações existe um transistor mais adequado em termos da frequência de operação e a máxima potência de saída possível de se obter. Existem diversos fabricantes de transistores no mercado e é de extrema importância, ao se iniciar um novo projeto, escolher de forma precisa o componente que traga a melhor relação custo/benefício.

É importante ressaltar que todas as características citadas estão diretamente relacionadas ao transistor utilizado. Se houver mudança no transistor empregado, todos estes fatores deverão ser reavaliados. Na indústria é comum realizar a troca de transistores uma vez por ano. A cada

troca de transistores deve-se atentar para que não haja degradação do desempenho pré-estabelecido.

- **Linearização**

Um recurso amplamente utilizado para se obter maior linearidade, ou menor intermodulação, dos amplificadores é o chamado *back-off* de potência. O *back-off* restringe a excursão do sinal de saída através da redução da potência amplificada final. Este recurso reduz a intermodulação, porém degrada enormemente a eficiência do amplificador, portanto, não pode ser considerado como solução comercial.

A técnica amplamente utilizada para conciliar redução de intermodulação com o aumento de eficiência elétrica é a linearização. Esta técnica consiste em manipular o sinal a ser entregue ao amplificador de potência de tal forma que ele contenha uma distorção contrária a distorção a ser inserida pelo amplificador. Assim, quando o sinal for amplificado, a intermodulação resultante será expressivamente reduzida, como mostra a Figura 7.

Atualmente, é praticamente impossível estar em conformidade com as legislações vigentes para emissões fora da banda sem o uso de alguma técnica de linearização. Há diversas técnicas amplamente difundidas no mercado como *digital pre-distortion*, *feed forward*, *RF pre-distortion* etc, sendo cada uma delas mais aplicável em determinado circuito. Deve-se, portanto, escolher o método mais aconselhável durante a fase de projeto do amplificador.

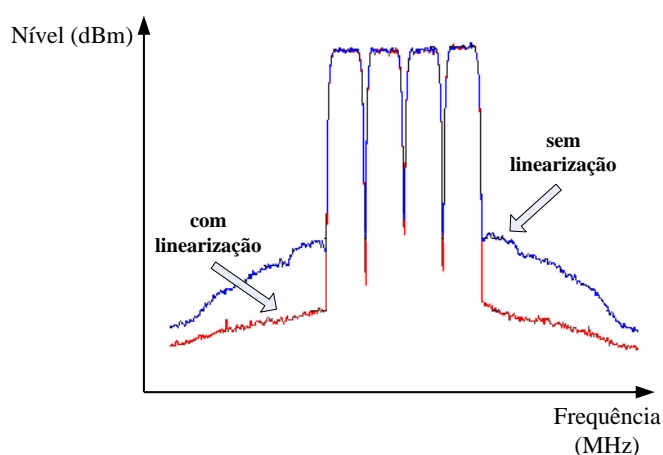


Figura 7. Resultados obtidos após o uso de técnica de linearização.

Desta forma, como há muitos fatores envolvidos, faz-se necessário utilizar uma abordagem otimizada para projetar e produzir amplificadores de RF, visando acelerar o desenvolvimento e avaliação destes, levando em consideração os fatores citados. Estes fatores

são de extrema importância durante a fase de projeto do amplificador, mas também devem ser monitorados durante o processo produtivo, pois a observação constante poderá indicar dispersões dignas de atenção. A Figura 8 mostra como os fatores apresentados se relacionam fisicamente com o amplificador de RF.

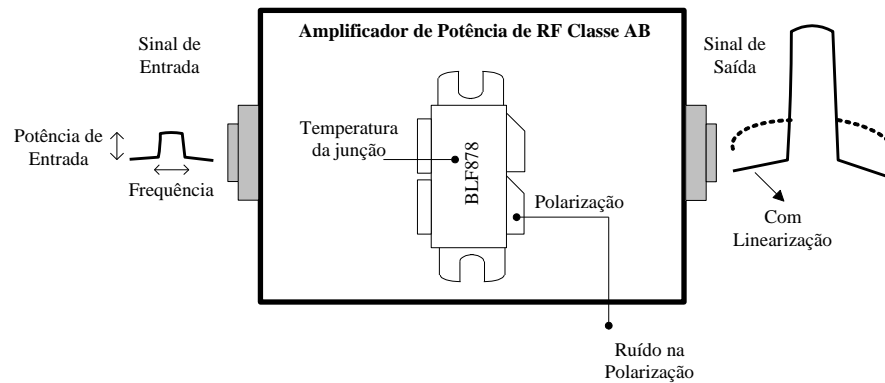


Figura 8. Fatores envolvidos e sua relação com o modelo físico do amplificador.

### 3. Experimentos e análise

Dada a demanda apresentada pelo setor de telecomunicações por amplificadores mais eficientes, mais lineares e capazes de atender o maior número de aplicações possíveis, ou seja, serem banda larga para atenderem uma ampla faixa de frequências de operação, vê-se a necessidade de analisar a questão e propor uma metodologia para melhoria do processo produtivo. Em suma, o presente trabalho de pesquisa pode ser assim sintetizado:

*A existência de altos níveis de intermodulação em amplificadores de RF de potência pode comprometer a qualidade do produto final e/ou gerar falhas catastróficas com severas conseqüências para os usuários finais. As principais questões a serem investigadas nesse estudo são: i) Quais fatores envolvidos no processo de amplificação são responsáveis pelo aumento de intermodulações? ii) Como esses fatores se relacionam com a eficiência? iii) Como estes fatores podem ser controlados visando aumentar a qualidade do produto e a produtividade? iv) Como um mesmo amplificador pode ser utilizado para atender o maior número possível de cliente, ou seja, ser banda larga?*

A Figura 9 mostra um conjunto de dados históricos obtidos de um amplificador. Pode-se observar nesta figura que há uma grande dispersão dos valores de intermodulação e eficiência dentro da faixa de frequências de UHF, que são representadas numericamente pelos canais de número 14 a 69. Isto faz com que este amplificador não possa ser considerado um amplificador banda larga, havendo a necessidade de customizá-lo para cada frequência de operação, ou seja, não é possível utilizar o mesmo amplificador para todas as frequências de UHF. O ideal seria obter um mesmo valor de intermodulação e eficiência para todos os canais com mínima variabilidade.

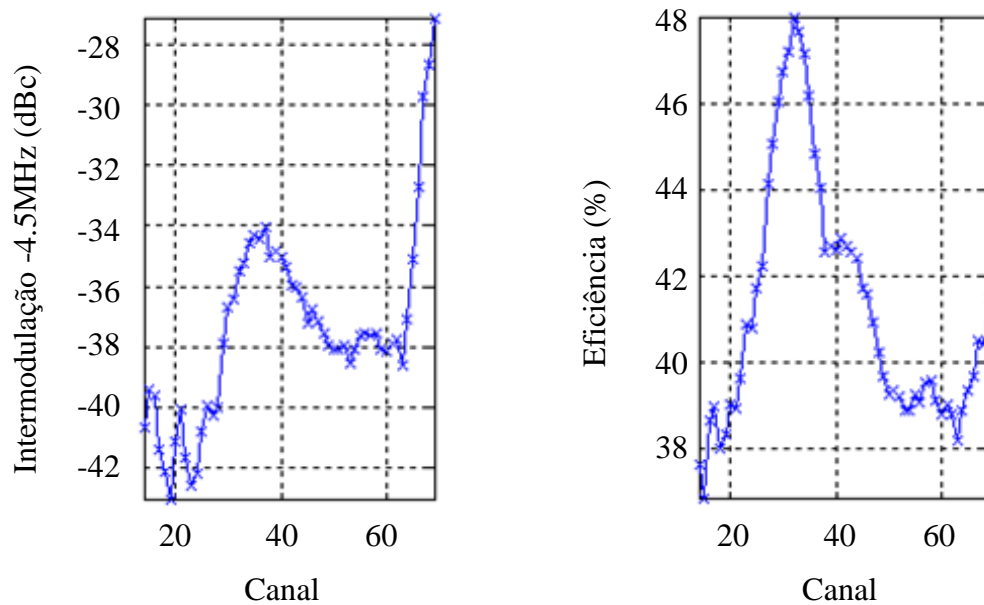


Figura 9. Dados históricos para intermodulação e eficiência.

Devido ao elevado número de fatores envolvidos no processo e a complexidade das potenciais interações entre estes para controle e robustez do processo de projeto e produção de amplificadores de RF de potência, o uso de Delineamento de Experimentos (*Design of Experiments* – DOE) é a metodologia natural a ser adotada. Coleman e Montgomery (1993) sugerem que a solução de problemas de processos industriais pode ser alcançada com mais facilidade e robustez quando o experimento é planejado e as respostas analisadas com métodos e técnicas estatísticas.

### 3.1 Experimentos Exploratórios

Os diversos fatores considerados na seção anterior foram classificados por um grupo de especialistas do ramo de telecomunicações em seções de *brainstorm*, conforme mostra a Tabela

1. Este grupo também definiu e atribuiu um índice denominado de *sensibilidade* associada ao controle dos fatores no processo (fatores de médio controle (1) e controláveis (2)).

Tabela 1. Análise exploratória dos fatores potenciais influentes no processo.

<b>Fator</b>	<b>Sensibilidade</b>	<b>Fator</b>	<b>Sensibilidade</b>
Tipo do Transistor	2	Uso de Linearização	2
Corrente de Polarização	2	Temperatura de Operação	1
Potência de Entrada	2	Montadora Manual	1
Canal de Operação	2	Ruído na Alimentação DC	1
Classe de Operação	1	Obs.: 1=Médio controle, 2=Controlável	

A equipe decidiu pela investigação experimental de todos os fatores utilizando um planejamento de experimentos exploratórios onde as respostas na saída de cada amplificador são mostradas na Tabela 2. Estas respostas são afetadas diretamente, em maior ou menor grau, pelos fatores listados na Tabela 1.

Tabela 2. Respostas esperadas.

<b>Y</b>	<b>Nome</b>	<b>Tipo de Resposta</b>
Y <sub>1</sub>	Intermodulação de Saída (dBc)	Menor Melhor
Y <sub>2</sub>	Eficiência (%)	Maior Melhor

Os projetos experimentais de Taguchi e de Plackett-Burman são naturais candidatos a projetos exploratórios. Optou-se pela abordagem tradicional de Plackett-Burman devido a característica de ortogonalidade, o que permite que os efeitos principais de cada fator sejam determinados individualmente, admitindo-se que os efeitos de interação sejam desprezíveis. Este modelo, além de ser adequado para situações exploratórias, também pode ser utilizado em pesquisas economicamente enxutas, pois permite com  $n$  experimentos investigar  $n-1$  fatores e utiliza-se de fatores “fantasmas”, os quais servem para fazer a estimativa do erro experimental (Barros, Scarmínio e Bruns, 2003). Assim como os experimentos de Taguchi, os experimentos de Plackett-Burman podem ser considerados de resolução III, onde os efeitos principais dos fatores estão confundidos com os efeitos de interações de segunda ordem. Esse é um custo a se pagar para se analisar um grande número de fatores. Os resultados exploratórios, contudo, indicam uma nova fase experimental a ser projetada.

A matriz de Plackett-Burman gerada com os respectivos resultados de Intermodulação ( $Y_1$ ) e Eficiência ( $Y_2$ ), considerando os nove fatores definidos na Tabela 1 e seus respectivos níveis, são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3. Matriz de Plackett-Burman.

Ensaio	Linear.	Temp.	Pot.	Transistor	Ruído	Montad.	Corrent.	Classe	Canal	$Y_1$	$Y_2$
1	On	20°C	-5,8 dBm	BLF878	Alto	IV	7,7 A	AB	69	-48,55	0,41
2	On	20°C	-5,8 dBm	MRF3450H	Baixo	I	7,7 A	A	14	-52,23	0,34
3	On	35°C	-2,6 dBm	BLF878	Baixo	IV	9,8 A	A	69	-53,20	0,32
4	Off	20°C	-2,6 dBm	BLF878	Baixo	IV	7,7 A	A	14	-40,58	0,25
5	Off	35°C	-5,8 dBm	BLF878	Alto	I	9,8 A	A	14	-51,94	0,32
6	Off	35°C	-2,6 dBm	MRF3450H	Alto	IV	7,7 A	AB	14	-41,34	0,34
7	On	20°C	-2,6 dBm	BLF878	Alto	I	9,8 A	AB	14	-51,83	0,46
8	On	35°C	-5,8 dBm	MRF3450H	Baixo	IV	9,8 A	AB	14	-57,60	0,49
9	Off	20°C	-5,8 dBm	MRF3450H	Alto	IV	9,8 A	A	69	-46,01	0,29
10	Off	35°C	-5,8 dBm	BLF878	Baixo	I	7,7 A	AB	69	-39,80	0,34
11	Off	20°C	-2,6 dBm	MRF3450H	Baixo	I	9,8 A	AB	69	-43,29	0,33
12	On	35°C	-2,6 dBm	MRF3450H	Alto	I	7,7 A	A	69	-48,29	0,26

A Figura 10 mostra a seqüência de realização das medições das duas respostas consideradas para os doze ensaios aleatorizados da matriz de Plackett-Burman.

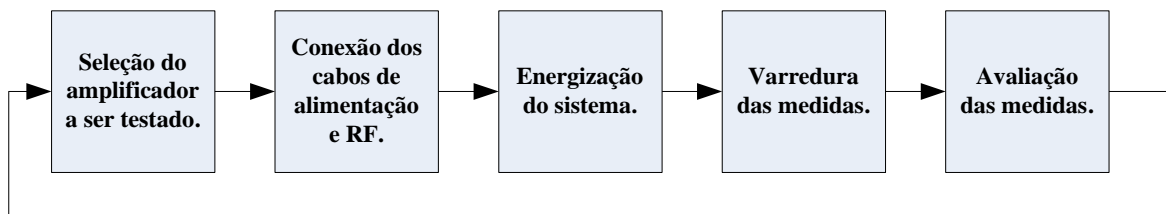


Figura 10. Processo de medidas.

A Figura 11 mostra os resultados de análise dos efeitos principais dos fatores envolvidos no experimento exploratório. Para a resposta  $Y_1$  (Intermodulação) os fatores Linearização, Temperatura, Potência, Corrente, Classe e Canal se mostraram significativos (Valor  $P < 0,005$ ). Para a resposta  $Y_2$  (Eficiência) os fatores Linearização, Potência, Corrente, Classe e Canal também se mostraram significativos. Os demais fatores foram considerados insignificantes.

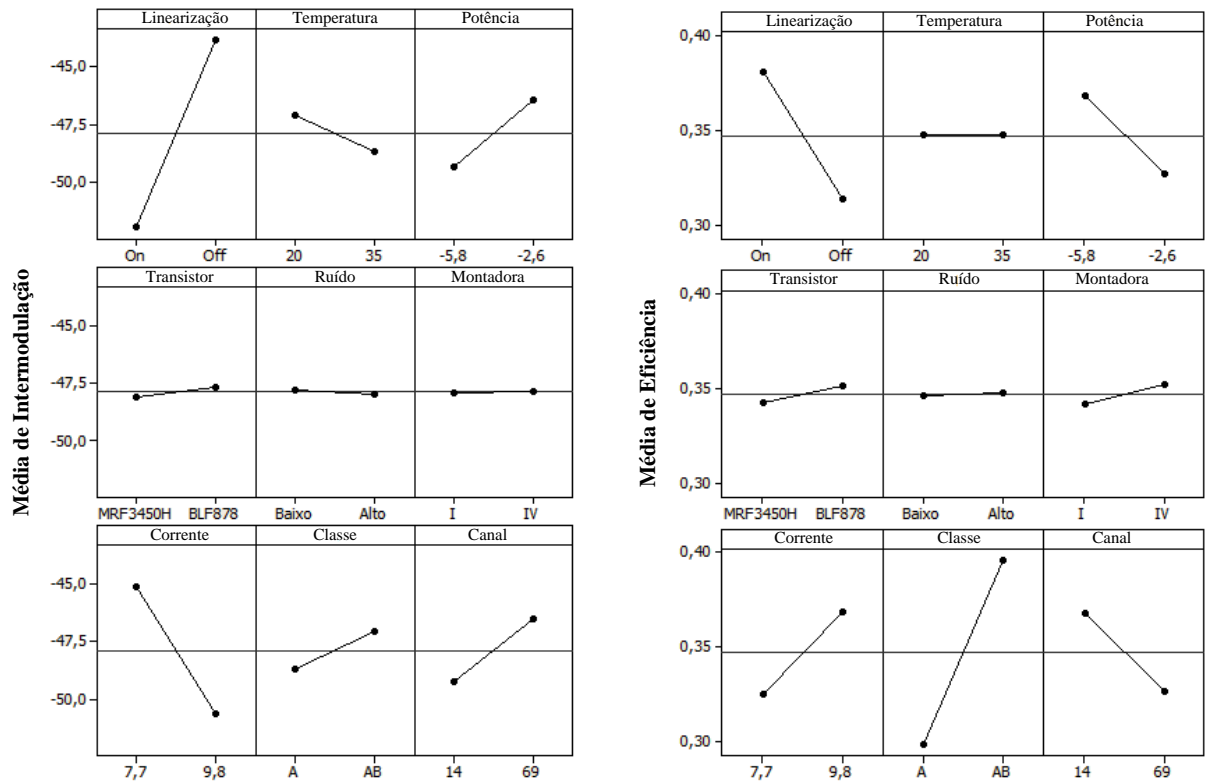


Figura 11. Análise dos efeitos principais.

A partir dos resultados obtidos no experimento exploratório, foi possível desprezar os fatores que menos impactaram nas respostas desejadas em um estudo consecutivo. Os fatores excluídos foram mantidos sob controle, fixando-os em um nível de fácil controle e de baixo custo. Os principais fatores significativos foram fixados em seus níveis no sentido de otimizar as duas respostas desejadas. Alguns fatores, passíveis de terem seus efeitos confundidos com interações foram selecionados para uma segunda fase experimental. A Tabela 4 sintetiza os resultados obtidos pelo DOE exploratório de Plackett-Burman.



Tabela 4. Decisão sobre os fatores de estudo a partir do DOE de Plackett-Burman

<b>Fator</b>	<b>Justificativa</b>	<b>Decisão</b>
Tipo do Transistor	Seleção do BLF878, pela maior eficiência	Fixar
Corrente de Polarização	Analisar em um segundo DOE	Analisar
Potência de Entrada	Analisar em um segundo DOE	Analisar
Canal de Operação	Analisar em um segundo DOE	Analisar
Classe de Operação	Seleção da Classe AB, pela maior eficiência	Fixar
Uso de Linearização	Seleção por ON, pelo ganho nas duas respostas	Fixar
Temperatura de Operação	Fixação na temperatura ambiente de 25°C	Fixar
Montadora Manual	Fixação na montadora 2	Fixar
Ruído DC	Fixação em ruído baixo	Fixar

### 3.2 Metodologia de Superfície de Resposta

No contexto do planejamento de experimentos, é possível caracterizar a relação entre uma ou mais respostas a um conjunto de fatores de interesse. Para o nosso caso a seguinte relação é apropriada:

$$(\text{Intermodulação, Eficiência}) = f(\text{corrente, potência, canal})$$

O conhecimento da forma funcional de  $f$ , freqüentemente obtido com a modelagem de dados provenientes de experimentos planejados, permite tanto sumarizar os resultados do experimento quanto prever a resposta para valores dos fatores. Assim, a função  $f$  define a superfície de resposta. Podemos então definir a superfície de resposta como sendo a representação geométrica obtida quando uma resposta é traçada como uma função de um ou mais fatores quantitativos.

No planejamento de experimentos para estudar ou ajustar superfícies de resposta, a função de resposta é caracterizada em uma região de interesse do pesquisador, para que seja possível utilizá-la na prática. Após o ajuste do modelo aos dados, é possível estimar a sensibilidade da resposta aos fatores, além de determinar os níveis dos fatores nos quais as respostas são ótimas (por exemplo, máxima ou mínima).

Dentre as diversas metodologias existentes, temos a metodologia de experimentos centrais compostos (*CCD – Central Composite Design*), através da qual podemos criar

experimentos centrais com ou sem blocos. Como exemplo, um *CCD* com dois fatores é mostrado na Figura 12. Os pontos no diagrama representam os ensaios experimentais que são realizados.

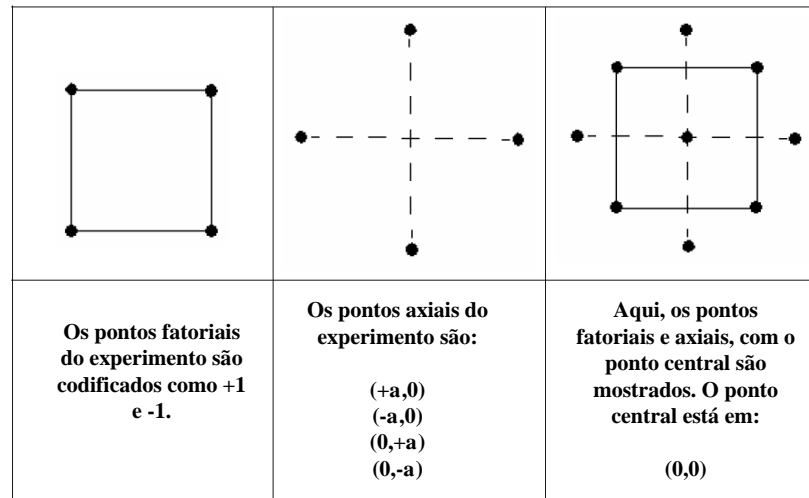


Figura 12. Experimento central composto com dois fatores.

A partir do experimento exploratório, o grupo decidiu por uma investigação dos fatores quantitativos possíveis de serem confundidos com interações envolvendo superfícies de resposta. Estes níveis foram escolhidos também com a premissa de cobrirem as especificações de um amplificador banda larga. A Tabela 5 apresenta os fatores de estudo e os níveis selecionados para a fase experimental da superfície de resposta.

Tabela 5. Fatores e níveis do estudo experimental.

Fator de Estudo	Nível -	Nível +
Corrente de Polarização (A)	8,1	9,3
Potência de Entrada (dBm)	-4,6	-3,8
Canal de UHF (#)	28	49

A Tabela 6 mostra a matriz de experimento e repostas segundo a metodologia de experimentos centrais compostos. Podem ser observados níveis na tabela pontos fatoriais, pontos axiais e pontos centrais. O número de experimentos foi escolhido para favorecer superfícies de resposta considerando termos quadráticos e termos de interação.

Tabela 6. Matriz de experimento e respostas.

<b>Ensaio</b>	<b>Corrente</b>	<b>Potência</b>	<b>Frequência</b>	<b>Y<sub>1</sub></b>	<b>Y<sub>2</sub></b>
<b>1</b>	9,7	-5,8	14	-48,8	0,375
<b>2</b>	9,2	-4,8	21	-49	0,391
<b>3</b>	8,0	-4,8	28	-49,6	0,440
<b>4</b>	7,8	-5,4	35	-47,5	0,464
<b>5</b>	8,4	-4,2	42	-48,3	0,433
<b>6</b>	8,9	-4,7	49	-49,2	0,400
<b>7</b>	9,3	-3,6	56	-49,3	0,397
<b>8</b>	8,4	-3,8	69	-44,2	0,384
<b>9</b>	9,7	-5,3	14	-49,8	0,376
<b>10</b>	8,9	-4,4	21	-49	0,389
<b>11</b>	8,1	-4,1	28	-50	0,450
<b>12</b>	7,9	-4,8	35	-47,3	0,461
<b>13</b>	8,5	-3,9	42	-49	0,426
<b>14</b>	9,0	-4,7	49	-50	0,396
<b>15</b>	9,2	-3,9	56	-50	0,390
<b>16</b>	8,8	-2,9	69	-41,7	0,414
<b>17</b>	9,5	-5,2	14	-49,6	0,371
<b>18</b>	9,1	-4,2	21	-49,1	0,406
<b>19</b>	7,9	-4	28	-50	0,459
<b>20</b>	7,7	-4,6	35	-46,5	0,474
<b>21</b>	8,4	-3,7	42	-47,8	0,436
<b>22</b>	9,3	-4,2	49	-49,1	0,399
<b>23</b>	9,5	-3,2	56	-49	0,378
<b>24</b>	8,8	-3,1	69	-42,9	0,418
<b>25</b>	9,5	-5	14	-49,1	0,371
<b>26</b>	9,0	-4,2	21	-49,4	0,407
<b>27</b>	7,9	-4,2	28	-49,8	0,460
<b>28</b>	7,9	-4,7	35	-46,8	0,464
<b>29</b>	8,5	-4,6	42	-48,9	0,421
<b>30</b>	9,3	-5,2	49	-49,4	0,383
<b>31</b>	9,8	-3,5	56	-49,6	0,375

As tabelas 7 e 8 trazem as análises estatísticas deste experimento, apresentando os coeficientes de regressão linear estimados para intermodulação e eficiência, respectivamente. Primeiramente, os *Valores-P* determinam quais dos efeitos do modelo são estatisticamente significativos. Pela análise de variância, têm-se evidências suficientes de que o modelo utilizado é adequado para explicar a relação desses fatores com a resposta. O valor de R-Sq, que representa a proporção da variação na resposta explicada pelo modelo, é de 97,6% para a Eficiência e de 86,5% para a Intermodulação, o que também mostra a adequação deste modelo. Os *Valores-P* mostram que a Intermodulação é afetada pela Corrente e Canal. A Eficiência é afetada pela Corrente e Potência. As interações Corrente-Potência e Corrente-Canal mostram-se significantes para a Intermodulação. Termos quadráticos também estão presentes nos modelos. Valores em negrito de *Valores-P* mostram os fatores significativos dos modelos para as duas respostas.

Tabela 7. Análise estatística para Intermodulação.

<b>Termo</b>	<b>Coef</b>	<b>SE Coef</b>	<b>T</b>	<b>P</b>
Constante	-49,3966	0,3991	-123,782	<b>0,000</b>
Corrente	-2,8551	0,3866	-7,385	<b>0,000</b>
Potência	0,4776	0,6211	0,769	0,451
Canal	3,1657	0,7791	4,063	<b>0,001</b>
Corrente*Corrente	0,4945	0,8679	0,570	0,575
Potência*Potência	1,7101	1,3385	1,278	0,216
Canal*Canal	3,3172	1,2826	2,586	<b>0,018</b>
Corrente*Potência	1,7528	0,7973	2,198	<b>0,040</b>
Corrente*Canal	-4,5883	1,4267	-3,216	<b>0,004</b>
Potência*Canal	-1,5300	1,9615	-0,780	0,445

Tabela 8. Análise estatística para Eficiência.

<b>Termo</b>	<b>Coef</b>	<b>SE Coef</b>	<b>T</b>	<b>P</b>
Constante	0,411077	0,002849	144,291	<b>0,000</b>
Corrente	-0,053600	0,002760	-19,420	<b>0,000</b>
Potência	0,012715	0,004434	2,868	<b>0,010</b>
Canal	0,007106	0,005562	1,278	0,216
Corrente*Corrente	0,022293	0,006196	3,598	<b>0,002</b>
Potência*Potência	0,006423	0,009556	0,672	0,509
Canal*Canal	-0,001667	0,009157	-0,182	0,857
Corrente*Potência	-0,000602	0,005692	-0,106	0,917
Corrente*Canal	-0,021972	0,010186	-2,157	<b>0,043</b>
Potência*Canal	-0,016817	0,014003	-1,201	0,244

Procedendo à análise estatística dos dados, muitas estatísticas e gráficos podem ser utilizados. Quando a superfície de resposta é uma função de dois ou mais fatores, como nesse caso, os resultados podem ser descritos graficamente. Gráficos de contorno e superfície são úteis para estabelecer condições de operação para se obter valores desejáveis da resposta. Em um gráfico de superfície, os valores dos dois fatores são representados nos eixos x e y, enquanto os valores da resposta são representados no eixo z. Esse gráfico fornece uma visão tridimensional que pode exibir um desenho mais claro da superfície de resposta.

Uma condição necessária para o uso de DOE consiste na análise estatística dos resíduos, através do gráfico de probabilidade normal dos resíduos, para verificar se estes não se desviam de forma substancial de uma distribuição normal. Se os resíduos seguem uma distribuição normal, os pontos descreverão, aproximadamente, uma linha no gráfico de probabilidade. Para esses dados, o gráfico de probabilidade normal dos resíduos mostra que se pode pressupor que estes resíduos seguem uma distribuição normal. Testes de resíduos usando a estatística de Anderson-Darling também confirmam os achados gráficos.

A normalidade também pode ser avaliada através do histograma. A Figura13 mostra os gráficos de superfície e resíduos para as resposta, gerados pelo software Minitab.

### Superfícies de Resposta para Intermodulação

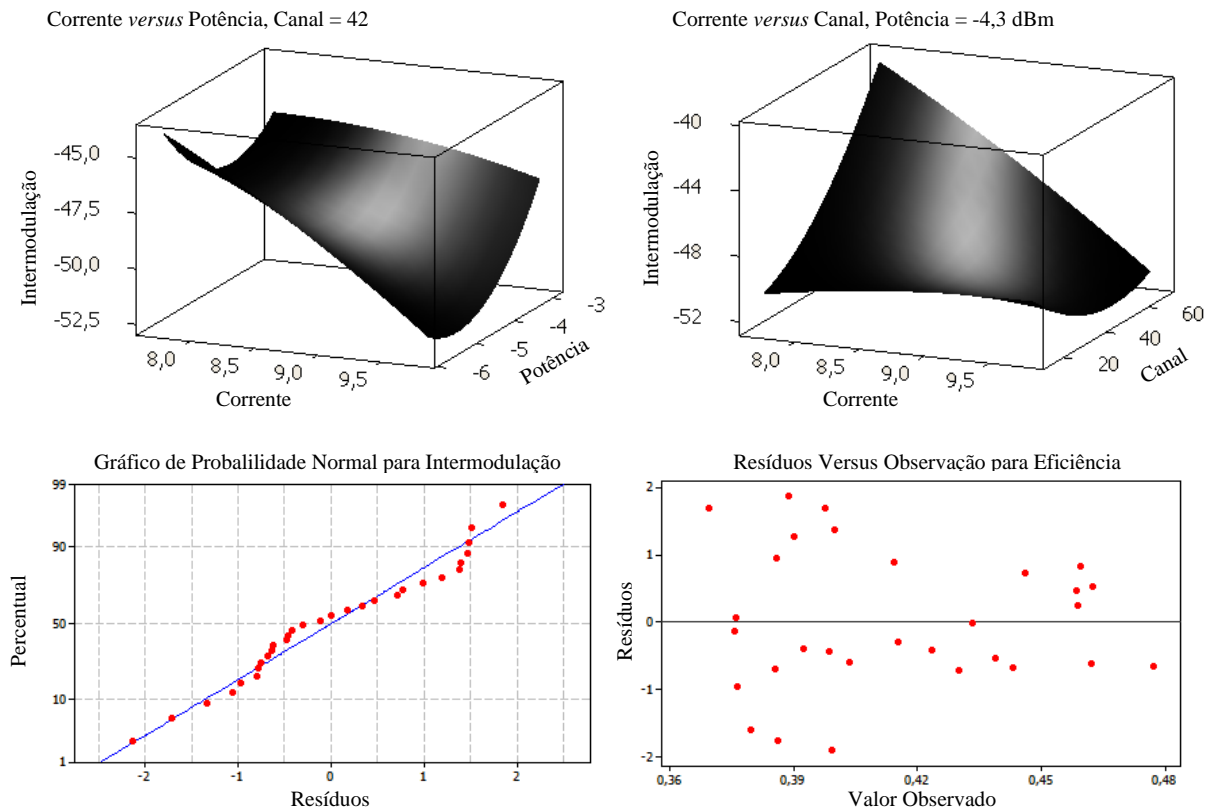


Figura 13. Gráfico de superfície e resíduos para intermodulação e eficiência.

É possível modelar cada uma das respostas esperadas individualmente com grau bastante elevado de precisão. Entretanto, a otimização de cada resposta raramente leva a uma solução de compromisso que atende a maioria dos objetivos.

Atentos a este tipo de problema de otimização de respostas e seguindo a idéia de agregação de múltiplos objetivos, Derringer e Suich (1980) propuseram um algoritmo para otimização simultânea de várias respostas, as quais dependem de um dado número de fatores independentes ou de um conjunto de condições. Com esta abordagem, a transformação é conduzida para cada uma das  $p$  respostas resultando em uma função de utilidade (*desirability*) individual  $d_i$ , com  $0 \leq d_i \leq 1$ . Neste método, o modelo estatístico é primeiramente obtido usando mínimos quadrados ordinários (*ordinary least square*). Os valores individuais obtidos através da transformação são então combinados utilizando média geométrica, compondo o índice de *desirability* global ( $D$ ) como sendo:

$$D = \left[ \prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \left( \hat{Y}_i \right) \right]^{\frac{1}{W}} \quad (3)$$

onde  $w_i$  é o peso individual da resposta  $\hat{Y}_i$  e  $W$  leva a média geométrica. O peso define a forma da função de *desirability* para cada resposta. Para cada resposta é possível selecionar um peso de 0,1 a 10 para diminuir ou aumentar a ênfase em cada alvo. A Figura 14 ilustra este conceito.

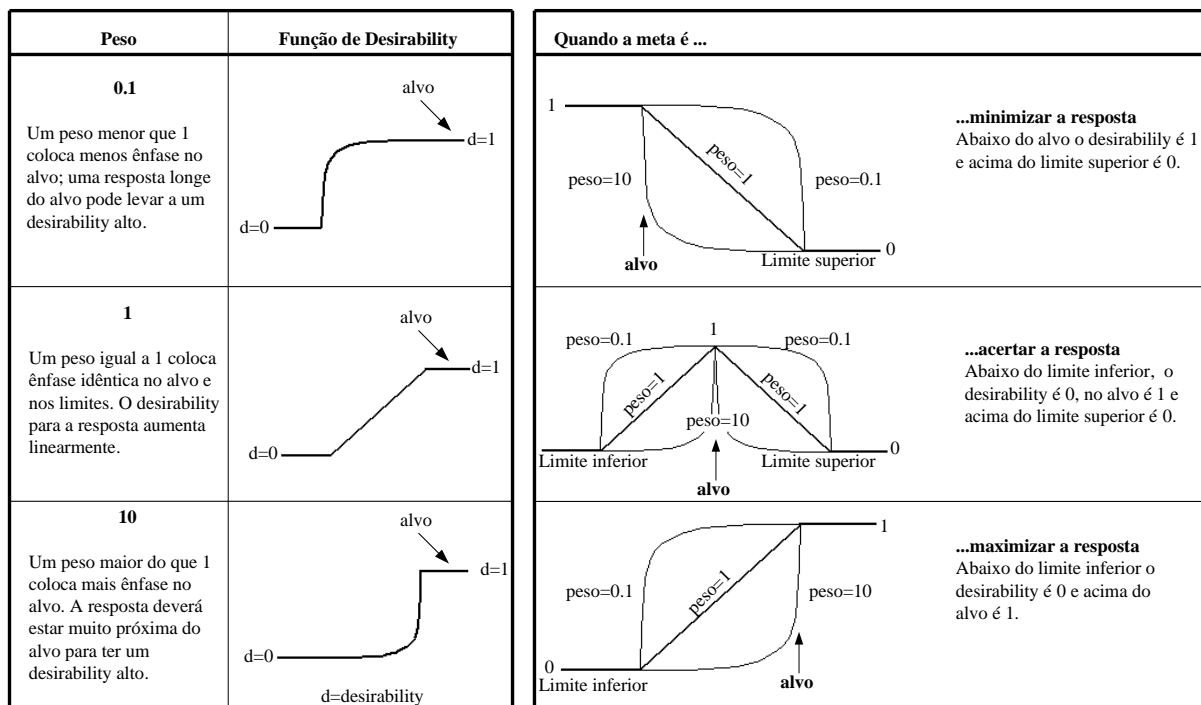


Figura 14. *Desirability* de Derringer.

O valor de  $D$  leva a solução de compromisso e está restrito ao intervalo  $[0,1]$ .  $D$  é próximo de 1 quando as respostas estão perto das especificações. O tipo de transformação depende da direção da otimização desejada. Para a Intermodulação o alvo é a minimização da resposta, com alvo fixado em -48 dBc, máximo de -46dBc e peso de 0,1. Para a Eficiência o alvo é a maximização da resposta, com alvo fixado em 0,4, mínimo de 0,36 e peso de 0,1. Foi dada a mesma importância para as duas respostas.

A solução otimizada para minimizar a Intermodulação e maximizar a Eficiência pode ser obtida usando a função *desirability* de Derringer e Suich, conforme mostra a Figura 15. A *desirability composta* prevista foi de 1, onde o valor 1 representa um perfeito ponto de ótimo, e a solução global para o problema proposto pode ser então dada por:

- Canal = 42
- Potência de Entrada = -4,04 dBm
- Corrente = 8,99A

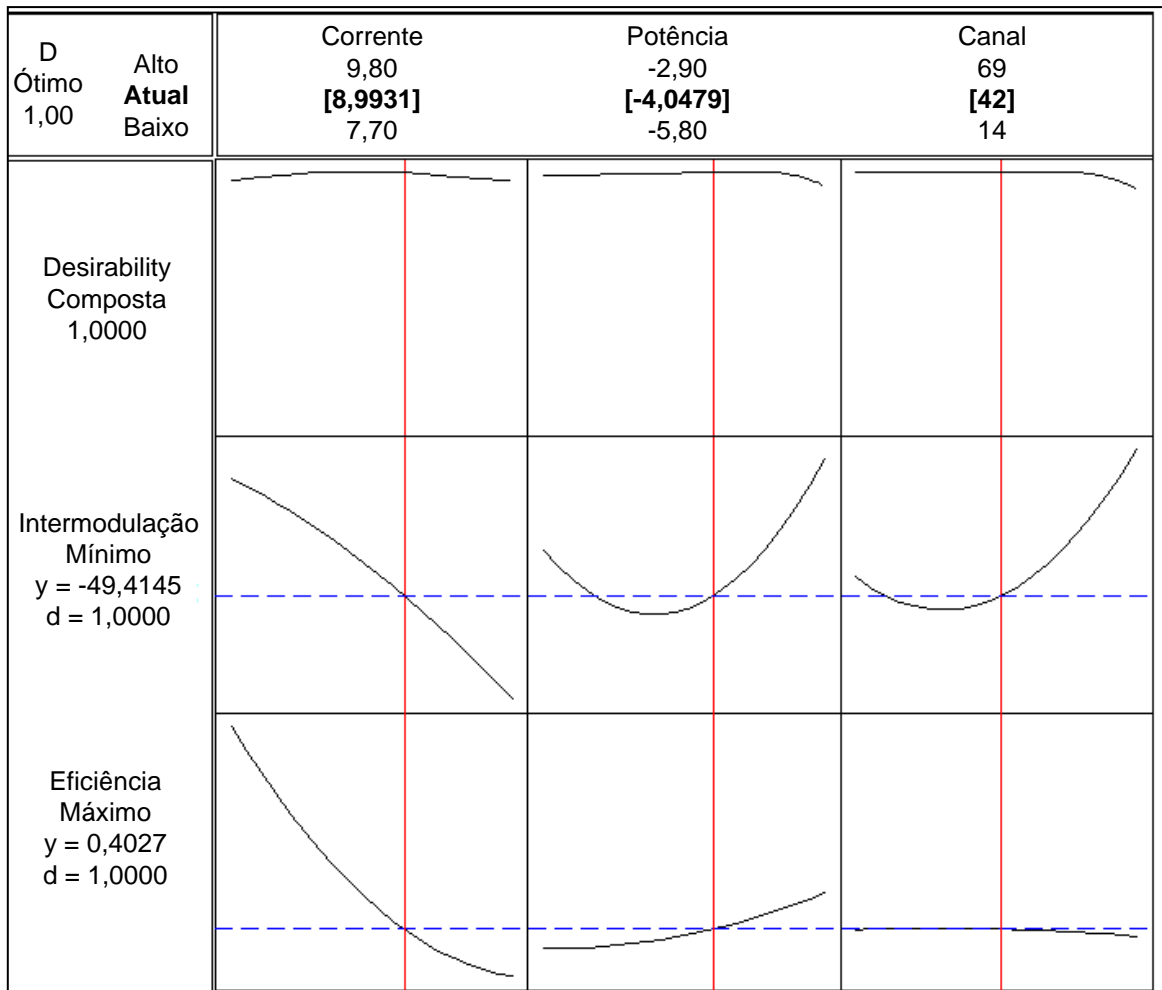


Figura 15. *Desirability* de Derringer e Suich.

### 3.3 Experimentos Confirmatórios

Para uma indústria de telecomunicações, de nada adianta ter um amplificador customizado para um único ponto ótimo, pois é preciso suprir o mercado com amplificadores banda larga que acomodem todas as situações possíveis nas instalações de equipamentos. Assim, é necessário levar todos os canais de UHF para o ponto ótimo, garantindo um bom desempenho em toda a faixa de frequência e aumentando a confiabilidade e a produtividade dos amplificadores por uma menor dispersão dos valores de Eficiência e Intermodulação.

Utilizando esta abordagem foi realizado um experimento de confirmação para oito canais de operação e testes de hipóteses foram aplicados para avaliar os resultados. Os resultados destes testes são apresentados nas tabelas 9 e 10. Os *Valores-P* menores que 0,05 mostram que houve aumento da Eficiência, quando comparada com o valor médio de 41%, e houve redução da Intermodulação, quando comparada com a média de -48,2 dBc.



Pode-se verificar através do teste de hipóteses a diferença entre os valores estimados pelo conceito de Derringer e Suich (1980) e os valores obtidos na prática, ou seja, a diferença entre o comportamento original do amplificador sem o uso de nenhuma técnica de otimização e o resultado final obtido. Esta otimização foi realizada para os canais dentro da faixa de UHF, mas pode ser utilizada para as demais frequências do espectro de televisão.

Tabela 9. Tabela de fatores ótimos para eficiência.

Variável	N	Média	DP	Média SE	95% Limite Inferior	T	P
Valores Estimados	8	0,41750	0,00707	0,00250	0,41276	3,00	<b>0,010</b>
Valores Obtidos	8	0,41375	0,00744	0,00263	0,40877	1,43	<b>0,099</b>
Valores Originais	8	0,4100	0,0298	0,0105	0,3901	0,00	0,500

Tabela 10. Tabela de fatores ótimos para intermodulação.

Variável	N	Média	DP	Média SE	95% Limite Inferior	T	P
Valores Estimados	8	-52,625	0,744	0,263	-52,127	-16,82	<b>0,000</b>
Valores Obtidos	8	-53,500	0,926	0,327	-52,880	-16,19	<b>0,000</b>
Valores Originais	8	-48,238	1,759	0,622	-47,059	-0,06	0,477

## 4. Conclusões

Duas variáveis respostas - Intermodulação e Eficiência - foram analisadas e otimizadas utilizando a abordagem experimental proposta neste trabalho, permitindo realizar as seguintes afirmações com relação às questões levantadas na seção 3.

- i) Os fatores envolvidos no processo de amplificação que mais contribuem para o aumento de Intermodulações são o Canal de operação e a Corrente de polarização. Para esta resposta, há uma forte interação entre a Corrente e a Potência, e entre a Corrente e o Canal.
- ii) A Eficiência também é afetada pela Corrente e pela Potência, mas a melhoria obtida na otimização desta resposta foi menos significativa que a obtida para a Intermodulação.
- iii) É possível escolher valores ótimos para os fatores envolvidos no processo de amplificação de tal forma a obter Intermodulações reduzidas e melhores Eficiências. A escolha ótima destes fatores permite obter amplificadores com melhor desempenho e, por consequência, maior qualidade. O aumento da qualidade é percebido com a

diminuição dos refugos na linha de produção por não atendimento aos requisitos técnicos, aumentando assim a produtividade.

- iv) Verificou-se ser possível utilizar um mesmo amplificador para atender toda a faixa de frequência de UHF (canais 14 a 69) com desempenho satisfatório, desde que os valores ótimos dos fatores estudados sejam escolhidos. Desta forma, para o transistor utilizado neste estudo, foi possível obter um amplificador banda larga capaz de atender um maior número de clientes com um mesmo produto.

O experimento aqui apresentado foi realizado em amplificadores para televisão digital na faixa de UHF, mas a mesma abordagem pode ser utilizada para qualquer outro amplificador em outras faixas de frequência. A inovação deste trabalho está na utilização de DOE e análises estatísticas para avaliação e otimização de circuitos eletrônicos, ferramentas normalmente não utilizadas nesta área, mas que se mostraram adequadas também para este tipo de problema e mais eficientes do que o método tradicional de tentativa e erro.

A fim de garantir a manutenção da qualidade dos amplificadores com o passar do tempo, novas coletas e análises de dados devem ser realizadas para garantir a eficácia do processo produtivo. Além disso, pode-se realizar um estudo de viabilidade econômica para demonstrar a redução de custos que esta abordagem pode trazer pela redução do tempo de produção e pela redução do estoque.

## Referências

ATSC: documento A/64B, *ATSC Recommended Practice: Transmission Measurement and Compliance for Digital Television*, 26 de Maio de 2008.

BARROS NETO, B., SCARMINIO, I. S., BRUNS, R. E., *Planejamento e Otimização de Experimentos*, 2a ed., Editora Unicamp, Campinas, SP, 1996, 60-131.

COLEMAN, D.E., MONTGOMERY, D.C., *A systematic approach to planning for a designed industrial experiment*, *Technometrics*, v.35, n.1, p.1-12, 1993.

CROSMUN, A.M., MAAS. S.A., *Minimization of intermodulation distortion in GaAs MESFET small-signal amplifiers*, *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions*, v. 37, n. 9, p. 1411-1417, set. 1989.

DERRINGER, G. AND SUICH, R., *Simultaneous Optimization of Several Response Variables*, *Journal of Quality Technology*, v. 12, n. 4, out. 1980.

HOEFER, W J R., *Linear and nonlinear field modelling in the time domain with the transmission line matrix (TLM) method*, *ALTA FREQ.*, v. 58, n. 5-6, p. 541-550, 1989.

JEONG, J., *High Efficiency RF and Microwave Power Amplifiers with Non-constant Envelope Signals*, University of California, Los Angeles, 2006.

KIM, B., KO, J., LEE, K., *A new linearization technique for MOSFET RF amplifier using multiple gated transistors*, *Microwave and Guided Wave Letters, IEEE*, v. 10, n. 9, p. 371-373, set. 2000.

LIU, C., XIAO, H., WU, Q., LI, F., *Linear RF power amplifier design for TDMA signals: a spectrum analysis approach*, *Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference*, v. 4, p. 2665-2668, 2001.

MINASIAN, R.A., *Intermodulation Distortion Analysis of MESFET Amplifiers Using the Volterra Series Representation*, Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions, v. 28, n. 1, p. 1- 8, jan. 1980.

NARAYANAN, S., *Application of Volterra series to intermodulation distortion analysis of transistor feedback amplifiers*, Circuit Theory, IEEE Transactions, v. 17, n. 4, p. 518- 527, nov. 1970.

SGRIGNOLI, G., *DTV repeater emission mask analysis*, Broadcasting, IEEE Transactions, v.49, n. 1, p. 32-80, mar. 2003.

YI, J., YANG, Y., PARK, M., KANG, W., KIM, B., *Analog predistortion linearizer for high-power RF amplifiers*, Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions, v. 48, n. 12, p. 2709-2713, dez. 2000.

WU, Y., *Performance comparison of ATSC 8-VSB and DVB-T COFDM transmission systems for digital television terrestrial broadcasting*, Consumer Electronics, IEEE Transactions, v. 45, n.3, p. 916-924, ago. 1999.

# Apêndice B

## RADIO FREQUENCY BROADBAND AMPLIFIERS PERFORMANCE OPTIMIZATION: AN EXPERIMENTAL APPROACH

*Vanessa Lima, Pedro Balestrassi, Anderson Paiva (UNIFEI Brazil) Alberto Garcia-Diaz (Univ Tennessee)*

**Abstract** – This study, utilizing Design of Experiments (DOE), evaluates the performance and assesses the applications of RF power amplifiers in telecommunications. An experimental strategy helps optimize a number of factors in the manufacturing process, factors that increase the amplifier's linearity and overall efficiency. This optimization, in turn, reduces the intermodulation and interference in adjacent services. The outcome is that manufacturers are able to produce high efficiency broadband amplifiers with increased productivity and reliability.

### I. Introduction

In recent years, two great demands of RF power amplifiers have emerged: linearity and electrical efficiency. Linearity is needed because of the scarcity of spectrum (a result of amplifiers' various applications in telecommunications). Electrical efficiency is needed as a selling point to clients, who are concerned about the amplifier's power consumption. Linearity and efficiency are influenced by several factors. If these factors aren't optimized by manufacturers, the amplifiers they produce may be plagued by malfunctions, intermittent failures, even widespread failures, failures that occasionally culminate in components burning.

Manufacturers employ highly multivariate processes to produce RF power amplifiers. Using one set of input factors, they establish relationships through the functional characteristics of the various outputs (responses). For manufacturers, these factors, their effects, and their interactions make some complex processes nearly impossible to control. Consequently, manufacturers can face significant loss of quality and resources. To avoid such loss, they must exercise strict control over these processes. Yet it is a large number of factors and interactions that lead to loss of quality, rejection of parts, or even failures. One reason

manufacturers lack control is that amplifiers' performances vary greatly. This makes it difficult to use the same amplifier over a wide frequency range (broadband amplifiers) as well as to conduct a quality check.

We try, in this study, to optimize the factors involved in producing and assessing RF power amplifiers. Our success may be measured in terms of how much intermodulation the amplifiers generate and their efficiency over a range or band of frequencies. Reducing the variability of the performance parameters helps us to standardize production times and raise the reliability of customers' products.

Section II outlines the subject. Sections III and IV lay out our experimental approach. Section V puts forward our conclusions.

### II. RF Amplifiers Evaluation and Manufacturing Process

The demand for wireless services is prodigious and engineers are responding. In 2005 about two out of three Americans used wireless service. 88% intended to buy a new service by 2009 (Jeong, 2006). According to the Telecommunications Industry Association (TIA), Americans generated \$174.7 billion dollars for the U.S. wireless market in 2005. At that time voice services via mobile phones were already widespread. Still, demand grew for more services and greater capacity for data traffic. To meet the demand engineers refined telecommunications, rolling out such innovations as 3G (Third Generation Mobile Telephony), 4G (Fourth Generation Mobile Telephony), and WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access). In addition, engineers have developed technologies such as LTE (Long Term Evolution), digital television, and digital radio. For consumers these new measures mean that, at an affordable price, broadband services for

voice, data, and video are available anywhere at any time.

These technologies must find room within a very crowded RF spectrum. Hence their modulations, mostly QAM (Quadrature Amplitude Modulation) or OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) types, are highly efficient at occupying bandwidth and at transporting data. While bringing great economy to spectrum, however, these modulations constrain the setting up of transmission systems that require more efficient projects, especially power amplifiers ones.

The power amplifier is an active element, predominantly non-linear in origin, whose main function is to deliver an output signal with amplitude greater than its input. We call this difference the amplifier's gain. This gain is used by telecommunication providers, along with high-powered base stations, to obtain large areas of coverage for their systems, systems like digital television coverage or LTE. To attain that level of power, providers must combine a large number of power amplifiers together.

For telecom companies, the booming demand for power amplifiers represents a great growth opportunity. How these amplifiers are manufactured, however, is slightly obsolete. Production lines turn out products that are neither reliable nor very productive. Several factors contribute to the manufacturers' inconsistency. Some of these factors include manufacturers' using various electronic components not available for pick-and-place machines, manually placing the transistors (the active element of the amplifier), conducting long series of electrical tests, and, generally, combining such a large number of amplifiers.

### II.1 Responses to the process

Two features of RF amplifiers are key to their continued market growth—linearity and efficiency. As more people use digital communications, the linearity of RF amplifiers becomes more pertinent. We can measure linearity by the amplifier's intermodulation output. The lower this output, the more linear the amplifier. At the same time, to be commercialized, the amplifier must be efficient. This study tries to optimize these two features, an RF amplifier's intermodulation output and its efficiency. The process responses are detailed below.

- **Output intermodulation**

While engineers desire an amplifier demonstrating the largest possible gain, they cannot amplify a signal without producing distortions. Thus they endeavor to design amplifiers that produce the fewest. Of the various types of distortions, that which most impacts services to be fitted in the emission masks is intermodulation. Intermodulation occurs when a signal composed of more than one frequency is routed through a non-linear path, such as an amplifier. These frequencies undergo linear combinations thereby producing several new frequencies. As is so with these new frequencies, the amplified signal occupies a band, or bandwidth, greater than the original signal.

The intermodulation reflects how much a signal, after amplification, is restricted in bandwidth so

as not to interfere with adjacent channels or services. The lower end intermodulation produces less interference with other services and yields better signal quality for viewers.

- **Efficiency**

The efficiency will reflect the amplifier's power consumption and, consequently, the total power consumption of the telecommunications equipment of which it is part. The aim is to achieve the most output power while consuming the least energy, i.e., the highest conversion rate of consumed kVA of the power grid out of effective power delivered to the load.

### II.2 Factors

Using an experimental approach, we search for an optimization of power amplifiers used for digital television in the UHF band. To lower intermodulation and raise efficiency, we may manipulate several factors in the power amplification process. Included among these factors are channel or frequency of operation, the bias current, the back-off power, the linearization techniques adopted, the quality of the circuit components, the quality of manufacture, the amount of noise in the power supply, the environmental temperature, and still more.

With so many factors involved, we need an optimized approach to designing and manufacturing RF amplifiers. An optimized approach would aim to accelerate the amplifier's development and evaluation. It should take into account those factors key to the amplifier's project phase and then monitor them in the manufacturing phase. Such vigilance may expose dispersions worthy of attention.

### III. Experimental planning

The telecommunications industry needs amplifiers that are more efficient, linear, and capable of meeting the largest number of applications. They must be broadband to serve a wider range of frequencies of operation. This question need must be analyzed and a method proposed that improves production. The problem has now been identified and defined. The problem, posed the following way, can be understood by several experts:

*The existence of high levels of intermodulation in RF power amplifiers may undermine the quality of the final product and/or generate catastrophic failures with severe consequences for final users. The main issues to be investigated in this study are: i) What factors involved in the amplification process are responsible for the increment of intermodulation? ii) How are they related to efficiency? iii) How can they be controlled with the objective of increasing product quality and productivity? iv) How can a single amplifier be used to serve as many customers as possible, i.e., how can it be broadband?*

Figure 1 shows the historical data of an amplifier with a large dispersion of intermodulation and efficiency. The dispersion falls inside the frequency range of UHF (channels 14 to 69). It's impossible to use the same amplifier for all UHF frequencies. Thus this

amplifier, which cannot be considered broadband, must be customized for each operating frequency. The ideal would be to get the same quantity of intermodulation and efficiency for all UHF channels with minimal variability.

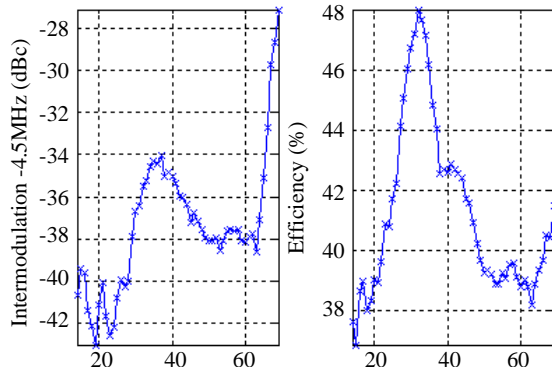


Figure 1. Historical data for intermodulation and efficiency

For a methodology, Design of Experiments (DOE) is a natural choice. Indeed, the process involves a large number of factors, and the potential interactions between them are complex. DOE will exert control and grant robustness to both the design process and the production of RF power amplifiers. Nevertheless, industrial processes always come with troubles. Coleman and Montgomery (1993) suggest that these troubles can be solved with ease and strength. The key, they say, is to design experiments and analyze responses with methods and statistical techniques.

**III.1 Screening experiments**

These factors, shown in Table 1, were selected after a brainstorming session involving four electrical engineers (working for a telecommunications company).

Table 1. Exploratory analysis of factors potentially influential in the process

Factor
Linearization (A)
Operation Temperature (B)
Input Power (C)
Type of Transistor (D)
Noise in the DC power source (E)
Manual Assembly (F)
Bias Current (G)
Class of Operation (H)
Frequency Band (I)

The team decided by experimentally investigating all factors. They used an exploratory design of experiments where the responses at the output of each amplifier are shown in Table 2. These responses were directly affected, to a greater or lesser extent, by the factors listed in Table 1.

Table 2. Expected responses

Y	Name	Type of Response
Y <sub>1</sub>	Output Intermodulation (dBc)	The lower the better
Y <sub>2</sub>	Efficiency (%)	The greater the better

The experimental designs of Taguchi and Plackett-Burman are natural candidates for exploratory projects. The experts opted for the traditional approach

of Plackett-Burman. The feature of orthogonality, which allows the main effects of each factor to be determined individually, assumes that the interaction effects are negligible. This model, besides being suitable for exploratory situations, can also be used in economically lean research. It allows *n* experiments investigating *n-1* factors and uses "ghost" factors. "Ghost" factors allow researchers to estimate the experimental error (Coleman and Montgomery,1996). As with Taguchi experiments, Plackett-Burman experiments can be considered a resolution III. The main effects of factors are confounded with the effects of second-order interactions. This is the cost that must be paid to analyze a large number of factors. The exploratory results, however, indicate a new phase to be designed.

Table 3 shows the Plackett-Burman matrix generated with the results of Intermodulation (Y1) and Efficiency (Y2), considering the nine factors set out in Table 1 and their levels.

Table 3. Plackett-Burman matrix

Run	A	B	C	D	E	F	G	H	I	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>
1	On	20°C	-5.8 dBm	BLF878	HI	IV	7.7 A	AB	69	-48.55	0.41
2	On	20°C	-5.8 dBm	MRF3450H	LO	I	7.7 A	A	14	-52.23	0.34
3	On	35°C	-2.6 dBm	BLF878	LO	IV	9.8 A	A	69	-53.20	0.32
4	Off	20°C	-2.6 dBm	BLF878	LO	IV	7.7 A	A	14	-40.58	0.25
5	Off	35°C	-5.8 dBm	BLF878	HI	I	9.8 A	A	14	-51.94	0.32
6	Off	35°C	-2.6 dBm	MRF3450H	HI	IV	7.7 A	AB	14	-41.34	0.34
7	On	20°C	-2.6 dBm	BLF878	HI	I	9.8 A	AB	14	-51.83	0.46
8	On	35°C	-5.8 dBm	MRF3450H	LO	IV	9.8 A	AB	14	-57.60	0.49
9	Off	20°C	-5.8 dBm	MRF3450H	HI	IV	9.8 A	A	69	-46.01	0.29
10	Off	35°C	-5.8 dBm	BLF878	LO	I	7.7 A	AB	69	-39.80	0.34
11	Off	20°C	-2.6 dBm	MRF3450H	LO	I	9.8 A	AB	69	-43.29	0.33
12	On	35°C	-2.6 dBm	MRF3450H	HI	I	7.7 A	A	69	-48.29	0.26

Fig. 2 shows the sequence of the measurements of the two responses considered for the twelve randomized trials of the Plackett-Burman design.

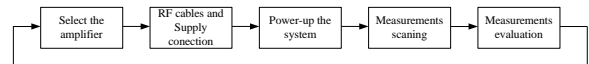


Figure 2. Measurement process.

Figure 3 shows the results of analysis of the main factors involved in the exploratory experiment. For response Y1 (Intermodulation), the factors proving themselves significant (P value < 0.005) were: Linearization (A), Operation Temperature (B), Input Power (C), Bias Current (G), Class of Operation (H) and Frequency Band (I). For the answer Y2 (efficiency) significant factors included Linearization (A), Input Power (C), Bias Current (G), Class of Operation (H) and Frequency Band (I). The other factors were considered negligible.

From the results obtained in the exploratory experiment, we could, in our next study, overlook the factors that less impacted the desired responses. The factors extracted were kept under control by fixing them to a level of easy control and low cost. The main significant factors were fixed at their levels to optimize the two desired responses. Some factors that could be confounded with interaction effects were selected for a second phase. Table 4 summarizes the results obtained by the exploratory Plackett-Burman DOE.

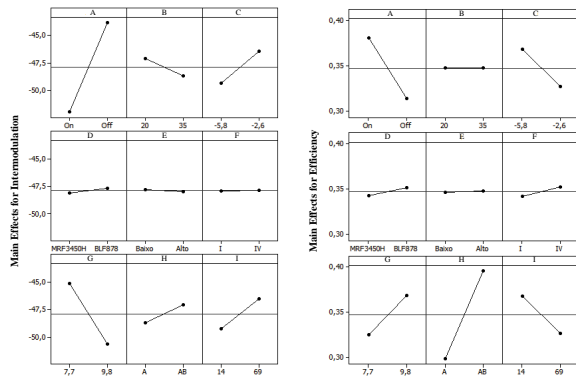


Figure 3. Main effects analysis

Table 4. Decision on factors from the Plackett-Burman DOE study

Factor	Reason	Decision
Transistor Type	Selected BLF878, for higher efficiency	Fix
Bias Current	Analyse in another DOE	Analyse
Input Power	Analyse in another DOE	Analyse
Channel	Analyse in another DOE	Analyse
Class of Operation	Selected Class AB, for higher efficiency	Fix
Linearization	Selected ON, for better responses	Fix
Operating Temperature	Fixed at 25°C	Fix
Manual Assembly	Fixed at assembly number 2	Fix
DC Noise	Fixed at low level noise	Fix

III.2 Response surface methodology (RSM)

From the exploratory experiment, the group decided to investigate, using RSMs, the quantitative factors that could be mistaken with possible interactions. These levels were also chosen on the premise to cover the specifications of a broadband amplifier. Table 5 presents the study factors and levels selected for the experimental phase with the response surface.

Table 5. Factors and levels of the experimental study

Factor Selected	Level -	Level +
Current (A)	8.1	9.3
Input Power (dBm)	-4.6	-3.8
UHF Channel (#)	28	49

Table 6 shows the matrix of experiments and results following the method of Central Composite Designs (CCD). Levels can be observed in the table as factorial points, axial points, and center points. The number of experiments was chosen to encourage response surfaces considering quadratic terms and interaction terms.

Table 6. Array experiment and answers

Run	Current	Power	Channel	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>
1	9.7	-5.8	14	-48.8	0.375
2	9.2	-4.8	21	-49.0	0.391
3	8.0	-4.8	28	-49.6	0.440
4	7.8	-5.4	35	-47.5	0.464
5	8.4	-4.2	42	-48.3	0.433
6	8.9	-4.7	49	-49.2	0.400
7	9.3	-3.6	56	-49.3	0.397
8	8.4	-3.8	69	-44.2	0.384
9	9.7	-5.3	14	-49.8	0.376
10	8.9	-4.4	21	-49.0	0.389
11	8.1	-4.1	28	-50.0	0.450
12	7.9	-4.8	35	-47.3	0.461
13	8.5	-3.9	42	-49.0	0.426
14	9.0	-4.7	49	-50.0	0.396
15	9.2	-3.9	56	-50.0	0.390
16	8.8	-2.9	69	-41.7	0.414
17	9.5	-5.2	14	-49.6	0.371

18	9.1	-4.2	21	-49.1	0.406
19	7.9	-4.0	28	-50.0	0.459
20	7.7	-4.6	35	-46.5	0.474
21	8.4	-3.7	42	-47.8	0.436
22	9.3	-4.2	49	-49.1	0.399
23	9.5	-3.2	56	-49.0	0.378
24	8.8	-3.1	69	-42.9	0.418
25	9.5	-5.0	14	-49.1	0.371
26	9.0	-4.2	21	-49.4	0.407
27	7.9	-4.2	28	-49.8	0.460
28	7.9	-4.7	35	-46.8	0.464
29	8.5	-4.6	42	-48.9	0.421
30	9.3	-5.2	49	-49.4	0.383
31	9.8	-3.5	56	-49.6	0.375

Tables 7 and 8 bring statistical analysis of this experiment, showing, respectively, the linear regression coefficients estimated for intermodulation and efficiency. First, the P values determine which effects of the model are statistically significant. An analysis of variance (ANOVA) yields enough evidence to prove the model's adequacy at explaining these factors relationships with the response. The value of R-Sq, which represents the proportion of the variation in the response explained by the model, is 97.6% for efficiency and 86.5% for intermodulation. These figures also demonstrate the model's suitability. The P values show that the intermodulation is affected by current and channel. Efficiency is affected by current and power. For intermodulation, the interactions Current-Power and Current-Channel are shown to be significant. Quadratic terms are also present in the models. Values in bold show P values of the significant factors of the models for both responses.

Table 7. Statistical analysis for Intermodulation

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-49.3966	0.3991	-123.782	<b>0.000</b>
Current	-2.8551	0.3866	-7.385	<b>0.000</b>
Power	0.4776	0.6211	0.769	0.451
Channel	3.1657	0.7791	4.063	<b>0.001</b>
Current*Current	0.4945	0.8679	0.570	0.575
Power*Power	1.7101	1.3385	1.278	0.216
Channel*Channel	3.3172	1.2826	2.586	<b>0.018</b>
Current*Power	1.7528	0.7973	2.198	<b>0.040</b>
Current*Channel	-4.5883	1.4267	-3.216	<b>0.004</b>
Power*Channel	-1.5300	1.9615	-0.780	0.445

Table 8. Statistical Analysis for Efficiency

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.41107	0.002849	144.29	<b>0.000</b>
Current	-0.05360	0.002760	-19.42	<b>0.000</b>
Power	0.01271	0.004434	2.868	<b>0.010</b>
Channel	0.00710	0.005562	1.278	0.216
Current*Current	0.02229	0.006196	3.598	<b>0.002</b>
Power*Power	0.00642	0.009556	0.672	0.509
Channel*Channel	-0.00166	0.009157	-0.182	0.857
Current*Power	-0.00060	0.005692	-0.106	0.917
Current*Channel	-0.02197	0.010186	-2.157	<b>0.043</b>
Power*Channel	-0.01681	0.014003	-1.201	0.244

To do the statistical analysis, we may use many statistics and graphs. When the response surface is a function of two or more factors, as in this case, the results can be graphically described. Surface and contour plots are useful for establishing operating conditions to obtain desirable values of the response. On a surface chart, the values of the two factors are



represented on the  $x$  and  $y$  axes, while the values of the response are represented on the  $z$  axis. Such a chart provides a three-dimensional view that can display a clearer drawing of the response surface.

To use DOE, a necessary condition is the statistical analysis of the residues through a normal probability plot of residues. Such an analysis determines that the residues do not deviate substantially from a normal distribution. If residues follow a normal distribution, the points describe approximately one line on the graph of probability. For these data, the normal probability plot shows that the residues can be assumed to follow a normal distribution. The residue tests using the Anderson-Darling statistics also confirm the findings graphics. Normality can also be evaluated through the histogram. Fig. 4 shows the graphs of surface and residues for the response generated by the software *Minitab*.

It's possible, and with very high accuracy, to individually model each expected response. Doing so, however, rarely leads to a compromise solution that meets most goals. Derringer and Suich (1980) addressed this problem of optimizing responses. They proposed an algorithm, following the idea of aggregating multiple objectives, for simultaneous optimization of several responses subject to a given number of independent factors or a set of conditions. In this approach, each  $i$  response is transformed, resulting in an individual desirability function  $d_i$ , with  $0 \leq d_i \leq 1$ . With this method, the statistical model is initially obtained using Ordinary Least Square. The individual values obtained after processing are combined by geometric means, making the global desirability index ( $D$ ) as:

$$D = \left[ \prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \left( \hat{Y}_i \right) \right]^{\frac{1}{W}} \quad (1)$$

where  $w_i$  is the  $\hat{Y}_i$  response's individual weight and  $W$  is the weight of the sum. The weight defines the function of desirability for each response. Each can have a weight from 0.1 to 10, to decrease or increase the emphasis on each target.

The  $D$  value leads to a compromise solution and is restricted to the interval  $[0, 1]$ .  $D$  is close to 1 when the answers are near the specifications. The type of transformation depends on the direction of optimization desired. For intermodulation the target is the minimization of response, with a target set at -48 dBc, a maximum of -46dBc, and a weight of 0.1. The efficiency target is to maximize the response, with a target set at 0.4, a minimum of 0.36, and a weight of 0.1. It was given the same importance for both answers.

The optimal solution to minimize intermodulation and maximize efficiency can be achieved, as shown in Figure 5, using the desirability function of Derringer and Suich. The desirability of a compound was provided, where the value 1 represents a perfect point of optimum, and the overall solution to our problem can then be given by:

- Channel = 42
- Input Power = -4.04 dBm

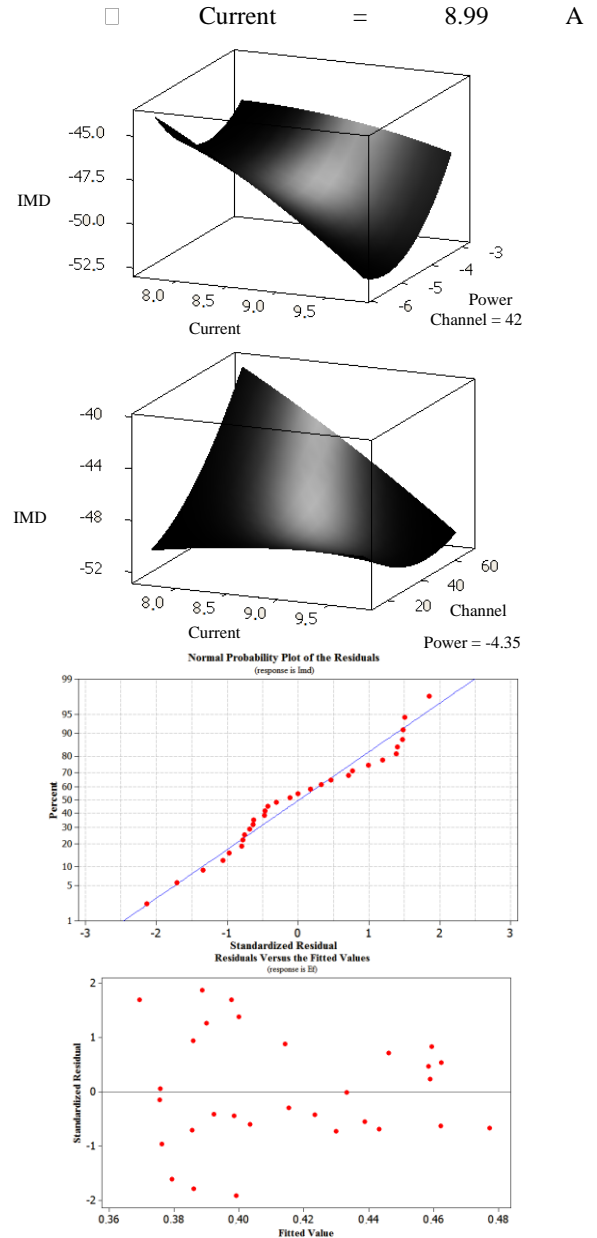


Figure 4. Graph of surface and waste for intermodulation and efficiency

### III.3 Confirmatory experiment

A telecommunications company is not helped, however, by having an amplifier customized for a single optimal point. A telecom company must supply its market with other bands that accommodate all possible situations in setting up the equipment. Hence, they must move all UHF channels to their optimal points to ensure good performance at all frequencies. This increases the reliability and productivity of the amplifiers by lessening the dispersion of efficiency values and intermodulation. Companies can use the concept of Derringer and Suich (1980) to assemble the best, considering the database available, combination of factors for each channel. Using digital device programming and memory for data storage, a company can project automatically, depending on the amplifier's final operating channel, the best factors. This can be

done with neither jeopardizing the productive process nor implying stock increase by creating new models.

By using this approach, we raised optimal estimated values for eight channels of operation. We performed a confirmation experiment and evaluated the results by applying the hypothesis testing. See Tables 9 and 10. The P-value lower than 0.05 shows two things: an increase in efficiency when compared to the average value of 41% and a decrease of intermodulation when compared to the average of -48.2 dBc.

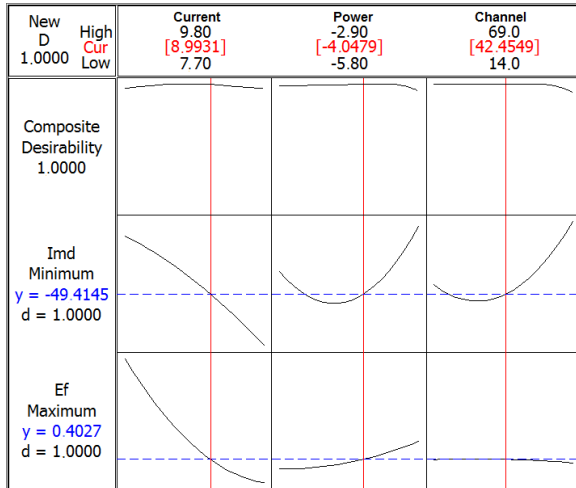


Figure 5. Desirability of Derringer and Suich

Table 9. Optimal factors for efficiency.

Variable	Mean	SD	Mean SE	95% Lower bound	T	P
Estimated values	0.41750	0.007	0.00250	0.41276	3.00	<b>0.010</b>
Obtained values	0.41375	0.007	0.00263	0.40877	1.43	<b>0.099</b>
Original values	0.4100	0.029	0.0105	0.3901	0.00	<b>0.500</b>

Hypothesis testing can verify the difference between the values estimated by the concept of Derringer and Suich (1980) and those obtained in practice. That is to say, it can verify the difference between the amplifier's original performance sans optimization and the final result. The optimization was performed for eight channels in the frequency range of interest. It can be used for other ranges.

Table 10. Optimal factors for intermodulation.

Variable	Mean	SD	Mean SE	95% Lower bound	T	P
Estimated values	-52.625	0.744	0.263	-52.127	-16.8	0.000
Obtained values	-53.500	0.926	0.327	-52.880	-16.1	0.000
Original values	-48.238	1.759	0.622	-47.059	-0.06	0.477

#### IV. Conclusion

This study, through an experimental approach, analyzed and optimized the parameters of intermodulation and efficiency. We began by advancing four questions. First, what factors involved in the amplification process help increase intermodulation? Second, how are such factors related to efficiency? How can they be controlled so as to raise both product quality and productivity? Finally, how can one amplifier serve

the most people? Having conducted the analysis and optimization, we are now able to draw four conclusions:

i. Of the factors involved in the amplification process, operational frequency and bias current contribute most to increasing the intermodulation. We may add to this a strong interaction between operational frequency and input power.

ii. Bias current also affects efficiency, but the improvement from optimizing this response was less significant than that obtained for the intermodulation.

iii. It is possible to choose optimal values for the factors involved in the amplification process to achieve low intermodulation and improved efficiencies. When the optimal factors are chosen, amplifiers perform better and at a higher quality. The higher quality is manifested by fewer rejects (those not meeting technical requirements) in the production line. Consequently, productivity is increased.

iv. Since the optimal values for the factors studied are chosen for each channel, it is possible to use, with satisfactory performance, one amplifier to meet the entire frequency range of UHF (channels 14 to 69). Thus, for the transistor used in this study, it was possible to obtain a broadband amplifier capable of serving a greater number of customers.

The experiments we present in this study were made in amplifiers for digital television in the UHF band. The same approach can be applied to any other amplifier in other frequency bands. This study's innovation is evaluating and optimizing electronic circuits through DOE and statistical analysis. These tools, not commonly used in this field, were adequate for this type of problem. Indeed, they proved themselves more efficient than the conventional method of trial and error.

To preserve the long-term quality of amplifiers, practitioners should collect and analyze data to ensure that production remains effective. Also, researchers can study the financial savings (scrutinizing reduced production time and inventories) to verify the approach's economic viability.

## References

- [1] COLEMAN, D.E., MONTGOMERY, D.C., *A systematic approach to planning for a designed industrial experiment*, Technometrics, v.35, n.1, p.1-12, 1993.
- [2] DERRINGER, G. AND SUICH, R., *Simultaneous Optimization of Several Response Variables*, Journal of Quality Technology, v. 12, n. 4, oct. 1980.
- [3] JEONG, J., *High Efficiency RF and Microwave Power Amplifiers with Non-constant Envelope Signals*, University of California, Los Angeles, 2006.
- [4] KIM, B., KO, J., LEE, K., *A new linearization technique for MOSFET RF amplifier using multiple gated transistors*, Microwave and Guided Wave Letters, IEEE, v. 10, n. 9, p. 371-373, sep. 2000.
- [5] YI, J., YANG, Y., PARK, M., KANG, W., KIM, B., *Analog predistortion linearizer for high-power RF amplifiers*, Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions, v. 48, n. 12, p. 2709-2713, dec. 2000.
- [6] WU, Y., *Performance comparison of ATSC 8-VSB and DVB-T COFDM transmission systems for digital television terrestrial broadcasting*, Consumer Electronics, IEEE Transactions, v. 45, n.3, p. 916-924, aug. 1999.

**Vanessa Lima** received the electrical engineering B. S. degree from Instituto Nacional de Telecomunicações, Brazil, in 2005 and MBA title from Universidade Federal de Itajubá, Brazil, in 2008. She currently works as a R&D Manager at Linear Industries Incorporation conducting the development of digital TV transmitters for ATSC and ISDB-T standards.

**Pedro Paulo Balestrassi** is Postdoctoral Fellow at University of Texas, Austin (TX, USA) in 2005/2006 (18 months), researching nonlinear time series forecasting. Ph.D. in Production Engineering from Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) and Texas A & M University (TX, USA) where he was a researcher at the Department of Industrial Engineering. Electrical Engineer by UFES-ES and Master UNIFEI-MG. Professor at Institute of Production Engineering and Management at the University of Itajubá. Areas of Statistics, Experimental Design, 6 Sigma and Statistical Quality Control. Fellow Productivity of FAPEMIG and CNPq.

**Anderson Paulo de Paiva** is adjunct professor at the Institute of Production Engineering and Management at the University of Itajubá. He graduated in Mechanical Engineering, MSc in Production Engineering (Unifei - 2004) and Ph.D. in Mechanical Engineering (Unifei - 2006). He works in the Design and Analysis of Experiments, Multivariate Statistics, Optimization Methods applied to Manufacturing Processes in themes: Response Surface Methodology, Principal Component Analysis, Genetic Algorithms, Artificial Neural Networks and Nonlinear Optimization.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATSC: documento A/64B, *ATSC Recommended Practice: Transmission Measurement and Compliance for Digital Television*, 26 de Maio de 2008.

BARBETTA, P. A., *Construção de modelos para médias e variâncias na otimização experimental de produtos e processos*, Tese (Engenharia de Produção), Florianópolis, 1998.

BARBETTA, P. A., RIBEIRO, J. L. D., SAMOBYL, R. W., *Variance regression models in Experiments with few replications*, *Quality And Reliability Engineering International*, Inglaterra, v.16, p. 397 – 404, 2000.

BARROS NETO, B., SCARMINIO, I. S., BRUNS, R. E., *Planejamento e Otimização de Experimentos*, 2a ed., Editora Unicamp, Campinas, SP, 60-131, 1996.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E., *Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria*, Campinas: Unicamp, 2001. 401 p.

BARTLETT, M. S., KENDALL, D. J., *The statistical analysis of variance-heterogeneity and the logarithmic transformation*, *Journal of the Royal Statistical Society, Série B*, v. 8, 1946, p. 128-138.

BOX, G. E. P., HUNTER, W. G., HUNTER, J. S., *Statistics for experimenters*, USA: John Wiley & Sons, 1978.

BOX, G. E. P.; DRAPER, N. R., *Empirical Model-Building and Response Surfaces*, New York: John Wiley & Sons, 1987.

CARROLL, J., CHANG, K., *Statistical computer-aided design for microwave circuits*, Dept. of Electr. Eng., Texas A&M Univ., College Station, TX, *Microwave Theory and Techniques*, IEEE Transactions on, v.44, p. 24-32, 1996.

CARROLL, R. J., RUPPERT, D., *Transformation and weighting in regression*, USA: Chapman and Hall, 1988.

CASTRO, I. A.; SILVA, R. S. F.; TIRAPEGUI, J.; BORSATO, D.; BONA, E., *Simultaneous optimization of response variables in protein mixtures formulation: constrained simplex method approach*, International Journal of Food Science and Technology, Oxford, v. 38, p. 103-110, 2003.

COLEMAN, D.E., MONTGOMERY, D.C., *A systematic approach to planning for a designed industrial experiment*, Technometrics, v.35, n.1, p.1-12, 1993.

CROSMUN, A.M., MAAS. S.A., *Minimization of intermodulation distortion in GaAs MESFET small-signal amplifiers*, Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions, v. 37, n. 9, p. 1411-1417, set. 1989.

DEL CASTILLO, E., MONTGOMERY, D. C., MCCARVILLE, D. R., *Modified Desirability Functions for Multiresponse Optimization*, Journal of Quality Technology. Volume 28, No. 3, pp. 337-345, 1996.

DERRINGER, G., SUICH, R., *Simultaneous Optimization of Several Response Variables*, Journal of Quality Technology, Volume 12, No. 4, pp. 214-219, 1980.

HARRINGTON, Jr. E. C., *The Desirability Function*, Industrial Quality Control, Volume 21, No. 10, pp. 494-498, 1965.

HOEFER, W J R., *Linear and nonlinear field modelling in the time domain with the transmission line matrix (TLM) method*, ALTA FREQ., v. 58, n. 5-6, p. 541-550, 1989.

JAIN, R., *The art of computer systems performance analysis: techniques for experimental design, measurement, simulation, and modeling*, USA: John Wiley & Sons, 1991.

JEONG, J., *High Efficiency RF and Microwave Power Amplifiers with Non-constant Envelope Signals*, University of California, Los Angeles, 2006.

KHURI, A. I, CONLON, M., *Simultaneous Optimization of Multiple Responses Represented by Polynomial Regression Functions*, Technometrics, Volume 23, No. 4, pp. 363-383, 1981.

KIM, B., KO, J., LEE, K., *A new linearization technique for MOSFET RF amplifier using multiple gated transistors*, Microwave and Guided Wave Letters, IEEE, v. 10, n. 9, p. 371-373, set. 2000.

LIU, C., XIAO, H., WU, Q., LI, F., *Linear RF power amplifier design for TDMA signals: a spectrum analysis approach*, Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference, v. 4, p. 2665-2668, 2001.

MAYER, R. J., BENJAMIN, P. C., *Using the Taguchi paradigm for manufacturing system design using simulation experiments*, Computers and Industrial Engineering, v. 22, n. 2, p. 195 – 209, 1992.

MARTINS, J.P.T., *Estudo de Técnicas de Linearização em Dispositivos de RF*, Universidade de Aveiro, Portugal, 2004.

MINASIAN. R.A., *Intermodulation Distortion Analysis of MESFET Amplifiers Using the Volterra Series Representation*, Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions, v. 28, n. 1, p. 1- 8, jan. 1980.

NAGELKERKE, N., *A Note on a General Definition of the Coefficient of Determination*, Biometrika, vol. 78, no. 3, pp. 691–692, 1991.

NARAYANAN, S., *Application of Volterra series to intermodulation distortion analysis of transistor feedback amplifiers*, Circuit Theory, IEEE Transactions, v. 17, n. 4, p. 518- 527, nov. 1970.

SALL, J., *Contour Profiling to Optimize Multiple Responses Across Multiple Factors*, SAS Institute, Inc., *JMP User's Guide*, Cary, NC. SAS Institute, Inc., 1995.

SGRIGNOLI, G., *DTV repeater emission mask analysis*, Broadcasting, IEEE Transactions, v.49, n. 1, p. 32-80, mar. 2003.

SHANG, J. S., TADIKAMALLA, P. R., *Multicriteria design and control of a cellular manufacturing system through and optimization*, International Journal of Production Research, v. 36, n. 6, p. 1515 – 1528, 1998.

SILVA, M. P. S., RODRIGUES, H. D., MELLO, A. A., LIMA, J. S. e SILVEIRA, M., *Uma eficiente abordagem numérica para a linearização de amplificadores de potência*, IEEE Latin America Transactions, vol. 2, n. 2, jun. 2004.

STEEL, R. G. D., TORRIE, J. H., *Principles and Procedures of Statistics*, New York: McGraw-Hill, p. 187-287, 1960.

TAGUCHI, G., *System of experimental design: engineering methods to optimize quality and minimize costs*, 2 ed. USA: UNIPUB, 1987.

WELCH, W. J., BUCK R. J., SACKS, J., WYNN, H. P., MITCHELL, T. J., MORRIS, M. D., *Screening, predicting, and computer experiments*, Technometrics, v. 34, n. 1, p. 15 – 25, 1992.

WU, Y., *Performance comparison of ATSC 8-VSB and DVB-T COFDM transmission systems for digital television terrestrial broadcasting*, Consumer Electronics, IEEE Transactions, v. 45, n.3, p. 916-924, ago. 1999.

YI, J., YANG, Y., PARK, M., KANG, W., KIM, B., *Analog predistortion linearizer for high-power RF amplifiers*, Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions, v. 48, n. 12, p. 2709-2713, dez. 2000.

## BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

LEHRER, C., *Operador de seleção para algoritmos genéticos baseado no jogo hawk-dove*, Dissertação (Ciência da Computação), Florianópolis, 2000.

MONTGOMERY, D. C., *Design and analysis of experiments*, 4 ed., USA: John Wiley & Sons, 1997.

MYERS, R. H., CARTER, W. H., *Response surface techniques for dual response systems. Technometrics*, v. 15, n. 2, p. 301 – 317, 1973.

MYERS, R. H., MONTGOMERY, D. C., *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*, USA: John Wiley & Sons, 1995.

RIBEIRO, J. L. D., ELSAYED, E. A., *A case study on process optimization using the gradient loss function*, International Journal of Production Research, v. 33, n. 12, p. 3233-3248, 1995.

TAGUCHI, G., *System of experimental design: engineering methods to optimize quality and minimize costs*, 2 ed. USA: UNIPUB, 1987.

VINING, G. G., MYERS, R. H., *Combining Taguchi and response surface philosophies: a dual response approach*, Journal of Quality Technology, v. 22, n. 1, p. 38 – 45, 1990.