

ALEXANDRE DOTTO

**DESENVOLVIMENTO DE UM ACESSÓRIO DE
MENSAGENS DE ATENDIMENTO AUTOMÁTICO PARA
CENTRAIS ANALÓGICAS INTELBRAS**

FLORIANÓPOLIS, 2014

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO *LATO SENSU* ESPECIALIZAÇÃO
EM DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS ELETRÔNICOS**

ALEXANDRE DOTTO

**DESENVOLVIMENTO DE UM ACESSÓRIO DE
MENSAGENS DE ATENDIMENTO AUTOMÁTICO PARA
CENTRAIS ANALÓGICAS INTELBRAS**

Monografia submetida ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos de obtenção do certificado de Especialista em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos.

**Professor Orientador:
André Luís Dalcastagnê, Dr.Eng.**

FLORIANÓPOLIS, 2014

CDD 621.382
D725d

Dotto, Alexandre

Desenvolvimento de um acessório de mensagens de atendimento automático para centrais analógicas Intelbras [MP] / Alexandre Dotto; orientação de André Luís Dalcastagnê. – Florianópolis, 2014.

1 v.: il.

Monografia de Pós - Graduação (Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos)
– Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Inclui referências.

1. Centrais privadas de comutação telefônica. 2. Centrais analógicas modulares. 3. Atendimento automático. 4. CPCT. 5. Software. I. Dalcastagnê, André Luís. II. Título.

Sistema de Bibliotecas Integradas do IFSC

Biblioteca Dr. Hercílio Luz – Campus Florianópolis

Catalogado por: Ana Paula F. Rodrigues Pacheco CRB 14/1117

DESENVOLVIMENTO DE UM ACESSÓRIO DE MENSAGENS DE ATENDIMENTO AUTOMÁTICO PARA CENTRAIS ANALÓGICAS INTELBRAS

ALEXANDRE DOTTO

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do certificado de Especialista em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Pós-Graduação *Lato Sensu* Especialização em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 10 de setembro de 2014.

Banca examinadora:

Prof. André Luís Dalcastagnê, Dr.Eng.

Prof. Carlos Gontarski Speranza, M.Eng.

Prof. Samir Bonho, M.Eng.

*"I love deadlines. I love the whooshing
noise they make as they go by."*
(Douglas Adams)

RESUMO

A Intelbras é uma empresa catarinense que desenvolve e fabrica, dentre outros produtos, centrais privadas de comutação telefônica (CPCTs). Há mais de dez anos, a empresa disponibiliza no mercado centrais analógicas modulares, formadas por versões básicas, que atendem as necessidades da maior parte dos usuários, e por acessórios destinados à execução de funções mais complexas. Neste trabalho, é apresentado o desenvolvimento do *software* da placa de atendimento automático, acessório que permite que determinada CPCT atenda a uma ligação automaticamente e informe ao assinante que originou a chamada quais são os ramais existentes através de uma mensagem de atendimento automático pré-gravada. Após listar os requisitos de projeto, elabora-se a especificação do *software* por meio da descrição dos casos de uso, além de se utilizar diagramas de sequência e de blocos. Um sistema de arquivos para armazenar as mensagens na memória *flash* é desenvolvido, com a escolha da codificação LPCM à taxa de 128.000 bits por segundo. Após um breve estudo acerca das características do PWM do microcontrolador utilizado, é determinado o valor de 58.593,75 Hz para a frequência da portadora. Para a gravação das mensagens de atendimento automático através de um ramal, o sinal é superamostrado à taxa de 16 kHz, sendo projetado para isso um filtro digital anti-recobrimento. A detecção da sinalização DTMF é feita através da análise espectral do sinal por meio do algoritmo de Goertzel, seguida de uma comparação entre as amplitudes determinadas a fim de adequar a detecção às normas da ANATEL. Os resultados obtidos comprovam o cumprimento dos requisitos de projeto.

Palavras-chave: Centrais privadas de comutação telefônica (CPCTs). Acessórios para CPCTs. *Direct inward system access*.

ABSTRACT

Intelbras is a company from Santa Catarina that develops and manufactures, among other products, private automatic branch exchanges (PABXs). For over ten years, the company has offered to the market modular analog PABXs, formed by basic versions that meet the needs of most users, and accessories that assist the implementation of more complex functions. This work presents the development of the automatic answering card software, an accessory that allows a PABX to answer a call automatically and notify the subscriber that originated the call what are the existing extensions through a pre-recorded voice message. After listing the design requirements, the software is specified through the description of the use cases, in addition to using sequence and block diagrams. A file system to store the messages in flash memory is developed, with the choice of LPCM encoding at the rate of 128,000 bits per second. After a brief study on the PWM characteristics of the chosen microcontroller, a value of 58,593.75 Hz for the carrier frequency is determined. To record voice messages through an extension, the signal is oversampled at the rate of 16 kHz, which requires the design of an anti-aliasing digital filter. The detection of DTMF signaling is done through the spectral analysis of the signal by applying the Goertzel algorithm, followed by a comparison between the determined amplitudes in order to adapt the detection to the ANATEL rules. The obtained results confirm compliance with the design requirements.

Key-words: Private automatic branch exchange (PABX). Accessories for PABXs. Direct inward system access.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Placa DISA original das centrais “Modulare i” e “Conecta”.	24
Figura 2	– Diagrama de blocos da placa DISA original.	24
Figura 3	– Placa DISA da central “Modulare i” com a placa adaptadora conectada no lugar do circuito integrado ISD2590.....	26
Figura 4	– Vista interna da central “Modulare+”.	27
Figura 5	– Mapa da memória de programa das centrais “Modulare+” e “Conecta+”.	28
Figura 6	– Fluxograma do <i>boot loader</i> das centrais “Modulare+” e “Conecta+”.....	29
Figura 7	– Formato do arquivo de atualização de <i>software</i> das centrais “Modulare+” e “Conecta+”.	30
Figura 8	– Diagrama de blocos da DISA das centrais “Modulare+” e “Conecta+”.....	31
Figura 9	– Esquemático de um circuito telefônico ponto-a-ponto.	36
Figura 10	– Exemplo de diagrama de uma rede telefônica ponto-a-ponto com cinco assinantes.	36
Figura 11	– Exemplo de diagrama de uma rede telefônica com cinco assinantes e um escritório central.....	37
Figura 12	– Diagrama de casos de uso da DISA.	46
Figura 13	– Diagrama de sequência do caso de uso “Instalar placa”.....	47
Figura 14	– Detalhamento do caso de uso “Configurar funcionamento”.	48
Figura 15	– Diagrama de sequência do caso de uso “Programar tipo de funcionamento”.....	49
Figura 16	– Diagrama de sequência do caso de uso “Ativar mensagens”.	50
Figura 17	– Diagrama de sequência do caso de uso “Atualizar <i>software</i> ”.	51
Figura 18	– Diagrama de sequência do caso de uso “Gravar mensagens (estúdio)”.....	53
Figura 19	– Diagrama de sequência do caso de uso “Gravar mensagens (ramal)”.	54
Figura 20	– Diagrama de sequência do caso de uso “Realizar chamada”.	55
Figura 21	– Diagrama de blocos dos programas para atualização de <i>software</i> e transferência de mensagens de atendimento automático, executados através do <i>boot loader</i> da central... ..	57
Figura 22	– Diagrama de blocos do <i>boot loader</i> da DISA.....	57
Figura 23	– Diagrama de blocos do <i>software</i> da DISA.	58
Figura 24	– Fluxograma do <i>boot loader</i> da DISA.....	60
Figura 25	– Fluxograma do <i>software</i> de atualização da DISA.....	62

Figura 26 – Diagrama de blocos mostrando as tarefas da Aplicação e seus relacionamentos.	63
Figura 27 – Divisão de memória de uma mensagem de atendimento automático customizada e as operações efetuadas.	65
Figura 28 – Organização das mensagens de atendimento automático na memória <i>flash</i>	70
Figura 29 – Resultado da simulação de um sinal UPWM de borda simples, destacando o efeito de distorção harmônica.	73
Figura 30 – Relação entre as magnitudes do sinal e da sua segunda harmônica em um sinal UPWM de borda simples em relação às variações de α e da profundidade de modulação M	74
Figura 31 – Resultado da simulação de um sinal UPWM de borda simples, destacando o efeito de distorção causada pela banda lateral.	75
Figura 32 – Relações entre as magnitudes do sinal e das suas oito primeiras harmônicas contidas na primeira banda lateral ($m = 1$) de um sinal UPWM de borda simples, com profundidade de modulação $M = 0,5$ e $0 < \alpha \leq 0,5$	76
Figura 33 – Relações entre as magnitudes do sinal e das suas trinta primeiras harmônicas contidas na primeira banda lateral ($m = 1$) de um sinal UPWM de borda simples, com profundidade de modulação $M = 1$	77
Figura 34 – Razão sinal-ruído em função da resolução para diversos valores de amplitude do sinal.	79
Figura 35 – Nível máximo da distorção causada pela banda lateral na região das frequências audíveis comparado com o nível do ruído de quantização.	81
Figura 36 – Comparação dos níveis de distorção harmônica e do ruído de quantização.	82
Figura 37 – Fluxograma do algoritmo de detecção de sinais DTMF.	83
Figura 38 – Coeficientes do filtro digital anti-recobrimento projetado. ...	86
Figura 39 – Magnitude da resposta em frequência do filtro digital anti-recobrimento projetado.	86
Figura 40 – Camadas do protocolo de comunicação entre a central e os seus acessórios.	87
Figura 41 – Fluxograma do <i>software</i> de atualização de mensagens de atendimento automático da DISA.	92
Figura 42 – Forma de onda de uma saída PWM com razão cíclica $D = 0,5$	94
Figura 43 – Análise espectral de uma saída PWM com razão cíclica $D = 0,5$	94

Figura 44 – Análise espectral de uma saída PWM modulada por um sinal de 1 kHz amostrado à taxa de 8 kHz.....	95
Figura 45 – Análise espectral na saída do filtro passa-baixas de uma saída PWM modulada por um sinal de 1 kHz amostrado à taxa de 8 kHz.	95
Figura 46 – Detalhe da análise espectral na saída do filtro passa-baixas de uma saída PWM modulada por um sinal de 1 kHz amostrado à taxa de 8 kHz.	96
Figura 47 – Forma de onda na saída do filtro passa-baixas de uma saída PWM modulada por um sinal de 1 kHz amostrado à taxa de 8 kHz.....	97
Figura 48 – Diagrama de conexão da central para simular uma chamada recebida pela linha telefônica.	97
Figura 49 – Análise espectral do sinal reproduzido a partir da gravação, através de um ramal da central, de um tom puro de 1 kHz. .	99
Figura 50 – Análise espectral do sinal reproduzido a partir da gravação, através de um ramal da central, de um sinal composto por tons puros de 1 kHz e 4,1 kHz, com o filtro digital anti-recobrimento desabilitado.....	99
Figura 51 – Análise espectral do sinal reproduzido a partir da gravação, através de um ramal da central, de um sinal composto por tons puros de 1 kHz e 4,1 kHz, com o filtro digital anti-recobrimento habilitado.	100
Figura 52 – Medição do pior tempo de execução (WCET) da detecção DTMF.	104
Figura 53 – Medição do pior tempo de execução (WCET) da reprodução de mensagens.....	105
Figura 54 – Medição do pior tempo de execução (WCET) da gravação de mensagens.	105
Figura 55 – Programa de determinação do filtro anti-recobrimento	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Parâmetros da sinalização decádica.	40
Tabela 2	–	Parâmetros da sinalização DTMF, no sentido do usuário para a rede.	40
Tabela 3	–	Durações das mensagens de atendimento automático pré-gravadas.	65
Tabela 4	–	Exemplo de tabela de mensagens de atendimento automático utilizada pela DISA com ISD2590.	68
Tabela 5	–	Resultados do teste de tolerância das frequências do sinal DTMF.	101
Tabela 6	–	Resultados do teste de <i>twist</i>	102

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	– Comparativo entre as centrais “Modulare+” e “Conecta+”.	27
Quadro 2	– Relação entre as frequências e os símbolos da sinalização DTMF.	40
Quadro 3	– Avaliação das mensagens de atendimento automático em diversas resoluções e taxas de amostragem.	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	<i>Analog-to-digital converter</i>
Anatel	Agência Nacional de Telecomunicações
CI	Circuito integrado
CPCT	Central privada de comutação telefônica
DAC	<i>Digital-to-analog converter</i>
DISA	<i>Direct inward system access</i>
DMA	<i>Direct memory access</i>
DTMF	<i>Dual-tone multi-frequency</i>
EEPROM	<i>Electrically erasable programmable read-only memory</i>
FFT	<i>Fast Fourier transform</i>
FIR	<i>Finite impulse response</i>
GPDMA	<i>General purpose direct memory access</i>
IAP	<i>In-application programming</i>
IDE	<i>Integrated development environment</i>
IIR	<i>Infinite impulse response</i>
IRQ	<i>Interrupt request</i>
JEDEC	<i>Joint Electron Device Engineering Council</i>
LPCM	<i>Linear pulse-code modulation</i>
MISR	<i>Multiple input signature register</i>
MCU	<i>Microcontroller unit</i>
PABX	<i>Private automatic branch exchange</i>
PBX	<i>Private branch exchange</i>
PWM	<i>Pulse-width modulation</i>

RMS	<i>Root mean square</i>
SAR	<i>Successive approximation register</i>
SNR	<i>Signal-to-noise ratio</i>
SPDT	<i>Single pole, double throw</i>
SPST	<i>Single pole, single throw</i>
SPI	<i>Serial peripheral interface</i>
TFD	Transformada de Fourier discreta
TFTD	Transformada de Fourier de tempo discreto
UPWM	<i>Uniform sampling pulse-width modulation</i>
USB	<i>Universal serial bus</i>
VoIP	<i>Voice over internet protocol</i>
WAVE	<i>Waveform audio file format</i>
WCET	<i>Worst case execution time</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Histórico da DISA Intelbras	23
1.2	Novas centrais “Modulare+” e “Conecta+”	26
1.2.1	Atualização do <i>software</i> das centrais	27
1.3	DISA das centrais “Modulare+” e “Conecta+”	29
1.4	Delimitação do problema	32
1.5	Justificativa	33
1.6	Objetivos	34
1.6.1	Objetivo geral	34
1.6.2	Objetivos específicos	34
1.7	Estrutura do documento	34
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	35
2.1	Telecomunicações	35
2.1.1	Telefonia	35
2.1.2	Centrais privadas de comutação telefônica	38
2.1.3	Sinalização de usuário para a central	38
2.1.3.1	Sinalização decádica	39
2.1.3.2	Sinalização multifrequencial	39
2.2	Processamento digital de sinais	41
2.2.1	Teorema da amostragem	41
2.2.2	Filtro anti-recobrimento	41
2.2.3	Sobreamostragem	42
2.2.4	Análise de sinais discretos no domínio da frequência	42
2.2.4.1	Transformada de Fourier discreta	43
2.2.4.2	Algoritmo de Goertzel	44
3	DESENVOLVIMENTO	45
3.1	Especificação	45
3.1.1	Casos de uso	45
3.1.1.1	Instalar placa	46
3.1.1.2	Configurar funcionamento	47
3.1.1.3	Atualizar <i>software</i>	48
3.1.1.4	Gravar mensagens (estúdio)	52
3.1.1.5	Gravar mensagens (ramal)	52
3.1.1.6	Realizar chamada	52
3.1.2	Diagramas de blocos	56
3.2	Implementação	58
3.2.1	<i>Boot loader</i>	59

3.2.2	Atualizador da DISA.....	60
3.2.3	<i>Software</i> Aplicação.....	61
3.2.3.1	Sistema de arquivos	63
3.2.3.2	Reprodutor de áudio	71
3.2.3.3	Detecção DTMF.....	80
3.2.3.4	Gravador de áudio	84
3.2.3.5	Protocolo CPCT	85
3.2.4	Atualizador de mensagens	91
4	RESULTADOS	93
4.1	Reprodutor de áudio	93
4.2	Gravador de áudio	98
4.3	Detecção DTMF	98
4.3.1	Teste de decodificação	100
4.3.2	Teste de tolerância das frequências do sinal DTMF	101
4.3.3	Teste de <i>twist</i>	101
4.3.4	Teste de alcance dinâmico	102
4.3.5	Teste de duração mínima	102
4.3.6	Teste de aceitação de ruído	102
4.3.7	Teste de imunidade à voz	102
4.3.8	Verificação de conformidade com as normas da ANATEL	103
4.4	Tempos de execução	103
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	107
	REFERÊNCIAS.....	111
	APÊNDICE A FILTRO ANTI-RECOBRIMENTO	113

1 INTRODUÇÃO

A Intelbras é uma empresa catarinense, fundada em 1976, que desenvolve e fabrica produtos de telefonia, informática e segurança eletrônica. Possui capital 100 % nacional e, além de abastecer o mercado interno, exporta para dezoito países os produtos fabricados pelas suas seis unidades fabris: quatro no estado de Santa Catarina, nas cidades de São José (matriz e parque fabril II), Palhoça (Automatiza) e Blumenau (Engesul), uma no estado de Minas Gerais, na cidade de Santa Rita do Sapucaí, e outra no estado do Amazonas, em Manaus.

Em 1987, a empresa lançou os primeiros modelos de centrais privadas de comutação telefônica (CPCTs) microprocessadas do Brasil, chamadas “IPX 30” e “IPX 60”. Atualmente, a Intelbras possui uma linha de CPCTs com tecnologia de comutação analógica disponível no mercado há mais de dez anos. Dessa linha fazem parte as centrais “CORP 16000”, “CORP 8000”, “CORP 6000”, “Modulare i” e “Conecta”, com 80, 32, 22, 16 e 10 portas, respectivamente ¹. Essas centrais foram desenvolvidas a partir de um conceito de modularidade, no qual as versões básicas dos produtos atendem a maior parte das necessidades dos usuários, ao passo que funções mais complexas dependem da instalação de acessórios. Dentre os acessórios para CPCTs disponibilizados pela empresa, destaca-se aqui a Placa de Atendimento Automático, também conhecida como DISA (do inglês *direct inward system access*). Tal acessório permite que determinada CPCT atenda a uma ligação automaticamente e informe ao assinante que originou a chamada quais são os ramais existentes através de uma mensagem de atendimento automático pré-gravada.

1.1 Histórico da DISA Intelbras

A DISA original usada nas centrais “Modulare i” e “Conecta” (Figura 1) era baseada no circuito integrado (CI) comercial ISD2590, dedicado à tarefa de gravar e reproduzir mensagens de áudio. O diagrama de blocos dessa primeira versão é apresentado na Figura 2, de onde se pode verificar que a interface com a central (bloco 7) era feita através de um barramento paralelo de 8 bits (D0 a D7) e também que o áudio era gravado ou reproduzido através de um único caminho, denominado via de atendimento (VATD). A identificação do número discado, via sinalização multifrequencial (DTMF, do

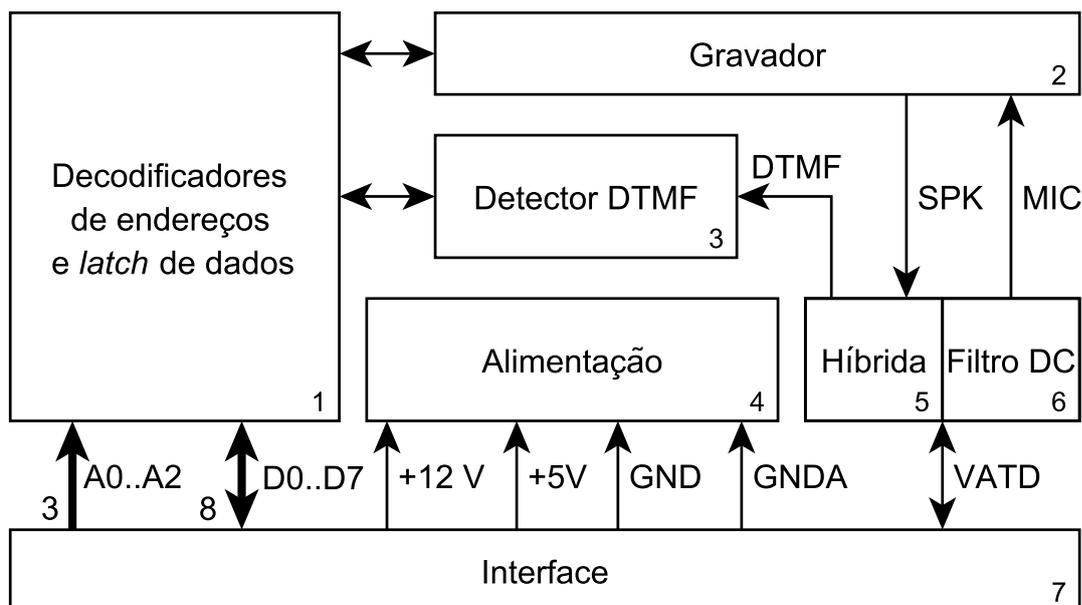
¹ O número de portas de uma CPCT equivale ao somatório de linhas e ramais em sua configuração máxima.

Figura 1 – Placa DISA original das centrais “Modulare i” e “Conecta”.



Fonte: Acervo Intelbras.

Figura 2 – Diagrama de blocos da placa DISA original.



Fonte: Elaboração própria.

inglês *dual-tone multi-frequency*), era realizada através do CI MT8870 (bloco 3). Além disso, tal versão possuía as seguintes características:

- a) capacidade de atender apenas uma linha por vez;
- b) duas opções de idioma para as mensagens pré-gravadas: português e espanhol;
- c) possibilidade de gravação de uma mensagem de até 20 s através de um ramal da central;
- d) seis mensagens de atendimento pré-gravadas:
 - mensagem para indicar ramal ocupado, com a fala “Ramal ocupado, aguarde.” (identificada pelo código ME01);
 - mensagem para indicar número inexistente, com a fala “Disca-gem incorreta, aguarde.” (código ME02);
 - mensagem para indicar ramal desligado, com a fala “Ramal fora de operação, aguarde.” (código ME03);
 - mensagem para indicar chamada de emergência, com a fala “Chamada de emergência.” (código ME04);
 - mensagem para saudar o assinante que originou a chamada, orientando-o a informar o número do ramal com o qual deseja se comunicar, com a fala “Atendimento digital. Após o sinal, digite o ramal ou aguarde.”, conhecida como mensagem diurna (código ME05);
 - mensagem para saudar o assinante que originou a chamada, solicitando-o a ligar em outro momento, com a fala “Atendimento digital. No momento não podemos atender. Por favor, volte a ligar no horário comercial. Obrigado.”, conhecida como mensagem noturna (código ME06).

Em 2008, o CI ISD2590 foi descontinuado pelo fabricante Winbond, que recomendou a sua substituição pelo CI ISD1760, o qual possui as mesmas funções de gravação e reprodução de mensagens, mas com uma interface de comunicação serial em vez de paralela. A solução encontrada à época pela Intelbras para manter a disponibilidade do acessório DISA sem a necessidade de realizar alterações na central telefônica foi desenvolver uma placa adaptadora com o novo CI, conectada à placa DISA exatamente na posição do CI anterior (ver Figura 3). Além do ISD1760, essa placa adaptadora incluiu outro CI, o microcontrolador ST72F260, responsável por converter os comandos da central vindos do barramento paralelo para o protocolo serial do gravador, o que elevou o custo da solução.

Figura 3 – Placa DISA da central “Modulare i” com a placa adaptadora conectada no lugar do circuito integrado ISD2590.



Fonte: Acervo Intelbras.

1.2 Novas centrais “Modulare+” e “Conecta+”

Em maio de 2014, a Intelbras lançou duas novas centrais analógicas, chamadas “Modulare+” (Figura 4) e “Conecta+”, visando substituir as suas equivalentes em número de portas, “Modulare i” e “Conecta”, respectivamente. Apesar de a capacidade de linhas e ramais serem as mesmas das anteriores, as novas centrais incorporam, de fábrica, vários acessórios dos modelos antigos como, por exemplo, a placa de identificação de chamadas.

Essas duas novas centrais, que se diferenciam principalmente pela capacidade máxima suportada (Quadro 1), têm como central de processamento principal o microcontrolador LPC1759, com núcleo ARM Cortex-M3, além de um microcontrolador secundário, ARM Cortex-M0 LPC1114, que realiza, dentre outras tarefas, a identificação de chamadas das linhas. A comutação do áudio entre ramais e linhas é feita através de uma matriz de comutação analógica de 16 linhas e 8 colunas, pelo CI MT8816. Além disso, as novas centrais possuem duas interfaces do tipo *universal serial bus* (USB): uma para possibilitar a comunicação das centrais com um microcomputador (USB *host*) e outra para conectar um dispositivo de armazenamento externo, do tipo *pendrive*, utilizado para repassar informações para a central, tal como a atualização do *software* (USB *device*).

Figura 4 – Vista interna da central “Modulare+”.



Fonte: Acervo Intelbras.

Quadro 1 – Comparativo entre as centrais “Modulare+” e “Conecta+”.

Característica	“Conecta+”	“Modulare+”
Quantidade de ramais analógicos	8	12
Quantidade de linhas analógicas	2	4
Quantidade de acessórios	1	2

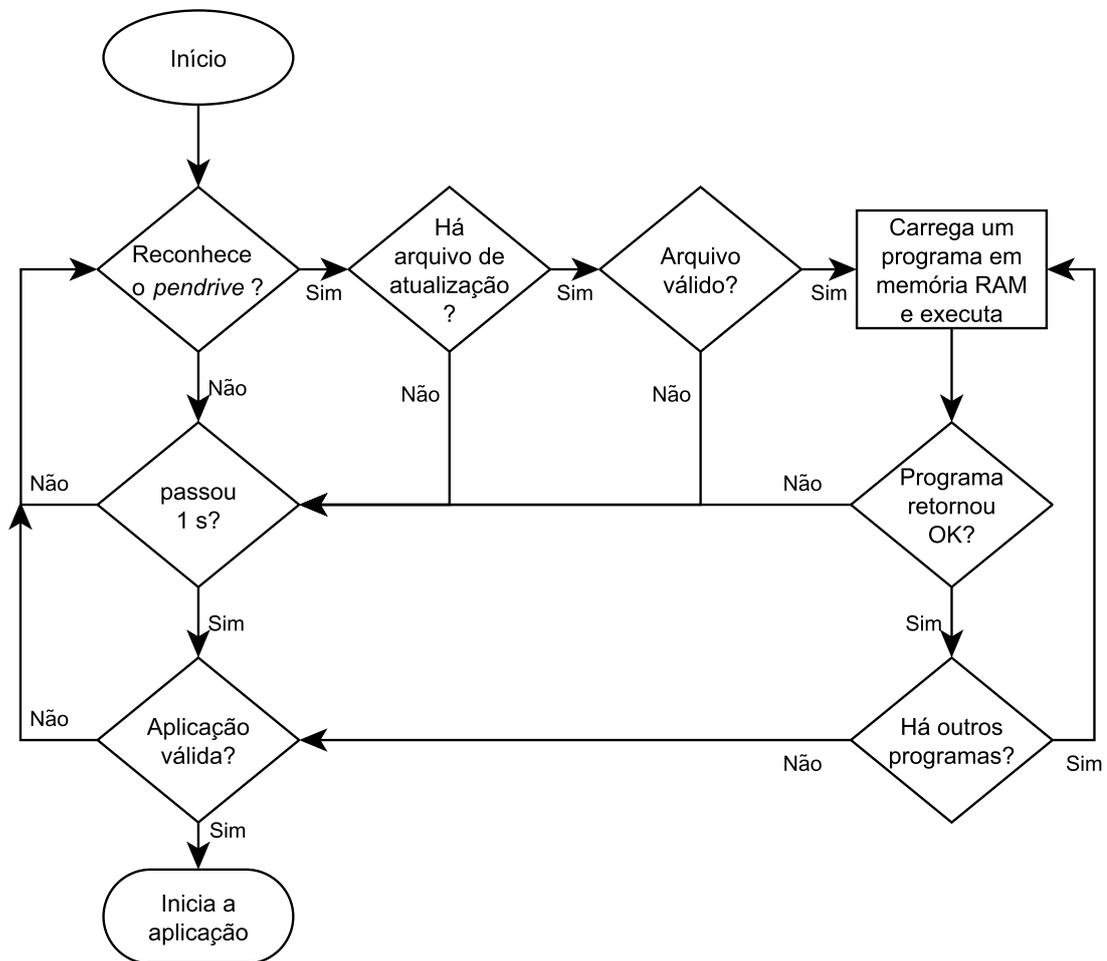
Fonte: Elaboração própria.

1.2.1 Atualização do *software* das centrais

Os produtos corporativos da Intelbras são reconhecidos no mercado por estarem em constante atualização, sendo essas, na maioria dos casos, disponíveis sem custos aos clientes, através de atualizações dos *softwares* dos equipamentos. Por tal motivo, as centrais “Modulare+” e “Conecta+” foram projetadas com uma interface USB *host*, através da qual um novo *software* pode ser copiado via *pendrive*.

Para tornar possível a atualização do *software* da central gravado no microcontrolador LPC1759, a sua memória de programa é dividida em duas áreas, de 32 e 480 Kb, como pode ser visto na Figura 5. Com isso, consegue-se

Figura 6 – Fluxograma do *boot loader* das centrais “Modulare+” e “Conecta+”.

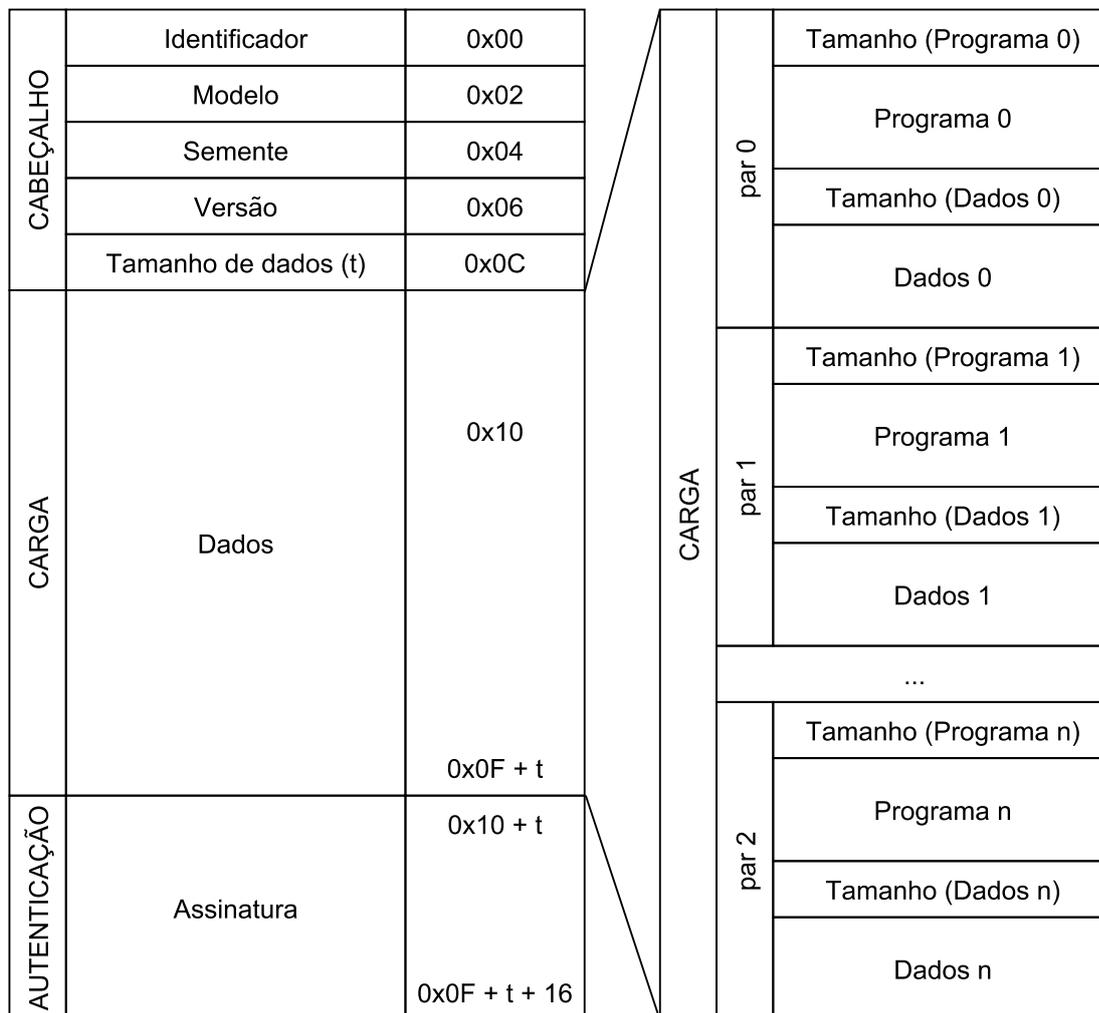


Fonte: Elaboração própria.

1.3 DISA das centrais “Modulare+” e “Conecta+”

Com a decisão de manter opcionais as funcionalidades da DISA para as novas centrais “Modulare+” e “Conecta+”, surgiu a necessidade de se desenvolver uma nova placa DISA. Além da compatibilidade, o novo acessório deveria contemplar novos requisitos de mercado, como capacidade de gravar mensagens de maior duração (30 s) e atender as quatro linhas simultaneamente. Para tal, foi projetada a arquitetura de *hardware* descrita através do diagrama da Figura 8. Nela, o mesmo modelo de microcontrolador utilizado na CPCT (LPC1759) foi selecionado para realizar o controle da operação da DISA, além das tarefas de processamento de áudio: gravação e reprodução de mensagens e detecção do sinal DTMF.

Figura 7 – Formato do arquivo de atualização de *software* das centrais “Modulare+” e “Conecta+”.

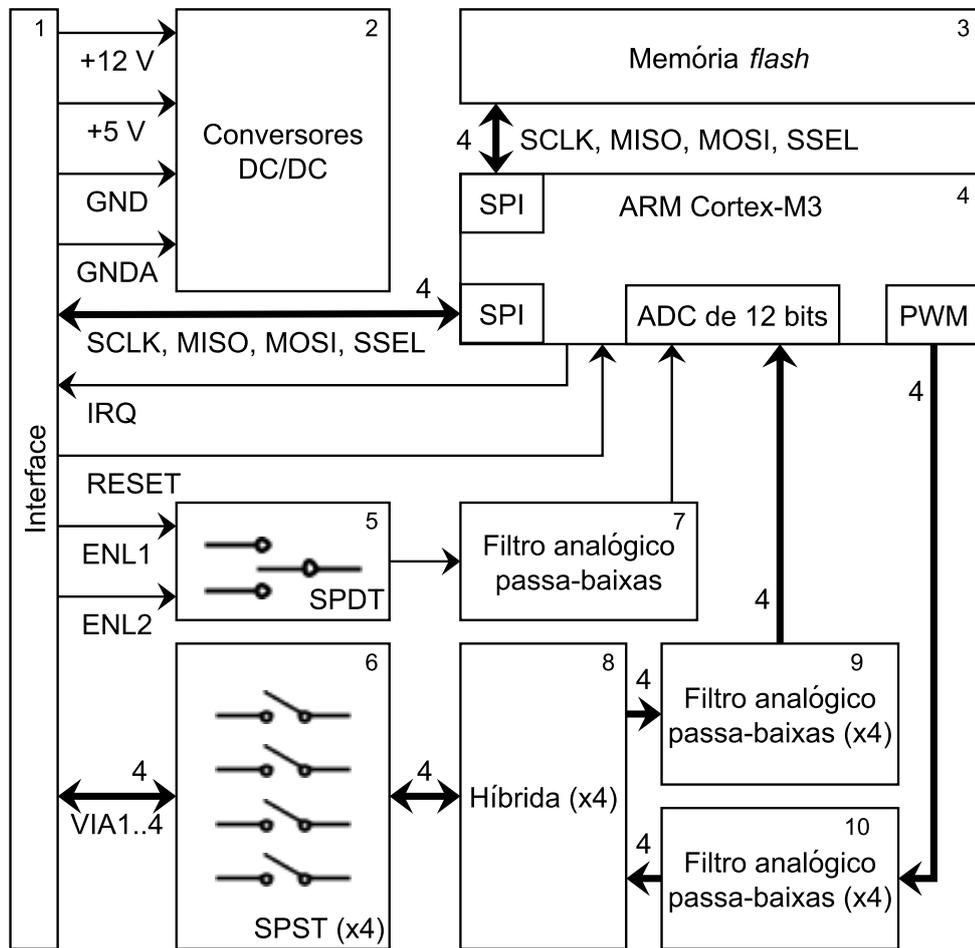


Fonte: Elaboração própria.

Foi também prevista na arquitetura uma memória não volátil do tipo *flash* (bloco 3 da Figura 8) para o armazenamento de mensagens, ligada diretamente ao microcontrolador através de um barramento serial do tipo *serial peripheral interface* (SPI) exclusivo para essa função. Outro barramento SPI do microcontrolador foi utilizado para a comunicação com a CPCT, utilizando o protocolo proprietário da central, capaz de receber a indicação de eventos dos acessórios através do sinal IRQ.

O microcontrolador utilizado possui um conversor de sinal analógico para digital (ADC, do inglês *analog-to-digital converter*) de aproximações sucessivas (SAR, do inglês *successive approximation register*) com seis entradas multiplexadas, das quais cinco são utilizadas neste trabalho: uma para

Figura 8 – Diagrama de blocos da DISA das centrais “Modulare+” e “Conecta+”.



Fonte: Elaboração própria.

a gravação de mensagens através de ramais da central e outras quatro para a detecção do sinal DTMF de cada uma das quatro linhas. Em todas essas entradas, foi utilizado um filtro analógico passa-baixas de segunda ordem como filtro anti-recobrimento, com frequência de corte de 3,7 kHz (blocos 7 e 9 da Figura 8).

Na entrada do ADC para a gravação de mensagens, houve ainda a necessidade de incluir um interruptor analógico de um polo e dois contatos (SPDT, do inglês *single pole, double throw*), representado pelo bloco 5, para seleccionar um dos dois possíveis pinos (ENL1 ou ENL2), através do qual a CPCT envia o sinal de áudio do ramal que está comandando uma gravação.

Para a reprodução de mensagens, quatro saídas do microcontrolador

foram utilizadas para implementar quatro conversores de sinal digital para analógico (DACs, do inglês *digital-to-analog converters*), através da técnica de modulação por largura de pulso (PWM, do inglês *pulse-width modulation*). Para eliminar a componente de alta frequência das saídas PWM, os sinais passam ainda por quatro filtros analógicos (bloco 10), com as mesmas características dos filtros anti-recobrimento de entrada.

Os sinais de entrada da detecção DTMF e os sinais de saída do PWM se encontram em um circuito de híbrida telefônica (bloco 8), cuja função é separar o sinal bidirecional vindo da linha telefônica em dois sinais unidirecionais: o sinal que vem do PWM e o que vai para o ADC.

Entre a híbrida e a linha (VIA1 a VIA4), existem quatro chaves analógicas de um polo e um contato (SPST, do inglês *single pole, single throw*), de modo que o circuito da DISA seja conectado na linha telefônica somente durante o atendimento automático (bloco 6). No restante do tempo, a DISA deve permanecer desconectada, pois a impedância adicionada por ela causaria uma atenuação dos sinais de voz durante a comunicação com um ramal.

1.4 Delimitação do problema

Para o desenvolvimento de um novo produto da Intelbras, é montado um time de projeto com representantes de diversas áreas, cada qual com uma responsabilidade específica. No caso da nova DISA, o Setor de Marketing de Produto gerou os requisitos, a Engenharia Eletrônica projetou os circuitos eletrônicos e o Setor de Layout de Placas gerou a placa de circuito impresso da DISA a partir dos esquemáticos dos circuitos eletrônicos desenvolvidos pela Engenharia. Nesse contexto, o escopo deste trabalho é o desenvolvimento do *software* embutido no microcontrolador que faz o controle do acessório DISA. Tal *software* deve controlar a plataforma descrita na Figura 8 de modo que o produto final cumpra os seguintes requisitos:

- a) compatibilidade com as centrais Modulare+ e Conecta+;
- b) capacidade de reprodução de mensagens de atendimento automático nas quatro linhas simultaneamente;
- c) capacidade de identificação da sinalização DTMF originada das quatro linhas simultaneamente;
- d) identificação do sinal DTMF durante ou após o término da reprodução de mensagens;
- e) identificação do sinal DTMF de acordo com as normas de telefonia nacionais;

- f) possibilidade de gravação de mensagens personalizadas através de um ramal da central;
- g) possibilidade de cópia de mensagens personalizadas através de um *pendrive* conectado na central;
- h) possuir, de fábrica, as mesmas mensagens pré-gravadas da DISA das centrais “Modulare i” e “Conecta”;
- i) possibilidade de gravação de até duas mensagens personalizadas, cada qual com duração máxima de 30 s, sem que as mensagens pré-gravadas sejam afetadas;
- j) possibilidade de atualização, através de um *pendrive* conectado na central, tanto das mensagens pré-gravadas quanto do *software* embutido na placa DISA.

1.5 Justificativa

Atualmente, o portfólio de produtos da Intelbras apresenta treze centrais privadas de comutação telefônica, todas com o recurso de reprodução de mensagens de atendimento automático, seja ele integrado na central ou disponibilizado na forma de um acessório. Em um levantamento realizado pela empresa em 2010, em que foram comparadas as centrais analógicas da Intelbras com as dos seus principais concorrentes, confirmou-se a tendência do mercado de prover esse recurso, independentemente da forma na qual ele seja disponibilizado.

Nas novas centrais “Modulare+” e “Conecta+”, optou-se por não oferecer essa funcionalidade como item de série, tendo como base o relatório de vendas de 2012, o qual revelou que nos modelos analógicos atuais apenas 15 % das centrais foram vendidas com a DISA, sendo que ela representa cerca de 27 % do custo do conjunto (DISA e central). Contudo, esse mesmo relatório mostra que a venda desse acessório representou 7 % do faturamento do segmento de centrais analógicas apenas de forma direta (venda da placa pela fábrica), além de ter sido responsável por, em média, 30 % da margem de lucro das revendas que, além da placa, disponibilizam um serviço de personalização e gravação de mensagens de atendimento automático.

Portanto, o desenvolvimento do acessório DISA é importante para o sucesso comercial dos novos modelos de centrais Intelbras, do ponto de vista do faturamento da empresa e de seus parceiros e também das necessidades dos clientes.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver o *software* do acessório DISA para as novas centrais privadas de comutação telefônica da Intelbras, “Modulare+” e “Conecta+”, de acordo com os requisitos listados na Seção 1.4.

1.6.2 Objetivos específicos

A fim de alcançar o objetivo geral deste trabalho, os seguintes objetivos específicos são identificados:

- a) desenvolver um sistema de arquivos para as mensagens de atendimento automático gravadas na memória da placa;
- b) projetar um filtro digital anti-recobrimento para os sinais amostrados;
- c) desenvolver um algoritmo para a identificação dos sinais DTMF vindos da linha telefônica;
- d) testar a detecção DTMF com relação às normas aplicáveis e ao seu desempenho na rejeição de falsos positivos.

1.7 Estrutura do documento

O restante deste trabalho é dividido da seguinte forma. No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica, buscando esclarecer dois temas associados a este trabalho: telecomunicações — explicando o que é uma CPCT e qual é a sua necessidade, além de apresentar a norma que regulamenta a sinalização DTMF no Brasil — e processamento digital de sinais — para apresentar os recursos utilizados para o condicionamento do sinal amostrado e para a detecção da sinalização DTMF. O desenvolvimento do trabalho é exposto no Capítulo 3. Na sequência, o Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos e o Capítulo 5 descreve as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Telecomunicações

O termo telecomunicações foi usado pela primeira vez na literatura em 1904 no livro *Traité pratique de télécommunication électrique (télégraphie-téléphonie)*, no qual o autor, então diretor da *École Supérieure des Postes et Télégraphes de France*, Edouard Estaunié, o associou à “troca de informações por meio de sinais elétricos” (HUURDEMAN, 2003, tradução do autor). Desde então, esse termo tem assumido diversas definições, buscando acompanhar as inovações tecnológicas na área. Atualmente, ele abrange qualquer “transmissão, emissão ou recepção de símbolos, sinais, escrituras, imagens e sons ou inteligência de qualquer natureza através de sistemas cabeados, de rádio, ópticos ou outros sistemas eletromagnéticos” (ITU, 1992, tradução do autor).

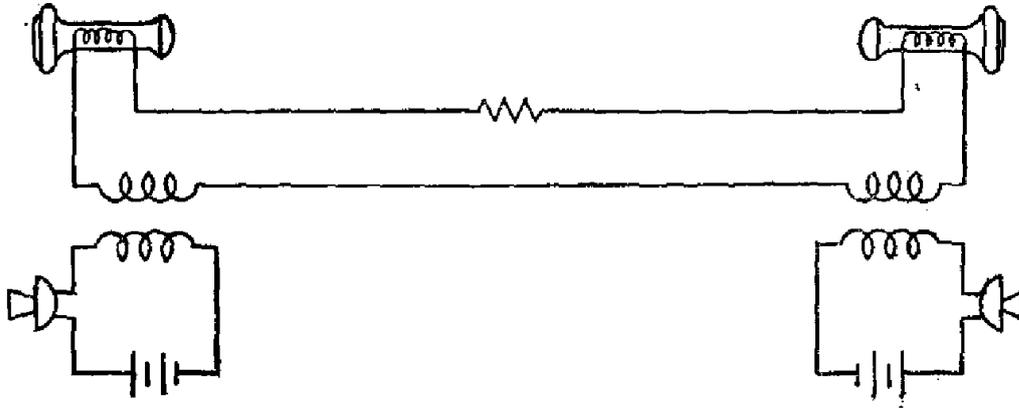
2.1.1 Telefonia

A telefonia é um ramo das telecomunicações que teve início no século XIX, fruto da contribuição de diversos inventos, culminando com a patente do telefone em 1876, atribuída ao escocês Alexander Graham Bell (MERCER, 2006). Em sua forma original, o telefone foi concebido para se comunicar apenas em pares (TELEPHONE; DEPT, 1961), com uma linha de transmissão exclusiva para interligar os dois pontos do circuito (Figura 9). Nesse esquema de ligação (Figura 10), o número de linhas de transmissão (L) necessárias para interligar uma rede com n assinantes é dado por

$$L = n(n - 1)/2. \quad (2.1)$$

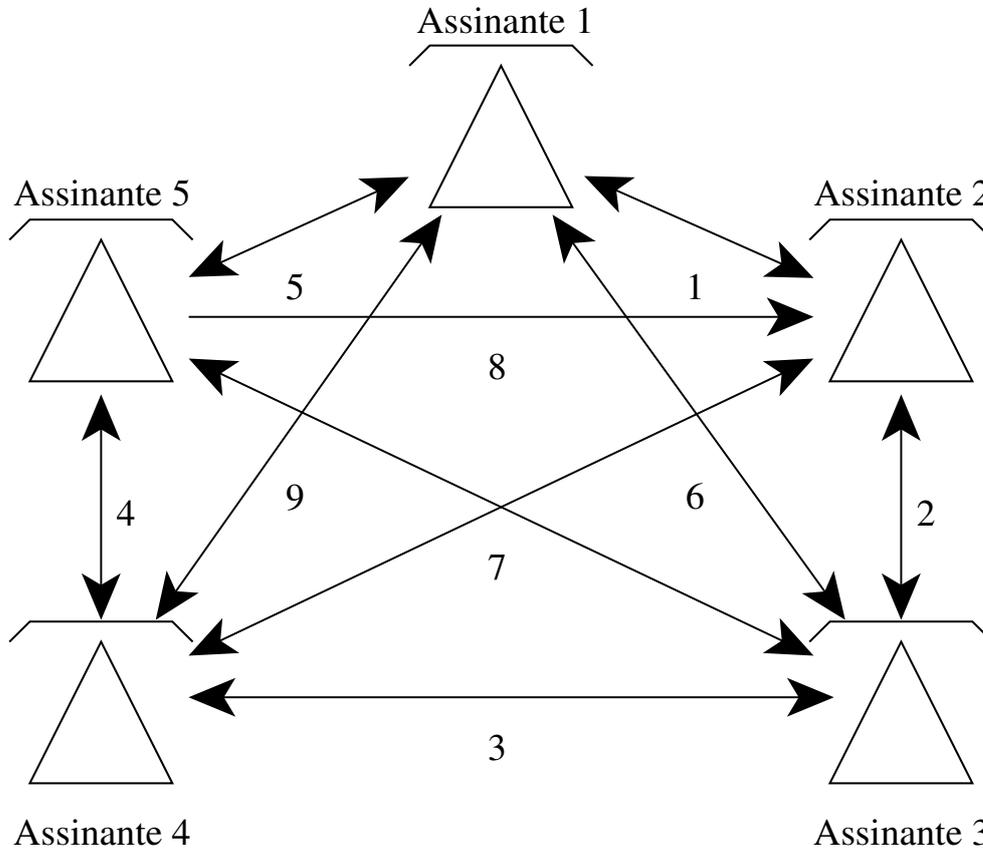
Como uma alternativa a tal modelo, foi idealizado um sistema centralizado em que cada assinante era conectado a um escritório central por uma linha de transmissão, através da qual um equipamento efetuava a interconexão entre eles (Figura 11). O primeiro desses escritórios, inaugurado em 1878 na cidade estadunidense de New Haven, Connecticut, realizava a comutação telefônica através de equipamentos operados manualmente, chamados “mesas telefônicas” (HUURDEMAN, 2003). Através desses aparelhos, os operadores, conhecidos como “telefonistas”, eram contactados por um assinante que quisesse iniciar uma ligação, o qual informava o destino desejado verbalmente. Após isso, o operador entrava em contato com o assinante de destino e, assim que este atendesse, o operador interligava os dois assinantes através de cabos inseridos em conectores de um painel.

Figura 9 – Esquemático de um circuito telefônico ponto-a-ponto.



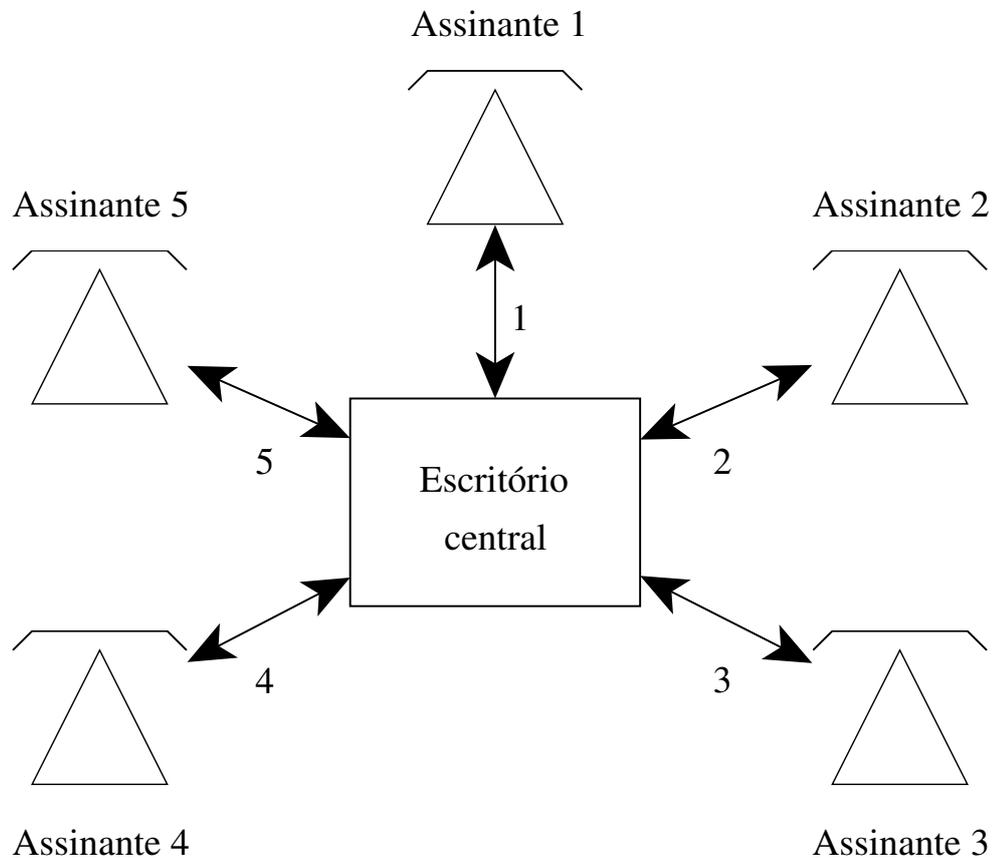
Fonte: Telephone e Dept (1961).

Figura 10 – Exemplo de diagrama de uma rede telefônica ponto-a-ponto com cinco assinantes.



Fonte: Adaptada de Chandrashekar (2008).

Figura 11 – Exemplo de diagrama de uma rede telefônica com cinco assinantes e um escritório central.



Fonte: Adaptada de Chandrashekar (2008).

Com o crescimento do número de assinantes, sistemas de comutação automáticos logo foram cogitados e diversas patentes foram registradas com tal objetivo. O primeiro sistema desse tipo a obter sucesso comercialmente foi o Seletor de Strowger, patenteado em 1889 por Almon Brown Strowger nos Estados Unidos da América (HURDEMAN, 2003). Nesse sistema, uma série de pulsos elétricos enviada pelos terminais telefônicos dos usuários acionava um sistema eletromecânico na central telefônica que, por sua vez, sinalizava o terminal de destino e fechava o circuito telefônico automaticamente.

Após a invenção do transistor em 1947, tornou-se possível o desenvolvimento de sistemas de comutação eletrônicos, considerados superiores aos eletromecânicos em aspectos como consumo energético, velocidade e manutenção (FAGEN et al., 1975). Dois sistemas desse tipo se destacaram: o de comutação espacial e o de comutação temporal. O primeiro, assim como os sistemas eletromecânicos, baseia-se na interligação do circuito de áudio através de um conjunto de chaves semicondutoras. No segundo, uma amostra

do sinal de cada assinante é inserida periodicamente em um barramento, cada qual em uma determinada parcela de tempo dentro desse período. Assim, a comutação pode ser determinada alterando-se o momento em que a amostra de um assinante é transferida para outro (CHAPUIS; JOEL, 2003).

2.1.2 Centrais privadas de comutação telefônica

Em 1880, a primeira central telefônica de uso particular foi instalada nos Estados Unidos da América, com uma linha tronco e sete extensões comutadas manualmente por uma operadora (HUURDEMAN, 2003). Assim como as públicas, as centrais privadas passaram pelos mesmos avanços tecnológicos, evoluindo desde as primeiras centrais comutadas manualmente (PBX, do inglês *private branch exchange*) até as centrais automáticas (PABX, do inglês *private automatic branch exchange*) eletromecânicas, eletrônicas de comutação espacial ou temporal e, recentemente, de comutação por pacote (VoIP, do inglês *voice over internet protocol*).

No Brasil, a Agência Nacional de Telecomunicações — Anatel, define uma central privada de comutação telefônica como “Estação comutadora para uso particular, interligada ou não através de linhas tronco a uma estação pública, que permite [sic] a seus ramais o acesso às redes de telecomunicações (interna e/ou externa), através de comutação automática ou manual. Trata-se de equipamento privado de comutação; o mesmo que CPCT.” (TELEBRAS, 1990).

A Anatel define, em sua Resolução 390, dois tipos de centrais telefônicas (ANATEL, 2004):

- a) CPCT CPA-E: CPCT com comutação analógica de circuitos (espacial);
- b) CPCT CPA-T: CPCT com comutação digital dos canais (temporal).

2.1.3 Sinalização de usuário para a central

Com a ausência de um operador humano, os sistemas de comutação automáticos necessitam de uma sinalização padronizada para que as centrais encaminhem a chamada para o destino correto. Para tal, cada assinante é associado a um número identificador. Assim, se o assinante *A* deseja realizar uma chamada para o assinante *B*, *A* deve informar à central o número de *B* antes de a chamada ser iniciada.

Dois sistemas de sinalização para telefonia fixa persistem até os dias atuais e são regulamentados no Brasil pela Anatel através da Resolução 473:

decádico e multifrequencial (ANATEL, 2007).

2.1.3.1 Sinalização decádica

Na sinalização decádica, também conhecida como sinalização por pulsos, o terminal conectado à central telefônica interrompe a circulação de corrente pelo circuito (gerando assim um pulso) por x vezes durante um curto período de tempo, sinalizando para a central o símbolo numérico x . Assim, um pulso representa o símbolo 1, dois pulsos representam o símbolo 2 e assim por diante, até que dez pulsos representam o símbolo 0. A Tabela 1 apresenta as especificações para esse pulso segundo a Resolução 473 da Anatel.

2.1.3.2 Sinalização multifrequencial

Na sinalização multifrequencial, também chamada DTMF, dezesseis pares de senóides são utilizados para representar os símbolos numéricos de 0 a 9 e outros seis símbolos especiais (#, *, A, B, C e D), conforme mostrado no Quadro 2.

Em Anatel (2007), são definidos os parâmetros do envio de um sinal DTMF por um terminal telefônico, listados na Tabela 2, além das seguintes características adicionais:

- a) atenuação do sinal de voz em, no mínimo, 40 dB durante o envio de um sinal DTMF;
- b) nível de potência total das componentes de frequência na faixa de 300 Hz a 3,4 kHz não presentes no sinal DTMF 20 dB abaixo do maior nível de potência dentre as frequências fundamentais do sinal DTMF enviado;
- c) nível de potência individual de qualquer frequência na faixa de 300 Hz a 3,4 kHz não presente no sinal DTMF não deve exceder -33 dBm, medida em uma largura de faixa de 100 Hz;
- d) um sinal DTMF com nível de potência entre -3 e -25 dBm deve ser corretamente identificado por um terminal, ao passo que sinais com potências abaixo de -50 dBm não devem ser validados;
- e) sinais DTMF cujas frequências estiverem deslocadas $\pm 3,5\%$ em relação às frequências nominais não devem ser validados.

Tabela 1 – Parâmetros da sinalização decádica.

Frequência	10 ± 1 pulsos por segundo
Razão nominal entre os tempos individuais de abertura e fechamento	2:1
Tempo individual de abertura (T_a)	$58 \text{ ms} \leq T_a \leq 77 \text{ ms}$
Tempo individual de fechamento (T_f)	$28 \text{ ms} \leq T_f \leq 40 \text{ ms}$
Pausa interdigital (P_i)	$700 \text{ ms} \leq P_i \leq 1.300 \text{ ms}$
Corrente durante a abertura do enlace	até 1 mA

Fonte: Anatel (2007).

Quadro 2 – Relação entre as frequências e os símbolos da sinalização DTMF.

	1.209 Hz	1.336 Hz	1.477 Hz	1.633 Hz
697 Hz	1	2	3	A
770 Hz	4	5	6	B
852 Hz	7	8	9	C
941 Hz	*	0	#	D

Fonte: Anatel (2007).

Tabela 2 – Parâmetros da sinalização DTMF, no sentido do usuário para a rede.

Tolerância das frequências		$\pm 1,5 \%$
Nível de potência das frequências	Grupo alto (acima de 1 kHz)	$-8 \text{ dBm} \pm 3 \text{ dB}$
	Grupo baixo (abaixo de 1 kHz)	$-10 \text{ dBm} \pm 3 \text{ dB}$
Duração do sinal		$\geq 50 \text{ ms}$
Duração da pausa		$\geq 50 \text{ ms}$
Velocidade de sinalização		$\geq 120 \text{ ms/dígito}$

Fonte: Anatel (2007).

2.2 Processamento digital de sinais

Em telecomunicações, assim como em diversas outras áreas de conhecimento, por vezes é necessário manipular um sinal para dele extrair ou inserir alguma informação relevante. Essa manipulação recebe o nome genérico de processamento de sinais. Se o sinal de interesse estiver digitalizado¹, esse condicionamento é chamado processamento digital de sinais.

Graças à evolução da microeletrônica, o processamento digital de sinais superou o processamento analógico em confiabilidade e custo, tornando-se atraente mesmo quando o sinal que se deseja processar não é, originalmente, digital (DINIZ; SILVA; NETTO, 2004).

2.2.1 Teorema da amostragem

Quando a transformada de Fourier $X(j\Omega)$ de um sinal analógico $x(t)$ possui banda limitada em Ω_c , em rad/s, isso é,

$$X(j\Omega) = 0, \quad |\Omega| \geq \Omega_c \quad (2.2)$$

é possível representá-lo, sem perda de informação, através de (2.3) pelo processo de amostragem, onde T representa o período de amostragem em segundos (OPPENHEIM; SCHAFER, 2012).

$$x[n] = x(nT), \quad -\infty < n < \infty \quad (2.3)$$

Segundo o teorema de Nyquist-Shannon, para que seja possível recuperar o sinal original $x(t)$ a partir do sinal discreto $x[n]$, o inverso de T , chamado frequência de amostragem ($f_s = 1/T$), em hertz, deve ser tal que

$$f_s = \frac{\Omega_s}{2\pi} \quad (2.4)$$

com

$$\Omega_s \geq 2\Omega_c \quad (2.5)$$

em rad/s.

2.2.2 Filtro anti-recobrimento

Se o sinal que se deseja amostrar não respeita o critério dado por (2.2), deve-se, antes da operação de amostragem, processá-lo através de um filtro

¹ Sinais digitais são aqueles nos quais a variável independente é discreta e a dependente assume apenas valores quantizados (OPPENHEIM; SCHAFER, 2012).

passa-baixas anti-recobrimento que elimine as componentes cujas frequências são maiores que $f_s/2$ (frequência de Nyquist), sob pena de ocorrer o fenômeno de recobrimento (OPPENHEIM; SCHAFER, 2012).

Na prática, filtros de corte abrupto, como os necessários para eliminar completamente o recobrimento, não são implementáveis. Buscam-se então filtros com bandas de transição estreitas o suficiente para que apenas uma parcela do espectro do sinal acima da frequência de Nyquist seja amostrada, causando assim um recobrimento que possa ser considerado desprezível para a aplicação. Técnicas para a determinação desses filtros são apresentadas em Oppenheim e Schaffer (2012).

2.2.3 Sobreamostragem

Quando se processa um sinal digitalmente, na maioria das vezes é de interesse que a frequência de amostragem seja a menor possível, resultando em um reduzido número de amostras a serem processadas, diminuindo assim o custo de processamento. Porém, à medida que a frequência de amostragem se aproxima da frequência de Nyquist, a largura da banda de transição necessária para o filtro anti-recobrimento se torna cada vez menor, com isso elevando a ordem de tal filtro.

Filtros analógicos de ordem elevada têm custo de implementação maior do que filtros digitais com as mesmas características (OPPENHEIM; SCHAFER, 2012). Porém, uma vez amostrado, o efeito do recobrimento torna-se parte integrante do sinal, tornando inútil a tentativa de utilizar um filtro digital para esse fim.

Uma forma de reduzir a complexidade do filtro anti-recobrimento analógico e ainda assim obter um sinal amostrado com frequência próxima à frequência de Nyquist é utilizar a estratégia da sobreamostragem (OPPENHEIM; SCHAFER, 2012). Com isso, simplifica-se o filtro analógico através do aumento da frequência de amostragem por um fator M , tal que $f_M = M f_s$, uma vez que a largura necessária para a sua banda de transição torna-se maior. Com o sinal já amostrado, um filtro digital com corte mais abrupto em $f_s/2$ pode ser aplicado, seguido de uma subamostragem através de um processo de dizimação pelo mesmo fator M (OPPENHEIM; SCHAFER, 2012).

2.2.4 Análise de sinais discretos no domínio da frequência

Através da análise de um sinal no domínio da frequência, consegue-se determinar, por exemplo, quais são as suas componentes de frequência e a relação entre a intensidade de cada uma delas. A seguir, apresentam-se algumas técnicas usadas para tal fim consagradas na literatura.

2.2.4.1 Transformada de Fourier discreta

Através da série de Fourier, qualquer sinal periódico, com frequência fundamental Ω_0 , em rad/s, pode ser descrito como uma composição de exponenciais complexas cujas frequências são múltiplas da frequência fundamental Ω_0 , na forma apresentada em (2.6) (PROAKIS, 1996).

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} c_k e^{jk\Omega_0 t} \quad (2.6)$$

Para sinais aperiódicos, pode-se considerar o uso de (2.6) com um período $T = 1/F_0$ tendendo ao infinito, resultando em (2.7) (TANEJA, 2007). A função $X(j\Omega)$, descrita em (2.8), é chamada de transformada de Fourier de $x(t)$, ao passo que (2.7) é denominada transformada inversa de Fourier.

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(j\Omega) e^{j\Omega t} d\Omega \quad (2.7)$$

$$X(j\Omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\Omega t} dt \quad (2.8)$$

Considere agora um sinal discreto $x[n]$ absolutamente somável ou com energia finita. Nesse caso, pode-se representá-lo no domínio da frequência através da transformada de Fourier de tempo discreto (TFTD), definida por:

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n] e^{-j\omega n}. \quad (2.9)$$

Contudo, $X(e^{j\omega})$ é uma função contínua e, portanto, não é facilmente representável computacionalmente (PROAKIS, 1996). Para suplantarmos tal dificuldade, pode-se utilizar a transformada de Fourier discreta (TFD), que é uma amostragem da TFTD em N pontos equidistantes sobre o círculo de raio unitário. As equações (2.10) e (2.11) representam as expressões de análise e síntese, respectivamente, da TFD, onde $W_n = e^{-j2\pi/N}$.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] W_n^{kn} \quad (2.10)$$

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] W_n^{-kn} \quad (2.11)$$

Uma exigência para a validade da TFD é que $x[n]$ seja uma sequência periódica, com período N . Contudo, ainda é possível analisar um sinal aperiódico no domínio da frequência pela TFD se este tiver energia finita. Além disso, se o sinal $x[n]$ for aperiódico e com energia infinita, pode-se analisá-lo através de um processo de janelamento (PROAKIS, 1996).

2.2.4.2 Algoritmo de Goertzel

Diversos algoritmos foram criados para implementar a expressão da TFD dada por (2.10) de uma forma eficiente computacionalmente. A aplicação direta de (2.10) resulta em um algoritmo com complexidade $O(N^2)$. Já as formas simplificadas, chamadas de FFT (do inglês *fast Fourier transform*), apresentam menor complexidade, dada por $O(N \log_2 N)$ (OPPENHEIM; SCHAFER, 2012).

Quando se deseja analisar o espectro do sinal discreto $x[n]$ em apenas um pequeno número de frequências, e não nas N frequências da TFD, o algoritmo de Goertzel (GOERTZEL, 1958) deve ser avaliado. Considerado como uma simplificação da TFD baseada na periodicidade de W_N^{kn} , o valor da transformada para o k -ésimo coeficiente da TFD é dado por

$$X[k] = y_k[n]|_{n=N} \quad (2.12)$$

e

$$H_k(z) = \frac{y_k(z)}{x_k(z)} = \frac{1 - W_N^k z^{-1}}{1 - 2 \cos(2\pi k/N) z^{-1} + z^{-2}} \quad (2.13)$$

que implementado na forma direta II resulta em (2.14) e (2.15), apresentando uma complexidade $O(NM)$ para M frequências desejadas (OPPENHEIM; SCHAFER, 2012).

$$v_k[n] = 2 \cos(2\pi k/N) v_k[n-1] - v_k[n-2] + x[n] \quad (2.14)$$

$$X[k] = y_k[n]|_{n=N} = v_k[N] - W_N^k v_k[N-1] \quad (2.15)$$

Portanto, comparando com a complexidade da FFT, $O(N \log_2 N)$, o algoritmo de Goertzel resulta em um menor esforço computacional quando $M < \log_2 N$ (OPPENHEIM; SCHAFER, 2012).

3 DESENVOLVIMENTO

O processo de desenvolvimento de um novo produto da Intelbras segue um fluxo padronizado de atividades. Através da análise dos requisitos e das viabilidades técnica e financeira, o projeto é julgado por um comitê. Se aprovado, iniciam-se os trabalhos de especificação de *hardware* e *software* do produto. Finalizada essa etapa, os blocos identificados são implementados e validados em conjunto com o *hardware* desenvolvido. Conforme explanado na Seção 1.4, as etapas anteriores à especificação e ao desenvolvimento do *software* da DISA não fazem parte do escopo deste trabalho.

3.1 Especificação

Para especificar o *software* a ser desenvolvido, primeiramente são determinados os casos de uso. Em seguida, o processo de desenvolvimento é dividido em etapas, cujo conjunto representa a arquitetura necessária para o *software*.

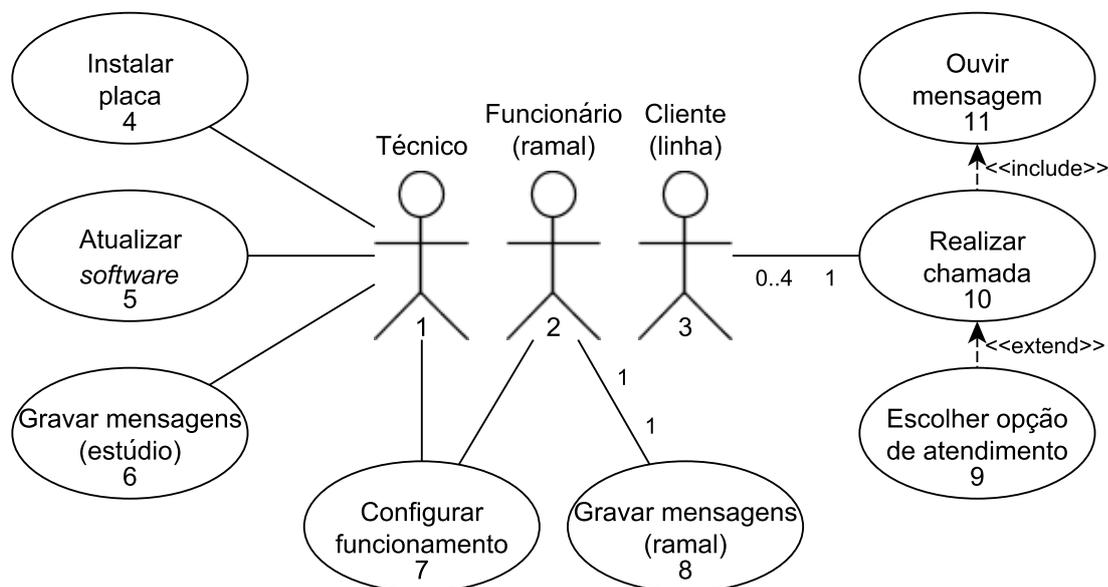
3.1.1 Casos de uso

A Figura 12 ilustra o diagrama de casos de uso da DISA. Nele, as figuras nomeadas Técnico (símbolo 1), Funcionário (símbolo 2) e Cliente (símbolo 3) são os atores dos casos de uso, ou seja, representam os diferentes papéis que uma pessoa ou entidade externa pode desempenhar no sistema. Os atores Funcionário e Cliente são escolhidos para representar o cenário mais comum de utilização do acessório — uma empresa que oferece serviços a clientes. Por fim, as elipses representam metas a serem alcançadas pelos atores (casos de uso).

O ator Técnico representa o profissional do ramo de telecomunicações que instala (caso 4) e configura (caso 7) a DISA na central telefônica do usuário. Ele também é responsável por realizar o procedimento de atualização do *software* do acessório, caso necessário. Além disso, se o cliente desejar uma mensagem de atendimento personalizada e de alta qualidade (gravada em estúdio), o Técnico efetua a transferência do arquivo de áudio para a DISA (caso 6).

Um colaborador da empresa onde a DISA esteja instalada, com acesso físico aos ramais da CPCT, pode desempenhar o papel de Funcionário. As ações que esse ator pode realizar no sistema são representadas pelos ca-

Figura 12 – Diagrama de casos de uso da DISA.



Fonte: Elaboração própria.

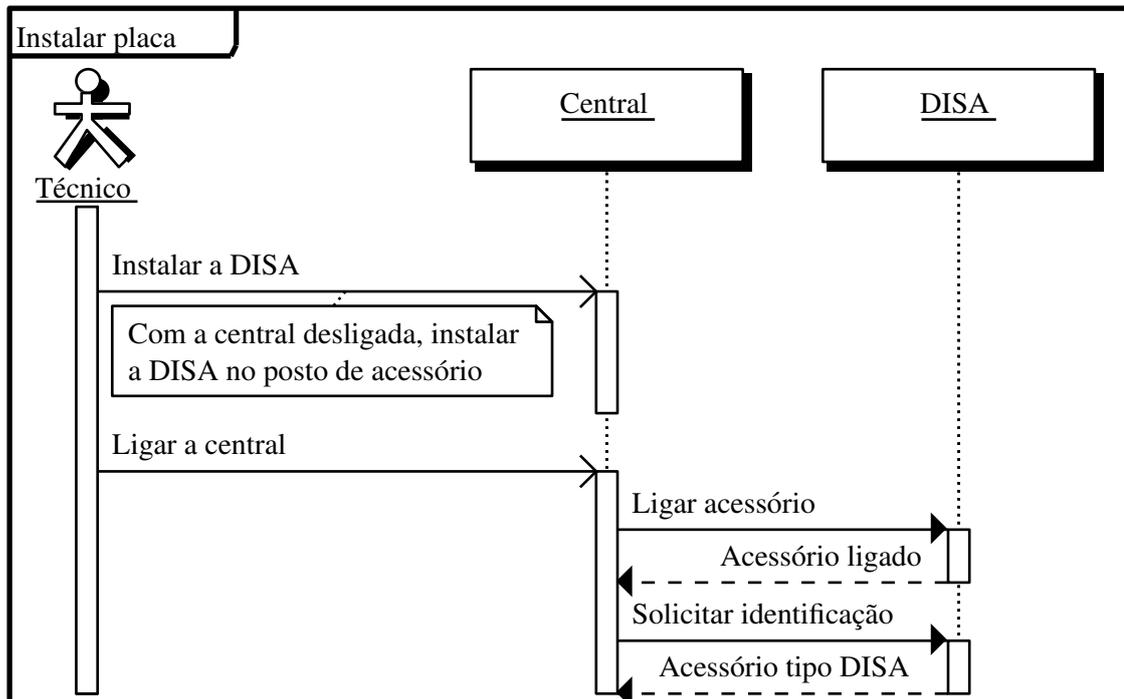
sos de uso 7 e 8. Assim como o Técnico, ele pode ter interesse em realizar configurações do acessório (caso 7), tal como ativar ou desativar uma mensagem durante o horário de expediente. Também é possível que ele queira gravar uma mensagem personalizada (caso 8) através de um ramal da central, para situações em que contratar um serviço de gravação profissional não seja prático ou necessário.

Já o ator Cliente representa alguém externo à empresa, cujo único interesse seja estabelecer uma comunicação (caso 10) com algum funcionário através da linha telefônica. Para tal, ele deve ouvir a mensagem de atendimento automático (caso 11), que o orienta a fazer uma escolha de atendimento (caso 9) ou aguardar o atendimento padrão por uma telefonista.

3.1.1.1 Instalar placa

Esse caso de uso representa o primeiro objetivo do ator Técnico, que é preparar a DISA para o uso em uma central. Na Figura 13, é ilustrado um diagrama de sequência dessa operação, de onde se verifica que o Técnico deve apenas executar duas ações simples: instalar fisicamente a placa na central e depois ligá-la. O processo de reconhecimento e configuração inicial é realizado automaticamente pela central e pela DISA.

Figura 13 – Diagrama de sequência do caso de uso “Instalar placa”.

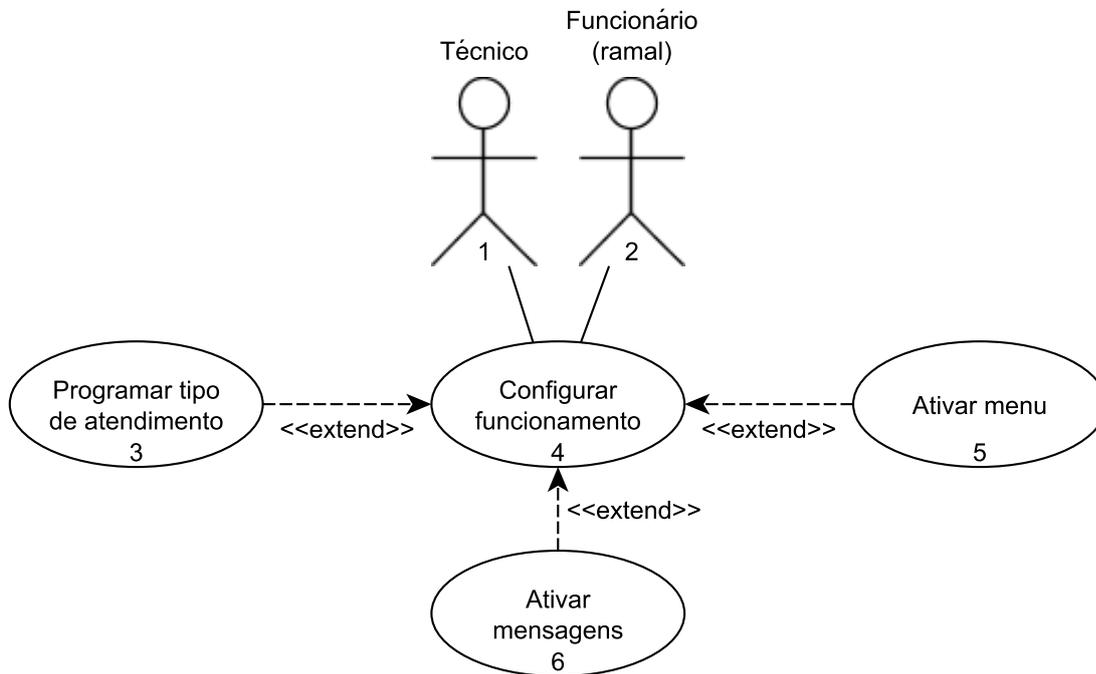


Fonte: Elaboração própria.

3.1.1.2 Configurar funcionamento

Algumas opções de funcionamento da DISA são dependentes do cenário de utilização e, portanto, não podem ser automáticas. Tais opções podem ser configuradas após a instalação pelo Técnico ou alteradas pelo Funcionário de acordo com mudanças no cenário, como, por exemplo, a ativação de uma mensagem indicando férias coletivas. Esse caso de uso é detalhado na Figura 14, na qual o caso de uso “Configurar funcionamento” é dividido em outros três, cada um representando um dos possíveis tipos de configuração. Em “Programar tipo de atendimento”, é determinado o comportamento da central quando o Cliente escolhe uma opção inválida: a central pode encaminhar a ligação para um ramal padrão (telefonista) ou derrubar a ligação. Em “Ativar mensagens”, escolhe-se a mensagem de saudação a ser reproduzida no momento em que a central atender a ligação. Já em “Ativar menu”, controlam-se quais opções numéricas são dadas ao Cliente: com o menu ativado, além da numeração dos ramais, ele pode escolher as opções 4, 5, 6 e 7 para chamar os grupos de ramais 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

Figura 14 – Detalhamento do caso de uso “Configurar funcionamento”.



Fonte: Elaboração própria.

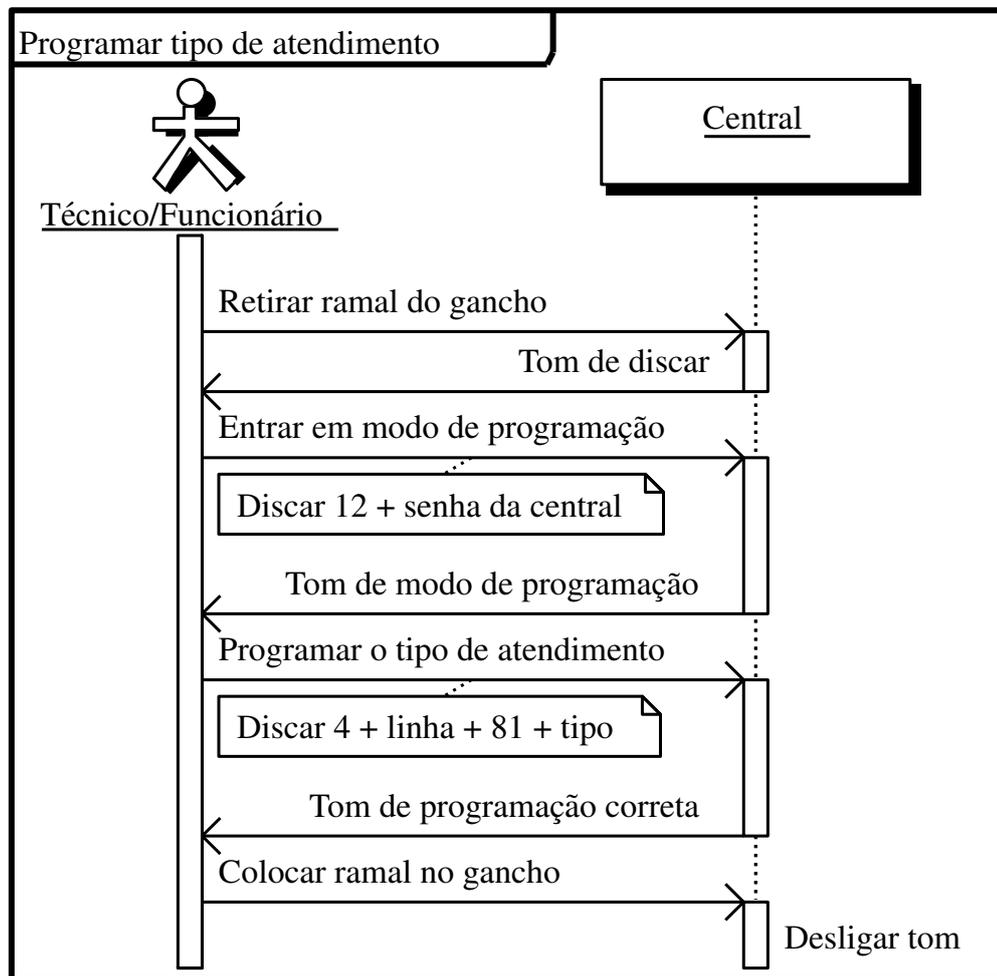
A Figura 15 mostra o diagrama de sequência para o caso “Programar tipo de atendimento”, ao passo que a Figura 16 ilustra o caso “Ativar mensagens”, que é idêntico ao diagrama do caso “Ativar menu”, exceto pelo código de programação. É importante notar que nesses três casos apenas o ator e a central participam do processo ao passo que a DISA permanece ociosa, indicando que as suas implementações devem ser feitas no *software* da central.

3.1.1.3 Atualizar *software*

Conforme explicitado na Subseção 1.2.1, a Intelbras costuma implementar novas funções durante a vida útil dos seus produtos corporativos, permitindo que proprietários de equipamentos antigos se beneficiem das novidades através de atualizações nos *softwares* dos seus equipamentos. Além disso, aquela subseção também descreveu o funcionamento do sistema de atualização das centrais “Modulare+” e “Conecta+”, demonstrando a necessidade de se implementar um *software* específico para a atualização de cada acessório da central.

Como o mesmo modelo de microcontrolador é utilizado na central e na DISA, também é necessário separar a memória de programa da DISA

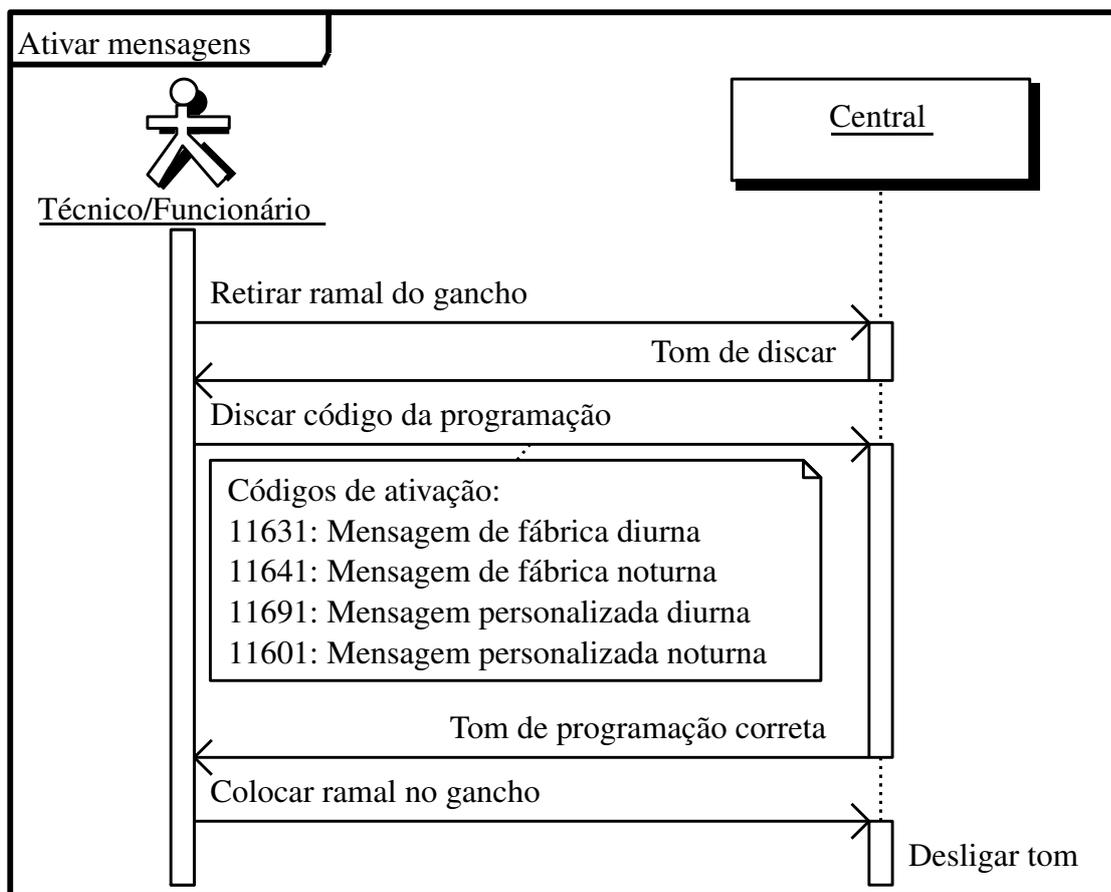
Figura 15 – Diagrama de sequência do caso de uso “Programar tipo de funcionamento”.



Fonte: Elaboração própria.

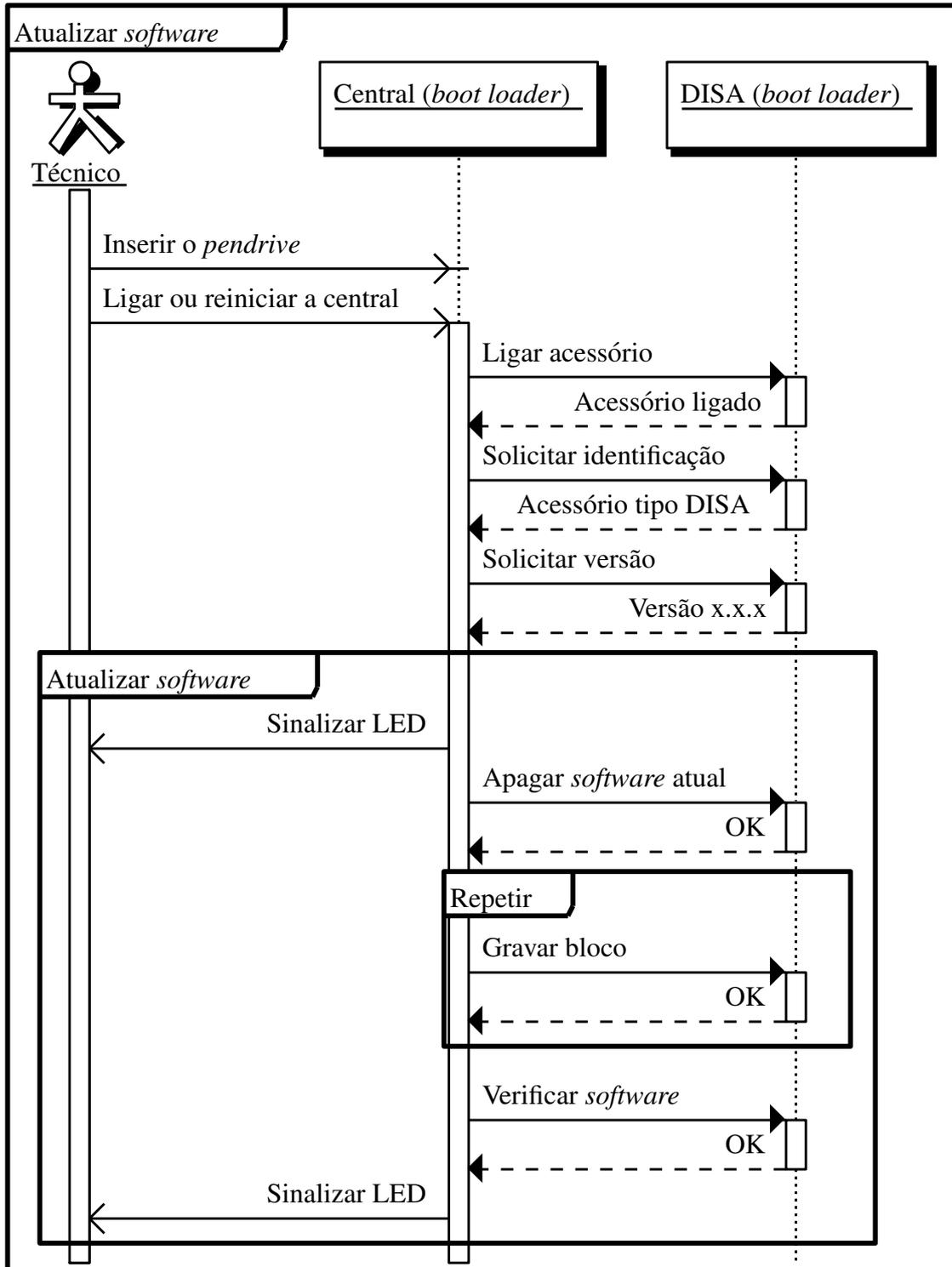
em duas áreas, tal como mostrado na Figura 5. A diferença é que, no caso da DISA, o *boot loader* é mais simples, pois é necessário apenas atualizar a aplicação através da interface de comunicação com a central (barramento SPI). Com isso, demonstra-se a necessidade de desenvolvimento de dois *softwares* para implementar o caso de uso “Atualizar *software*”: um deles incluído no arquivo de atualização da central e executado pelo seu *boot loader* e o outro o próprio *boot loader* da DISA. A interação entre esses dois *softwares* e o ator desse caso de uso é mostrada na Figura 17.

Figura 16 – Diagrama de sequência do caso de uso “Ativar mensagens”.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 17 – Diagrama de sequência do caso de uso “Atualizar software”.



Fonte: Elaboração própria.

3.1.1.4 Gravar mensagens (estúdio)

Quando o proprietário da central telefônica desejar uma mensagem de atendimento personalizada, com o nome da sua empresa, por exemplo, existe a possibilidade de gravação de até duas mensagens com duração máxima de 30 s cada. A transferência de tais mensagens é feita através da interface USB *host* da central, sem a necessidade de uma ferramenta de gravação especializada — na DISA das centrais “Modulare i” e “Conecta”, essa transferência era possível apenas em assistências técnicas especializadas chamadas de Laboratórios Avançados Intelbras (LAI) através de ferramentas de gravação do CI ISD1760.

O procedimento para transferir essas mensagens para a placa DISA é mostrado na Figura 18. Como é utilizada a interface USB *host* da central, controlável apenas pelo *boot loader*, um programa para transferência das mensagens deve ser incluído no arquivo lido por ele (Subseção 1.2.1). Esse programa, diferentemente do programa para atualização de *software* da DISA, deve solicitar ao *boot loader* do acessório a inicialização do *software* de aplicação, pois, com o objetivo de manter o *boot loader* com tamanho otimizado, somente o *software* aplicação implementa o acesso à memória *flash* na qual as mensagens são armazenadas.

3.1.1.5 Gravar mensagens (ramal)

Há casos em que se deseja uma mensagem de atendimento provisória, como, por exemplo, para informar um período de férias coletivas, em que não há tempo ou interesse em elaborar uma mensagem em estúdio e/ou com locutores profissionais. Para tais situações, existe a possibilidade de gravação de uma mensagem através de um ramal da central.

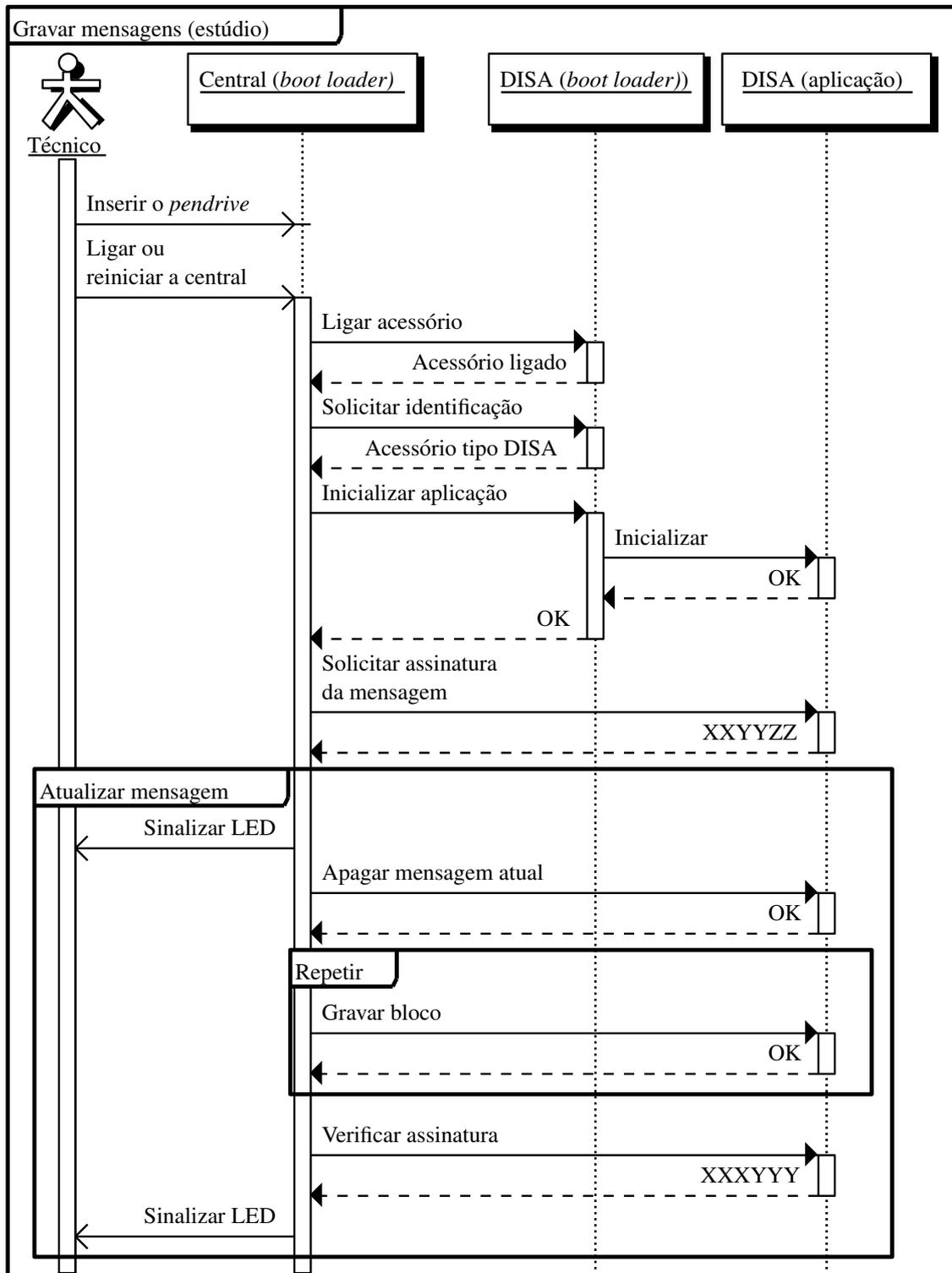
A Figura 19 mostra o diagrama de sequência desse caso de uso em um cenário no qual a duração da mensagem é inferior à capacidade máxima da DISA (30 s). No cenário em que o ramal não é desligado antes desse tempo, a DISA envia uma mensagem à central indicando que o espaço reservado para a mensagem se esgotou e, em seguida, a central sinaliza tal condição enviando um tom de ocupado para o ramal.

3.1.1.6 Realizar chamada

A principal função da DISA, que é reproduzir mensagens após o atendimento de uma linha pela central, é descrita nesse caso de uso e o seu cenário principal é ilustrado no diagrama de sequência da Figura 20.

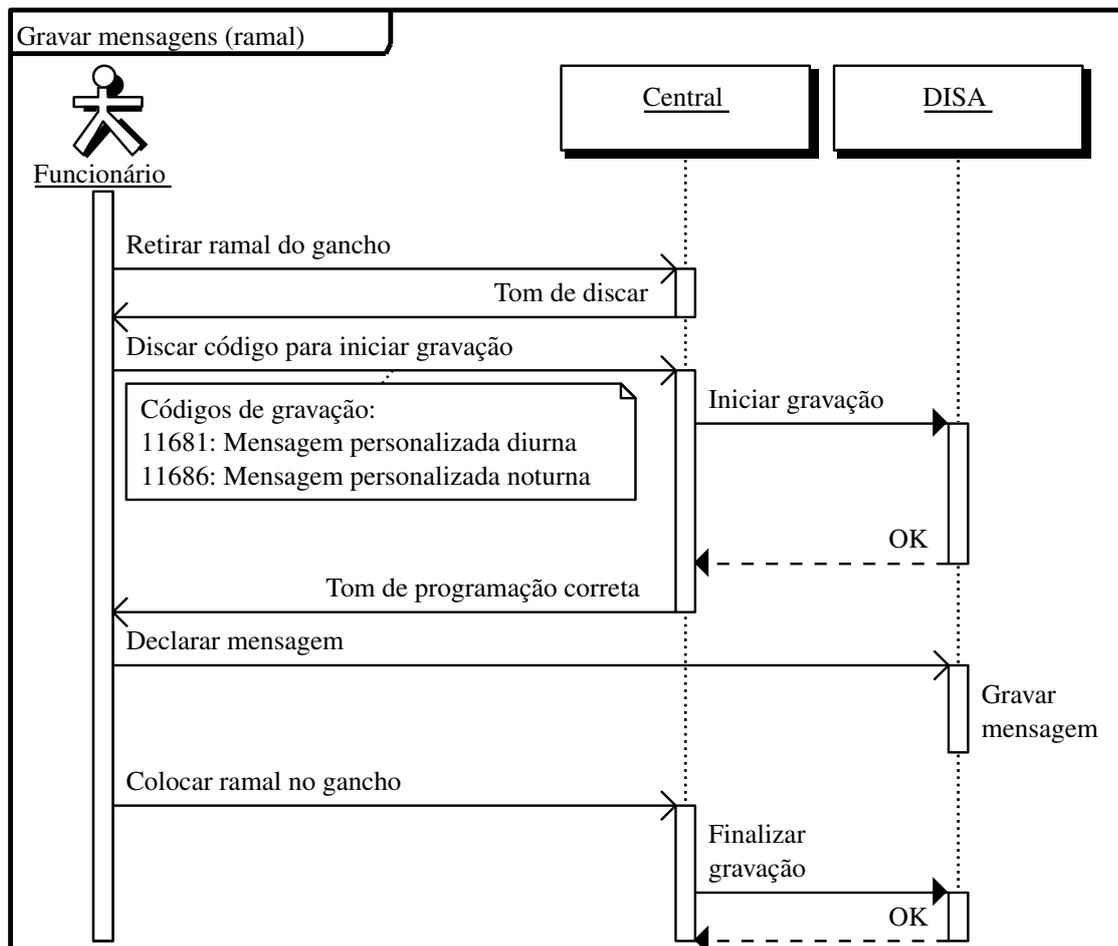
Quando uma linha telefônica da CPCT programada com atendimento automático recebe a sinalização de chamada de uma central pública, a cen-

Figura 18 – Diagrama de sequência do caso de uso “Gravar mensagens (estúdio)”.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 19 – Diagrama de sequência do caso de uso “Gravar mensagens (ramal)”.

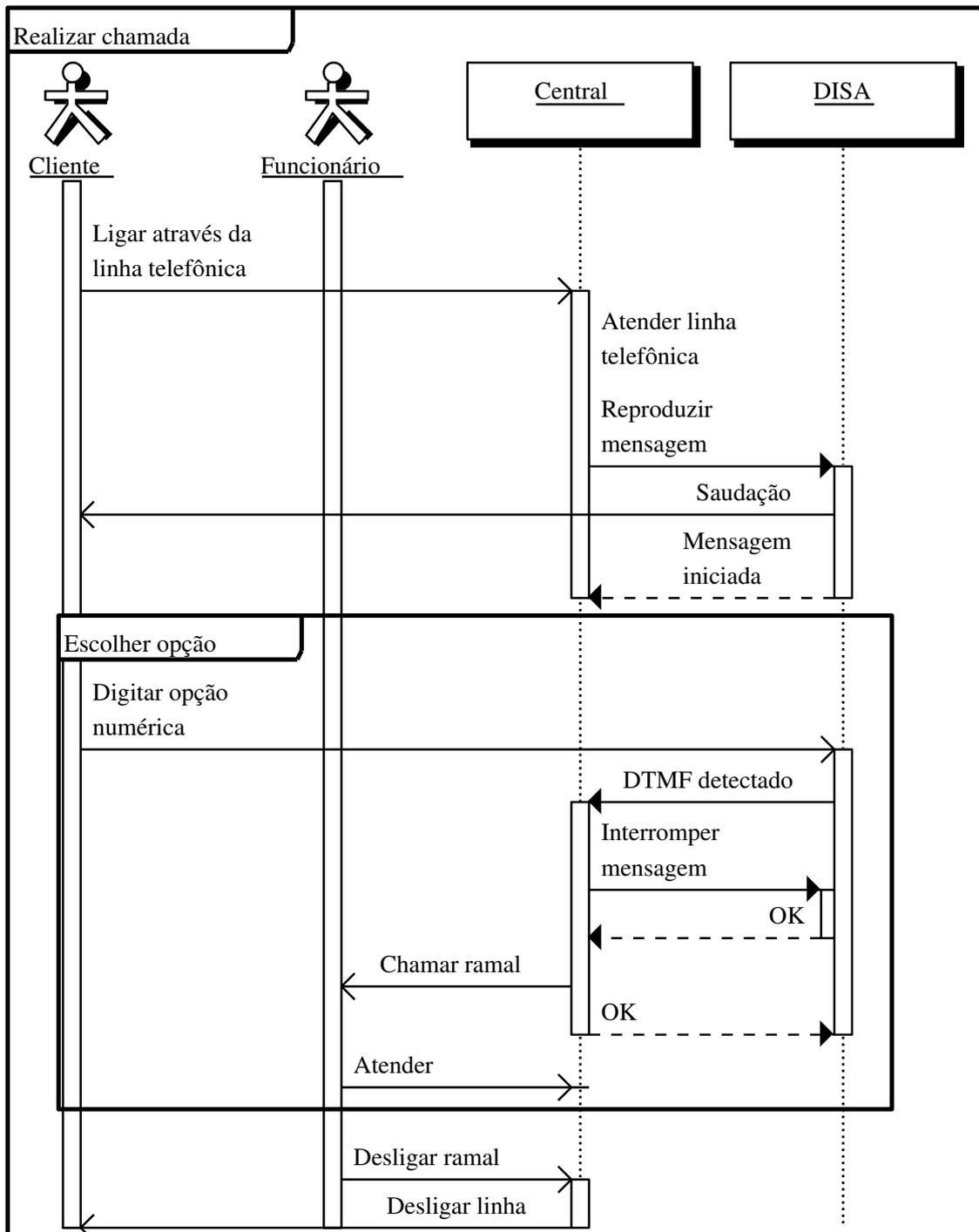


Fonte: Elaboração própria.

tral privada sinaliza o atendimento à central pública através do fechamento do circuito telefônico. Em seguida, conforme a programação de ativação de mensagens (Figura 16, Subseção 3.1.1.2), a central privada envia para a DISA uma mensagem solicitando o início da reprodução da mensagem de atendimento automático programada. Nesse momento, a DISA também deve iniciar o monitoramento do áudio da linha telefônica para verificar a marcação de um número pelo Cliente via sinalização DTMF.

Se durante ou após a reprodução da mensagem a DISA identificar um sinal DTMF, este deve ser informado para a central, que imediatamente solicita a interrupção da mensagem. Após a análise deste e de outros dígitos enviados pelo Cliente, a central estabelece uma chamada com o ramal solicitado.

Figura 20 – Diagrama de sequência do caso de uso “Realizar chamada”.



Fonte: Elaboração própria.

3.1.2 Diagramas de blocos

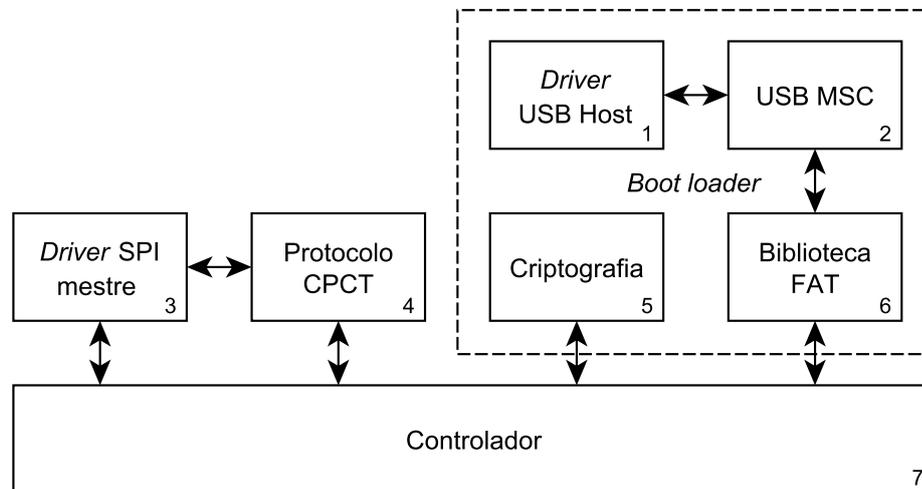
A análise anterior revela a necessidade de quatro *softwares* distintos. O principal deles é chamado Aplicação (da DISA) e implementa os casos de uso “Realizar chamada”, “Instalar placa”, “Gravar mensagens (ramal)” e parte de “Gravar mensagens (estúdio)”. Outro *software* é chamado *boot loader* (da DISA) e divide a tarefa de “Atualizar *software*” (“Aplicação”, no caso) com o terceiro *software*, o “Atualizador da DISA”. O último, “Atualizador de mensagens”, divide com a Aplicação a responsabilidade pelo caso de uso “Gravar mensagens (estúdio)”. Os dois primeiros *softwares* são gravados no microcontrolador do acessório, ao passo que os demais devem ser executados pelo *boot loader* da central e por isso precisam estar embutidos em arquivos de atualização.

A Figura 21 mostra um diagrama de blocos identificando os principais componentes dos *softwares* “Atualizador da DISA” e “Atualizador de mensagens”. Os blocos 1, 2, 5 e 6, representados dentro do retângulo tracejado, são utilizados pelos programas, mas são acessados diretamente do *boot loader* da central, e servem para realizar a leitura dos dados gravados no *pendrive*. O bloco 3 representa a implementação do controle da interface SPI do microcontrolador como mestre do barramento e é utilizado através de um protocolo proprietário — implementado no bloco 4 — para comunicação com a placa DISA. O bloco 7 representa o controlador que coordena as atividades dos *softwares*.

Os componentes do *boot loader* são representados na Figura 22, de onde se verifica que a interface do *boot loader* com o “Atualizador da DISA” também utiliza o protocolo CPCT (bloco 2), mas desse lado com a SPI no modo escravo (bloco 1). Através do *driver in-application programming* (IAP) — bloco 3 — os dados recebidos do “Atualizador da DISA” são gravados na memória *flash* do microcontrolador. A coordenação dessas atividades fica a cargo do controlador (bloco 4).

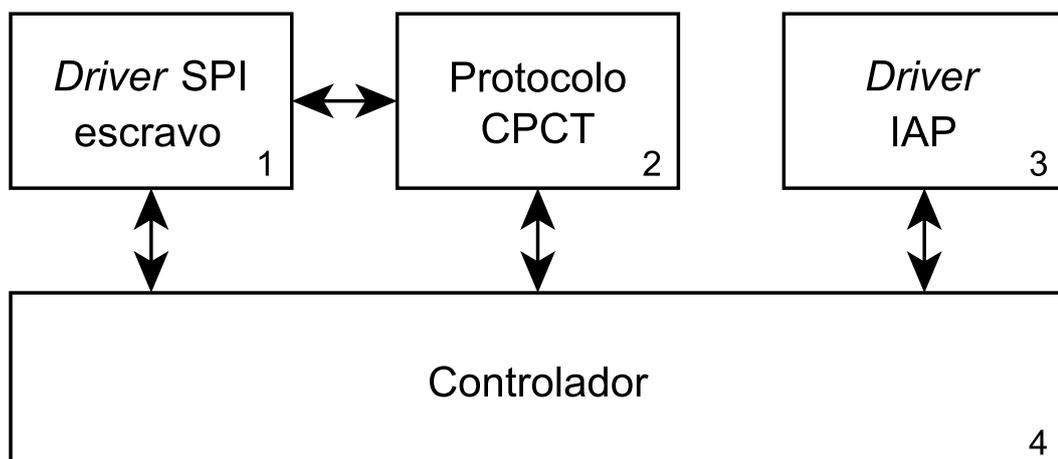
Na Figura 23 é mostrado o diagrama de blocos da Aplicação. Novamente há um bloco chamado Controlador (bloco 12), que realiza a coordenação entre os blocos 7 a 11. Os blocos 8, 9 e 10 representam as principais atividades que o *software* deve realizar e fazem a interface com sinais analógicos através do ADC e do DAC, controlados pelos blocos 4 e 5, respectivamente. Tais *drivers* utilizam um controlador de acesso direto à memória (DMA, do inglês *direct memory access*) para otimizar os seus desempenhos (bloco 1). O bloco 11 representa o sistema de arquivos que organiza os dados armazenados pela DISA (mensagens) na memória *flash*. O acesso a tal memória é controlado pelo *driver flash* (bloco 6) e realizado através da interface SPI (bloco 2). Finalmente, o bloco 7 simboliza a comunicação do acessório com a CPCT, através

Figura 21 – Diagrama de blocos dos programas para atualização de *software* e transferência de mensagens de atendimento automático, executados através do *boot loader* da central.



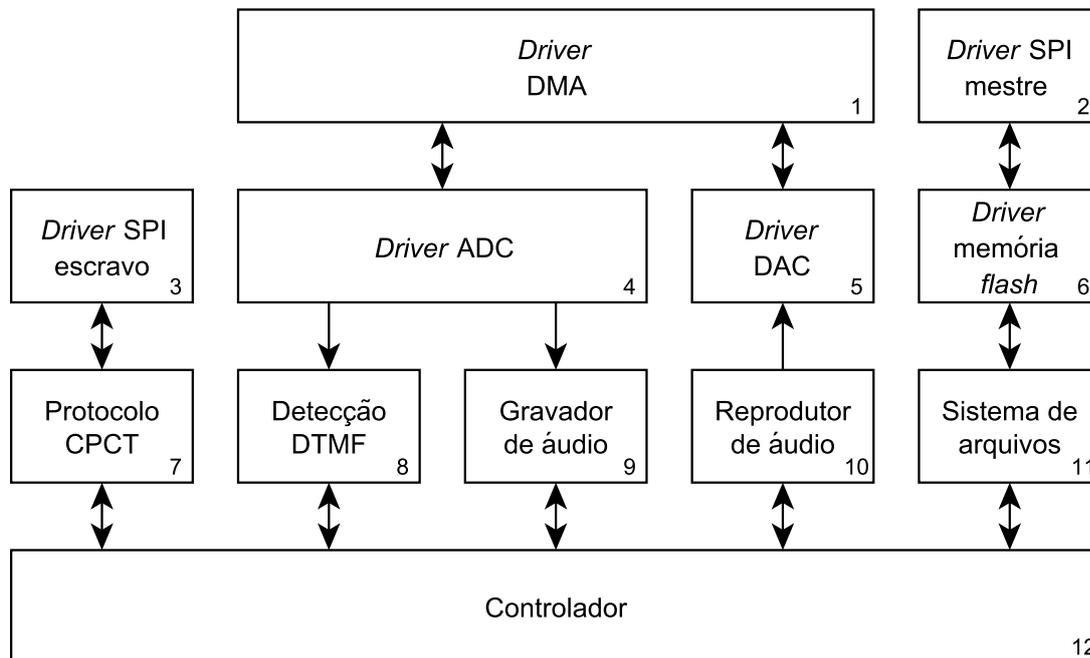
Fonte: Elaboração própria.

Figura 22 – Diagrama de blocos do *boot loader* da DISA.



Fonte: Elaboração própria.

do barramento SPI (bloco 3).

Figura 23 – Diagrama de blocos do *software* da DISA.

Fonte: Elaboração própria.

3.2 Implementação

Os *softwares* desenvolvidos neste trabalho são escritos em linguagem de programação C e compilados para a linguagem de máquina dos microcontroladores através do pacote de ferramentas de desenvolvimento Red Suite 5, da Code Red Technologies¹, que inclui uma interface integrada de desenvolvimento (IDE, do inglês *integrated development environment*) baseada no projeto Eclipse, uma biblioteca de propósito geral da linguagem C otimizada para sistemas embarcados (Redlib), o compilador GCC e demais ferramentas da GNU Toolchain (GDB, Make e Binutils) preparadas para trabalhar com os microcontroladores da família LPC utilizados na placa DISA.

Além da Redlib, as bibliotecas CMSIS e MCU LPC17xx também são empregadas neste trabalho. A biblioteca CMSIS é um pacote de abstração de *hardware* padronizado pela ARM Holdings (proprietária do Cortex-M3, núcleo dos microcontroladores LPC1759) e distribuído pela NXP, sendo aqui utilizado para controlar a inicialização dos microcontroladores. Já a biblioteca MCU LPC17xx, também fornecida pela NXP, é aqui adotada para controlar

¹ A Code Red Technologies foi adquirida pela NXP (fabricante dos microcontroladores da família LPC) em 2013.

alguns periféricos dos microcontroladores sem a necessidade de acessar os seus registradores diretamente.

A seguir, é apresentado um detalhamento de cada um dos *softwares* desenvolvidos.

3.2.1 *Boot loader*

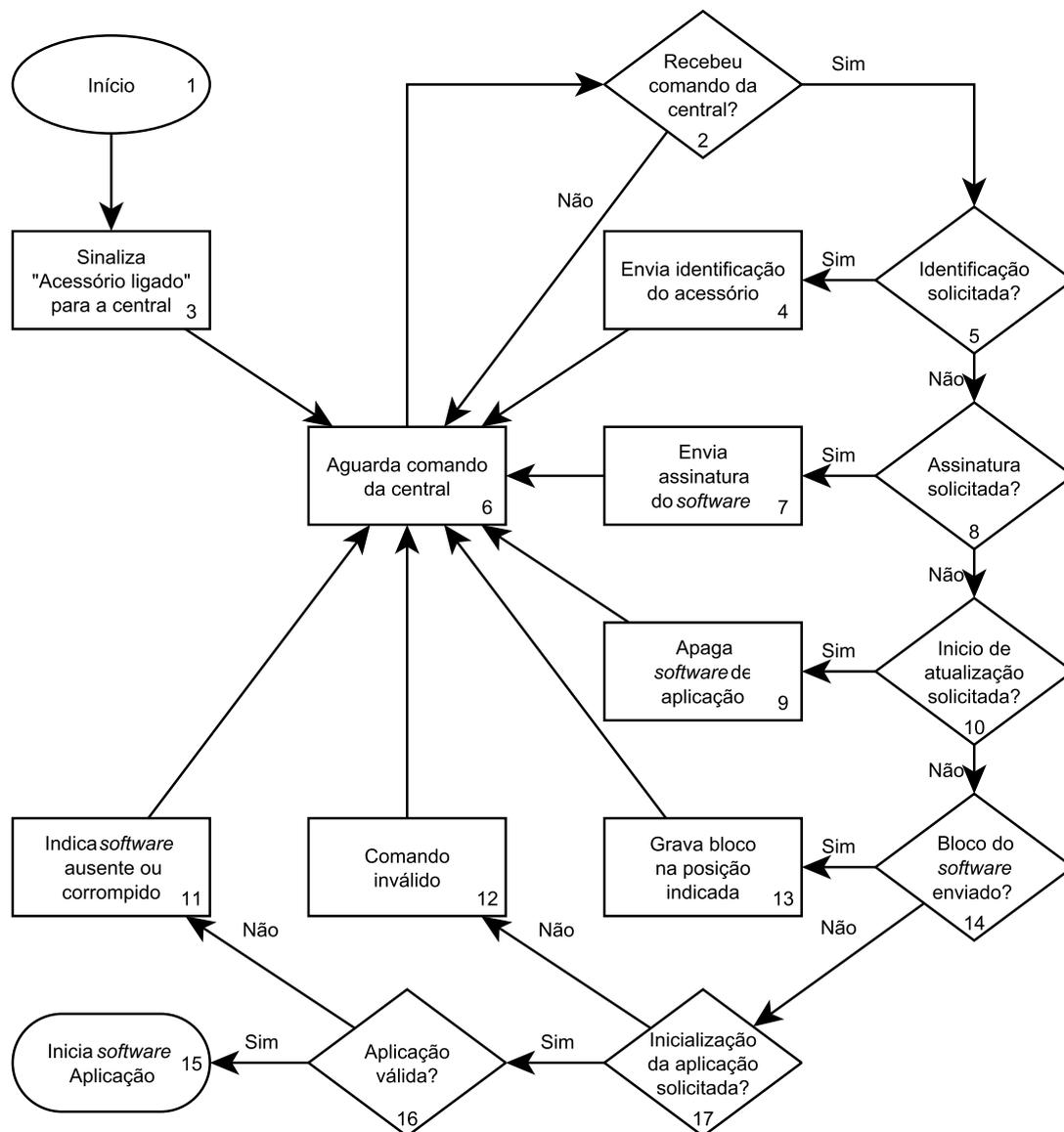
Conforme mostrado anteriormente, o *boot loader* assume o controle do microcontrolador assim que este é ligado e tem como papel principal realizar a atualização do *software* Aplicação da DISA. O fluxograma do *boot loader* é apresentado na Figura 24.

A sua primeira tarefa é sinalizar para a central que um acessório está pronto para ser ativado (bloco 3), através do envio de uma mensagem pelo barramento SPI dos acessórios. Após isso, a central envia um pedido de identificação, que deve ser respondido pelo *boot loader* (blocos 4 e 5) a fim de informar à central o tipo de acessório que está instalado em determinada posição.

Quando a central está em modo de operação normal (ou seja, não está executando o *boot loader*) e nenhum outro acessório do tipo DISA é identificado, o comando para liberar o funcionamento da DISA é enviado. O *boot loader* da DISA faz então uma verificação do *software* de aplicação gravado na memória do microcontrolador (blocos 16 e 17). Se o resultado for positivo, o *boot loader* é encerrado ao passar o controle do microcontrolador para o *software* Aplicação. Caso contrário, tal fato é informado para a central e a Aplicação não é inicializada.

Para fazer essa verificação, o *boot loader* utiliza um recurso do microcontrolador chamado *multiple input signature register* (MISR), descrito em NXP (2014). Através do MISR, uma assinatura de 128 bits é gerada a partir de todo o conteúdo da memória *flash* utilizado pela Aplicação (ver Figura 5). Essa assinatura é comparada com o valor armazenado nos últimos 128 bits da memória *flash* (gravados sempre que uma atualização é bem sucedida), sendo assim possível identificar falhas na memória (causadas por uma atualização incompleta, por exemplo).

A assinatura calculada através do MISR é também utilizada pelo *boot loader* da central para identificar quando uma atualização na aplicação da DISA é necessária. Por isso, quando solicitado, o *boot loader* da DISA deve calcular a assinatura e enviar o resultado para a central (blocos 7 e 8), que decide se é ou não necessário iniciar o procedimento de atualização. Em caso afirmativo, o *boot loader* da DISA deve apagar toda a memória *flash* da

Figura 24 – Fluxograma do *boot loader* da DISA.

Fonte: Elaboração própria.

Aplicação (blocos 9 e 10), para somente então gravar o novo *software* recebido da central, que é dividido em trechos de 512 bytes (blocos 13 e 14) a fim de facilitar a retransmissão em casos de erros durante a comunicação pelo barramento SPI.

3.2.2 Atualizador da DISA

O *software* executado pela central para atualização da DISA realiza as tarefas complementares do *boot loader* da DISA, ilustradas no fluxograma

da Figura 25. A primeira ação realizada (bloco 2) é liberar o funcionamento de um dos acessórios (a “Modulare+” possui conexão para até dois acessórios) através da liberação do sinal de Reset, controlado pela central (Figura 8). Conforme visto na Subseção 3.2.1, o acessório deve enviar uma mensagem para a central assim que for ligado, indicando que a sua posição está ocupada (bloco 3). Para levar em conta possíveis atrasos no recebimento, o “Atualizador da DISA” aguarda até 200 ms para o recebimento dessa mensagem e, após esgotado esse tempo, considera a ausência de um acessório nessa posição, passando então a verificar a próxima, caso haja (blocos 7, 8 e 10).

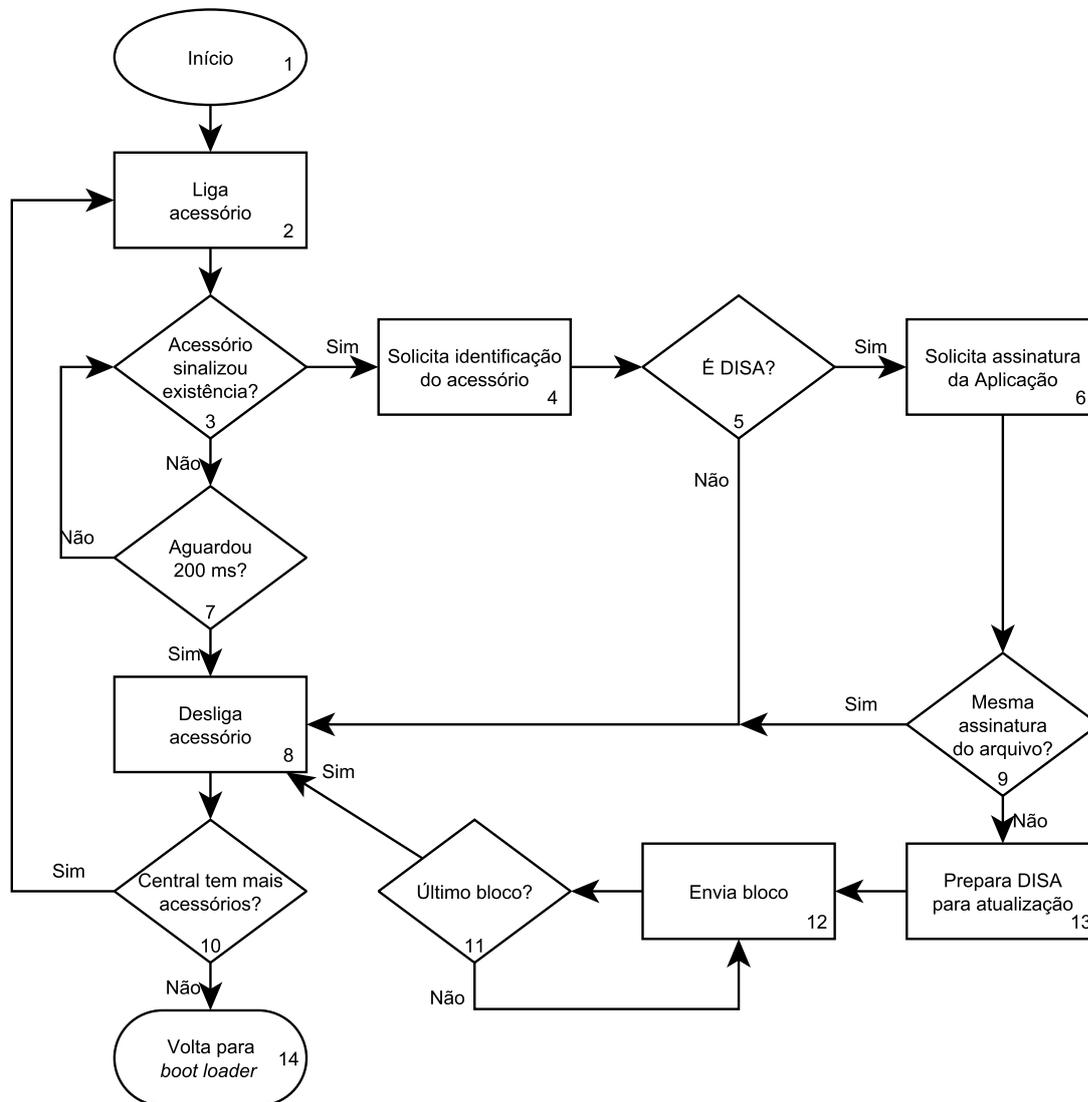
Quando o acessório sinaliza sua presença e em seguida responde ao pedido de identificação indicando se tratar de uma placa DISA (blocos 4 e 5), a central verifica a necessidade de atualização através da comparação da assinatura enviada pelo acessório com a armazenada no arquivo (blocos 6 e 9). A assinatura recebida da DISA, conforme descrito na Subseção 3.2.1, é calculada através do MISR do microcontrolador, ao passo que a assinatura obtida do arquivo de atualização de *software* é calculada durante a construção do arquivo por uma ferramenta, criada na Intelbras durante o desenvolvimento das centrais, baseada no mesmo algoritmo do MISR, descrito em NXP (2014).

Quando a verificação das assinaturas indicar a necessidade de atualização do *software* da DISA, tal fato deve ser informado através de uma mensagem solicitando a preparação da memória (procedimento que consiste em tornar todos os bits da memória *flash* da Aplicação iguais a 1), para em seguida ser gravada com trechos de 512 bytes contendo o novo programa (blocos 11, 12 e 13).

3.2.3 *Software* Aplicação

Na Figura 23, os blocos “Protocolo CPCT”, “Detecção DTMF”, “Gravador de áudio”, “Reprodutor de áudio”, “Sistema de arquivos” e “Controlador” representam as principais atividades do sistema (controle, processamento e armazenamento do áudio e comunicação com a CPCT). As atividades que envolvem o processamento de áudio (“Gravador de áudio” e “Reprodutor de áudio”) são consideradas tarefas de tempo crítico, pois se suas execuções forem postergadas, o sinal resultante sofrerá distorções. Das diversas arquiteturas de *software* conhecidas que auxiliam na garantia do tempo de execução das tarefas, uma arquitetura multitarefa de tempo real é adotada neste trabalho, a fim de viabilizar a reutilização dos códigos desenvolvidos para as centrais “Modulare+” e “Conecta+”.

Assim como nas centrais, para realizar o controle da execução das tarefas (chaveamento de contexto) é utilizada a biblioteca de código aberto

Figura 25 – Fluxograma do *software* de atualização da DISA.

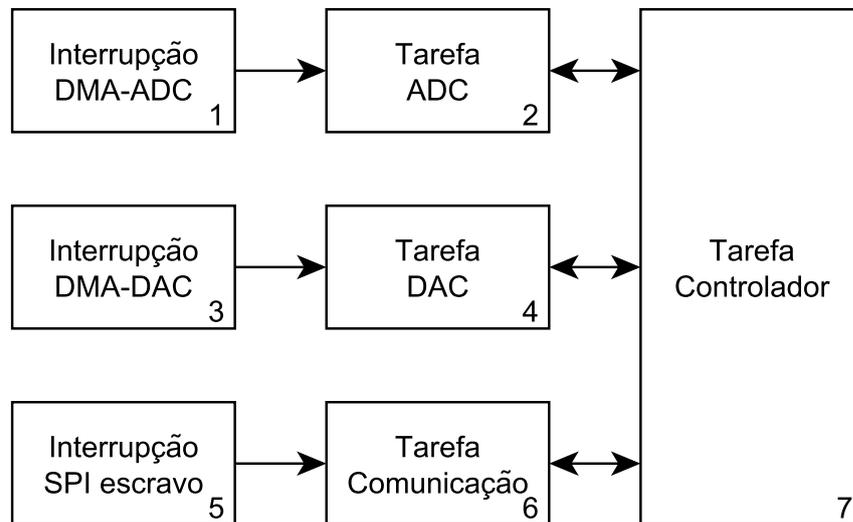
Fonte: Elaboração própria.

FreeRTOS², que também implementa rotinas de transferência de dados, sincronização e exclusão mútua entre tarefas.

A Figura 26 exibe um diagrama de blocos com as quatro tarefas (ADC, DAC, Comunicação e Controlador) criadas para a Aplicação. As setas indicam os caminhos de troca de mensagens entre duas tarefas e entre uma tarefa e uma interrupção (blocos 1, 3 e 5). Nas tarefas DAC, Comunicação e Controlador, são executadas as atividades “Reprodutor de áudio”, “Protocolo CPCT” e “Controlador”, respectivamente. Já na tarefa ADC, são reunidas as

² Disponível em <http://www.freertos.org>.

Figura 26 – Diagrama de blocos mostrando as tarefas da Aplicação e seus relacionamentos.



Fonte: Elaboração própria.

atividades “Detecção DTMF” e “Gravador de áudio”, pela similaridade da interface. A outra atividade citada, “Sistema de arquivos”, não possui uma tarefa exclusiva, sendo acessada pelas demais diretamente.

3.2.3.1 Sistema de arquivos

Previamente à definição da arquitetura de *hardware*, um estudo é aqui realizado a fim de definir o tipo de memória mais adequado para o armazenamento das mensagens da DISA. Dentre as opções consideradas, estão cartões de memória (SD-Cards), CIs de memórias *flash* e EEPROM e, até mesmo, a memória *flash* interna do microcontrolador. Com base no resultado dessa avaliação, decide-se adotar neste trabalho uma memória do tipo *flash* com interface SPI em função do baixo custo e da alta densidade (de bits), padronização entre fabricantes (JEDEC³), facilidade de integração (através da interface SPI) e escalabilidade (em um mesmo padrão de encapsulamento, podem-se encontrar CIs com capacidade de 4 a 64 Mibit⁴).

³ Conselho Conjunto para Engenharia de Dispositivos de Elétron, do inglês *Joint Electron Device Engineering Council*. Trata-se de um órgão de padronização de dispositivos semicondutores dos Estados Unidos da América.

⁴ **Mi** é o símbolo do prefixo mebi padronizado pela *International Electrotechnical Commission* (IEC) e equivale a 2^{20} .

3.2.3.1.1 Reescrita da memória

Uma característica das memórias *flash* é que a operação de limpeza de uma área, necessária para que essa área possa ser reescrita, pode demorar desde décimos de segundo a alguns segundos. Por exemplo, segundo a especificação do CI M25P32, do fabricante Micron, o tempo para a limpeza de um setor (quantidade mínima de memória — S_b — que é limpa de uma só vez, com 512 Kibit⁵ no caso) pode variar de 0,6 a 3 s (t_{l_sector}). Como as mensagens personalizadas da DISA podem chegar a ocupar uma área equivalente a 30 s (t_{msg}), determina-se através de (3.1) que a operação de limpeza de memória pode levar aproximadamente 11 s (t_{l_msg}), considerando que a mensagem está gravada a uma taxa (T_{bps}) de 64.000 bit/s. Uma demora dessa magnitude, especialmente se comparada com a obtida pela DISA das centrais “Modulare i” e “Conecta”, seria inaceitável, pois causaria uma má imagem do produto.

$$t_{l_msg} = t_{l_sector} \times \frac{t_{msg} \times T_{bps}}{S_b} \quad (3.1)$$

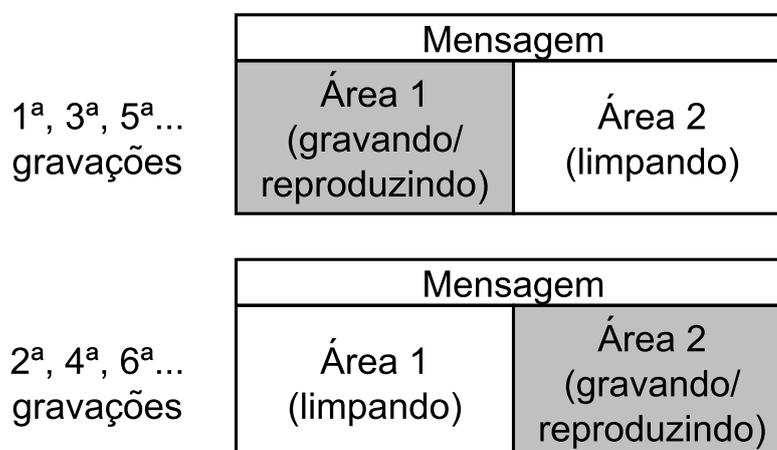
A solução encontrada para evitar tal característica é duplicar a área de memória destinada a cada uma das mensagens personalizadas, alterando a ordem de execução da operação de limpeza, que em vez de ser implementada antes da gravação (momento em que o usuário da central deve aguardar o fim da operação) é implementada após o usuário finalizar a mensagem e desligar o ramal (Figura 27).

3.2.3.1.2 Capacidade da memória e qualidade do áudio

Como visto nas Seções 1.1 e 1.4, um total de oito mensagens de atendimento automático distintas devem ser armazenadas e reproduzidas pela DISA. Dentre elas, seis são as mesmas mensagens pré-gravadas da DISA atual, listadas na Tabela 3 com a duração de cada uma nos dois idiomas disponíveis. As demais mensagens correspondem às duas mensagens personalizadas de 30 s cada, que devido à solução descrita na Subseção 3.2.3.1.1, têm as suas durações dobradas, resultando em um total de 120 s de mensagens personalizadas. Sendo assim, somando-se as durações de todas as mensagens, chega-se a um total de 147,012 s no pior caso (mensagens em espanhol). Para determinar o espaço de memória necessário para o armazenamento dessas mensagens, é necessário definir o formato adotado para a codificação de áudio, com características como taxa de amostragem, resolução e tipo de compressão de dados, se houver.

⁵ 1 Kibit = 2¹⁰ bits.

Figura 27 – Divisão de memória de uma mensagem de atendimento automático customizada e as operações efetuadas.



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 3 – Durações das mensagens de atendimento automático pré-gravadas.

Código da mensagem	Duração (ms)	
	Português	Espanhol
ME01	2.508	2.637
ME02	2.926	2.946
ME03	2.833	2.979
ME04	1.950	1.425
ME05	9.189	8.526
ME06	6.989	8.499
Total	26.395	27.012

Fonte: Elaboração própria.

Em relação à compressão de dados, opta-se por, a princípio, não utilizar compressão alguma, pois o uso de qualquer algoritmo desse tipo implicaria em uma maior taxa de ocupação do processador, justamente no momento mais crítico da operação da DISA, em que dois processos de tempo real (reprodução da mensagem e detecção DTMF) devem ser executados em até quatro linhas simultaneamente.

Para definir a taxa de amostragem e a resolução, primeiramente determinam-se parâmetros mínimos e máximos de cada um. Uma vez que

as mensagens da DISA das centrais “Modulare i” e “Conecta” foram reaproveitadas e as gravações em estúdio dessas mensagens estão armazenadas em arquivos do tipo *waveform audio file format* (WAVE) de 16 bits por amostra à taxa de 22.050 Hz, esses valores são considerados como máximos para resolução e taxa de amostragem. O valor mínimo de resolução escolhido é 8 bits, considerando que não há ganho em espaço de armazenamento com valores menores, pois esse é o menor valor endereçável da memória *flash*. Por último, taxas menores que 8.000 Hz são desconsideradas devido ao fenômeno de recobrimento na banda da voz [de 300 a 3.400 Hz, segundo Anatel (2007)].

Em seguida, as mensagens de atendimento automático da DISA são avaliadas⁶ em diferentes combinações de resolução (A) e taxas de amostragem (f_s) a fim de determinar a menor taxa de bits por segundo aceitável, definida por (3.2). Para converter os arquivos originais (16 bits à 22.050 Hz) nos arquivos com as diferentes combinações avaliadas, utiliza-se a ferramenta SoX⁷, com o seguinte comando “sox -D {arquivo original} -b {número de bits} {arquivo convertido} rate -v {taxa de amostragem}”. Os resultados dessa avaliação estão compilados no Quadro 3, que mostra que a menor taxa de bits por segundo aceitável é 128.000 bit/s, correspondente à resolução de 16 bits à taxa de 8.000 Hz.

$$T_{\text{bps}} = \log_2(A) \times f_s \quad (3.2)$$

Uma vez determinada a taxa de bits por segundo do áudio das mensagens e descartada a utilização de técnicas de compressão, o formato LPCM é então escolhido para a codificação desses sinais na memória. Tal formato de codificação é o mesmo utilizado pelos arquivos WAVE (IBM CORPORATION AND MICROSOFT CORPORATION, 1991) sem compressão e, portanto, o seu emprego simplifica as tarefas de gravação de mensagens através de um *pendrive*.

Sabendo que na codificação LPCM o espaço ocupado por um trecho de áudio (S_{msg} , em bits) pode ser obtido por (3.3) e que as mensagens de atendimento automático resultam em um total de 147,012 s, verifica-se que a capacidade mínima de memória necessária para armazená-las é de 18.817.536

⁶ Um estudo realizado previamente não encontrou parâmetros quantitativos que pudessem ser utilizados para avaliar a qualidade do áudio reproduzido em uma linha telefônica. Assim, a avaliação realizada neste trabalho é qualitativa, baseada na percepção dos membros da equipe de desenvolvimento das centrais.

⁷ SoX - Sound eXchange, disponível em <http://sox.sourceforge.net/>.

Quadro 3 – Avaliação das mensagens de atendimento automático em diversas resoluções e taxas de amostragem.

$\log_2(A)$	f_s (Hz)	T_{bps}	Aceitável	Comentário
8 bits	8.000	16.000 bit/s	Não	Ruído de quantização perceptível
8 bits	16.000	128.000 bit/s	Não	Ruído de quantização perceptível
8 bits	22.050	176.400 bit/s	Não	Ruído de quantização perceptível
16 bits	8.000	128.000 bit/s	Sim	Áudio mais grave do que o original
16 bits	16.000	256.000 bit/s	Sim	Áudio com qualidade semelhante a do original
16 bits	22.050	352.800 bit/s	Sim	Áudio com qualidade superior a do original

Fonte: Elaboração própria.

bits ou, aproximadamente, 18 Mibit.

$$S_{\text{msg}} = t_{\text{msg}} \times T_{\text{bps}} \quad (3.3)$$

A capacidade de memória dos CIs de memória *flash* SPI comercialmente disponíveis varia de 512 Kibit a 2 Gibit⁸, com valores intermediários iguais às potências da base 2. Desse modo, o menor valor comercial capaz de armazenar as mensagens da DISA é 32 Mibit. Sendo assim, o CI M25P32 é aqui empregado por ser um componente já utilizado em outros produtos da Intelbras.

3.2.3.1.3 Requisitos para a organização da memória

Na DISA baseada no CI ISD2590, as mensagens eram identificadas através de uma tabela armazenada na memória do microcontrolador da central, que associava cada mensagem a um endereço de memória do ISD2590 no qual o áudio correspondente estava gravado (Tabela 4).

Com a adaptação para o ISD1760, os endereços das mensagens foram alterados devido às características do novo CI. Por isso, além da conversão

⁸ 1 Gibit = 2³⁰ bits.

Tabela 4 – Exemplo de tabela de mensagens de atendimento automático utilizada pela DISA com ISD2590.

Código da mensagem	Endereço	
	Português	Espanhol
ME01	0	0
ME02	18	20
ME03	40	41
ME04	65	67
ME05	100	100
ME06	491	491

Fonte: Elaboração própria.

de protocolo, o ST72F260 também é responsável por determinar a correspondência entre o endereço enviado pela central e o endereço da mensagem no CI de gravação, através de uma nova tabela gravada nesse microcontrolador.

Essa solução apresenta alguns inconvenientes, como a dificuldade de alterar ou introduzir novas mensagens e também com relação à logística da linha de produção e das assistências técnicas, devido ao forte acoplamento entre o conteúdo gravado nesses três CIs distintos (memória de programa da central, microcontrolador e gravador da DISA).

De forma a evitar tal acoplamento, deve-se buscar uma solução em que toda informação necessária para a reprodução de uma determinada mensagem esteja armazenada também na memória *flash* e que o único parâmetro necessário para que a central inicie a sua reprodução ou gravação seja o seu identificador (ME01, ME02, ...).

Outro ponto considerado na organização da memória *flash* diz respeito ao aproveitamento da memória a princípio não utilizada pelas mensagens. Com a possibilidade da atualização do *software* da DISA, quatro cenários futuros são considerados:

- a) inclusão de uma nova mensagem pré-gravada;
- b) alteração no tamanho de uma mensagem pré-gravada;
- c) reserva de espaço para outras mensagens personalizadas;
- d) alteração do espaço reservado para uma mensagem personalizada.

É desejável que, na ocorrência de qualquer um desses cenários, os impactos do ponto de vista de alteração nos *softwares* (da central e da DISA)

sejam minimizados e também que, sempre que possível, as mensagens de atendimento automático personalizadas já gravadas pelo usuário sejam preservadas.

Por último, a organização da memória também considera os seguintes aspectos relativos à memória *flash*:

- a) uma memória *flash* não gravada possui todos os seus bits iguais a 1;
- b) a operação de gravação só é capaz de tornar um bit igual a 0;
- c) para fazer com que um bit volte a ser 1, é necessária a execução de uma operação de limpeza;
- d) a operação de limpeza afeta 512 Kibit de uma só vez (espaço chamado setor);
- e) a limpeza de um setor pode durar de 0,6 a 3 s.

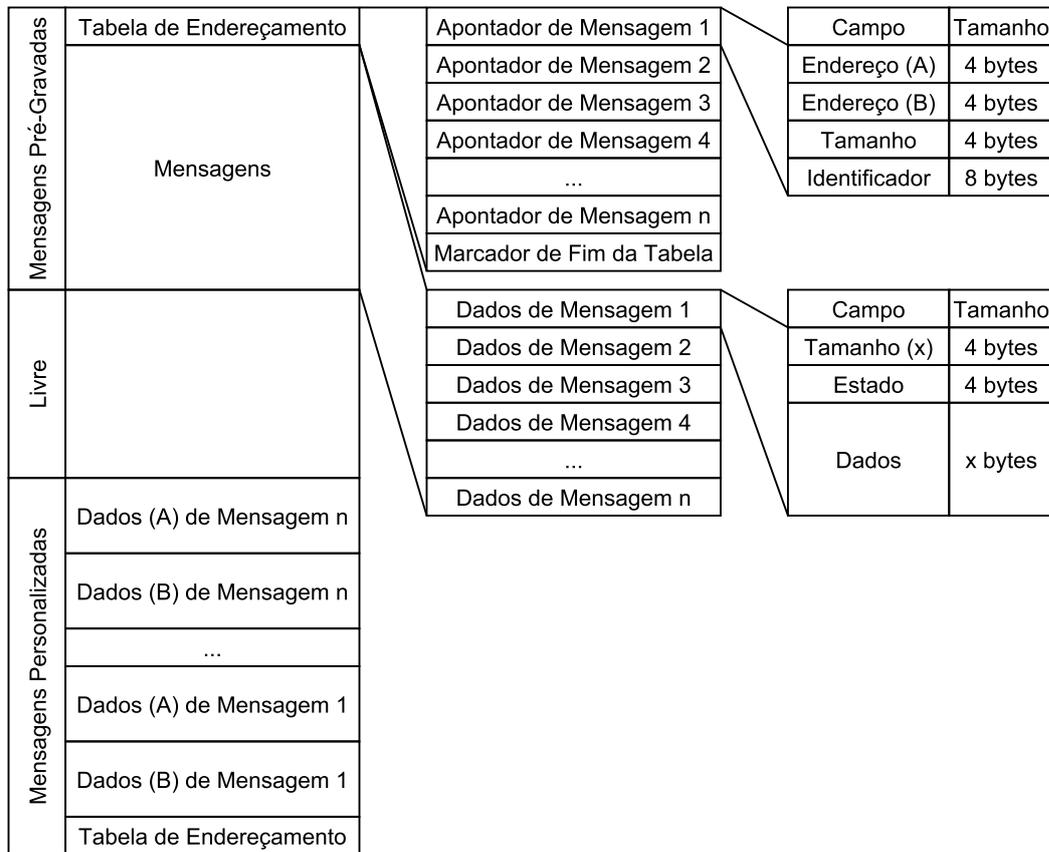
3.2.3.1.4 Organização da memória

A Figura 28 apresenta a solução encontrada para o armazenamento das mensagens na memória *flash*, considerando todos os detalhes descritos na Subseção 3.2.3.1.3. A parte esquerda da figura mostra uma visão macro da memória, dividida em três áreas chamadas de partições: Mensagens Pré-gravadas, Livre e Mensagens Personalizadas. Dessa forma, cada partição de mensagem possui um endereço de referência fixo e os seus tamanhos podem ser alterados independentemente, retirando-se espaço da partição Livre. Cada partição de mensagem contém uma lista de informações das mensagens armazenadas, chamada Tabela de Endereçamento. O espaço reservado para cada tabela equivale a um setor da memória *flash*, para que a modificação de qualquer outra informação, além da própria tabela, não afete os seus dados.

Para cada mensagem existe um Apontador de Mensagem na Tabela de Endereçamento da partição correspondente (centro da figura). Os apontadores são gravados sequencialmente, sendo que o fim da tabela é indicado através de um Marcador de Fim de Tabela (uma sequência de 32 bits iguais a 1) após o último apontador válido.

Os formatos dos Apontadores de Mensagem são mostrados no lado direito da Figura 28. Os dois primeiros campos — Endereço (A) e Endereço (B) — informam duas opções de localização dos Dados de Mensagem associados, conforme discutido na Subseção 3.2.3.1.1. Para o caso das mensagens pré-gravadas, não é necessário haver duas áreas para cada mensagem. Assim, todos os bits do campo Endereço (B) são feitos igual a 1 para indicar tal fato.

Figura 28 – Organização das mensagens de atendimento automático na memória *flash*.



Fonte: Elaboração própria.

O campo Tamanho informa o tamanho total (em bytes) da área Dados de Mensagem associado (se duas áreas forem utilizadas, ambas devem possuir o mesmo tamanho). Por fim, o campo Identificador contém a cadeia de caracteres utilizada para identificar a mensagem (ME01, ME02, ...), conforme relação mostrada na Seção 1.1.

A área onde são gravados Dados de Mensagem contém dois campos, além da mensagem de áudio: Tamanho, que indica a quantidade de bytes utilizadas pelo áudio, e Estado, que serve para controlar a utilização das duas áreas de dados das mensagens personalizadas.

A fim de permitir a limpeza completa de uma área de Dados de Mensagem sem interferir em áreas adjacentes, a partição de Mensagens Personalizadas deve conter apenas Dados de Mensagem com tamanho múltiplo de um setor da memória *flash*. Além disso, se há o requisito de armazenar, no mínimo, 30 s de áudio em uma mensagem (t_{\min}) e que além do espaço ocu-

pado pelo áudio são necessários mais 8 bytes (S_{fixo}) para os campos Tamanho e Estado, então, de acordo com (3.4), são necessários 8 setores (n_s) para cada área de dados e, portanto, um total de 524.288 bytes.

$$n_s = \left\lceil \frac{t_{\text{min}} \times T_{\text{bps}}}{S_b} \right\rceil \quad (3.4)$$

3.2.3.2 Reprodutor de áudio

Conforme visto na Seção 1.3, as mensagens da DISA são gravadas em uma memória *flash* e convertidas em um sinal analógico através da técnica de modulação por largura de pulso. Esses pulsos são gerados automaticamente pelo LPC1759 através de um periférico chamado PWM, que realiza a comutação de uma saída entre os valores de tensão 0 (y_{min}) e 3,3 V (y_{max}), periodicamente.

A variação da tensão entre os valores y_{min} e y_{max} resulta em um sinal com frequência f_{pwm} (frequência portadora) e tensão média (\bar{y}), definidos por (3.5) e (3.6), respectivamente, onde t_{ligado} corresponde ao tempo em que a saída permanece na tensão máxima, $t_{\text{desligado}}$, ao tempo na tensão mínima e D — conhecida como razão cíclica do PWM — correspondente ao produto entre o tempo que a saída permanece na tensão máxima e a frequência portadora, dado por (3.7).

$$f_{\text{pwm}} = \frac{1}{t_{\text{ligado}} + t_{\text{desligado}}} \quad (3.5)$$

$$\bar{y} = D y_{\text{max}} + (1 - D) y_{\text{min}} \quad (3.6)$$

$$D = t_{\text{ligado}} \times f_{\text{pwm}} \quad (3.7)$$

Quando D é discretizado em N valores distintos, chama-se N de resolução do PWM e, conseqüentemente, resolução de \bar{y} . Ao se representar N em um sistema binário, é comum que ele seja uma potência de 2, como em (3.8). Nesse caso, passa-se o rótulo de resolução para a variável Q ($Q \in \mathbb{N}$), medida em bits.

$$N = 2^Q \quad (3.8)$$

Segundo a classificação dada por Goldberg (1992), o periférico PWM do LPC1759 é capaz de gerar sinais PWM de amostragem uniforme (UPWM,

do inglês *uniform sampling PWM*) tanto em borda simples quanto em borda dupla. Há, porém, uma limitação em relação à quantidade de saídas PWM para cada tipo de borda: três saídas em borda dupla e seis saídas em borda simples (NXP, 2013). Como o requisito da DISA é reproduzir quatro mensagens simultaneamente, o periférico PWM deve ser configurado para operar em borda simples.

3.2.3.2.1 Características do sinal UPWM de borda simples

Goldberg (1992) mostra que o UPWM de borda simples provoca distorções harmônicas no sinal modulante com amplitudes (em relação à fundamental) descritas por (3.9), onde J_h é a função de Bessel de primeira espécie de ordem h e r relaciona a profundidade da modulação (M) com as frequências angulares da portadora e do sinal modulante (ω_c e ω_v , respectivamente), através de (3.10). Essa distorção pode ser observada na Figura 29, na qual um sinal UPWM de borda simples é simulado com uma portadora de 48 kHz e um sinal modulante de 3,4 kHz. A análise de (3.9) mostra que é possível reduzir esse tipo de distorção com o aumento de ω_c ou com a redução da profundidade de modulação M , como pode ser verificado na Figura 30.

$$\frac{F_h}{F_1} = \left| \frac{J_h(\pi hr)}{hJ_1(\pi r)} \right| \quad (3.9)$$

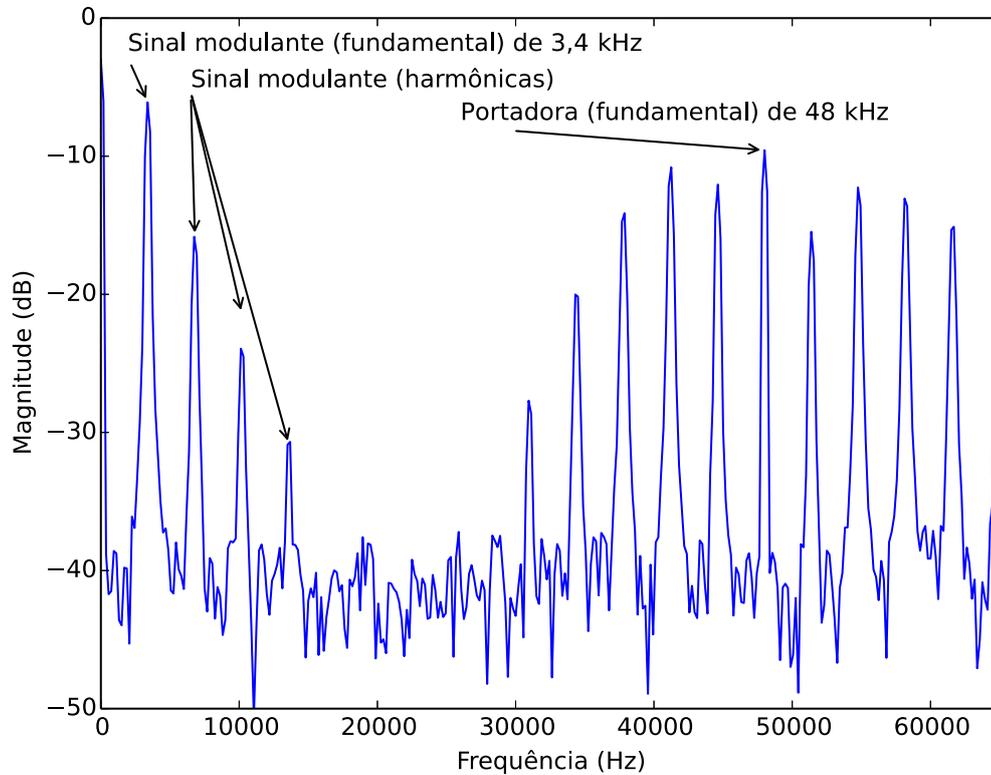
$$r = \frac{M\omega_v}{\omega_c} \quad (3.10)$$

Outro efeito distorcivo do UPWM de borda simples é o causado pela banda lateral resultante da modulação da portadora, definido através de (3.11) por Goldberg (1992), em que $\alpha = \omega_v/\omega_c$, destacado na Figura 31 através da simulação do sinal UPWM de borda simples com portadora de 48 kHz e modulante de 1,3 kHz. Essa distorção também pode ser atenuada com a utilização de valores maiores de ω_c ou com a redução de M ou, ainda, através do incremento de m e h (Figura 32).

$$\frac{F_h(m)}{F_1} = \left| \frac{J_h[\pi M(m + h\alpha)]}{J_1(\pi r)} \frac{\alpha}{m + h\alpha} \right| \quad (3.11)$$

Ainda na Figura 32, pode-se verificar que para valores de ω_c próximos à ω_v , há pouca atenuação dessa distorção com o aumento de h , ao passo que quando ω_c aumenta, a atenuação da distorção entre os valores de h se torna mais significativa. Esse fenômeno é melhor ilustrado na Figura 33, onde

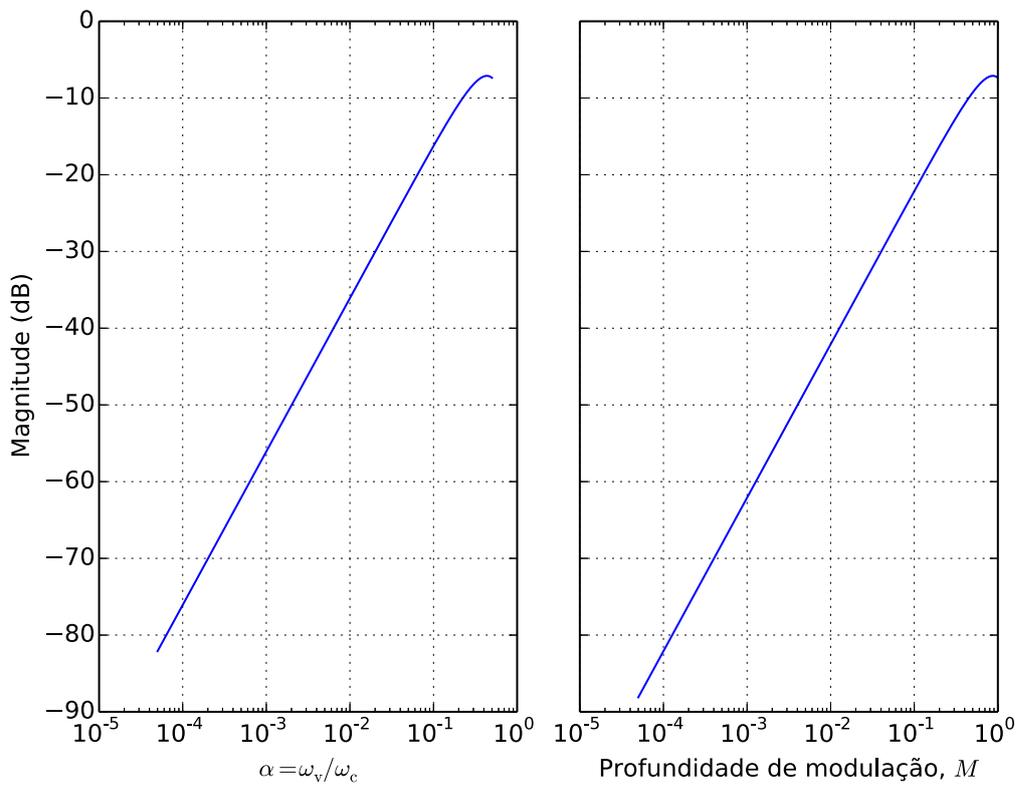
Figura 29 – Resultado da simulação de um sinal UPWM de borda simples, destacando o efeito de distorção harmônica.



Fonte: Elaboração própria.

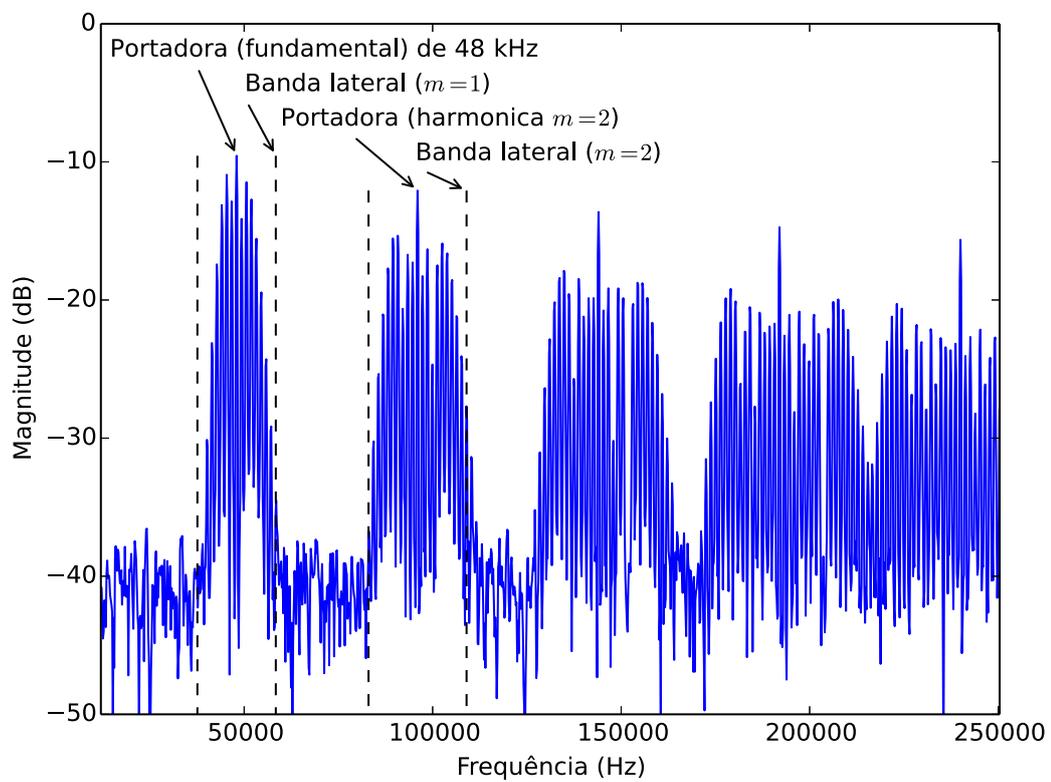
se nota que para $\alpha = 0,3$, a trigésima harmônica ainda contribui com uma distorção da ordem de -40 dB, mas para $\alpha = 0,05$, essa mesma harmônica tem uma amplitude insignificante.

Figura 30 – Relação entre as magnitudes do sinal e da sua segunda harmônica em um sinal UPWM de borda simples em relação às variações de α e da profundidade de modulação M .



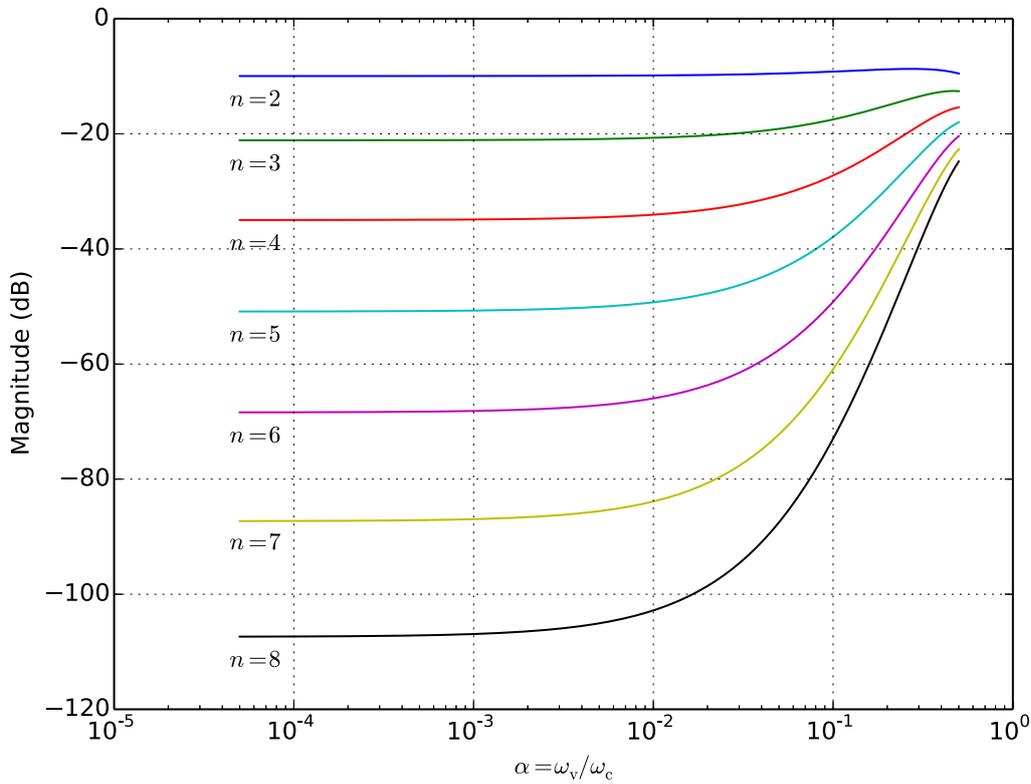
Fonte: Elaboração própria.

Figura 31 – Resultado da simulação de um sinal UPWM de borda simples, destacando o efeito de distorção causada pela banda lateral.



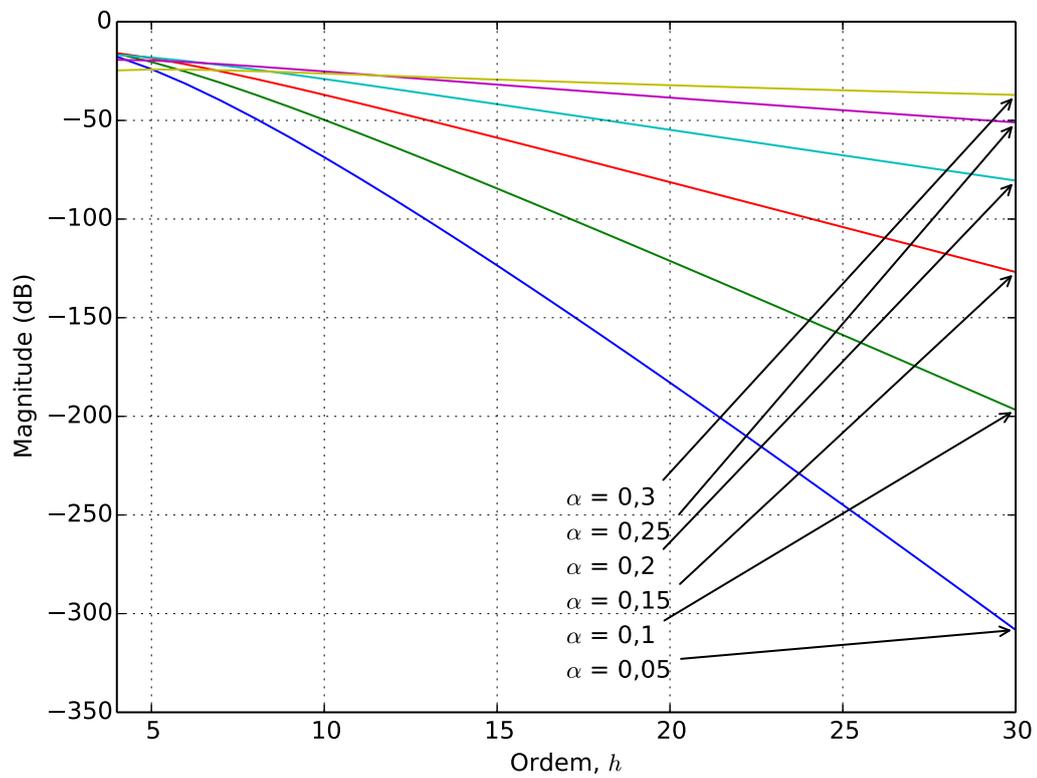
Fonte: Elaboração própria.

Figura 32 – Relações entre as magnitudes do sinal e das suas oito primeiras harmônicas contidas na primeira banda lateral ($m = 1$) de um sinal UPWM de borda simples, com profundidade de modulação $M = 0,5$ e $0 < \alpha \leq 0,5$.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 33 – Relações entre as magnitudes do sinal e das suas trinta primeiras harmônicas contidas na primeira banda lateral ($m = 1$) de um sinal UPWM de borda simples, com profundidade de modulação $M = 1$.



Fonte: Elaboração própria.

3.2.3.2.2 Características do PWM do LPC1759

De forma resumida, o PWM do LPC1759 funciona como um contador, com tempo para contar de zero até o seu valor máximo igual a $1/f_{\text{pwm}}$ e com largura de pulso definida por um evento ocorrendo no momento em que o contador atinge um valor entre zero e o valor máximo da contagem. Assim, o valor máximo da contagem acaba definindo o número de possíveis valores para a escolha da largura de pulso e, conseqüentemente, a resolução de \bar{y} . A Equação (3.12) define tal relação, onde a frequência máxima de operação do LPC1759 (f_{clk}) define o limite para a menor largura de pulso.

$$f_{\text{clk}} = 2^Q f_{\text{pwm}} \quad (3.12)$$

Quanto maior for a resolução escolhida para \bar{y} , menor será o erro de quantização do sinal, que pode ser analisado através de (3.13) [adaptado de Oppenheim e Schaffer (2012)]. Nessa equação, a razão sinal-ruído (SNR, do inglês *signal-to-noise ratio*), medida em decibéis, é diretamente proporcional à resolução, representada pelo valor $2^{2(Q-1)}$. Essa relação também é proporcional ao valor quadrático médio (RMS, do inglês *root mean square*) do sinal convertido (σ_x) e inversamente proporcional ao máximo valor de pico a pico do conversor (V_{pp}). A Figura 34 mostra o gráfico dessa equação.

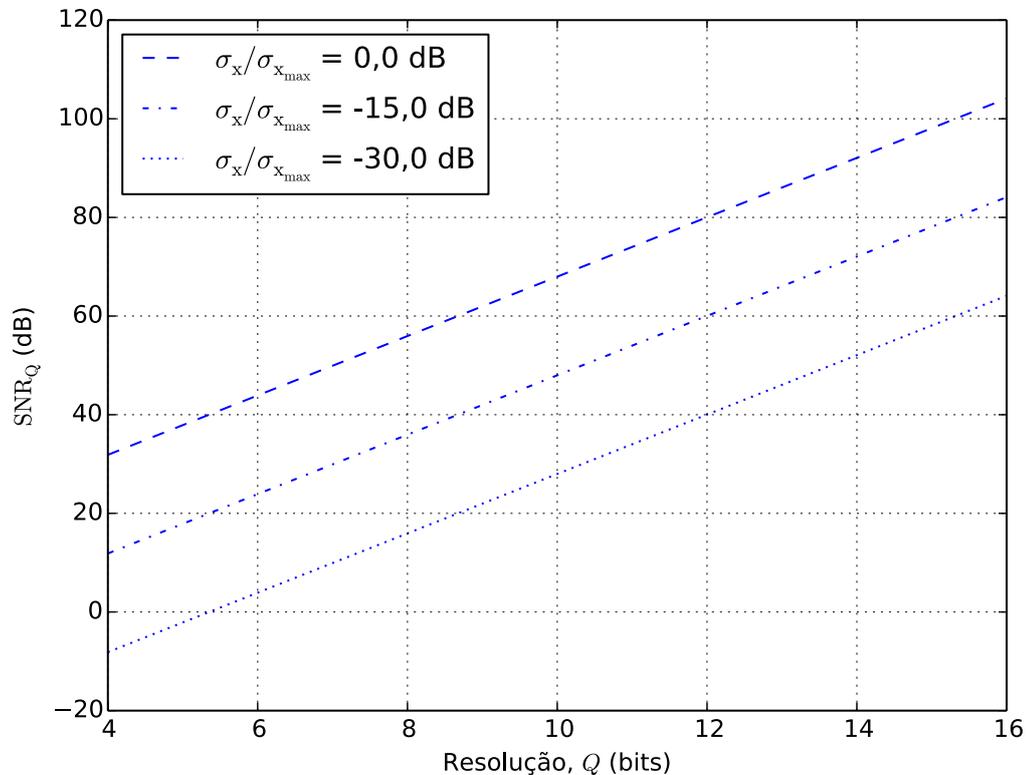
$$\text{SNR}(Q) = 10 \log_{10} \left(12 \frac{2^{2Q} \sigma_x^2}{V_{\text{pp}}^2} \right) \quad (3.13)$$

A variação da largura do pulso é definida através da alteração do valor de uma posição específica da memória (registrador) e só é aplicada pelo periférico no ciclo de PWM seguinte à essa operação. Isso resulta em uma janela de tempo inferior à $1/f_{\text{pwm}}$, na qual o *software* deve interromper sua atividade corrente e realizar a atualização da largura de pulso, sob pena de causar uma distorção no sinal. Para eliminar tal risco, a reprodução de áudio neste trabalho utiliza um periférico do LPC1759 chamado GPDMA, capaz de gerenciar automaticamente a cópia de dados de qualquer posição de memória do microcontrolador.

3.2.3.2.3 Determinação dos parâmetros do PWM

Conforme visto anteriormente, a qualidade do DAC por modulação de largura de pulso é afetada principalmente pela escolha da frequência da portadora (ω_c) e da profundidade da modulação (M). Sendo assim, opta-se aqui por fixar $M = 1$ e trabalhar na escolha do valor adequado de ω_c ,

Figura 34 – Razão sinal-ruído em função da resolução para diversos valores de amplitude do sinal.



Fonte: Elaboração própria.

pois aumentar tal parâmetro tem o efeito benéfico de afastar a frequência da portadora da faixa de frequência que o ouvido humano é capaz de perceber.

Também foi mostrado que há uma relação entre a frequência da portadora do sinal PWM ($\omega_c = 2\pi f_{\text{pwm}}$) e a resolução do sinal, dada por (3.12). Portanto, na escolha de f_{pwm} , deve haver um compromisso entre reduzir as distorções causadas pela modulação UPWM e manter uma razão sinal-ruído adequada. Também em virtude de (3.12) e a fim de reduzir a complexidade computacional no momento da reprodução dos sinais (como explicado na Subseção 3.2.3.1.2), é desejável que a razão $f_{\text{cclk}}/f_{\text{pwm}}$ seja dada por uma potência de dois ($Q \in \mathbb{N}$).

Analisando a distorção causada pela banda lateral, nota-se que é necessário reduzir os níveis de distorção apenas na faixa de frequência considerada audível pelo ouvido humano (até $f_b = 20$ kHz). Como o nível da distorção é inversamente proporcional à ordem h , o maior nível está no lado inferior da primeira banda lateral ($m = 1$) da maior frequência modulante

($\omega_v = 2\pi f_v$), tal que

$$f_{\text{pwm}} - hf_v \leq f_b \quad (3.14)$$

ou

$$h = \left\lceil \frac{f_{\text{pwm}} - f_b}{f_v} \right\rceil \quad (3.15)$$

onde $f_v = 3,4$ kHz, considerado o limite superior da banda de frequência da voz. Aplicando esses valores em (3.11), obtém-se os níveis máximos de distorção causados pela banda lateral (D_{bl}) dentro do intervalo de frequências $[0, f_b]$, mostrado na Figura 35. Nessa figura, também é mostrado o nível do ruído de quantização em função da resolução Q , calculado a partir de (3.13) com $\sigma_x = V_{pp}/\sqrt{2}$. Verifica-se que para $Q \leq 11$, a portadora está suficientemente afastada, resultando em um nível de distorção menor do que o nível do ruído de quantização para essa resolução.

Também é aqui analisada a distorção harmônica, dada por (3.9), que, para um determinado valor de f_{pwm} , tem o seu maior nível para $h = 2$ e $f_v = 3.400$ Hz. Substituindo ω_c de (3.10) por $f_{\text{pwm}}(Q)$ de (3.12), obtém-se (3.16), que representa a máxima distorção harmônica do sinal UPWM (D_h) em função da resolução Q . A Figura 36 mostra o comportamento de tal parâmetro, considerando $M = 1$ e $f_{\text{clock}} = 120$ MHz (frequência máxima do LPC1759), na qual se vê que somente para resoluções menores que 7 bits, a máxima distorção harmônica torna-se indiscernível do ruído. Porém, conforme visto na Subseção 3.2.3.1.2, para $Q \leq 8$, a razão sinal-ruído mostra-se inadequada.

$$D_{h_{\text{max}}} = 20 \log_{10} \left| \frac{J_2(2\pi M f_v 2^Q f_{\text{clock}}^{-1})}{2J_1(\pi M f_v 2^Q f_{\text{clock}}^{-1})} \right| \quad (3.16)$$

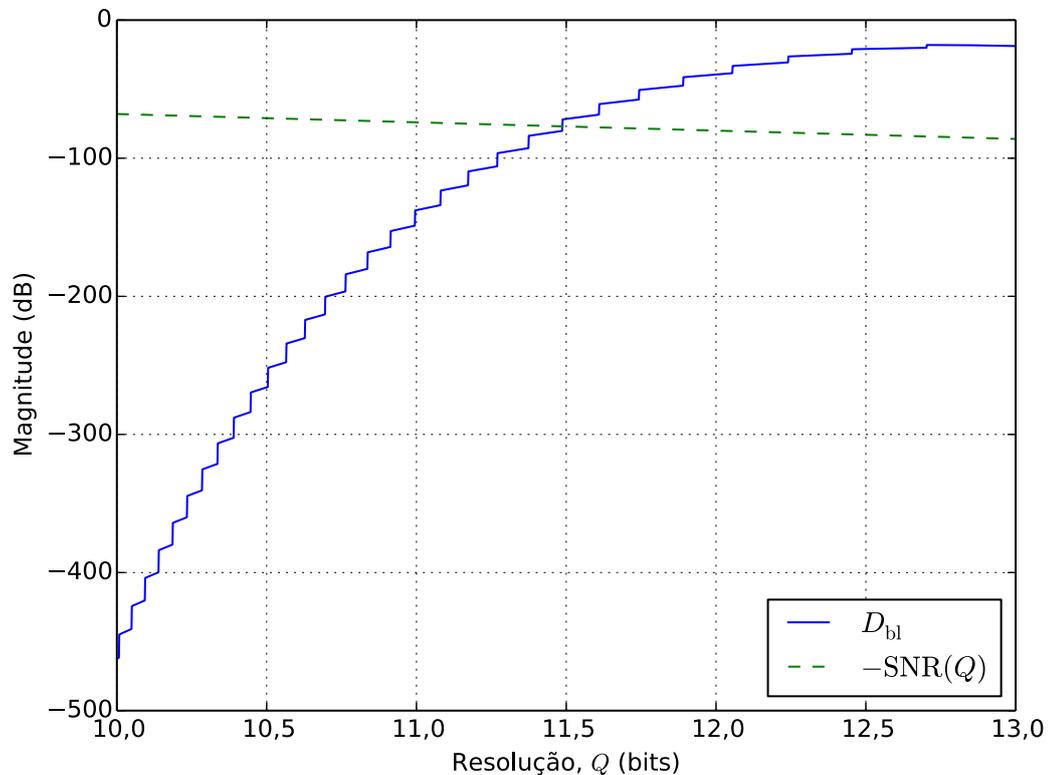
Como não é possível eliminar a distorção harmônica do UPWM, adota-se neste trabalho $Q = 11$ bits, implicando em $f_{\text{pwm}} = 58.593,75$ Hz.

3.2.3.3 Detecção DTMF

Na Subseção 3.1.1.6 foi mostrada a necessidade de a DISA identificar as marcações enviadas pelo Cliente durante ou instantes após a reprodução de uma mensagem, sendo que tais marcações são enviadas através da sinalização DTMF. De acordo com a Subseção 2.1.3.2, um algoritmo para identificar um sinal DTMF originado de um aparelho telefônico deve apresentar, pelo menos, as seguintes características:

- a) identificar o nível de potência das oito frequências fundamentais do sinal DTMF, com uma tolerância de $\pm 1,5\%$ em relação aos valores nominais das frequências;

Figura 35 – Nível máximo da distorção causada pela banda lateral na região das frequências audíveis comparado com o nível do ruído de quantização.

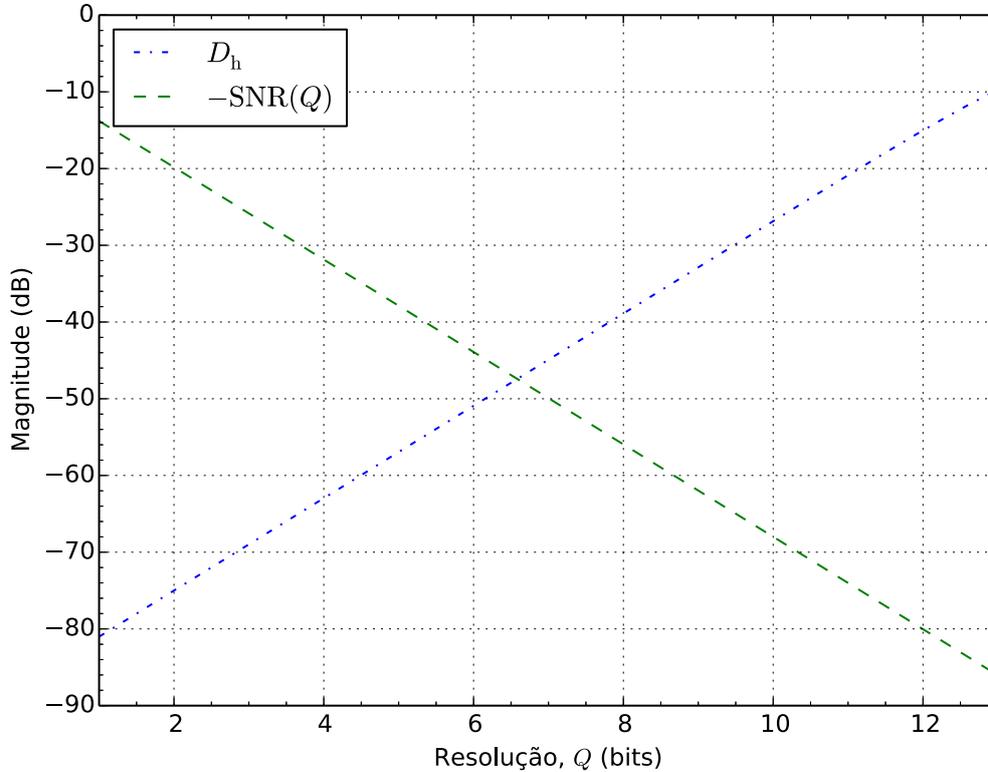


Fonte: Elaboração própria.

- b) reconhecer corretamente um sinal DTMF com nível de potência entre -3 e -25 dBm;
- c) reconhecer corretamente um sinal DTMF com duração mínima de 50 ms;
- d) reconhecer corretamente um sinal DTMF mesmo que os níveis de potência dos seus dois tons sejam diferentes, devido à característica passa-baixas da linha de transmissão;
- e) rejeitar um sinal DTMF com potência abaixo de -50 dBm;
- f) rejeitar um sinal DTMF cuja SNR seja menor que 20 dB.

Além disso, como o processo de detecção ocorre simultaneamente ao de reprodução da mensagem, é necessário que o algoritmo não interprete em momento algum o conteúdo da mensagem como uma marcação válida, ou seja, o algoritmo deve possuir boa imunidade à voz e a outros sinais não-DTMF.

Figura 36 – Comparação dos níveis de distorção harmônica e do ruído de quantização.



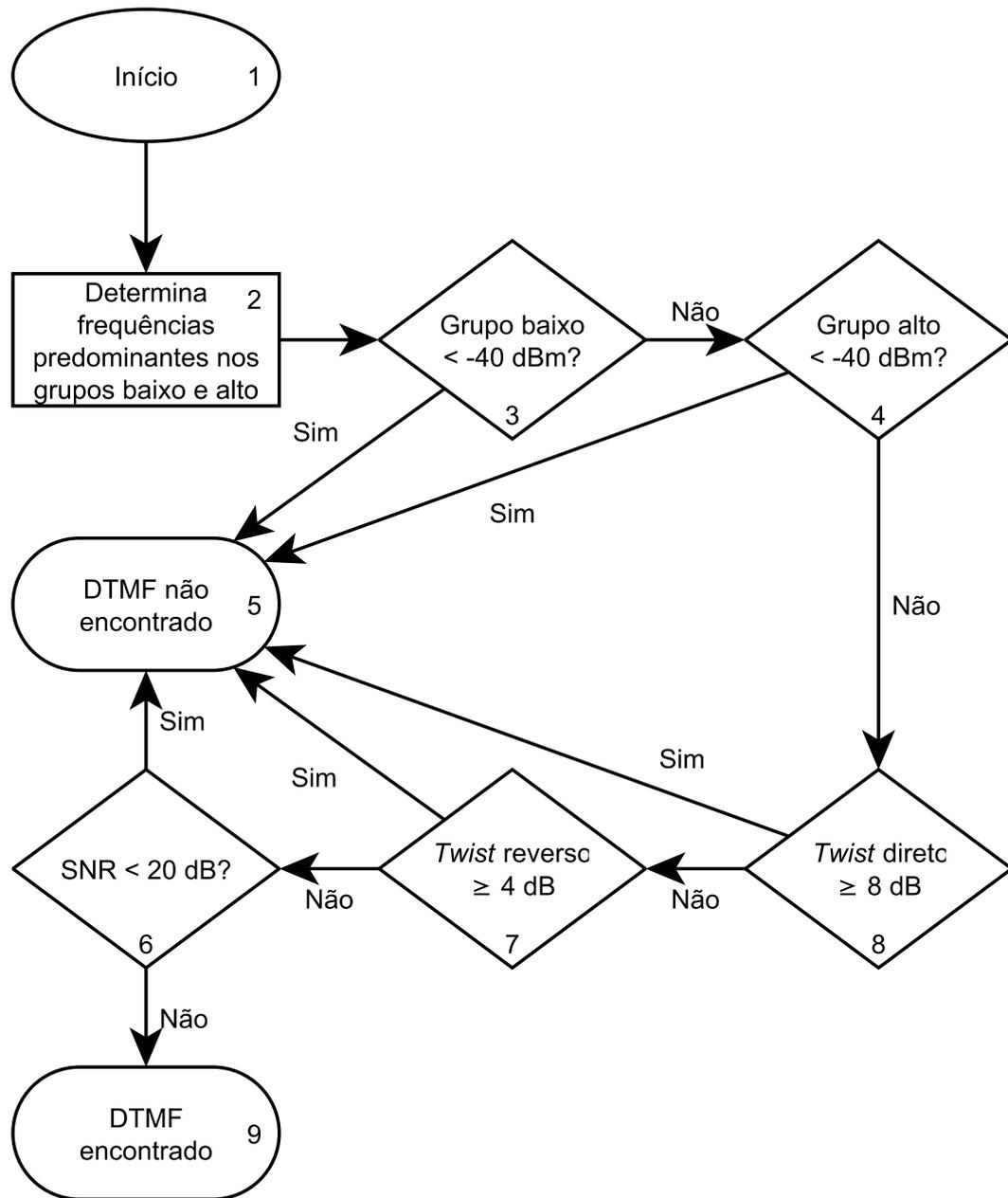
Fonte: Elaboração própria.

Kuo e Lee (2001) propõem a utilização do algoritmo de Goertzel (Subseção 2.2.4.2) para a determinação dos níveis de potência das frequências de interesse. Kuo e Lee (2001) propõem ainda que, para a detecção DTMF, não é necessário obter o valor do k -ésimo coeficiente da TFD ($X[k]$), sendo o valor de sua magnitude quadrática suficiente para a detecção, simplificando assim a etapa não recursiva do algoritmo, resultado em (3.17), com $v_k[N]$ dado por (2.14).

$$\left|X[k]^2\right| = v_k^2[N] - 2 \cos(2\pi k/N)v_k[N]v_k[N-1] + v_k^2[N-2] \quad (3.17)$$

Após a obtenção dos valores de $\left|X[k]^2\right|$ das oito frequências específicas do DTMF, o *software* segue o algoritmo mostrado no fluxograma da Figura 37. A sua primeira etapa é determinar qual frequência possui a maior potência dentro de cada grupo (bloco 2) e, em seguida, verificar se

Figura 37 – Fluxograma do algoritmo de detecção de sinais DTMF.



Fonte: Elaboração própria.

as potências dessas duas frequências são maiores do que a potência mínima permitida (blocos 3 e 4), que, de acordo com os requisitos de Anatel (2007), deve pertencer ao intervalo de $(-25, -50]$ dBm. Em seguida, três testes são realizados, que contribuem para a imunidade à voz: *twist* direto, *twist* reverso e razão sinal-ruído. No dois primeiros, a maior potência dentre as frequências do grupo baixo é comparada com a maior potência dentre as frequências do grupo alto e essa razão, chamada de *twist* direto, deve ser menor que 8 dB (bloco 8), ao passo que a razão inversa, chamada de *twist* reverso, deve ser menor que 4 dB (bloco 7). Por último, os níveis de potência das componentes DTMF são comparados com a potência total do sinal (DTMF + ruído), validando o sinal DTMF apenas quando tal razão for superior a 20 dB (bloco 6).

3.2.3.4 Gravador de áudio

A fim de implementar o caso de uso “Gravar mensagens (ramal)”, descrito na Subseção 3.1.1.5, o *software* Aplicação realiza o controle do ADC do LPC1759, obtendo as amostras do áudio originado de um ramal da central e as armazenando na memória *flash* através do sistema de arquivos implementado.

Conforme visto na Subseção 3.2.3.1.2, considera-se possível compreender a voz humana mesmo quando o seu espectro está limitado a até $f_v = 3,4$ kHz e, portanto, uma amostragem à frequência (f_s) de 8 kHz é suficiente para representar tal sinal, desde que o filtro anti-recobrimento seja adequado.

O filtro anti-recobrimento utilizado na DISA, como visto na Seção 1.3, tem frequência de corte (f_c) de 3,7 kHz e taxa de decaimento na banda de rejeição de apenas 12 dB por oitava (filtro de segunda ordem), não sendo adequado para amostrar sinais à taxa de 8 kHz. Uma possível solução é utilizar a estratégia da sobreamostragem para reduzir o recobrimento do sinal na faixa de 0 a 3,4 kHz. Todavia, a escolha de um fator de sobreamostragem M elevado implica em uma maior taxa de utilização do processador. Sendo assim, adota-se neste trabalho um fator $M = 2$, que resulta em um recobrimento, calculado através de (3.18), cerca de 17 dB menor do que o obtido com $M = 1$.

$$A = -40 \log_{10} \left(\frac{M f_s - f_v}{f_c} \right) \quad (3.18)$$

Em seguida, o sinal amostrado à taxa de $M f_s$ deve ser filtrado novamente, dessa vez por um filtro digital, para que não ocorra o recobrimento após o processo de dizimação. Apesar que filtros IIR resultam em um menor número de operações, opta-se aqui por um filtro FIR devido à garantia de

estabilidade mesmo após somados os erros de quantização dos coeficientes e de arredondamento das operações em ponto fixo.

Para o projeto do filtro digital anti-recobrimento, os seguintes parâmetros são especificados:

- a) frequência máxima da banda de passagem $f_p = f_v = 3,4$ kHz;
- b) frequência mínima da banda de rejeição $f_r = f_s/2 = 4$ kHz;
- c) *ripple* máximo na banda de passagem $A_p = \pm 1$ dB;
- d) atenuação mínima na banda de rejeição $A_r = 60$ dB.

Utilizando a biblioteca de computação científica “SciPy”, cria-se um programa em linguagem de programação Python para o projeto do filtro de acordo com as especificações supracitadas (Apêndice A). Para isso, utiliza-se neste trabalho um processo de janelamento (janela de Kaiser), que resulta em um sistema de ordem 97, com os coeficientes mostrados na Figura 38. A Figura 39 mostra a magnitude da resposta em frequência do filtro obtido, juntamente com o gabarito especificado. Pode-se notar que o filtro projetado atende aos requisitos do gabarito.

Aproveitando a característica de não-recursividade dos filtros FIR, o filtro anti-recobrimento (de ordem $N - 1$) é implementado em conjunto com a dizimação pelo fator M , resultando na equação da forma direta modificada (3.19), reduzindo assim o número de operações necessárias por um fator $1/M$.

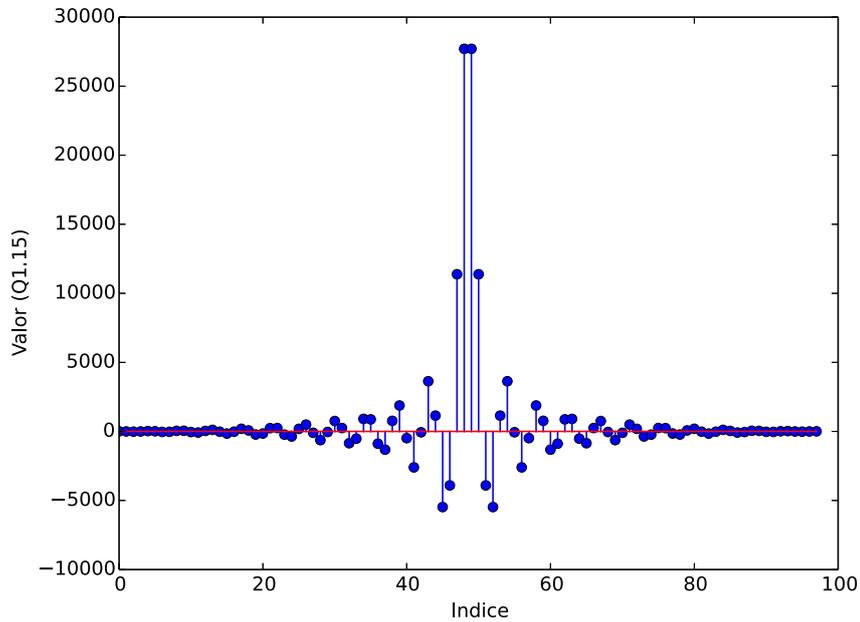
$$y[Mn] = \sum_{k=0}^N b_k x[(Mn) - k] \quad (3.19)$$

3.2.3.5 Protocolo CPCT

A comunicação entre um acessório e a central “Modulare+” ou “Conecta+” requer a utilização de um protocolo específico, dividido nas quatro camadas apresentadas na Figura 40.

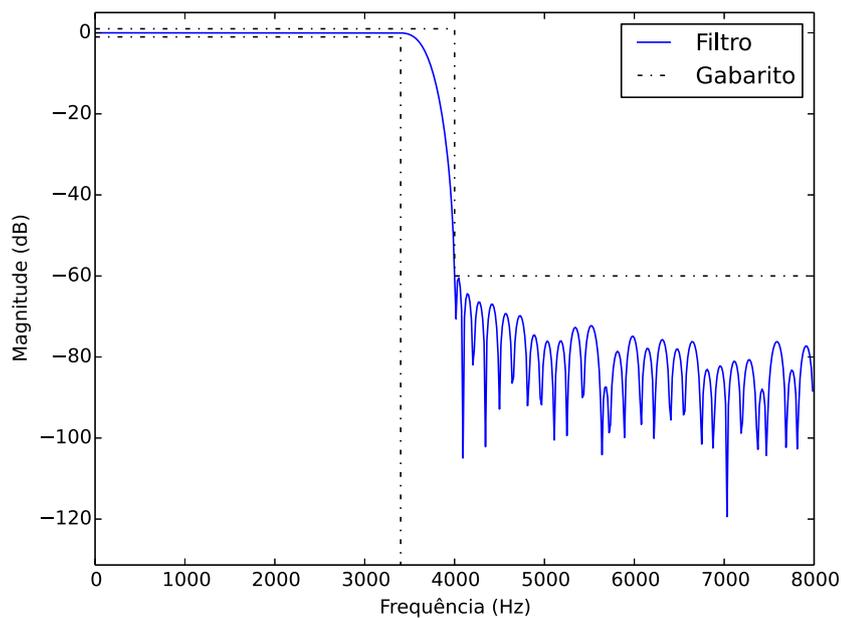
A camada inferior do protocolo, chamada de “SPI escravo” no caso dos acessórios, é responsável pela troca de quadros de 16 bits através da sinalização SPI. Além disso, ela também gerencia um sinal extra, não encontrado em um SPI padrão, chamado IRQ (Figura 8), através do qual um acessório sinaliza o intento de transmitir uma informação ou a incapacidade de receber novos dados durante um certo período. Além de utilizar o periférico SPI do LPC1759, essa camada é implementada pelo *software* através de um

Figura 38 – Coeficientes do filtro digital anti-recobrimento projetado.



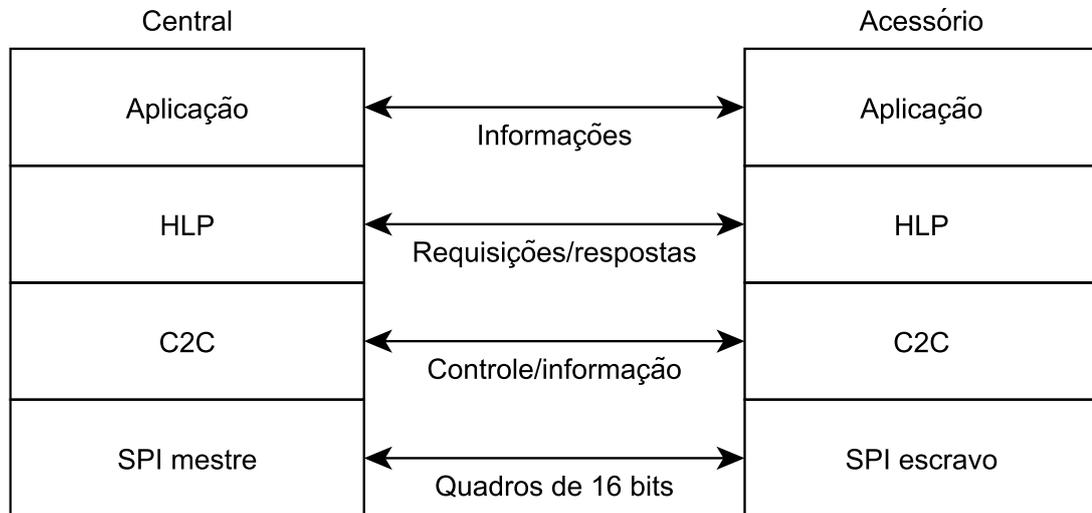
Fonte: Elaboração própria.

Figura 39 – Magnitude da resposta em frequência do filtro digital anti-recobrimento projetado.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 40 – Camadas do protocolo de comunicação entre a central e os seus acessórios.



Fonte: Elaboração própria.

bloco nomeado “*Driver SPI escravo*” (bloco 3 da Figura 23), que realiza o controle do periférico e do sinal IRQ.

Acima do “SPI escravo” encontra-se a camada de comunicação (C2C, do inglês *chip-to-chip*) entre CIs. Essa camada serve para tratar certas limitações de algumas implementações de SPI, em especial às dos microcontroladores LPC1114 e LPC1759, utilizados tanto nas centrais “Modulare+” e “Conecta+” quanto na DISA. Dentre essas limitações, está o fato de que no modo SPI escravo, esses microcontroladores não definem o que acontece com o sinal MISO se o registrador de saída não possuir novos dados para transmitir, resultando na recepção, pelo mestre, de um quadro inválido que não é distinguível de um quadro válido. Para superar esse problema, o C2C acrescenta 8 bits de informações de controle para cada 8 bits de dados úteis, reduzindo assim pela metade a capacidade de transmissão relativa à uma determinada taxa de bit/s, mas ao final, ganhando em desempenho por possibilitar a utilização bidirecional do barramento a taxas maiores.

A seguir, a camada de protocolo de alto nível (HLP, do inglês *high level protocol*) oferece como serviços a garantia de entrega e o controle de erros, através da adição de um cabeçalho contendo, dentre outras informações, um identificador de transação e um código de detecção de erros do tipo *cyclic redundancy check* (CRC). Além disso, a camada HLP trata o envio de uma informação na forma de uma requisição obrigatoriamente correspondida por

uma resposta. Dependendo do tipo de resposta, uma ação pode ser tomada pela própria camada HLP como, por exemplo, a retransmissão de uma requisição cuja resposta indique erro na validação do CRC. Em outros casos, a resposta é encaminhada para a próxima camada e a transação requisição/resposta é dada como encerrada.

Finalmente, a camada mais abstrata do protocolo é a camada de aplicação. Através dela, informações são trocadas entre a central e um acessório, sendo que qualquer uma das partes pode tomar a iniciativa de enviar uma informação. Todas as informações trocadas possuem um código de identificação do tipo de mensagem e podem ainda conter informações adicionais na forma de parâmetros. Por exemplo, o comando enviado pela central para que a DISA inicie a reprodução de uma mensagem de atendimento automático possui o código de identificação decimal 19 e dois parâmetros adicionais: o código da mensagem e a identificação da linha na qual a mensagem deve ser reproduzida. A especificação da central define nove mensagens comuns a todos os acessórios, sendo as cinco primeiras de implementação obrigatória e que fazem parte do reconhecimento do acessório. São elas:

1. mensagem de pedido de identificação, enviada pela central e obrigatoriamente respondida por um acessório, que informa o código de reconhecimento do tipo de acessório;
2. mensagem de pedido de reinício, enviada pela central e obrigatoriamente respondida por um acessório, que deve interromper imediatamente suas ações e voltar ao seu estado inicial de funcionamento;
3. mensagem de liberação de funcionamento, enviada pela central após identificar um acessório para que este inicie o seu funcionamento;
4. mensagem de preparação para atualização de *software*, enviada pela central antes de iniciar a atualização do *software* de um acessório, através da qual o *boot loader* da DISA inicia a limpeza da memória *flash* do microcontrolador utilizada pelo *software* Aplicação;
5. mensagem de dados para atualização de *software*, enviada pela central para cada novo bloco de dados de *software* a ser gravado em um acessório e implementado no *boot loader* da DISA para gravar tal bloco na memória *flash* do microcontrolador;
6. mensagem de validação de *software*, enviada pela central para verificar se é necessário atualizar o *software* do acessório e também verificar se ele foi gravado corretamente. Também por meio dessa mensagem, o *boot loader* da DISA efetua o cálculo da assinatura da aplicação recém

atualizada e a armazena no final da memória *flash*, para verificações futuras;

7. mensagem de leitura de memória, enviada pela central com o objetivo de investigar algum comportamento anômalo do acessório. Tal mensagem não é implementada pela DISA, que responde enviando dados aleatórios;
8. mensagem de pedido de estado, enviada periodicamente pela central para verificar erros de execução dos acessórios. Deve ser obrigatoriamente respondida pelo acessório. Caso contrário, a central enviará um pedido de reinício;
9. mensagem de aviso de religamento, enviada pelo acessório como um pedido de atenção, indicando que o acessório foi recém-iniciado e aguarda uma mensagem de liberação de funcionamento.

Além dessas, dezesseis novas mensagens são definidas para o funcionamento da DISA, sendo as doze primeiras enviadas pela central e as restantes enviadas pela DISA para a central:

1. mensagem de pedido de assinatura de mensagem de atendimento automático, enviada pelo *software* Atualizador de mensagens e respondida pela DISA com o valor, calculado através do MISR, da assinatura de uma mensagem, para que o Atualizador determine a necessidade de atualizá-la;
2. mensagem de preparação para envio de mensagem de atendimento automático, enviada pelo *software* Atualizador de mensagens após ter determinado que uma mensagem de atendimento automático deve ser atualizada;
3. mensagem de envio de dados de mensagem de atendimento automático, enviada pelo *software* Atualizador de mensagens para cada bloco de dados da mensagem de atendimento automático a ser gravada na DISA;
4. mensagem de pedido de reprodução de mensagem de atendimento automático, enviada pela central no momento em que a DISA deve iniciar a reprodução de uma mensagem, juntamente com o código da mensagem e a identificação da linha na qual a mensagem deve ser reproduzida;
5. mensagem de pedido de interrupção de mensagem de atendimento automático, enviada pela central quando for necessário interromper a reprodução de uma mensagem de uma determinada linha;

6. mensagem de pedido de detecção de sinal DTMF, enviada pela central para que a DISA inicie a tarefa de detecção DTMF de uma determinada linha;
7. mensagem de interrupção de detecção de sinal DTMF, enviada pela central quando não for mais necessário que a DISA detecte sinais DTMF em uma linha;
8. mensagem de preparação para gravação de mensagem de atendimento automático, enviada pela central antes do momento em que um ramal efetua o comando de gravação, para que a DISA selecione o pino (ENL1 ou ENL2) com o sinal a ser gravado;
9. mensagem de início de gravação de mensagem de atendimento automático, enviada pela central após ela ter recebido a confirmação do comando de preparação, através da qual a DISA inicia a gravação do sinal selecionado na memória *flash*;
10. mensagem de término de gravação de mensagem de atendimento automático, enviada pela central quando for necessário interromper a gravação de uma mensagem;
11. mensagem de cancelamento de gravação de mensagem de atendimento automático, enviada pela central para que a DISA cancele a gravação atual e a marque como inválida, recuperando a gravação anterior, caso exista;
12. mensagem de gravação de assinatura de mensagem de atendimento automático, enviada pelo *software* Atualizador de mensagens após o envio do último bloco de dados de uma mensagem, contendo a assinatura que deve ser associada à mensagem gravada;
13. mensagem de aviso de fim de mensagem de atendimento automático, enviada pela DISA para informar à central o fim da mensagem que estava sendo reproduzida em determinada linha;
14. mensagem de aviso de detecção DTMF, enviada pela DISA após reconhecer um sinal DTMF, juntamente com o dígito detectado;
15. mensagem de aviso de DISA pronta para gravação, enviada pela DISA no momento em que ela estiver pronta para iniciar a gravação de uma nova mensagem de atendimento automático, após ter recebido a mensagem de preparação para gravação;

16. mensagem de aviso de fim de gravação, enviada pela DISA se, durante uma gravação, a capacidade de memória reservada para a gravação dessa mensagem de atendimento automático for excedida.

3.2.4 Atualizador de mensagens

Conforme visto anteriormente, o *software* Atualizador de mensagens é um programa executado pelo *boot loader* da central, responsável por transferir novas mensagens de atendimento automático de um *pendrive* para a DISA. Seu funcionamento segue o fluxograma da Figura 41.

A primeira tarefa executada pelo Atualizador de mensagens é verificar se o *pendrive* conectado na central possui um dos arquivos definidos como arquivo de mensagem personalizada da DISA: “msdia.wav” ou “msnot.wav” (bloco 1). Esses arquivos WAVE devem possuir um formato específico, igual ao utilizado pelos dados de mensagem gravados na memória *flash* da DISA, ou seja, devem ser codificados no formato LPCM, com 16 bits por amostra à taxa de 8.000 Hz. Se nenhum dos arquivos for encontrado, o programa é encerrado e a central volta a executar o seu *boot loader*. Caso contrário, o Atualizador de mensagens continua em execução.

Se pelo menos um dos arquivos de atualização for encontrado, o *software* inicia a busca por um acessório DISA instalado. Tal busca envolve ligar cada uma das posições de acessórios da central, verificar se existe um acessório conectado e, em caso positivo, verificar se a identificação desse acessório corresponde com a da DISA (blocos 4, 5, 7, 8, 9 e 10).

Uma vez encontrado um acessório do tipo DISA, o *software* envia o comando para que a DISA inicie a execução do *software* Aplicação (bloco 12), uma vez que, conforme visto anteriormente, o *boot loader* da DISA não é capaz de gerenciar a memória *flash* do acessório. Em seguida, para não realizar uma transferência de dados desnecessária, a assinatura de um arquivo no *pendrive* e a assinatura da sua mensagem correspondente na memória *flash* são comparadas (blocos 15 e 18). Se houver necessidade de atualizar a mensagem, seu conteúdo é transferido em blocos de 512 bytes (blocos 13, 16 e 17).

4 RESULTADOS

4.1 Reprodutor de áudio

A tarefa de reprodução de áudio na DISA é verificada neste trabalho em três etapas distintas. Na primeira etapa, antes da integração com o sistema de arquivos, o conversor DAC é testado com um sinal constante, com razão cíclica $D = 0,5$. Na segunda etapa, o reprodutor de áudio é integrado com o sistema de arquivos e um arquivo de mensagem personalizada, gerado através do *software* Audacity e contendo um sinal de 1 kHz, é gravado na memória *flash* por meio de um *pendrive*. Após isso, o arquivo é reproduzido em uma linha da central. Por último, as mensagens pré-gravadas são reproduzidas e avaliadas. Todas as figuras deste capítulo são obtidas utilizando-se um osciloscópio Tektronix, modelo TDS 2012C¹.

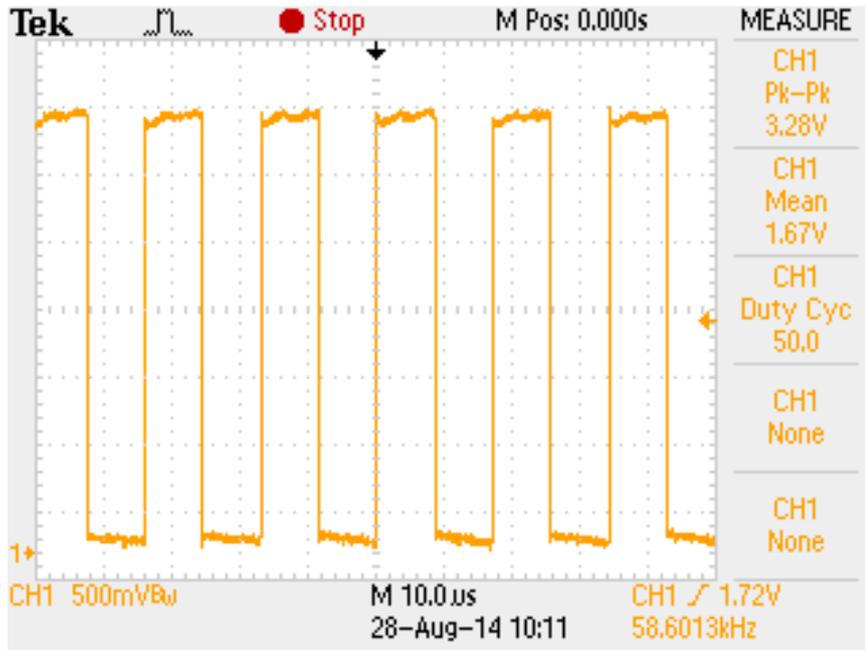
A Figura 42 mostra a forma de onda do sinal PWM com largura constante. Nela pode-se verificar a presença do sinal da portadora, com frequência $f_c = 58,6013$ kHz próxima à calculada (diferença de 7,55 Hz ou 0,013 %) e também a razão cíclica D , indicada por *Duty Cyc* na tela do osciloscópio. A análise espectral desse mesmo sinal é vista na Figura 43, que mostra que a forma de onda da Figura 42 é composta pela senóide de frequência f_c e por um número de harmônicas que tende ao infinito.

Com a modulação da portadora através do sinal modulante de 1 kHz, reproduzido a partir da memória *flash*, é obtido o gráfico de análise espectral mostrado na Figura 44. Através dele, pode-se verificar a presença dominante do sinal modulante e também da primeira harmônica da portadora, em conjunto com sua banda lateral. Também podem ser vistos picos em 7 e 9 kHz, 15 e 17 kHz e também em 23 e 25 kHz, atribuídos à interpolação de ordem zero realizada no sinal modulante, gravado à taxa de 8 kHz e reproduzido pelo PWM com taxa de 58,59375 kHz. Com relação ao nível do ruído de fundo observável na figura, este é resultado do recobrimento do sinal pelas infinitas harmônicas da frequência portadora (e suas bandas laterais) que, como pode ser visto na Figura 43, ainda possuem amplitude considerável na frequência de Nyquist em que o sinal foi amostrado.

A mesma reprodução também é capturada após o filtro passa-baixas. O seu espectro é apresentado na Figura 45, de onde pode se ver que, com a

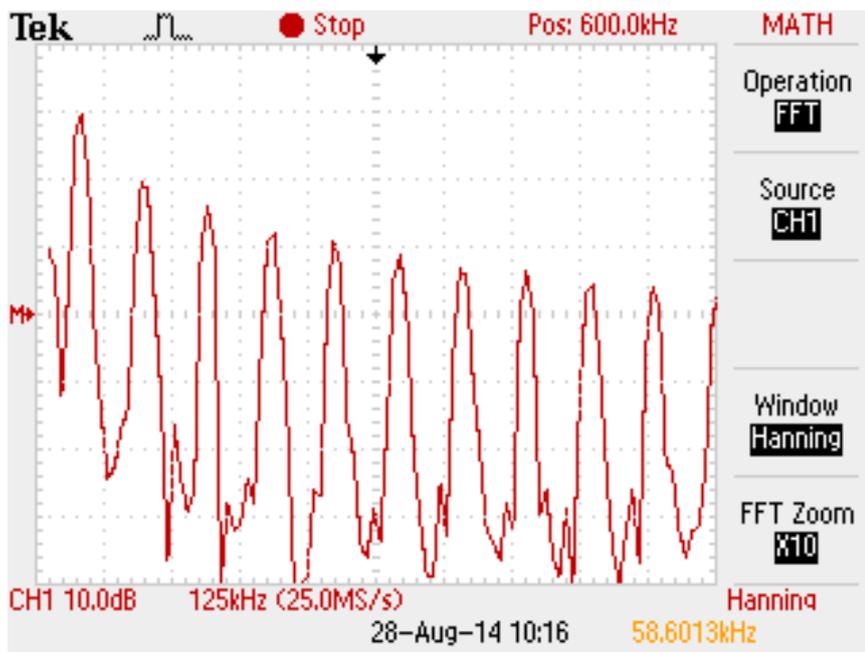
¹ O osciloscópio Tektronix TDS 2012C é capaz de amostrar sinais com 8 bits de resolução à taxa de 2 GHz, com erro de 50 ppm em sua base de tempo.

Figura 42 – Forma de onda de uma saída PWM com razão cíclica $D = 0,5$.



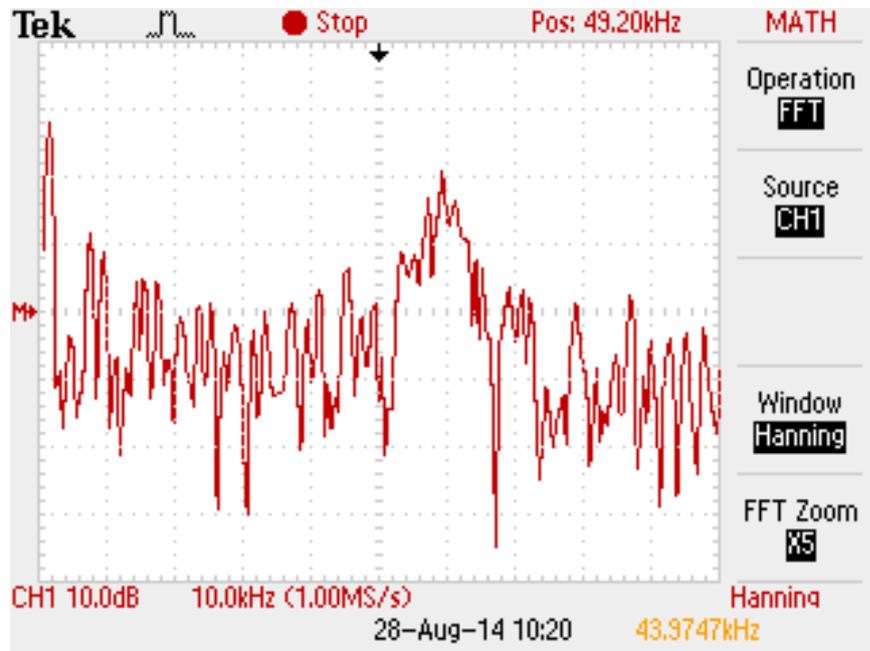
Fonte: Elaboração própria.

Figura 43 – Análise espectral de uma saída PWM com razão cíclica $D = 0,5$.



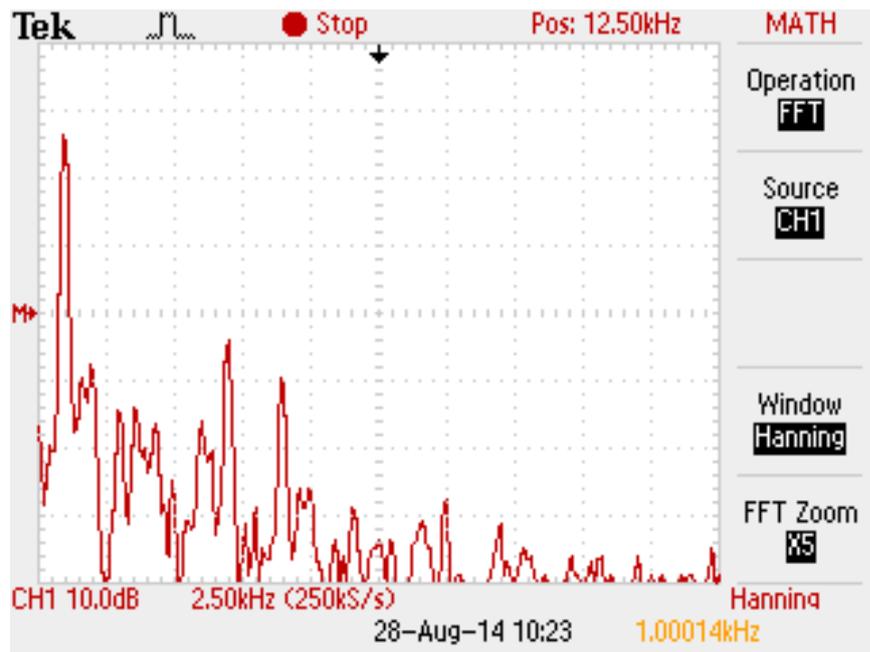
Fonte: Elaboração própria.

Figura 44 – Análise espectral de uma saída PWM modulada por um sinal de 1 kHz amostrado à taxa de 8 kHz.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 45 – Análise espectral na saída do filtro passa-baixas de uma saída PWM modulada por um sinal de 1 kHz amostrado à taxa de 8 kHz.

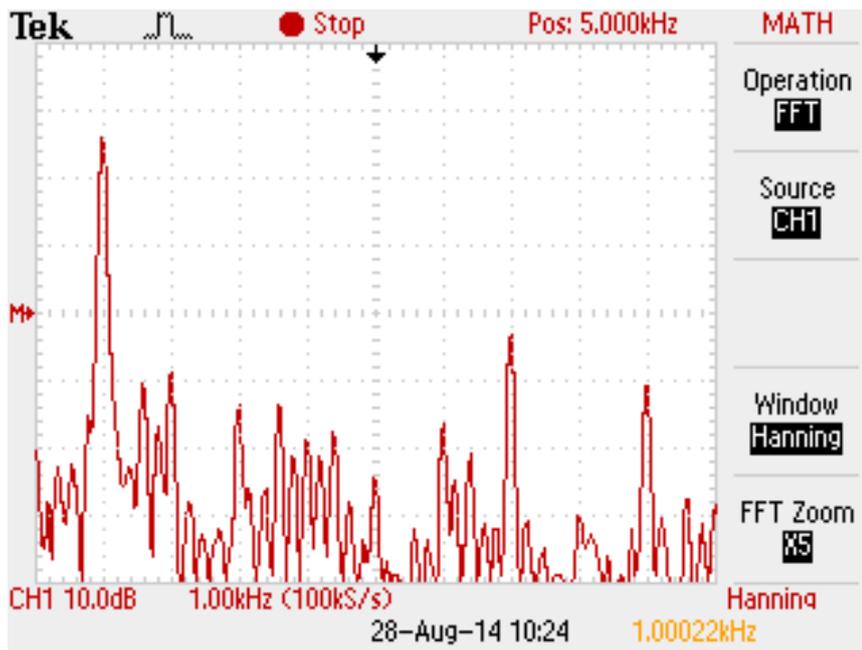


Fonte: Elaboração própria.

aplicação do filtro, consegue-se limitar a banda do sinal em torno de 20 kHz, eliminando completamente o efeito da portadora e da banda lateral. Restam ainda os artefatos relacionados à interpolação do sinal, embora um pouco atenuados em função de estarem na banda de rejeição do filtro. Vê-se também que algumas harmônicas do sinal modulante, conforme previsto na Subseção 3.2.3.2.1, podem ser melhor examinadas através da Figura 46, em que a frequência de amostragem é reduzida em 2/5. Finalmente, na Figura 47, é apresentada a forma de onda desse sinal.

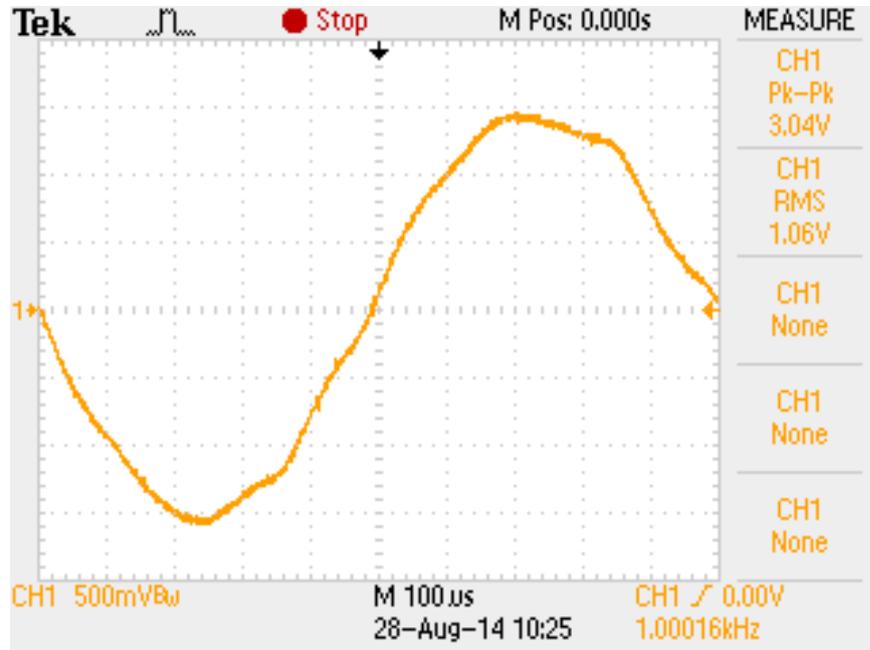
Por último, as mensagens de atendimento automático pré-gravadas são avaliadas qualitativamente após serem reproduzidas em uma linha telefônica simulada por meio de um ramal da própria central, conforme mostra o diagrama da Figura 48, através do qual uma chamada realizada pelo ramal 20 para o 27 acarreta na sinalização de uma chamada entrante na linha 1. É verificado pelos membros da equipe de desenvolvimento das centrais “Modulare+” e “Conecta+” que as mensagens são transmitidas com clareza, indistinguíveis da reprodução das mesmas mensagens feitas por um microcomputador.

Figura 46 – Detalhe da análise espectral na saída do filtro passa-baixas de uma saída PWM modulada por um sinal de 1 kHz amostrado à taxa de 8 kHz.



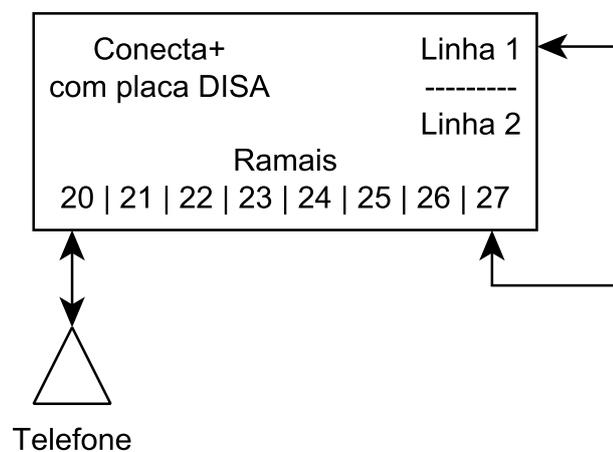
Fonte: Elaboração própria.

Figura 47 – Forma de onda na saída do filtro passa-baixas de uma saída PWM modulada por um sinal de 1 kHz amostrado à taxa de 8 kHz.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 48 – Diagrama de conexão da central para simular uma chamada recebida pela linha telefônica.



Fonte: Elaboração própria.

4.2 Gravador de áudio

A avaliação da gravação de mensagens através de um ramal da central é realizada através de quatro experimentos. Nos três primeiros, a saída de áudio de um microcomputador é conectada na entrada ENL2 da DISA e o *software* Audacity é utilizado para gerar os sinais de teste de gravação, cujas amplitudes são ajustadas para que o sinal não ultrapassasse 3 V de pico a pico. No último, a mensagem de atendimento automático é ditada diretamente no ramal. Em todos os casos, as gravações são reproduzidas na linha telefônica conforme a Figura 48.

O primeiro experimento realizado consiste em gravar um tom puro de 1 kHz gerado pelo Audacity. Ao se reproduzir tal sinal na linha telefônica, obtém-se o resultado apresentado na Figura 49, compatível com o resultado mostrado na Figura 46, obtido a partir da reprodução de um tom puro de 1 kHz gravado à partir de um *pendrive*.

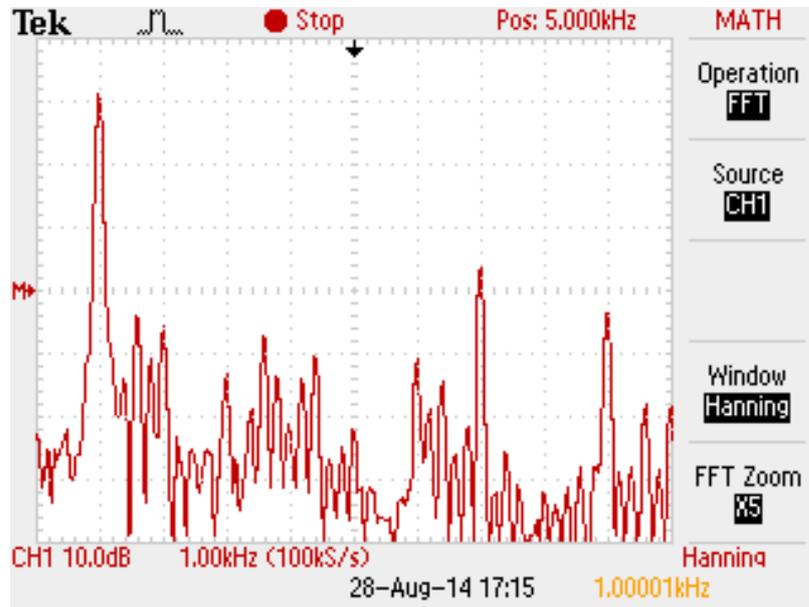
Em seguida, com o objetivo de avaliar o filtro digital anti-recobrimento projetado, gera-se um sinal composto por dois tons puros de 1 kHz e 4,1 kHz, sendo este com frequência acima do limite da banda de rejeição do filtro anti-recobrimento. Tal sinal é então gravado na DISA por duas vezes, em uma delas com o filtro desabilitado. A Figura 50 mostra o resultado da reprodução do sinal com o filtro desabilitado, de onde se nota a ocorrência do fenômeno do recobrimento ocasionado pela componente de 4,1 kHz em 3,9 kHz. Com o filtro habilitado, tanto o recobrimento quanto o tom de 4,1 kHz atingem valores insignificantes, como pode ser visto na Figura 51.

Por último, são realizadas gravações de mensagens através de um aparelho telefônico comum, em que frases são ditadas a fim de verificar se a mensagem reproduzida permanece inteligível. Nesse teste é utilizado um aparelho telefônico modelo Pleno da Intelbras, conectado na central através de uma linha artificial de transmissão (modelo “LAT 7,5-80” do fabricante Fone-Mat S.A), que simula distâncias de transmissão entre 0,5 e 7,5 km (com passo de 0,5 km) adicionando 280 Ω e 50 nF por quilômetro. Até o alcance máximo dos ramais da central (2,5 km), a equipe de desenvolvimento das centrais “Modulare+” e “Conecta+” considerou que não é possível notar diferença entre as mensagens gravadas pelo ramal e através do *pendrive*.

4.3 Detecção DTMF

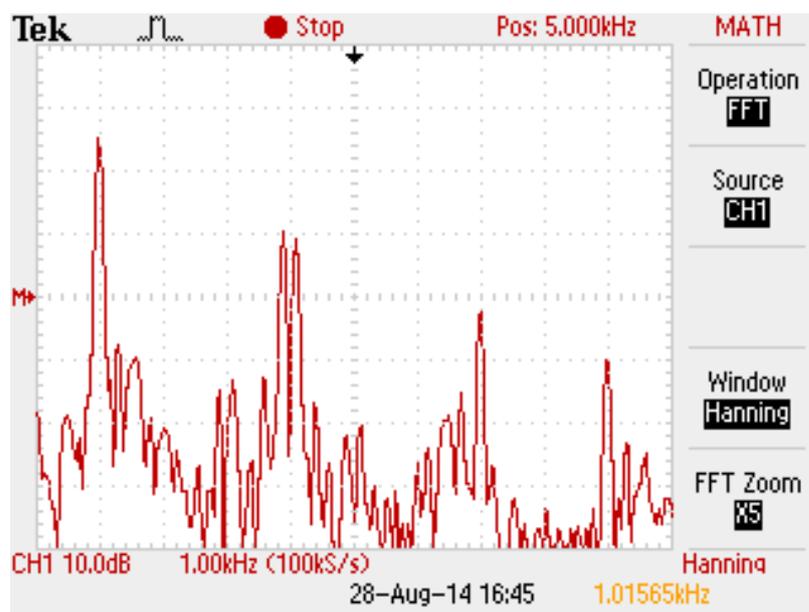
Para avaliar o desempenho da DISA em relação à detecção de sinais DTMF, são realizados os testes descritos em Mitel (1989), que consistem na reprodução de dois arquivos de áudio seguidos da análise dos resultados. O

Figura 49 – Análise espectral do sinal reproduzido a partir da gravação, através de um ramal da central, de um tom puro de 1 kHz.



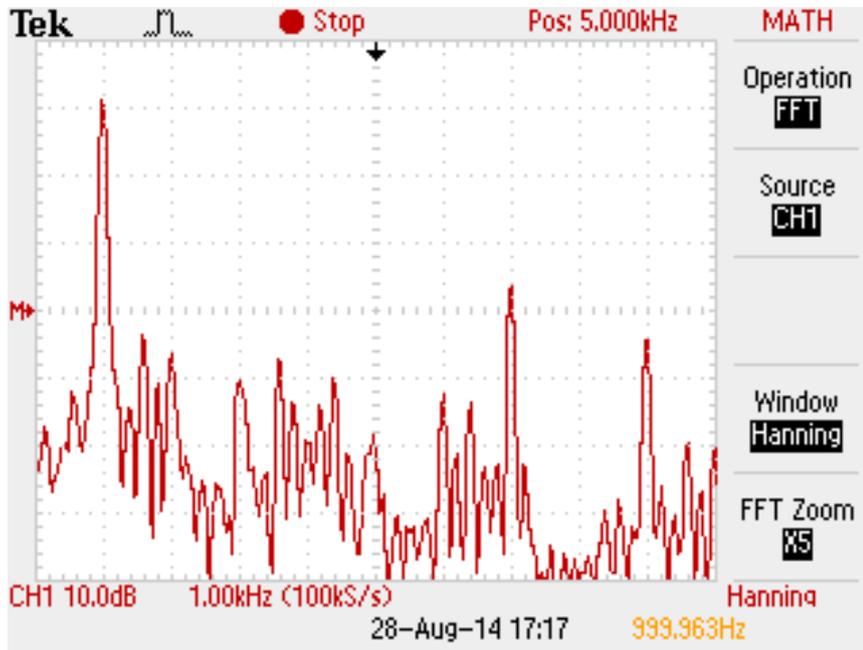
Fonte: Elaboração própria.

Figura 50 – Análise espectral do sinal reproduzido a partir da gravação, através de um ramal da central, de um sinal composto por tons puros de 1 kHz e 4,1 kHz, com o filtro digital anti-recobrimento desabilitado.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 51 – Análise espectral do sinal reproduzido a partir da gravação, através de um ramal da central, de um sinal composto por tons puros de 1 kHz e 4,1 kHz, com o filtro digital anti-recobrimento habilitado.



Fonte: Elaboração própria.

primeiro arquivo é formado por uma sequência de seis testes, com o objetivo de validar a detecção DTMF em condições variadas, ao passo que o segundo contém trinta minutos de conversas gravadas, para avaliar a detecção em relação à imunidade à voz. No início de ambos, um tom puro de 1 kHz com duração de um minuto é apresentado, e deve ser utilizado para o ajuste do volume da reprodução, tal que a potência desse tom seja igual a -3 dBm para uma impedância de 600Ω . Para agilizar o procedimento do teste, o *software* da DISA é aqui alterado, de modo que a detecção DTMF permaneça sempre habilitada na linha 1.

4.3.1 Teste de decodificação

O primeiro teste do primeiro arquivo, chamado teste de decodificação, consiste em simular os dezesseis pares de senóides do código DTMF e verificar se os símbolos são corretamente identificados, de acordo com o Quadro 2. Cada símbolo é enviado 10 vezes, com duração de 50 ms por símbolo (duração mínima estipulada pelas normas da ANATEL) e potência total de -3 dBm (-6 dBm por componente). Na realização do teste, a DISA obteve índice de sucesso de 100 %.

4.3.2 Teste de tolerância das frequências do sinal DTMF

Nesse teste, os símbolos 1, 5, 9 e D são simulados 160 vezes cada um, em quatro sessões nas quais 40 pulsos são emitidos com duração de 50 ms e potência total de -17 dBm (-20 dBm por componente). Na primeira sessão, os pulsos são emitidos com a frequência do grupo alto (H) com desvio nulo em relação à sua frequência nominal, ao passo que a frequência do grupo baixo (L) é emitida no primeiro pulso com desvio de $0,1\%$, aumentando $0,1\%$ em cada pulso. Na sessão seguinte, H continua com desvio nulo e L inicia com desvio de $-0,1\%$, somando $-0,1\%$ em cada pulso. Nas terceira e quarta sessões, L é emitido com desvio nulo ao passo que H varia de $0,1$ a $4,0\%$ na terceira sessão e de $-0,1$ a $-4,0\%$ na quarta sessão. Os resultados desse conjunto de testes estão compilados na Tabela 5, onde se observa que nenhuma frequência com desvio de até $1,6\%$ deixa de ser identificada, ao passo que frequências com desvios acima de $3,0\%$ não são reconhecidas.

4.3.3 Teste de *twist*

Nesse teste, os símbolos 1, 5, 9, e D são emitidos com duração de 50 ms em duas sessões com 200 pulsos cada. Em uma delas, a potência da componente de frequência do grupo alto é mantida em -6 dBm, ao passo que a outra componente inicia em -6 dBm e termina com -26 dBm, reduzindo $0,1$ dB por pulso. Na outra sessão, a componente de frequência do grupo baixo é mantida em -6 dBm, ao passo que a outra componente reduz de -6 dBm para -26 dBm. Os resultados desse conjunto de testes estão compilados na Tabela 6, mostrando que os valores do *twist* direto e reverso permitidos estão próximos dos valores especificados na Subseção 3.2.3.3, com erro máximo de

Tabela 5 – Resultados do teste de tolerância das frequências do sinal DTMF.

Frequência (Hz)	Desvio mínimo (%)	Desvio máximo (%)
697	3,0	2,4
770	2,3	3,0
852	3,0	2,8
941	2,8	2,8
1.209	2,3	2,1
1.336	1,7	2,0
1.477	1,7	1,7
1.633	1,6	1,6

Fonte: Elaboração própria.

0,1 dB.

4.3.4 Teste de alcance dinâmico

Nesse teste, são emitidos 35 pulsos com o símbolo 1, com duração de 50 ms, iniciando com potência total de -3 dBm (-6 dBm por componente) e reduzindo em 1 dB por pulso. Na sua realização, são identificados 33 pulsos, resultando em nível mínimo de -36 dBm para identificar o sinal.

4.3.5 Teste de duração mínima

Nesse teste, são emitidos 400 pulsos com o símbolo 1, com potência total de -3 dBm e duração inicial de 49 ms, reduzindo 0,1 ms por pulso. Na sua realização, são identificados 199 pulsos, resultando em uma duração mínima de 30,1 ms.

4.3.6 Teste de aceitação de ruído

Nesse teste, o símbolo 1 é transmitido 1000 vezes com duração de 50 ms e potência total de -3 dBm em conjunto com um ruído branco, em três sessões distintas: com SNRs de 24, 18 e 12 dB. Em nenhuma das três sessões há falha na detecção, resultando em um nível de aceitação de ruído menor que 12 dB.

4.3.7 Teste de imunidade à voz

Segundo Mitel (1989), em um equipamento com um nível aceitável de imunidade à voz, a reprodução dos trinta minutos de conversas gravadas contidas nesse arquivo deve resultar em menos de 30 registros de detecções falsas. Na DISA, tal teste é repetido por cinco vezes, obtendo como resultado zero detecções em 60 % dos casos e apenas uma detecção nos 40 % restantes,

Tabela 6 – Resultados do teste de *twist*.

Símbolo	<i>Twist</i> direto (dB)	<i>Twist</i> reverso (dB)
1	8,1	3,9
5	7,9	3,9
9	7,9	4,0
D	7,9	4,0

Fonte: Elaboração própria.

indicando que o equipamento apresenta um nível aceitável de imunidade à VOZ.

4.3.8 Verificação de conformidade com as normas da ANATEL

Na Resolução 473 da ANATEL, os testes aplicados na detecção da sinalização DTMF verificam o desempenho do equipamento quanto à sua capacidade de identificar a sinalização em função da variação da potência total, das frequências e da duração. Em relação à potência, é definido que o equipamento deve identificar um sinal DTMF cuja potência esteja entre -3 e -25 dBm (inclusive) e que sinais com potências iguais ou inferiores a -50 dBm não devem ser identificados. De acordo com o teste realizado na Subseção 4.3.4, esse requisito é atendido, pois a DISA demonstra ser capaz de reconhecer sinais com até -36 dBm de potência. Em relação à variação das frequências, a ANATEL define que o equipamento deve aceitar, pelo menos, $\pm 1,5\%$ de variação na frequência nominal (do grupo alto ou do baixo), mas que a partir de $\pm 3,5\%$, o sinal não pode ser reconhecido. Na Subseção 4.3.2, verificou-se que, nos casos mais críticos, a DISA é capaz de tolerar uma variação de $1,6\%$ e que a partir de $3,1\%$, nenhuma frequência é reconhecida. Por último, a duração mínima de um sinal que um equipamento deve identificar é de 50 ms, não podendo aceitar sinais com duração igual ou inferior a 10 ms. No teste realizado na Subseção 4.3.5, verifica-se que a duração mínima suportada pela DISA é de $30,1$ ms, dentro, portanto, do limite normatizado. A Resolução 473 da ANATEL também especifica que a sinalização DTMF gerada por um aparelho telefônico deve possuir SNR acima de 20 dB. Nesse quesito, o teste realizado na Subseção 4.3.6 mostra que a DISA é capaz de identificar os sinais DTMF emitidos por qualquer aparelho telefônico que esteja de acordo com a norma, pois ela apresenta tolerância a SNRs de pelo menos 12 dB.

4.4 Tempos de execução

A última avaliação realizada tem como objetivo verificar a habilidade do *software* de atender os requisitos de tempo real do sistema. Para tal, o pior tempo de execução (WCET, do inglês *worst case execution time*) dos três processos considerados mais críticos — detecção DTMF, reprodução de mensagem e gravação de mensagem — são avaliados. Para medir cada WCET, altera-se o *software* de modo que o processo medido percorra seu caminho mais crítico (por exemplo, verifica-se todas as condições da detecção DTMF) e também para que uma saída digital seja ativada no início do seu processamento e desativada ao seu final. Tal saída é aqui conectada em um

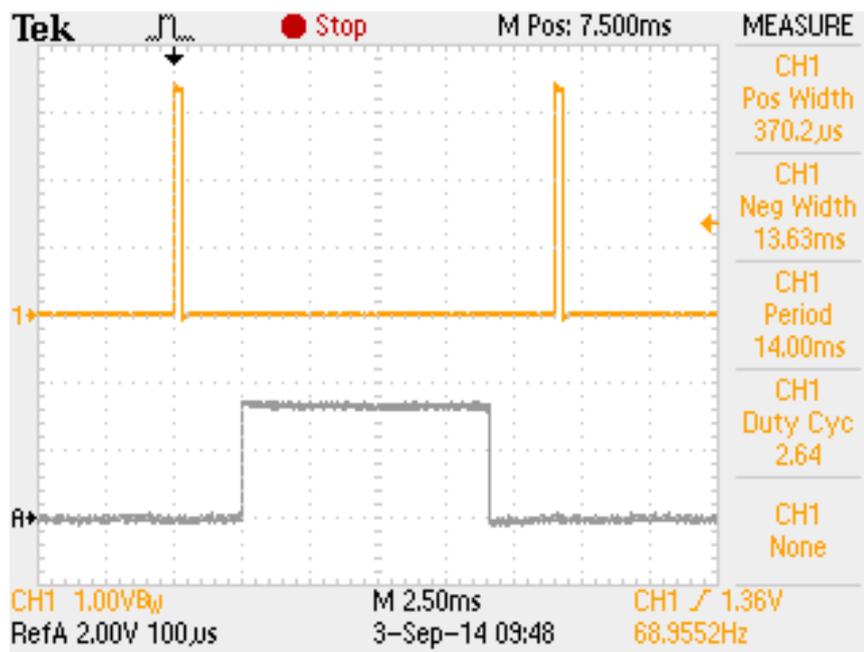
osciloscópio Tektronix, modelo TDS 2012C, por meio do qual a largura e a periodicidade dos pulsos são determinados.

O resultado da medição do WCET para a detecção DTMF em uma linha é mostrado na Figura 52. A forma de onda da parte superior da figura mostra a periodicidade da detecção, ao passo que a forma de onda da parte inferior apresenta de forma detalhada o tempo de execução do processo. Através das medições apresentadas pelo osciloscópio, determina-se que a detecção DTMF de cada linha ocupa o microcontrolador durante 370,2 μ s a cada 14 ms, ou seja, uma taxa de ocupação de 2,64 %.

Na Figura 53, é apresentada a medição do WCET referente ao processo de reprodução de mensagens em uma linha. Novamente, verificam-se duas formas de onda: a superior mostrando a periodicidade e a inferior detalhando a duração do processamento. Nesse caso, o WCET vale 1,58 ms, representando uma taxa de ocupação do processamento de 4,94 %.

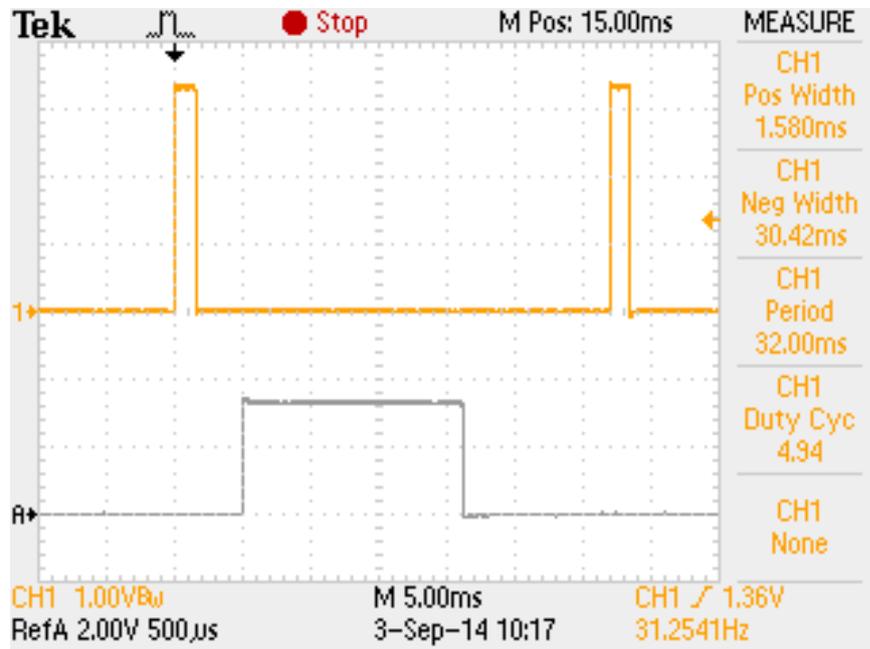
Com relação à gravação de mensagens, é obtido um WCET de 4,79 ms (aproximadamente 30 % de ocupação do processador), como pode ser visto na Figura 54.

Figura 52 – Medição do pior tempo de execução (WCET) da detecção DTMF.



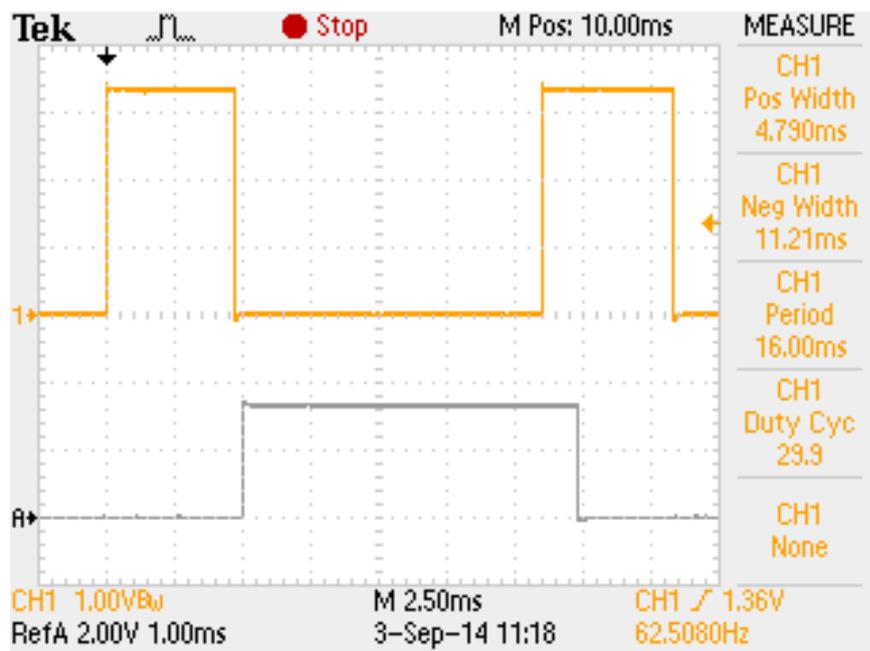
Fonte: Elaboração própria.

Figura 53 – Medição do pior tempo de execução (WCET) da reprodução de mensagens.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 54 – Medição do pior tempo de execução (WCET) da gravação de mensagens.



Fonte: Elaboração própria.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou o desenvolvimento do *software* da nova placa de atendimento automático, conhecida como DISA (do inglês *direct inward system access*), que é um acessório das novas centrais privadas de comutação telefônica (CPCTs) “Modulare+” e “Conecta+” produzidas pela Intelbras, responsável por permitir que determinada CPCT atenda a uma ligação automaticamente e informe ao assinante que originou a chamada quais são os ramais existentes através de uma mensagem de atendimento automático pré-gravada. Essa nova placa DISA substituiu a DISA original das centrais “Modulare i” e “Conecta”, baseadas em CIs dedicados a funções específicas. Para as novas centrais “Modulare+” e “Conecta+”, foi proposta a nova DISA, substituindo esses CIs específicos por um microcontrolador de propósito geral, ficando a cargo do *software* desenvolvido neste trabalho a implementação das funcionalidades dos CIs substituídos. Para tal, foram levantados os seguintes requisitos: compatibilidade com as centrais “Modulare+” e “Conecta+”; capacidade de reprodução de mensagens de atendimento automático nas quatro linhas da central simultaneamente; capacidade de identificação da sinalização DTMF originada das quatro linhas da central simultaneamente; identificação do sinal DTMF durante ou após o término da reprodução de mensagens; identificação do sinal DTMF de acordo com as normas de telefonia nacionais; possibilidade de gravação de mensagens personalizadas através de um ramal da central; possibilidade de cópia de mensagens personalizadas através de um *pendrive* conectado na central; possibilidade de gravação de até duas mensagens personalizadas, cada qual com duração máxima de 30 s; possuir, de fábrica, as mesmas mensagens pré-gravadas da DISA das centrais “Modulare i” e “Conecta”; possibilidade de atualização, através de um *pendrive* conectado na central, tanto das mensagens pré-gravadas quanto do *software* embutidos na placa DISA.

A fim de atender tais requisitos, foi elaborada uma especificação de *software* por meio da descrição dos casos de uso, além de diagramas de sequência das atividades e diagramas de blocos dos componentes. Tal especificação revelou a necessidade de quatro *softwares* distintos, dois deles a serem gravados e executados no microcontrolador do acessório e os demais gravados em um *pendrive* e executados pelo microcontrolador da central. Esses quatro *softwares* foram escritos em linguagem de programação C, e o principal deles, chamado de Aplicação, é o responsável pelo controle do acessório, bem como da reprodução e gravação de mensagens e ainda da detecção da

sinalização DTMF. Para armazenar as mensagens de atendimento automático na memória *flash* do acessório, foi desenvolvido um sistema de arquivos, o qual cumpriu os requisitos estipulados e ainda manteve uma reserva de memória para usos futuros. A reprodução de mensagens foi feita através da conversão do sinal digital em analógico através da técnica de modulação por largura de pulso. Para determinar o valor da frequência da portadora, foram levados em consideração os efeitos da distorção harmônica e da banda lateral do PWM, além dos efeitos da resolução da conversão. Foi observada a necessidade do uso de um filtro digital para evitar o fenômeno do recobrimento na amostragem dos sinais para a gravação das mensagens de atendimento automático através de ramais da CPCT. O projeto de tal filtro foi realizado aplicando o método de janelamento para filtros FIR, com a utilização da janela de Kaiser. Com relação à detecção de sinais DTMF pela placa DISA, foi desenvolvido um algoritmo para identificar um sinal através da análise espectral do sinal nas oito frequências envolvidas, obtida através do algoritmo de Goertzel, seguida de uma comparação entre as amplitudes determinadas a fim de adequar a detecção às normas da ANATEL.

Para validar o *software* desenvolvido, foram realizados testes do reprodutor e do gravador de áudio, do detector DTMF e também a medição do pior tempo de execução de tais processos. Em relação ao reprodutor, foram avaliadas as características do sinal modulado assim como as do sinal filtrado pelo *hardware* durante a reprodução de um tom puro de 1 kHz, gravado na DISA através de um *pendrive*, constatando-se que a distorção causada pela portadora, por suas harmônicas e suas bandas laterais foram suficientemente atenuadas pelo filtro passa-baixas analógico. Apesar disso, tanto a distorção harmônica quanto a distorção em decorrência do recobrimento do sinal não foram completamente eliminadas. O reprodutor também foi avaliado através da reprodução das mensagens pré-gravadas em um cenário simulando o atendimento de uma chamada pela linha telefônica, verificando-se, por meio de uma análise qualitativa, a inteligibilidade das mensagens de forma indistinguível da reprodução das mesmas mensagens feitas por um microcomputador. Para a validação do detector DTMF, foram realizados testes de decodificação, tolerância das frequências, *twist*, alcance dinâmico, duração mínima, aceitação de ruído e imunidade à voz, tendo-se observado resultados satisfatórios em todos eles. Os resultados dos testes de detecção DTMF também foram analisados com relação às normas da ANATEL, verificando-se que a detecção satisfaz todos os requisitos necessários. Por fim, os tempos de execução da detecção DTMF bem como de reprodução e gravação de mensagens foram mensurados, obtendo-se uma taxa de ocupação do microcontrolador durante a reprodução de mensagens nas quatro linhas de aproximadamente 30 %, verificando-se assim o atendimento desse requisito.

Cabe ressaltar que este trabalho não teve como objetivo cumprir todos os requisitos de maneira completamente otimizada. Sendo assim, ele proporciona oportunidades para trabalhos futuros. Uma delas é o estudo da utilização de um algoritmo para compactação dos dados das mensagens de atendimento automático. Com o *software* finalizado, pode-se verificar a capacidade de processamento livre disponível e assim determinar um algoritmo cujo tempo de processamento não ultrapasse tal valor. Outro aspecto que pode ser considerado é o aumento da taxa de reprodução do sinal, visando melhorar a qualidade das mensagens, desde que a nova taxa de bits por segundo multiplicada pela duração das mensagens não ultrapasse a capacidade de armazenamento da memória *flash* e também que o microcontrolador não fique sobrecarregado com a nova taxa. Além disso, os resultados da reprodução das mensagens pelo PWM demonstraram que o filtro passa-baixas analógico não apresenta rejeição suficiente para a taxa de amostragem escolhida e, mesmo que não seja possível alterar a taxa de amostragem das mensagens na memória *flash*, pode-se buscar melhorar o sinal utilizando um outro tipo de interpolação entre essa frequência e a frequência da portadora do PWM, substituindo assim a interpolação de ordem zero empregada.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. *Regulamento para certificação e homologação de centrais privadas de comutação telefônica - CPCT: Resolução 390*. Brasília, 2004. Citado na página 38.

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. *Regulamento da interface de usuário - rede e de terminais do serviço telefônico fixo comutado: Resolução 473*. Brasília, 2007. Citado 4 vezes nas páginas 39, 40, 66 e 84.

CHANDRASHEKHAR, K. *Telecommunication and switching*. [S.l.]: Technical Publications, 2008. ISBN 9788184310986. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.

CHAPUIS, R.; JOEL, A. *100 Years of telephone switching*. [S.l.]: IOS Press, 2003. (100 Years of Telephone Switching, pt. 2). ISBN 9781586033729. Citado na página 38.

DINIZ, P.; SILVA, E. da; NETTO, S. *Processamento digital de sinais: projeto e análise de sistemas*. [S.l.]: Bookman, 2004. ISBN 9788536304182. Citado na página 41.

FAGEN, D. et al. *A history of engineering and science in the Bell system: the early years (1875-1925)*. [S.l.]: The Laboratories, 1975. (A History of Engineering and Science in the Bell System). Citado na página 37.

GOERTZEL, G. An algorithm for the evaluation of finite trigonometric series. *American Math. Monthly*, 1958. Citado na página 44.

GOLDBERG, J. M. *Signal processing for high resolution pulse width modulation based digital-to-analogue conversion*. Tese (Doutorado) — University of London, 1992. Disponível em: <https://kclpure.kcl.ac.uk/portal/files/2927175/296574.pdf>. Acesso em: 25 janeiro. 2014. Citado 2 vezes nas páginas 71 e 72.

HURDEMAN, A. *The worldwide history of telecommunications*. [S.l.]: Wiley, 2003. ISBN 9780471205050. Citado 3 vezes nas páginas 35, 37 e 38.

IBM CORPORATION AND MICROSOFT CORPORATION. *Multimedia programming interface and data specifications 1.0*. [S.l.], 1991. Citado na página 66.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. *Annex to the Constitution*. Geneva, 1992. Citado na página 35.

KUO, S.; LEE, B. *Real-time digital signal processing: implementations, application and experiments with the TMS320C55X*. [S.l.]: Wiley, 2001. (Companion website). ISBN 9780470841372. Citado na página 82.

MERCER, D. *The telephone: the life story of a technology*. [S.l.]: Greenwood Press, 2006. (Greenwood technographies). ISBN 9780313332074. Citado na página 35.

MITEL. *DTMF receiver test cassette: CM7291*. [S.l.], 1989. Citado 2 vezes nas páginas 98 e 102.

NXP. *LPC176x/5x user manual: UM10360*. [S.l.], 2013. Citado na página 72.

NXP. *NXP LPC Cortex-M3 IEC60335 class B library: AN10918*. [S.l.], 2014. Citado 2 vezes nas páginas 59 e 61.

OPPENHEIM, A.; SCHAFER, R. *Processamento em tempo discreto de sinais*. [S.l.]: Pearson Brasil, 2012. ISBN 9788581431024. Citado 4 vezes nas páginas 41, 42, 44 e 78.

PROAKIS, D. G. M. J. G. *Digital signal processing: principles, algorithms and applications*. [S.l.]: Prentice-Hall International, Inc., 1996. ISBN 0133943389. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 44.

TANEJA, H. C. *Advanced engineering mathematics: volume 2*. [S.l.]: I.K. International Publishing House Pvt. Limited, 2007. ISBN 9788189866563. Citado na página 43.

TELEBRAS. *Glossario de termos técnicos de telecomunicações*. [S.l.], 1990. Citado na página 38.

TELEPHONE, A.; DEPT, T. C. L. L. *Principles of electricity applied to telephone and telegraph work: a training course text prepared for employees of the long lines department*. [S.l.]: American Telephone and Telegraph Company, 1961. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.

APÊNDICE A – PROGRAMA PARA DETERMINAÇÃO DO FILTRO DIGITAL ANTI-RECOBRIMENTO

A Figura 55 mostra o código-fonte do programa elaborado para determinar os coeficientes do filtro passa-baixas do tipo FIR utilizado como filtro anti-recobrimento para a gravação de mensagens de atendimento automático oriundas de um ramal da central, a partir dos requisitos descritos na página 85 deste trabalho. Utiliza-se aqui a linguagem de programação Python, em conjunto com as bibliotecas de computação científica “SciPy” e “NumPy”. Na linha 27 do código-fonte, vê-se que os coeficientes do filtro são obtidos através da função “firwin”, que por sua vez utiliza o método do janelamento. Nessa mesma linha, observa-se também que é adotada a janela de Kaiser de ordem $L - 1$, sendo L dado por (A.1) e obtido no programa por meio da função “kaiserord” (linha 24).

$$L = \frac{A_r - 8}{14,36(f_r - f_p)} \quad (\text{A.1})$$

Figura 55 – Código-fonte do programa para determinação do filtro anti-recobrimento.

```
1  import numpy as np
2  from scipy import signal
3
4  # Parametros do filtro
5  # Ripple na banda de passagem
6  Ap = 1.0
7  # Atenuacao na banda de rejeicao
8  Ar = 60
9  # Final da banda de passagem
10 fp = 3400
11 # Inicio da banda de rejeicao
12 fr = 4000
13 # Frequencia de amostragem
14 fs = 16000
15
16 wp = np.true_divide(fp, fs/2)
17 wr = np.true_divide(fr, fs/2)
18 # Calcula largura da banda de transicao, em rad
19 largura = wr - wp
20 # Calcula frequencia de corte, em rad
21 wc = (wr + wp)/2.0
22
23 # Determina o comprimento da janela Kaiser
24 L = signal.kaiserord(Ar, largura)[0]
25
26 # Calcula os coeficientes do filtro
27 b = signal.firwin(L, wc, largura, window='kaiser')
28
29 # Transforma em ponto fixo Q0.15
30 q = np.round(b * (2**16)).astype(np.int16)
31 print('Ordem do filtro: {}'.format(L-1))
32 print('Coeficientes:')
33 print(repr(q))
```

Fonte: Elaboração própria.