



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA E MATEMÁTICA APLICADA
BACHARELADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO



Geração de prosódia para o português brasileiro em sistemas *text-to-speech*

Felipe Cortez de Sá

Natal-RN
Junho de 2018

Felipe Cortez de Sá

Geração de prosódia para o português brasileiro em
sistemas *text-to-speech*

Monografia de Graduação apresentada ao
Departamento de Informática e Matemática
Aplicada do Centro de Ciências Exatas e da
Terra da Universidade Federal do Rio Grande
do Norte como requisito parcial para a ob-
tenção do grau de bacharel em Ciência da
Computação.

Orientador

Carlos Augusto Prolo, doutor

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE – UFRN
DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA E MATEMÁTICA APLICADA – DIMAP

Natal-RN

Junho de 2018

Monografia de Graduação sob o título *Geração de prosódia para o português brasileiro em sistemas text-to-speech* apresentada por Felipe Cortez de Sá e aceita pelo Departamento de Informática e Matemática Aplicada do Centro de Ciências Exatas e da Terra da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, sendo aprovada por todos os membros da banca examinadora abaixo especificada:

Professor Doutor Carlos Augusto Prolo
Orientador
Departamento de Informática e Matemática Aplicada
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Professor Doutor Antônio Carlos Gay Thomé
Departamento de Informática e Matemática Aplicada
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Professora Doutora Erica Reviglio Iliovitz
Departamento de Letras
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Natal-RN, 20 de junho de 2018.

Dedicado a todo mundo

Agradecimentos

Agradeço à minha família, a Antônia, a Marc, a Prolo e a todos os meus amigos e professores.

Some few people are born without any sense of time. As consequence, their sense of place becomes heightened to an excruciating degree. They lie in tall grass and are questioned by poets and painters from all over the world. These time-deaf are beseeched to describe the precise placement of trees in the spring, the shape of snow on the Alps, the angle of sun on a church, the position of rivers, the location of moss, the pattern of birds in a flock. Yet the time-deaf are unable to speak what they know. For speech needs a sequence of words, spoken in time.

Alan Lightman, *Einstein's Dreams*

Geração de prosódia para o português brasileiro em sistemas *text-to-speech*

Autor: Felipe Cortez de Sá

Orientador(a): Professor Doutor Carlos Augusto Prolo

RESUMO

Com a cada vez mais forte presença de *smartphones* e *home assistants* no cotidiano, grandes empresas de tecnologia vêm desenvolvendo sistemas de conversação baseados em fala, denominadas *voice user interfaces*. Apesar dos avanços, é perceptível que os sistemas de síntese de voz, especialmente para o português brasileiro, deixam a desejar quanto à naturalidade da fala gerada. Um dos fatores principais que contribuem para isso é a prosódia, isto é, entoação, ritmo e acento da fala. Este trabalho investiga sistemas *text-to-speech* existentes através do estudo de seus algoritmos para síntese de voz e geração de prosódia para diversas línguas, com foco no português brasileiro. São explicitados os desafios encontrados, é feito um levantamento de modelos de análise prosódica na fonologia e propõem-se possíveis soluções para tornar a geração de voz mais próxima à humana.

Palavras-chave: text-to-speech, prosódia, voice user interfaces

Prosody generation for Brazilian Portuguese in text-to-speech systems

Author: Felipe Cortez de Sá

Advisor: Carlos Augusto Prolo, Ph.D.

ABSTRACT

With the evergrowing presence of smartphones and home assistants in our daily lives, technology companies have been developing two-way conversation systems, that is, voice user interfaces. Despite its recent improvements, text-to-speech programs still sound artificial, especially for their Brazilian Portuguese voices. A big contributing factor for that is the lack of accurate prosody, that is, pitch, length and emphasis. This thesis explores existing text-to-speech systems, especially those for which there are Brazilian Portuguese voices, focusing on their prosody generation modules. We highlight challenges of prosody generation, review prosodic analysis in the intonational phonology field and propose possible solutions for improving text-to-speech quality.

Keywords: text-to-speech, prosody, voice user interfaces

Lista de figuras

1	Arquitetura geral de sistemas TTS (adaptado de Dutoit (1997))	p. 19
2	Arquitetura para o programa da interface gráfica	p. 30
3	Editor gráfico	p. 36

Lista de tabelas

1	Regras para INTSINT	p. 25
2	Regras para DaTo	p. 25

Lista de códigos

3.1	Exemplo de arquivo de entrada para MBROLA	p. 23
3.2	Exemplo de texto anotado com SSML	p. 26
3.3	Exemplo de texto anotado com EmotionML com parâmetros discretos .	p. 26
3.4	Exemplo de texto anotado com SSML e EmotionML (adaptado de (SCHRÖDER; BURKHARDT, 2014))	p. 26
3.5	Anotações no modelo ToBI para o sistema TTS Festival	p. 27
4.1	Utilização do programa espeak e saída correspondente	p. 28
4.2	Extrato de linhas da tabela de conversão	p. 29
4.3	Utilização por linha de comandos	p. 30
A.1	Servidor	p. 35
A.2	Conversor eSpeakNG-MBROLA	p. 35
A.3	Editor gráfico	p. 39
A.4	Exemplo de resposta para <i>endpoint</i> do eSpeakNG	p. 40
A.5	Exemplo de resposta para <i>endpoint</i> do MBROLA	p. 41

Lista de abreviaturas e siglas

TTS – *text-to-speech*

INTSINT – *International Transcription System for Intonation*

HMM – *Hidden Markov Model*

SSML – *Speech Synthesis Markup Language*

XML – *eXtensible Markup Language*

W3C – *World Wide Web Consortium*

MBRPSOLA – *Multi-Band Resynthesis Pitch Synchronous Overlap and Add*

API – *Application Programming Interface*

JSON – *JavaScript Object Notation*

REST – *Representational State Transfer*

AJAX – *Asynchronous JavaScript And XML*

Lista de símbolos

f_0 (frequência fundamental da fala)

ms (milissegundos)

Hz (Hertz)

Sumário

1	Introdução	p. 16
1.1	Objetivos	p. 16
1.2	Organização do trabalho	p. 17
2	Fundamentação teórica	p. 18
2.1	Prosódia	p. 18
2.1.1	Componentes	p. 18
2.1.2	Função prosódica	p. 18
	Afetiva	p. 18
	Suprasegmental	p. 18
	Aumentativa	p. 19
2.2	Sistemas TTS	p. 19
2.2.1	Estrutura	p. 19
2.2.2	<i>Front end</i>	p. 20
2.2.2.1	Normalização de texto	p. 20
2.2.2.2	Conversão grafema-fone	p. 20
2.2.2.3	Geração de prosódia	p. 20
2.2.3	<i>Back end</i>	p. 21
	Síntese articulatória	p. 21
	Síntese por formantes	p. 21
	Síntese concatenativa	p. 21

3	Revisão da literatura	p. 22
3.1	Sistemas TTS para o português brasileiro	p. 22
	Aiuruetê (BARBOSA et al., 1999)	p. 22
	eSpeakNG (DUNN, 2006)	p. 22
	(COUTO et al., 2010)	p. 22
	LianeTTS (SERPRO, 2011)	p. 23
3.2	MBROLA	p. 23
3.2.1	Formato	p. 23
3.2.2	Modelos de análise entoacional	p. 24
	3.2.2.1 Teoria métrica-autossegmental	p. 24
	3.2.2.2 INTSINT	p. 24
	3.2.2.3 DaTo (<i>Dynamic Tones</i>)	p. 24
3.2.3	Prosódia afetiva em sistemas TTS	p. 25
	3.2.3.1 SSML	p. 25
	3.2.3.2 EmotionML	p. 26
	3.2.3.3 Anotação manual	p. 27
4	Editor de prosódia	p. 28
4.1	Implementação	p. 28
4.1.1	espeak-ng	p. 28
4.1.2	MBROLA	p. 29
4.1.3	INTSINT	p. 29
4.1.4	Editor gráfico	p. 29
	4.1.4.1 Arquitetura	p. 29
	4.1.4.2 <i>Endpoints</i>	p. 30
	[POST] /api/espeak	p. 30
	[POST] /api/mbrola	p. 30

4.1.5	Utilização	p. 30
5	Resultados	p. 31
6	Considerações finais	p. 32
6.1	Trabalhos futuros	p. 32
	Referências	p. 33
	Apêndice A – Primeiro apêndice	p. 35

1 Introdução

Interfaces humano-computador que utilizam a voz, denominadas *voice user interfaces*, antigamente vistas apenas na ficção científica, hoje são uma realidade e estão disponíveis em *smartphones* e ambientes *desktop*. De acordo com (DUTOIT, 1997; JURAFSKY; MARTIN, 2009), há uma grande área de aplicação para essas interfaces, como a acessibilidade, permitindo que deficientes visuais possam ouvir texto sem a necessidade de gravação prévia de seu conteúdo, ensino de linguagens e auxílio à pesquisa na linguística, por exemplo. Além disso, com o aumento da popularidade de sistemas embarcados, é importante investigar novas formas de interação humano-máquina, e a síntese de fala, juntamente com o seu reconhecimento computacional, permite comunicação de duas vias com esses sistemas.

Os serviços mais populares e com resultados considerados mais naturais que temos atualmente são implementações proprietárias de grandes empresas, como Siri (Apple Inc., 2011), Cortana (Microsoft Corp., 2014) e Alexa (Amazon.com, Inc., 2014). Apesar das vantagens destacadas providas por *voice user interfaces*, os serviços disponíveis sintetizam voz com resultados perceptivelmente artificiais, principalmente para a língua portuguesa. Múltiplos trabalhos (HIRSCHBERG, 2006; RAJESWARI; UMA, 2012; TAYLOR, 2009) apontam como uma das maiores causas da artificialidade a prosódia empregada, isto é, aspectos rítmicos e melódicos da fala gerada.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral propor melhorias para o módulo de prosódia afetiva para sistemas TTS com suporte ao português brasileiro através de uma revisão da área da fonologia e estado da arte de algoritmos para sistemas TTS, com atenção especial à modelagem de prosódia.

1.2 Organização do trabalho

No capítulo 2, são explicados em detalhes a arquitetura e funcionamento de sistemas TTS, destacando seus componentes principais e os algoritmos empregados em cada subsistema. Também é feita uma apresentação de conceitos da fonologia entoacional.

No capítulo 3, é feita uma revisão da literatura, realizando um levantamento dos sistemas *text-to-speech* existentes tanto para o inglês quanto para o português brasileiro e como a prosódia é modelada em cada um deles. Mostramos como trabalhos recentes abordam síntese de fala e apresentamos trabalhos existentes em análise de prosódia em um contexto não necessariamente computacional.

No capítulo 4, é descrito o sistema desenvolvido, justificando a abordagem com base na revisão da literatura. Explica-se a implementação do software, descrevendo sua arquitetura, as ferramentas e linguagens de programações utilizadas e o modo de utilização do programa.

No capítulo 5, apresentamos as conclusões feitas a partir da revisão bibliográfica e dos resultados obtidos com a implementação do módulo de prosódia para o português brasileiro.

2 Fundamentação teórica

2.1 Prosódia

2.1.1 Componentes

Dutoit (1997) descreve como parâmetros principais da prosódia *pitch*, intensidade e duração. Outros nomes para os mesmos fenômenos também são utilizados. Moraes (1998) separa as características principais da prosódia em *stress*, *accent* e *rhythm*. Como eventos prosódicos estão alinhados a sílabas ou grupos de sílabas, a prosódia é dita um fenômeno suprasegmental. Além desses componentes principais, Taylor (2009) destaca *downdrift* (declinação), isto é, a queda gradual do valor de f_0 durante um sintagma como aspecto relevante para a análise entoacional.

2.1.2 Função prosódica

Taylor (2009) argumenta que uma das dificuldades do desenvolvimento de um bom modelo de prosódia se deve à falta de consideração da função comunicativa da fala, isto é, comumente análises são feitas ignorando o contexto da intenção do locutor. Apresenta, então, três principais funções comunicativas para prosódia:

Afetiva Prosódia referente à emoção, estado mental e atitude do locutor.

Suprasegmental Quando uma mensagem é dita de maneira declarativa, sem conteúdo afetivo significante – descrita como *discourse neutral* –, ainda é possível observar variação de *pitch*, intensidade e duração. Na abordagem de Taylor (2009), essa parte da prosódia, dita suprasegmental, não é considerada conteúdo prosódico verdadeiro, mas sim um aspecto da fonética verbal. É possível ainda pensar em prosódia “real” como desvios dos parâmetros suprasegmentais.

Aumentativa Além da prosódia afetiva, é possível desviar da prosódia padrão para assegurar a comunicação efetiva de uma mensagem sem adicionar informação ao conteúdo do que está sendo dito. É usada, por exemplo, para enfatizar palavras, desambiguando uma mensagem que poderia ser interpretada de diferentes formas.

2.2 Sistemas TTS

Burnett e Shuang (2010) definem *text-to-speech* como “o processo de geração automática de fala a partir de texto ou texto anotado” (tradução nossa). São utilizados em leitores digitais, assistentes pessoais para *smartphones*, aprendizagem de linguagens, entre outros.

Sistemas TTS são compostos por múltiplos subsistemas. Como veremos na seção 3.1, algumas implementações de TTS são modulares, permitindo desenvolvimento paralelo de cada componente individual. Isso possibilita que pesquisas possam focar em melhorias de uma parte específica do sistema sem necessidade de entendimento total. Neste trabalho, por exemplo, estudamos especificamente o módulo de prosódia.

2.2.1 Estrutura

Na literatura, cada sistema TTS normalmente emprega algoritmos diferentes, resultando em múltiplas arquiteturas possíveis para conversão de texto em fala. Apesar disso, Dutoit (1997) propõe uma arquitetura geral, dividindo os sistemas em duas partes principais:

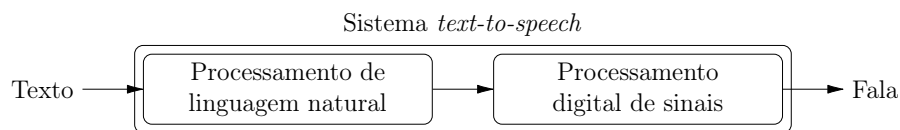


Figura 1: Arquitetura geral de sistemas TTS (adaptado de Dutoit (1997))

É comum encontrar em outros trabalhos o termo *front end* para o bloco de processamento de linguagem natural e *back end* para o bloco de processamento digital de sinais. Doravante utilizaremos essa nomenclatura.

2.2.2 *Front end*

O *front end* de um sistema TTS é responsável pela conversão do texto em sua representação em fones juntamente com parâmetros prosódicos. Em outras palavras, o bloco é responsável por determinar a pronúncia de cada palavra do texto, incluindo o contorno melódico e ritmo da fala. As definições seguintes são adaptadas de (JURAFSKY; MARTIN, 2009):

2.2.2.1 Normalização de texto

O processo de conversão de texto para fala começa com o processamento do texto a fim de gerar uma representação grafêmica. A primeira etapa da normalização é a separação em sintagmas, isto é, encontrar os limites de cada frase do texto. Frases que terminam com siglas ou abreviações podem dificultar o processo. Em “Encaminhamos o caso à deliberação de V. Exas. O prazo para resposta é de dez dias.”, por exemplo, o ponto em “Exas.” é final, não da abreviação.

Em seguida, devem-se transformar símbolos, abreviações, siglas e outras *non-standard words* em suas representações pronunciáveis. Como exemplo, “R\$ 50” deve ser lido como “cinquenta reais”.

Por último, deve ser realizada a desambiguação de homônimos heterófonos: em “Gosto de pão”, “gosto” pode ser pronunciada como “gôsto” ou “gósto”.

2.2.2.2 Conversão grafema-fone

Com o texto normalizado, é preciso converter letras, isto é, grafemas, em uma representação pronunciável, ou seja, fones. Para isso, normalmente é composto um conjunto de regras *letter-to-sound* ou letra-som, contendo as pronúncias comuns para sequências de letras, juntamente a um dicionário de pronúncia com palavras que não se adequam às regras. Para cada palavra, é feita uma busca no dicionário, e caso não seja encontrada, utilizam-se as regras.

2.2.2.3 Geração de prosódia

A partir do texto e fones gerados nas etapas anteriores, deve-se estimar *pitch*, intensidade e duração. Taylor (2009) explica que o desafio para implementação deste componente é que o texto praticamente não possui informação prosódica. Possíveis soluções para este

problema são discutidas na seção 3.2.3. (essa parte precisa ser estendida!)

2.2.3 *Back end*

Com o texto de entrada transformado em fones e informação prosódica, um *back end* é responsável por gerar uma forma de onda, ou seja, o áudio a ser reproduzido pelos alto-falantes. Jurafsky e Martin (2009), Taylor (2009) separam algoritmos de síntese em três classes:

Síntese articulatória Sintetizadores articulatórios sintetizam fala através de modelos matemáticos, aproximando o aparelho fonador por uma série de tubos abertos. Pequenas alterações nos parâmetros de entrada podem gerar uma grande variação de sons. Em contrapartida, é difícil encontrar uma correspondência entre o texto de entrada e os parâmetros necessários para o sintetizador.

Síntese por formantes A fala, quando decomposta espectralmente através da transformada de Fourier, é majoritariamente composta por quatro senoides. A frequência mais baixa é dita frequência fundamental ou f_0 , emitida pela glote. As outras três senoides f_1 , f_2 e f_3 são chamadas formantes, e são geradas pela ressonância do filtro resultante da posição da língua, queixo e lábio, alterando a intensidade de cada componente frequencial. A variação de intensidade de cada formante determina a vogal percebida. Sintetizadores por formantes são tentativas de modelagem da fala humana pela geração computacional dessas ondas. Apesar da simplicidade do modelo, além das senoides principais, há conteúdo harmônico significativo no sinal de uma fala humana. Ao ignorar-se essa parte residual, a fala sintetizada é perceptivelmente robótica.

Síntese concatenativa Devido aos problemas destacados para as outras duas abordagens, a maioria dos sistemas hodiernos utilizam síntese concatenativa. Síntese concatenativa pode trabalhar com diferentes atomicidades: nível de palavra, dífonos e fones individuais. (estender essa parte também)

3 Revisão da literatura

3.1 Sistemas TTS para o português brasileiro

Destacamos aqui sistemas TTS *open-source* com suporte ao português brasileiro desenvolvidos por ordem cronológica a fim de evidenciar a evolução das tecnologias utilizadas e as tendências para trabalhos futuros.

Aiuruetê (BARBOSA et al., 1999) Desenvolvido com o objetivo de obter um sistema TTS com fala natural sem custo computacional elevado, os autores descartam síntese articulatória e formantes justificando que o custo de desenvolvimento seria muito alto, como descrito na seção 2.2.3, optando por uma solução concatenativa. Para a prosódia, a parte de *pitch* utiliza curvas f0 associadas a frases declarativas com declinação e as durações segmentais são obtidas por redes neurais treinadas a partir de parâmetros como número de vogais e clíticos.

eSpeakNG (DUNN, 2006) Projeto *open-source* com suporte a múltiplas linguagens. É modular, permitindo *back end* com síntese por formantes ou concatenativa. Também possibilita que seja utilizado apenas o *front end*, gerando representação fonética no formato X-SAMPA (*Extended Speech Assessment Methods Phonetic Alphabet*). No seu módulo de prosódia, determina contorno f0 a partir de pontuação e tabela com regras para *pre-head*, *head*, *nucleus* e *tail*. As durações são fixas para fones diferentes e também são determinadas por uma tabela.

(COUTO et al., 2010) Foi desenvolvido com base no *framework* MaryTTS um sistema completo para português brasileiro baseado em HMMs. O projeto iniciou com uma implementação de um módulo de conversão grafema-fone LaPS-G2P (BARBOSA et al., 2003), tornando-se então um sistema completo (COUTO et al., 2010), e foi subsequentemente estendido por (COSTA et al., 2012) para funcionar de maneira *stand-alone*, isto é, ser uti-

lizado sem necessidade de instalação do *framework* MaryTTS. A prosódia é gerada pelos parâmetros das cadeias de Markov, ou seja, determinada probabilisticamente a partir do corpus de treinamento.

LianeTTS (SERPRO, 2011) Projeto da SERPRO, o LianeTTS utiliza síntese concatenativa através do programa MBROLA. Assim como o eSpeakNG, os subsistemas são baseados em regras e tabelas. O cálculo de curva f_0 é feito com base em *parts-of-speech tagging*, ou seja, atribuição de classes gramaticais a cada palavra do texto de entrada.

3.2 MBROLA

MBROLA é uma ferramenta para geração de voz baseada em síntese concatenativa por dífonos (pares de fones) desenvolvida com o objetivo de fomentar pesquisas acadêmicas em geração de prosódia (DUTOIT et al., 1996). É utilizada como *back end* para diversos sistemas TTS, como MaryTTS, Festival (BLACK; TAYLOR, 1997) e eSpeakNG, e possui três vozes disponíveis para o português brasileiro.

```
_ 150 50 150
t 70 50 125
e 125 50 75
c 70 50 125
e 125 50 75
c 70 50 125
e 116 20 232 80 300
_ 150 50 150
```

Código 3.1: Exemplo de arquivo de entrada para MBROLA

3.2.1 Formato

Como pode ser observado no código 3.1, em cada linha tem-se um fone ou um silêncio (representado pelo *underscore*) seguido por uma duração em milissegundos e, por último, um ou mais pares de porcentagem e frequência em Hertz determinando alvos para a curva f_0 . Como exemplo, na penúltima linha temos o fone e com duração de 116 ms e dois alvos para altura, 232 Hz em 20% e 300 Hz em 80%. Para sintetizar a fala, a tabela é lida sequencialmente, concatenando pares de fones pré-gravados, e é feita uma interpolação linear entre cada alvo de *pitch*. Os dífonos pré-gravados têm frequência alterada utilizando o algoritmo MBRPSOLA.

Cada voz gravada fornece uma tabela com os dífonos que podem ser utilizados. Utilizamos neste trabalho a voz br3 desenvolvida por Denis R. Costa disponível no site oficial do projeto MBROLA.

3.2.2 Modelos de análise entoacional

3.2.2.1 Teoria métrica-autossegmental

Utilizada por Moraes (2008) para analisar uma mesma frase com diferentes intenções. (falta isso)

3.2.2.2 INTSINT

Proposto por Hirst (1987) com objetivo de criar uma representação equivalente ao IPA (*International Phonetic Alphabet*) para prosódia, é um sistema de transcrição para entoação capaz de ser utilizado para analisar múltiplas línguas.

A entoação é anotada por três símbolos que definem frequências-alvo absolutas, Top (T), Mid (M) e Bottom (B), indicando respectivamente o limite superior, a base e o limite inferior para a frequência fundamental, três símbolos relativos à marcação anterior, Higher (H), Same (S) e Lower (L), e dois símbolos denominados iterativos, Upstepped (U) e Downstepped (D). Além das anotações, utilizam-se dois parâmetros fixos *key*, definido em Hertz, e *span*, definido em oitavas.

Apesar de ser inicialmente proposto como um modelo de análise, trabalhos subsequentes como (HIRST, 2007; VÉRONIS et al., 1998) utilizaram a mesma notação para sintetizar contornos f0. A tabela 3.2.2.2 detalha como cada marcação é convertida para uma frequência em Hertz para determinação de alvos f0.

O modelo INTSINT foi utilizado por Celeste e Reis (2012) e Moraes (1998) para analisar entoação para o português brasileiro.

3.2.2.3 DaTo (*Dynamic Tones*)

Apesar de o modelo ToBI ter sido utilizado para analisar o português brasileiro em diversos trabalhos, Lucente (2014) argumenta que há características perceptíveis que a notação não consegue expressar, propondo um novo modelo, DaTo, com base na entoação do português brasileiro.

Tabela 1: Regras para INTSINT

Regra	Cálculo
Top	$\text{key} \times \sqrt{2^{range}}$
Middle	key
Bottom	$\text{key} / \sqrt{2^{range}}$
Higher	$\sqrt{P_{i-1}} \times T$
Same	P_{i-1}
Lower	$\sqrt{P_{i-1}} \times B$
Upstepped	$\sqrt{P_{i-1}} \times \sqrt{P_{i-1}} \times T$
Downstepped	$\sqrt{P_{i-1}} \times \sqrt{P_{i-1}} \times B$

Tabela 2: Regras para DaTo

Contorno	Notação
Rising	LH
Late rising	>LH
Compressed rising	vLH
Rising falling	LHL
Late falling	>HL
Late rising	vHL
Falling rising	HLH

3.2.3 Prosódia afetiva em sistemas TTS

3.2.3.1 SSML

A linguagem de marcação *Speech Synthesis Markup Language* foi criada motivada pela dificuldade de predição computacional de pronúncia (TAYLOR; ISARD, 1997). Quando originalmente proposta, alguns sistemas TTS permitiam anotações extra-textuais para auxiliar a estimação de parâmetros, mas cada sistema tinha sua própria notação. Consequentemente, usuários tinham que aprender um sistema de anotação para cada programa diferente. A proposta da SSML é padronizar notações, permitindo que sistemas TTS recebam o texto com marcações adicionais feitas utilizando uma linguagem unificada. A

linguagem foi adotada por soluções *open-source* como MaryTTS e eSpeakNG, além dos sistemas proprietários encontrados em Alexa, Google Assistant e Cortana. A especificação é mantida pela W3C (BURNETT; SHUANG, 2010) e cita os elementos *emphasis*, *break* e *prosody* como marcadores que podem auxiliar o processador de linguagem natural a gerar parâmetros prosódicos apropriados.

```
<say>
  Siga <emphasis level="strong">aquele</emphasis> carro.
</say>
```

Código 3.2: Exemplo de texto anotado com SSML

3.2.3.2 EmotionML

A EmotionML (SCHRÖDER; BURKHARDT, 2014) foi criada para estender textos e outros documentos, adicionando marcações que indicam. Uma das aplicações da EmotionML é auxiliar algoritmos de TTS a determinarem prosódia.

Como explicitado por (TAYLOR, 2009), não há um acordo quanto ao sistema mais apropriado para representar emoções. A linguagem de marcação tem suporte a múltiplos sistemas descritivos, como categorias, dimensões, *appraisals* e *action tendencies*. As categorias podem receber valores discretos (como pode ser visto no código 3.3), determinando se uma emoção está presente, ou valores contínuos, determinando a intensidade de uma emoção específica (como pode ser visto no código 3.4), permitindo múltiplas categorias simultaneamente.

Na literatura, Charfuelan e Steiner (2013) descrevem um algoritmo para implementação de cálculo de parâmetros prosódicos a partir de anotações em EmotionML utilizando o *framework* MaryTTS.

```
<emotionml version="1.0" xmlns="http://www.w3.org/2009/10/emotionml">
  <emotion category-set="http://www.w3.org/TR/emotion-voc/xml#everyday-categories">
    <emotion>
      <category name="happy" />
      Que bom te ver!
    </emotion>
  </emotionml>
```

Código 3.3: Exemplo de texto anotado com EmotionML com parâmetros discretos

```
<say version="1.1" xmlns="http://www.w3.org/2001/10/synthesis"
  xmlns:emo="http://www.w3.org/2009/10/emotionml"
  xml:lang="en-US">
```

```

<s>
  <emo:emotion
    category-set="http://www.w3.org/TR/emotion-voc/xml#everyday-categories">
    <emo:category name="worried" value="0.4"/>
  </emo:emotion>
  Precisa de ajuda?
</s>
</speak>

```

Código 3.4: Exemplo de texto anotado com SSML e EmotionML (adaptado de (SCHRÖDER; BURKHARDT, 2014))

3.2.3.3 Anotação manual

Uma solução mais simples para geração de contornos f0 para prosódia efetiva é permitir que o usuário especifique na entrada do programa TTS marcações prosódicas utilizando um dos modelos de análise entoacional vistos anteriormente na seção 3.2.2. Apesar de requerer conhecimento de fonologia, é uma opção viável enquanto não são desenvolvidos algoritmos para determinação de prosódia a partir de marcação emocional. O sistema Festival (BLACK; TAYLOR, 1997) disponibiliza uma maneira de especificar entoação seguindo o modelo ToBI, como pode ser visto na tabela 3.5.

```

(Utterance Words
(The
  (boy ((accent L*))
  saw
  the
  (girl ((accent H*) (tone L-)))
  with
  the
  (telescope ((accent H*) (tone H-H%))))))

```

Código 3.5: Anotações no modelo ToBI para o sistema TTS Festival

4 Editor de prosódia

4.1 Implementação

4.1.1 `espeak-ng`

Foi utilizado o programa *open-source* eSpeakNG (DUNN, 2006) para realizar as primeiras etapas do *back end*, normalização de texto e conversão grafema-fone, ou seja, obter a partir do texto de entrada uma representação em fones. A saída gerada pelo programa é subsequentemente passada para o programa desenvolvido neste trabalho através da biblioteca `subprocess` da linguagem Python. O comando utilizado para obter os grafemas pode ser visto no código 4.1.

- A *flag* `-v` seleciona uma voz. Neste caso, `pt-br`
- `-x` e `-q` escrevem fones na saída em vez da fala sintetizada.
- `-sep=` separa fones utilizando o caractere `/`

```
$ espeak-ng -v pt-br 'Bom dia' -x -q --sep=/
$ b/'o/N dZ/'i/&
```

Código 4.1: Utilização do programa `espeak` e saída correspondente

Um fone precedido pelo caractere `'` indica *primary stress*.

Apesar da existência de outras ferramentas para *front end* para o português brasileiro, optamos pelo eSpeakNG pela disponibilidade e facilidade de instalação. O sistema TTS desenvolvido por Couto et al. (2010) não foi encontrado para *download* no início de desenvolvimento deste trabalho.

4.1.2 MBROLA

Cada voz do MBROLA tem suporte a um conjunto específico de dífonos. O programa `sampa_mbrola.py` foi desenvolvido para converter a saída gerada em fones suportados pela voz do MBROLA utilizada. O equivalente ao fone `/&/` gerado pelo `espeak` é `/a/` na voz do MBROLA, por exemplo. A ferramenta de conversão lê a tabela do arquivo `sampa_mbrola.tbl`, e substitui cada fone em notação XSAMPA pelo equivalente. A tabela possui três colunas: o fone que o `espeak` produz, o fone equivalente para o MBROLA e um exemplo numa palavra do português. No código 4.2 é possível ver algumas linhas do arquivo.

```
b | b | _b_arco
k | k | _c_om
d | d | _d_ose
& | a | v_a_le
6 | @ | tam_a_nho
n | n | _n_unca
```

Código 4.2: Extrato de linhas da tabela de conversão

As durações padrão para cada fone estão contidas no arquivo `durations.tbl`, adaptado da tabela utilizada pelo LianeTTS (SERPRO, 2011). Cada linha contém o fone e uma duração em milissegundos.

4.1.3 INTSINT

Como visto na seção 3.2.2.2, o INTSINT serve não apenas para análise, mas também para síntese de contornos f_0 . Escolhemos utilizá-lo na implementação pela simplicidade da notação e flexibilidade.

4.1.4 Editor gráfico

Para permitir refinamento de prosódia após cálculo de parâmetros, foi desenvolvido um editor gráfico para *web* utilizando HTML, CSS e JavaScript. A duração e altura de cada fone pode ser especificado arrastando barras de controle.

4.1.4.1 Arquitetura

O editor se comunica com o `espeak-ng` e MBROLA através de um servidor programado em Python utilizando o *framework* Flask para prover *endpoints* de uma API *RESTful*.

Foi utilizada uma arquitetura cliente-servidor (FIELDING, 2000) comumente observada em aplicações *web* atuais. A maneira como os módulos se comunicam pode ser vista na figura 2.

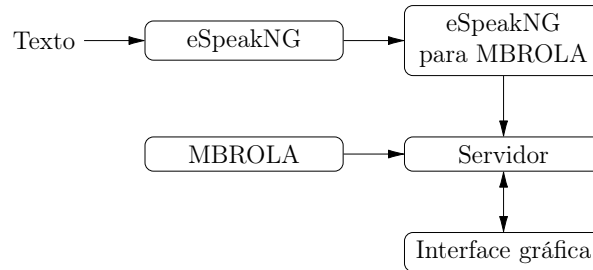


Figura 2: Arquitetura para o programa da interface gráfica

4.1.4.2 Endpoints

Foram criados dois *endpoints* para a API, possibilitando a comunicação entre interface gráfica e servidor.

[POST] /api/espeak Recebe um texto como entrada e gera uma resposta no formato JSON com lista de fones. Cada fone, por sua vez, possui campos *duration*, *phone_mbrola*, *phone_sampa* e *pitch_changes*. Um exemplo de resposta pode ser visto no código A.4.

[POST] /api/mbrola Recebe uma lista de fones no formato MBROLA descrito na seção 3.2 e gera uma resposta com o nome do arquivo de áudio contendo a fala sintetizada.

4.1.5 Utilização

O programa pode ser executado através de uma interface de linha de comandos

```

$ echo "Testando" | python3 sampa_mbrola.py > out.pho
$ mbrola ../br3/br3 out.pho out.wav; afplay out.wav
  
```

Código 4.3: Utilização por linha de comandos

5 Resultados

Com o levantamento dos sistemas TTS desenvolvidos para o português brasileiro, é possível observar que há carência de suporte à síntese expressiva. Seguindo o modelo de (TAYLOR, 2009), os sistemas estudados concentram-se na geração de prosódia suprasegmental, mas não há suporte algum à geração de prosódia afetiva.

Linguagens de marcação como SSML e EmotionML já foram integradas a *frameworks* para TTS e sistemas comerciais, mas ainda não há integração entre essas linguagens e síntese de voz para o português brasileiro.

Estudando os modelos de anotação entoacional, percebe-se que ainda não há uma solução mais adequada para analisar o português brasileiro de forma a

Com o desenvolvimento da aplicação *web* deste trabalho, dá-se um passo inicial para a integração de prosódia afetiva a sistemas TTS para o português brasileiro.

6 Considerações finais

Neste trabalho foi apresentada a definição de um sistema TTS, bem como a descrição de seus componentes principais e possíveis implementações para cada módulo. Também foi realizada uma busca dos sistemas TTS *open-source* e comerciais existentes. Com o objetivo de melhorar a geração de prosódia, foi feita uma revisão de prosódia, descrevendo os principais sistemas de anotação usados na fonologia entoacional, principalmente aplicados ao português brasileiro. Investigamos como a prosódia funciona nos sistemas encontrados e identificamos que, enquanto a geração de prosódia suprasegmental em trabalhos recentes já produz resultados satisfatórios, ainda há desafios quando à síntese de fala expressiva relacionada à prosódia afetiva e aumentativa.

6.1 Trabalhos futuros

Considerando o que foi estudado e concluído, próximos passos para melhorar a naturalidade da fala em sistemas TTS a partir do módulo de prosódia incluem:

- Expansão do sistema desenvolvido neste trabalho para adicionar suporte a mais modelos de notação entoacional, como ToBI e DaTo.
- Avaliação estatística da qualidade de falas geradas com a aplicação desenvolvida comparada a outros sistemas *open-source* e comerciais
- Adicionar suporte a SSML e EmotionML ao sistema desenvolvido, gerando curvas f_0 a partir de marcações
- Uso técnicas de técnicas de *Natural Language Understanding* para gerar notação SSML e EmotionML automaticamente.
- Desenvolvimento de corpus anotados com prosódia para o português brasileiro.

Referências

- Amazon.com, Inc. *Alexa*. 2014. Disponível em: <<https://developer.amazon.com/alexa>>. Acesso em 25 de setembro de 2017.
- Apple Inc. *Siri*. 2011. Disponível em: <<https://www.apple.com/ios/siri/>>. Acesso em 25 de setembro de 2017.
- BARBOSA, F. et al. Grapheme-phone transcription algorithm for a Brazilian Portuguese TTS. In: SPRINGER. *International Workshop on Computational Processing of the Portuguese Language*. [S.l.], 2003. p. 23–30.
- BARBOSA, P. A. et al. Aiuruete: A high-quality concatenative text-to-speech system for brazilian portuguese with demisyllabic analysis-based units and a hierarchical model of rhythm production. In: *Sixth European Conference on Speech Communication and Technology*. [S.l.: s.n.], 1999.
- BLACK, A. W.; TAYLOR, P. A. *The Festival Speech Synthesis System: System Documentation*. 1.1. ed. Scotland, UK, 1997. Available at <http://www.cstr.ed.ac.uk/projects/festival.html>.
- BURNETT, D.; SHUANG, Z. W. *Speech Synthesis Markup Language (SSML) Version 1.1*. [S.l.], 2010. Disponível em: <<http://www.w3.org/TR/2010/REC-speech-synthesis11-20100907/>>. Acesso em 5 de junho de 2018.
- CELESTE, L.; REIS, C. Análise entonativa formal: Intsint aplicado ao português. *Journal of Speech*, v. 2, n. 2, p. 3–21, 2012.
- CHARFUELAN, M.; STEINER, I. Expressive speech synthesis in MARY TTS using audiobook data and emotionML. In: *INTERSPEECH*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1564–1568.
- COSTA, E. S. et al. Um sintetizador de voz baseado em hmms livre: Dando novas vozes para aplicações livres no português do brasil. In: *Workshop de Software Livre*. [S.l.: s.n.], 2012.
- COUTO, I. et al. An open source HMM-based text-to-speech system for Brazilian Portuguese. In: *7th international telecommunications symposium*. [S.l.: s.n.], 2010.
- DUNN, R. H. *espeak-ng*. 2006. Disponível em: <<https://github.com/espeak-ng/espeak-ng>>. Acesso em 29 de outubro de 2017.
- DUTOIT, T. *An introduction to text-to-speech synthesis*. [S.l.: s.n.], 1997. (Text, Speech and Language Technology 3).

- DUTOIT, T. et al. The MBROLA project: Towards a set of high quality speech synthesizers free of use for non commercial purposes. In: IEEE. *Spoken Language, 1996. ICSLP 96. Proceedings., Fourth International Conference on.* [S.l.], 1996. v. 3, p. 1393–1396.
- FIELDING, R. T. REST: architectural styles and the design of network-based software architectures. *Doctoral dissertation, University of California*, 2000.
- HIRSCHBERG, J. Speech synthesis, prosody. *Encyclopedia of language & linguistics*, v. 7, p. 49–55, 2006.
- HIRST, D. J. *La représentation linguistique des systèmes prosodiques: une approche cognitive*. Tese (Doutorado) — Aix-Marseille 1, 1987.
- HIRST, D. J. A praat plugin for momel and int sint with improved algorithms for modelling and coding intonation. In: *Proceedings of the XVIth International Conference of Phonetic Sciences*. [S.l.: s.n.], 2007. v. 12331236.
- JURAFSKY, D.; MARTIN, J. H. *Speech and Language Processing (2nd Edition)*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 2009. ISBN 0131873210.
- LUCENTE, L. Uma abordagem fonética na fonologia entoacional. *Fórum Linguístico*, v. 11, n. 1, p. 79–95, 2014.
- Microsoft Corp. *Cortana*. 2014. Disponível em: <<https://www.microsoft.com/en-us/windows/cortana>>. Acesso em 25 de setembro de 2017.
- MORAES, J. A. de. Brazilian portuguese. *Intonation systems: A survey of twenty languages*, Cambridge University Press, p. 179, 1998.
- MORAES, J. A. de. The pitch accents in Brazilian Portuguese: analysis by synthesis. In: *Proc. Speech Prosody*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 389–397.
- RAJESWARI, K.; UMA, M. Prosody modeling techniques for text-to-speech synthesis systems—a survey. *International Journal of Computer Applications*, v. 39, n. 16, p. 8–11, 2012.
- SCHRÖDER, M.; BURKHARDT, F. *Emotion Markup Language (EmotionML) 1.0*. [S.l.], maio 2014. Disponível em: <<http://www.w3.org/TR/2014/REC-emotionml-20140522/>>. Acesso em 8 de junho de 2018.
- SERPRO. *LianeTTS*. 2011. Disponível em: <<http://intervox.nce.ufrj.br>>. Acesso em 7 de junho de 2018.
- TAYLOR, P. *Text-to-speech synthesis*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2009.
- TAYLOR, P.; ISARD, A. SSML: A speech synthesis markup language. *Speech communication*, Elsevier, v. 21, n. 1-2, p. 123–133, 1997.
- VÉRONIS, J. et al. A stochastic model of intonation for text-to-speech synthesis1. *Speech Communication*, Elsevier, v. 26, n. 4, p. 233–244, 1998.

APÊNDICE A – Primeiro apêndice

```
import sqlite3
import sampa_mbrola
from flask import Flask, g, jsonify, render_template, abort, request
from flask_cors import CORS

app = Flask(__name__)
CORS(app)

@app.route('/api/espeak', methods=['POST'])
def frontend():
    text = request.form['text']
    converter = sampa_mbrola.Converter()
    sentence = converter.convert_sentence(text)
    return jsonify(sentence.dictify())

@app.route('/api/mbrola', methods=['GET'])
def mbrola(page):
    pass

if __name__ == '__main__':
    app.run(debug=True)
```

Código A.1: Servidor

```
import sys
import re
import subprocess
import random
import json
from collections import OrderedDict
from typing import List

def flatten(lst: List):
    return [item for sublist in lst for item in sublist]
```

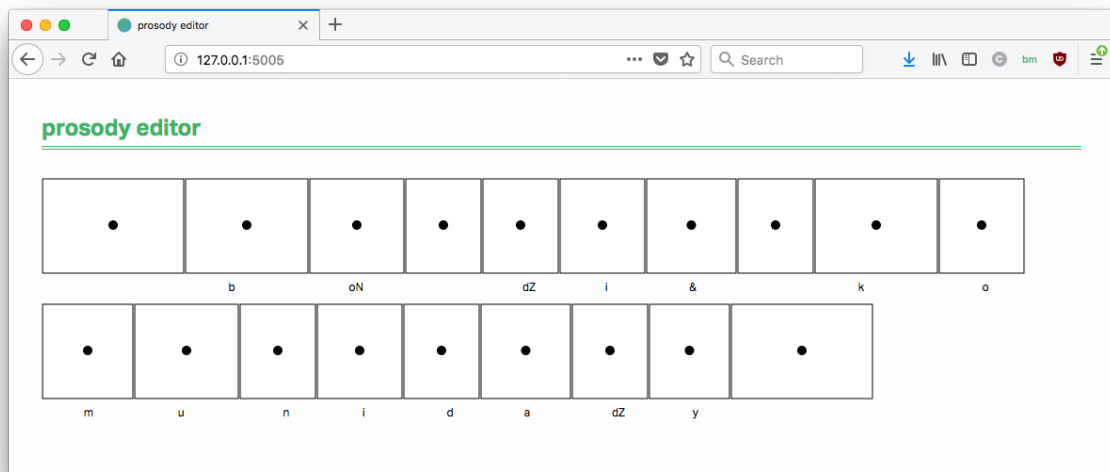


Figura 3: Editor gráfico

```

class Phone():
    def __init__(
        self,
        phone_sampa: str,
        phone_mbrola: str,
        duration: int,
        pitch_changes: list
    ):
        self.phone_sampa = phone_sampa
        self.phone_mbrola = phone_mbrola
        self.duration = duration
        self.pitch_changes = pitch_changes

    def as_line(self):
        return "{} {} {}".format(
            self.phone_mbrola,
            self.duration,
            " ".join([str(item) for item in flatten(self.pitch_changes)])
        )

class Sentence():
    def __init__(self, phones: List[Phone]=None):
        if phones is None:
            self.phones = []
        else:
            self.phones = phones

```

```

def mbrola_phones(self):
    return [phone.phone_mbrola for phone in self.phones]

def dictify(self):
    return [vars(phone) for phone in self.phones]

def __repr__(self):
    return "\n".join([phone.as_line() for phone in self.phones])

class Converter():
    def __init__(self):
        self.load_sampa_mbrola()
        self.load_durations()

    def load_sampa_mbrola(self):
        equivs = {}
        with open("sampa_mbrola.tbl") as f:
            for line in f:
                k, v, _ = line.split()
                equivs[k] = v

        self.equivs = OrderedDict(
            sorted(equivs.items(), key=lambda t: -len(t[0])))

    def load_durations(self):
        durations = {}
        with open("durations.tbl") as f:
            for line in f:
                k, v = line.split()
                durations[k] = v

        self.durations = durations

    def convert_phoneme(self, sentence: str) -> tuple:
        """Returns first phone from the sentence"""

        if sentence[0] == " ":
            return ("_", 1)
        elif self.equivs:
            # s is a special case, needs to peek next
            if sentence[0] == "s":

```

```

        if sentence[1] in "aeiou&":
            return ("s", 1)

    for equiv in self.equivs.items():

        if re.match(re.escape(equiv[0]), sentence):
            # print("match:", equiv[0], phoneme, "=", equiv[1])
            return (equiv[1], len(equiv[0]))

    # print("didn't match", phoneme)
    return (phoneme[0], 1)

def get_duration(self, phoneme: str) -> int:
    if self.durations and phoneme in self.durations:
        return self.durations[phoneme]
    else:
        return 100

def convert_sentence(self, input_str: str) -> Sentence:
    sentence = Sentence()
    sentence.phones.append(Phone(" ", "_", 150, [[50, 150]]))

    ignored = ["@", "\n", ",", "'", "^", ";"]

    sampa = self.text_to_sampa(input_str)
    sampa = sampa.replace("'", "")
    print(";; ", sampa)

    while sampa:
        if sampa[0] not in ignored:
            converted = self.convert_phoneme(sampa)
            phone_sampa = sampa[:converted[1]]
            sampa = sampa[converted[1]:]

            duration = self.get_duration(converted[0])
            phone = Phone(
                phone_sampa = phone_sampa,
                phone_mbrola = converted[0],
                duration = int(duration),
                pitch_changes = [[50, 150]] # percentage, Hz
            )

            sentence.phones.append(phone)

```

```

        else:
            sampa = sampa[1:]

        sentence.phones.append(Phone(" ", "_", 150, [[50, 150]]))
    return sentence

def text_to_sampa(self, sentence: str) -> str:
    espeak_str = "espeak-ng -v pt-br '{}' -x -q".format(sentence)

    p = subprocess.Popen(espeak_str, stdout=subprocess.PIPE, shell=True)
    (output, err) = p.communicate()
    p_status = p.wait()
    output = output.decode("utf-8")
    output = output.replace("\n", "").strip()
    return output

if __name__ == "__main__":
    converter = Converter()

    for line in sys.stdin:
        print(";;", line)
        print(converter.convert_sentence(line))

```

Código A.2: Conversor eSpeakNG-MBROLA

```

var app = new Vue({
  el: '#app',
  data: {
    phones: [],
    height: 300
  },
  mounted: function() {
    var self = this;
    const requestURL = "http://127.0.0.1:5000/api/espeak";
    let XHR = new XMLHttpRequest();
    let FD = new FormData();

    FD.append("text", "Bom dia, comunidade");

    XHR.open("POST", requestURL);
    XHR.send(FD);

    XHR.onreadystatechange = function() {

```



```

    if (XHR.readyState === XMLHttpRequest.DONE) {
      if (XHR.status === 200) {
        const results = JSON.parse(XHR.responseText);
        self.phones = results;
      }
    }
  };
},
computed: {
  totalDuration: function() {
    let durations = this.phones.map((phone) => phone.duration);
    console.log(durations.reduce((acc, val) => acc + val, 0));
    return durations.reduce((acc, val) => acc + val, 0);
  }
}
});

```

Código A.3: Editor gráfico

```

[
  {
    "duration": 150,
    "phone_mbrola": "_",
    "phone_sampa": " ",
    "pitch_changes": [[50, 150]]
  },
  {
    "duration": 80,
    "phone_mbrola": "n",
    "phone_sampa": "n",
    "pitch_changes": [[50, 150]]
  },
  {
    "duration": 110,
    "phone_mbrola": "u",
    "phone_sampa": "U",
    "pitch_changes": [[50, 150]]
  },
  ...
  {
    "duration": 150,
    "phone_mbrola": "_",
    "phone_sampa": " ",

```

```
|   "pitch_changes": [[50, 150]]  
| }  
| ]
```

Código A.4: Exemplo de resposta para *endpoint* do eSpeakNG

```
| {  
|   "mp3_file": "07acc5c4ba924294.mp3"  
| }
```

Código A.5: Exemplo de resposta para *endpoint* do MBROLA