

4 Resultados obtidos

Ao longo da pesquisa as abordagens *top-down* e *bottom-up* foram detalhadas, sendo as técnicas de suavização exponencial e o modelo FORECAST-*Residential* os escolhidos para representar cada uma das abordagens.

Este capítulo tem por objetivo apresentar os resultados do ajuste das séries históricas de consumo (Brasil e classes de consumo) através das metodologias supracitadas, a previsão até 2050 de cada uma dessas séries e a comparação dos resultados com os esperados das pesquisas Plano Decenal de Energia 2014-2023 e Plano Nacional de Energia 2050. No caso da abordagem *top-down*, os resultados encontrados foram desenvolvidos através do *software* R (R: A Language and Environment for Statistical Computing, 2012), utilizando o pacote *tseries* para encontrar o melhor modelo *in-sample*, e com funções desenvolvidas pela própria autora (Apêndice) para suprir a limitação no caso das técnicas Pegels. Para a previsão das equações foi utilizado o pacote *forecast*, além do *Add-in Solver* do Excel para encontrar os valores ótimos dos hiperparâmetros.

4.1 Abordagem *top-down*

Na abordagem *top-down* primeiramente foram encontrados os melhores modelos ao aplicar os métodos de suavização exponencial e por melhores modelos quer se dizer os que obtiveram menor erro para os dados históricos. E para isso foi utilizado, especificamente, a função *ets* do pacote *tseries* do *software* R. Em seguida foram realizados ajustes dos hiperparâmetros das técnicas *Standard* e *Damped* Pegels para encontrar as equações que obtivessem melhor desempenho em: (1) prever conjuntamente os valores esperados de 2014 a 2023 do Plano Decenal de Expansão da Energia; (2) prever cada um dos anos 2020, 2030, 2040 e 2050, disponibilizados pela Pesquisa de Nacional de Demanda de Energia; e (3) ajustar a previsão de todos os anos do PNE. Para ajustar os hiperparâmetros ótimos foi utilizado o *Add in Solver* do Excel e para realizar a previsão a partir de

tais equações a autora desenvolveu um código no R que permitisse utilizar qualquer valor para o parâmetro φ das técnicas *Standard* e *Damped Pegels*. Tal código foi necessário, pois a função *ets* não permitia qualquer valor de φ , se tornando um problema para ajustar os valores das pesquisas da EPE.

4.1.1

Melhores modelos *in-sample*

A primeira técnica de suavização exponencial a ser aplicada foi o “método de tendência linear de Holt”, pois, notoriamente, as séries de consumo analisadas anteriormente possuem uma tendência linear no histórico. Na Tabela 3, estão apresentados todos os parâmetros encontrados para cada um dos setores e suas respectivas medidas de MAPE.

Tabela 3 - Parâmetros e MAPE com o método Holt

Setor	α	γ	MAPE (%)
Brasil	0,9156	0,0001	2,0230
Industrial	0,5569	0,0001	3,2152
Residencial	0,9999	0,3294	3,9163
Terciário	0,9970	0,3173	2,2543
Outros	0,9999	0,1615	1,9644

Fonte: a autora (2015)

O próximo passo após o ajuste dos dados é realizar a projeção até 2050, sendo o resultado apresentado na Figura 7. Quando comparado com os consumos esperados pelo PDE e PNE percebe-se que o modelo não obteve sucesso ao alcançar os níveis das projeções oficiais o que também acontece para três dos quatro setores, ver Figura 8.

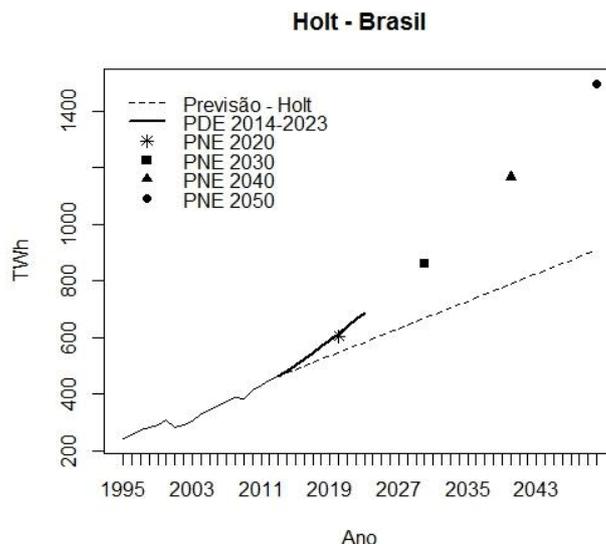


Figura 7 - Previsão da série de consumo do Brasil com Holt, melhor modelo *in-sample*

Fonte: a autora (2015)

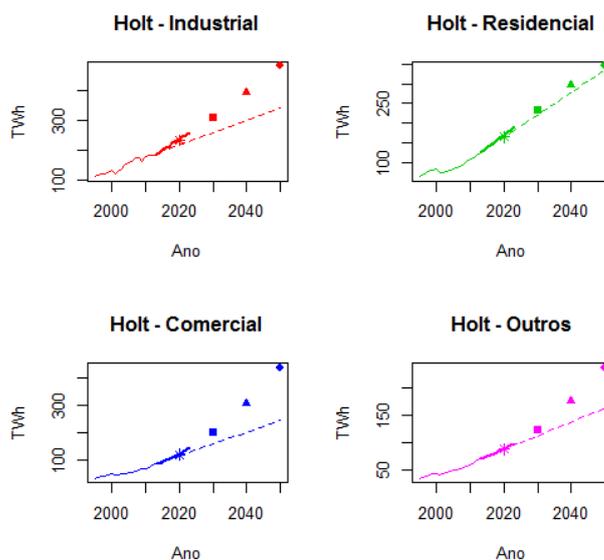


Figura 8 - Previsão das séries de consumo por classe com Holt, melhor modelo *in-sample*

Fonte: a autora (2015)

De acordo com as análises anteriores o método de Holt subestimou as previsões da EPE tanto para Brasil quanto por classes de consumo, com exceção do setor Residencial, isso porque tais expectativas apresentam um crescimento exponencial. Para tentar alcançar tal comportamento serão empregados os métodos *Standard* e *Damped* Pegels, que de acordo com (TAYLOR, 2003) são mais adequados para prever esse tipo de comportamento (crescimento não linear).

Na Tabela 4 estão os valores dos hiperparâmetros e MAPEs obtidos tanto para o caso Brasil agregado quanto desagregado por classes de consumo ao aplicar o método *Standard Pegels*, tendo como principais análises: (1) para o modelo Brasil agregado por setores e as classes de consumo Residencial, Comercial e Outros a equação do modelo possui α igual 1, significando que a equação que estima o nível é igual a observação atual, não levando em consideração a estimativa de tendência. Esta conclusão ser obtida ao substituir α por 1 na Equação (2.3); (2) para os setores Industrial e Residencial o γ estimado é igual a 0, mostrando que para estes casos a estimativa de taxa de crescimento é igual a anterior, novamente esta conclusão pode ser confirmada a partir da (2.4).

Tabela 4 - Parâmetros e MAPE com o método *Standard Pegels*

Setor	α	γ	MAPE (%)
Brasil	1,000	0,044	2,246
Industrial	0,680	0,000	3,281
Residencial	1,000	0,001	2,643
Terciário	1,000	0,141	2,336
Outros	1,000	0,078	2,005

Fonte: a autora (2015)

Ao contrário do que foi concluído com o método de Holt, ao projetar as séries de consumo a partir do melhor modelo *in-sample* do *Standard Pegels* e comparar com as disponibilizadas através das fontes oficiais, o método atual mostrou valores mais altos em todos os casos, como se pode ver na Figura 9 para o caso agregado e na Figura 10 por classe de consumo.

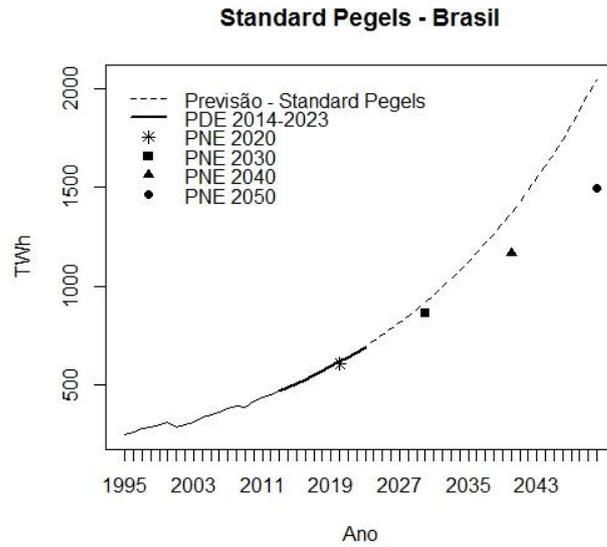


Figura 9 - Previsão da série de consumo do Brasil com *Standard Pegels*, melhor modelo *in-sample*

Fonte: a autora (2015)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313499/CA

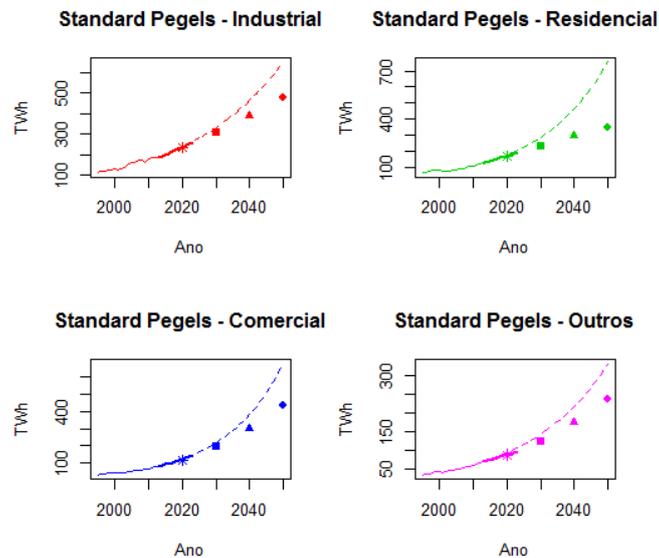


Figura 10 - Previsão da série de consumo por classe com *Standard Pegels*, melhor modelo *in-sample*

Fonte: a autora (2015)

Já que ao utilizar o método de tendência linear de Holt os valores do PDE e PNE não foram alcançados e usando o método de tendência exponencial os mesmos valores foram superestimados, espera-se que com o *Damped Pegels*

chegue-se o mais perto dos esperados pela EPE, pois projeta valores com crescimento exponencial, porém amortecidos segundo a constante φ .

Analisando a Tabela 5, que apresenta os parâmetros e medidas de MAPE encontradas ao aplicar o método *Damped Pegels* às séries de consumo, percebe-se que para todos os setores, exceto o Industrial, as estimativas de níveis são dadas como a observação atual, já que α igual 1 e, excluindo o setor Residencial, a taxa de crescimento é igual a taxa de crescimento inicial amortecida, pois para esses setores γ tem valor 0.

Tabela 5 - Parâmetros e MAPE com o método *Damped Pegels*

Setor	α	γ	φ	MAPE (%)
Brasil	1,000	0,000	0,984	2,156
Industrial	0,671	0,000	0,998	3,267
Residencial	1,000	0,150	1,000	2,643
Terciário	1,000	0,000	0,975	2,454
Outros	1,000	0,000	0,987	1,967

Fonte: a autora (2015)

As previsões até 2050 obtidas com o método *Damped Pegels* para a série de consumo do Brasil pode ser vista na Figura 11 e como na equação do modelo α tem valor 1 e γ valor 0, a previsão terá uma tendência linear independente do valor de φ , resultando assim em um projeção mais baixa do que as oficiais, indo contra as expectativas anteriores de uma melhor modelagem desses valores. Analisando as projeções para cada um dos setores com o *Damped Pegels*, na Figura 12 observa-se que para os setores Industrial e Residencial os valores projetados são mais otimistas do que os encontrados nas pesquisas enquanto que para o Comercial acontece o contrário, porém ao avaliar somente os anos do PDE (2014-2023), os modelos escolhidos para as classes Industrial e Residencial se mostram bastante eficiente. O setor Outros além de possuir o menor MAPE *in-sample* é também o que apresenta melhores resultados *out-of-sample* quando comparado com os valores do PDE e do PNE, apresentando uma diferença significativa com as pesquisas somente no último ano do horizonte (2050).

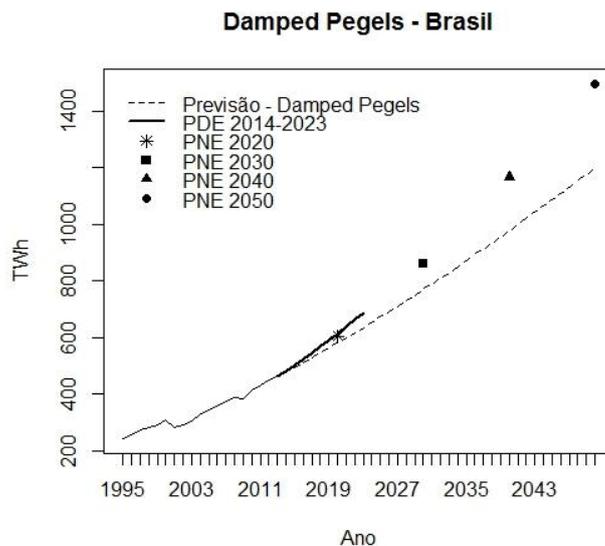


Figura 11 - Previsão da série de consumo do Brasil com *Damped Pegels*, melhor modelo *in-sample*

Fonte: a autora (2015)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313499/CA

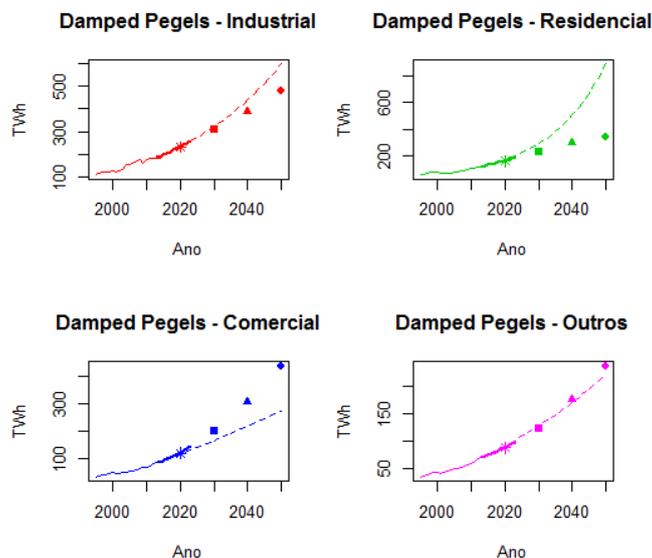


Figura 12 - Previsão da série de consumo por classe com *Damped Pegels*, melhor modelo *in-sample*

Fonte: a autora (2015)

Em todos os casos anteriores, o modelo escolhido aderiu bem ao histórico de dados em geral, porém ao analisar os anos que possuem quebra estrutural (2001 e 2009) percebe-se que os valores pontuais não foram modelados satisfatoriamente, como pode ser visto nas Figura B 1 à B 6. Isso se deve ao fato

do método de suavização exponencial ser uma técnica univariada e MAÇAIRA *et al* (2014) mostra que tal modelo não tem a capacidade de prever essas quebras estruturais nas séries de consumo e geração de energia, sendo somente captadas ao adicionar o PIB como variável explicativa em um modelo de Regressão Dinâmica, ou seja, um modelo com variáveis explicativas.

4.1.2

Otimização dos hiperparâmetros

De agora em diante será mostrado, aplicando os métodos de *Standard* e *Damped Pegels*, os modelos que apresentam melhor desempenho ao ajustar (1) cada valor de 2014 até 2023 do Plano Decenal de Energia; (2) cada um dos anos; e (3) todos os anos conjuntamente disponibilizados pelo Plano Nacional de Energia (2020, 2030, 2040 e 2050). O valor deste exercício está em modelar as expectativas oficiais do consumo de energia do Brasil, agregado e por setor, a partir de métodos de séries temporais. Além de fornecer equações de nível e tendência para cada uma das projeções das pesquisas PDE e PNE. Observa-se que para não entediar o leitor, os gráficos referentes as previsões não serão mostrados dentro da seção e sim no Apêndice B, somente a análise feita a partir de tais figuras será realizada.

Começando com a metodologia *Standard Pegels*, os parâmetros, valores previstos e valores de MAPE *in-sample* para o Brasil (agregado) e para os setores Industrial, Residencial, Comercial e Outros podem ser encontrados na Tabela 6. As principais análises que podem ser extraídas são: (1) o setor Industrial é o único que não apresenta α igual a 1 para o modelo com melhor ajuste *in-sample*; (2) o setor Residencial também apresenta α igual a 1 ao ajustar o melhor modelo para os valores divulgados pelo PDE 2023, o que significa dizer que as estimativas de nível nesse caso são iguais as observações atuais; (3) para o setor Industrial ao ajustar o melhor modelo à previsão do ano de 2050 e todos os anos conjuntamente do PNE o γ encontrado foi igual a 1, isto é, a estimativa da taxa de crescimento é a razão entre o nível no momento atual e no momento anterior; (4) as medidas de MAPE *in-sample* encontradas para Brasil e as classes de consumo Industrial e Outros mostram que todos os modelos testados aderiram bem ao histórico, já que o maior valor encontrado entre esses casos foi de 8.28%; (5) por outro lado, os

setores Residencial e Comercial apresentaram valores de MAPE *in-sample* na ordem de 15% e 22% ao ajustar todos os anos da PNE e somente o ano de 2050.

Tabela 6 - Parâmetros, MAPE e previsões com *Standard Pegels*, melhores modelos

Setor	Pesquisa	Oficial	α	γ	Obtido	MAPE <i>in-sample</i> (%)
Brasil	PNE - 2020	604,79	0,48	0,08	604,84	2,54
	PNE - 2030	859,89	0,29	0,09	859,96	2,83
	PNE - 2040	1165,48	0,15	0,12	1165,90	4,16
	PNE - 2050	1496,26	0,08	0,18	1494,97	5,80
	PNE - todos os anos	-	0,02	0,56	-	2,52
	PDE 2014 - 2023	-	0,95	0,05	-	2,26
	Melhor modelo <i>in sample</i>	-	1,00	0,04	-	2,25
Industrial	PNE - 2020	233,15	0,47	0,05	233,13	3,44
	PNE - 2030	307,31	0,30	0,14	307,23	3,96
	PNE - 2040	389,56	0,22	0,31	389,26	4,53
	PNE - 2050	479,54	0,10	1,00	480,30	5,71
	PNE - todos os anos	-	0,02	1,00	-	4,48
	PDE 2014 - 2023	-	0,79	0,00	-	3,40
	Melhor modelo <i>in sample</i>	-	0,68	0,00	-	3,28
Residencial	PNE - 2020	164,73	0,56	0,06	164,73	4,07
	PNE - 2030	232,37	0,32	0,09	232,34	5,93
	PNE - 2040	297,45	0,15	0,10	297,30	8,11
	PNE - 2050	345,20	0,09	0,18	345,60	9,53
	PNE - todos os anos	-	0,02	0,59	-	15,37
	PDE 2014 - 2023	-	1,00	0,04	-	2,79
	Melhor modelo <i>in sample</i>	-	1,00	0,00	-	2,64
Comercial	PNE - 2020	118,42	0,35	0,15	118,42	4,60
	PNE - 2030	196,60	0,29	0,20	196,66	5,11
	PNE - 2040	302,40	0,17	0,13	302,71	9,32
	PNE - 2050	434,89	0,09	0,18	434,41	15,12
	PNE - todos os anos	-	0,03	0,40	-	22,40
	PDE 2014 - 2023	-	0,42	0,17	-	3,93
	Melhor modelo <i>in sample</i>	-	1,00	0,14	-	2,34
Outros	PNE - 2020	88,49	0,25	0,13	88,48	3,72
	PNE - 2030	123,62	0,20	0,17	123,66	4,20
	PNE - 2040	176,07	0,17	0,12	176,10	5,23
	PNE - 2050	236,63	0,08	0,17	236,49	8,18
	PNE - todos os anos	-	0,08	0,17	-	8,07
	PDE 2014 - 2023	-	0,10	0,13	-	7,14
	Melhor modelo <i>in sample</i>	-	1,00	0,08	-	2,00

Fonte: a autora (2015)

Realizando uma análise meramente gráfica das Figuras B 7 até B 18, que apresentam as previsões com o método *Standard* no exercício de ajuste dos hiperparâmetros, os pontos que merecem ser destacados são: (1) para Brasil agregado e desagregado por classe de consumo, as previsões feitas com o modelo que melhor ajusta os valores do PDE (B 7 e B 8) são maiores do que as realizadas pelo PNE, o que significa dizer que se esse modelo fosse utilizado para prever até 2050 as expectativas para o consumo seriam ainda mais otimistas do que as

divulgadas pela EPE nesse horizonte de tempo; (2) este mesmo fato ocorre ao ajustar os valores dos anos de 2020 e 2030 da PNE (B 9, B 10, B 11 e B 12), com a diferença de que ao comparar com os valores do PDE as projeções são menores; (3) olhando para os modelos que ajustam os anos de 2040 da PNE (B 13 e B 14) percebe-se que os anos anteriores previstos são subestimados enquanto que os anos subsequentes são sobre estimados; (4) para todos os casos, os modelos que ajustam o ano de 2050 da PNE (B 15 e B 16) geram resultados mais pessimistas dos que os oficiais para os anos anteriores; (5) o ajuste de todos os anos da PNE (2020, 2030, 2040 e 2050), apresentados na Figuras B 17 e B 18, para Brasil agregado e desagregado para os setores Comercial e Outros mostra que todos os anos da PNE são bem aproximados, resultando em um ajuste ruim para o PDE, com exceção do setor Outros, enquanto que para o caso dos setores Industrial e Residencial analisa-se que com esse modelo o ano de 2050 está sendo sobre estimado.

Na Tabela 7 estão os resultados encontrados na aplicação da metodologia *Damped Pegels* para a aproximação dos consumos esperados do PDE e PNE. Para a atual metodologia (*Damped*) quando α e/ou γ são iguais a 1 ou 0 a interpretação das projeções é similar as realizadas com a abordagem *Standard*, porém a diferença está na inserção do termo de amortecimento (φ). Dentre as inúmeras análises e interpretações que podem ser feitas a partir da Tabela 7, os principais resultados são: (1) para o caso Brasil ao ajustar os anos de 2040 e 2050 da PNE e do setor Industrial para o ajuste dos anos 2020, 2030, 2040 e todos os anos do PDE a interpretação pode ser feita baseada na abordagem *Standard*, já que α igual 1; (2) existem três casos que resultaram em φ maior que 1 na equação do modelo, esperando assim um crescimento exponencial mais acentuado dependendo da combinação do α e γ , são eles: Brasil ao ajustar os anos 2020 e 2030 da PNE, o setor Residencial ao ajustar o melhor modelo no histórico de dados e a classe de consumo Comercial para o modelo que ajusta todos os anos projetados pelo PDE; (3) diferentemente da metodologia anterior, a atual abordagem mostrou eficácia ao ajustar valores dentro da amostra em todos modelos testados, sendo a maior medida de MAPE encontrada aproximadamente 4%.

Tabela 7 - Parâmetros, MAPE e previsões com *Damped Pegels*, melhores modelos

Setor	Pesquisa	Oficial	α	γ	φ	Obtido	MAPE <i>in-sample</i> (%)
Brasil	PNE - 2020	604,79	0,99	1,00	1,03	604,81	3,83
	PNE - 2030	859,89	1,00	1,00	1,01	858,28	3,78
	PNE - 2040	1165,48	1,00	1,00	1,00	1161,16	3,76
	PNE - 2050	1496,26	0,79	1,00	1,00	1498,80	3,64
	PNE - todos os anos	-	1,00	0,29	0,99	-	2,73
	PDE 2014 - 2023	-	1,00	0,01	1,00	-	2,21
	Melhor modelo <i>in sample</i>	-	1,00	0,00	0,98	-	2,16
Industrial	PNE - 2020	233,15	0,47	0,05	1,00	233,51	3,44
	PNE - 2030	307,31	1,00	0,04	1,00	307,22	3,74
	PNE - 2040	389,56	1,00	0,08	1,00	390,00	3,82
	PNE - 2050	479,54	0,77	0,00	0,99	485,46	3,36
	PNE - todos os anos	-	0,12	0,00	0,99	-	4,23
	PDE 2014 - 2023	-	0,79	0,00	1,00	-	3,40
	Melhor modelo <i>in sample</i>	-	0,67	0,00	1,00	-	3,27
Residencial	PNE - 2020	164,73	0,96	0,92	0,92	164,65	3,13
	PNE - 2030	232,37	1,00	0,77	0,96	232,51	3,07
	PNE - 2040	297,45	0,80	1,00	0,96	297,56	3,27
	PNE - 2050	345,20	0,78	1,00	0,96	343,23	3,31
	PNE - todos os anos	-	1,00	0,34	0,97	-	3,11
	PDE 2014 - 2023	-	1,00	0,00	0,99	-	2,68
	Melhor modelo <i>in sample</i>	-	1,00	0,02	1,00	-	2,64
Comercial	PNE - 2020	118,42	1,00	1,00	0,98	118,45	3,47
	PNE - 2030	196,60	0,53	1,00	0,97	196,77	3,59
	PNE - 2040	302,40	0,62	1,00	0,98	304,70	3,33
	PNE - 2050	434,89	0,51	1,00	0,98	436,48	3,71
	PNE - todos os anos	-	1,00	0,25	0,99	-	2,55
	PDE 2014 - 2023	-	0,41	0,15	1,00	-	4,09
	Melhor modelo <i>in sample</i>	-	1,00	0,00	0,98	-	2,45
Outros	PNE - 2020	88,49	1,00	1,00	0,95	88,53	3,00
	PNE - 2030	123,62	0,64	1,00	0,95	123,63	2,71
	PNE - 2040	176,07	0,88	0,98	0,99	175,24	2,99
	PNE - 2050	236,63	0,51	1,00	0,97	236,71	2,78
	PNE - todos os anos	-	1,00	0,08	0,99	-	2,02
	PDE 2014 - 2023	-	0,57	0,09	0,99	-	2,40
	Melhor modelo <i>in sample</i>	-	1,00	0,00	0,99	-	1,97

Fonte: a autora (2015)

Os pontos importantes de destacar dos resultados gráficos (ver Figuras B 19 até B 30) da aplicação da técnica *Damped Pegels* são: (1) para o Brasil agregado e as classes Industrial, Residencial e Outros as previsões realizadas com os modelos que melhor se ajustam aos valores do PDE sobre estimam todos os anos subsequentes da PNE, ver Figuras B 19 e B 20; (2) dado que o parâmetro de amortecimento é maior do que 1 para o caso Brasil, ao ajustar os anos de 2020 (B 21) e 2030 (B 23) os valores previstos ao aumentar o horizonte de tempo são muito maiores, especialmente no primeiro caso quando a expectativa prevista para o ano de 2050 é o dobro da presente na PNE; (3) olhando por setor, ao ajustar o

ano de 2020, os setores Industrial e Comercial apresentam previsões com concavidades positivas enquanto que os demais apresentam concavidade negativa, uma consequência da combinação dos parâmetros α , γ e ϕ , resultando em uma má aproximação dos anos seguintes, ver Figura B 22; (4) a mesma interpretação realizada no tópico 3 pode ser feita no caso da análise da Figura B 24 com a exceção do setor Comercial que parece apresentar uma tendência de crescimento linear; (5) a partir das Figuras B 25 e B 26, que contêm as previsões ao ajustar o ano de 2040 da PNE, observa-se a subestimação dos anos anteriores a 2040 e sobre estimam o ano de 2050, como aconteceu para a abordagem *Standard Pegels*, com exceção do setor Residencial que apresentou um ótimo ajuste para todos os anos da PNE e também para o PDE, mesmo apresentando uma concavidade negativa; (6) para o caso do ajuste do ano 2050 da PNE, a mesma conclusão anterior pode ser desenhada, com exceção do setor Outros que não apresenta um bom ajuste para os demais anos (Figuras B 27 e B 28); (7) no caso do ajuste de todos os anos da PNE a série do Brasil, agregada por setor (Figura B 29) apresenta bom ajuste do histórico e também ao comparar com as pesquisas da EPE, porém o ponto alto desta análise está a excelente aderência as estimativas realizadas por classe de consumo (Figura B 30) onde todos os modelos apresentaram bons resultados *in-sample* e ao comparar com os valores esperados do PDE e também da PNE.

A Tabela 8 contém, para o total Brasil e por classe de consumo, os modelos entre todos os otimizados, que obtiveram menor erro médio em relação tanto aos resultados do PDE quanto aos da PNE. Por exemplo, para o setor Residencial, utilizando as equações do modelo otimizado para ajustar todos os anos da PNE 2050 (Damped Pegels com $\alpha = 0.78$, $\gamma = 1$ e $\phi = 0.96$) para projetar o consumo do setor residencial até 2050, se obtém o menor erro médio em relação tanto ao PDE quanto ao PNE dentre todos os aqui testados.

Tabela 8 - Melhores modelos PDE 2014-2023 e PNE 2050

Setor	Melhor modelo	Erro Médio
Brasil	Todos os anos PNE 2050 - Damped Pegels	2,27%
Industrial	Todos os anos PNE 2050 - Damped Pegels	1,55%
Residencial	Todos os anos PNE 2050 - Damped Pegels	0,74%
Terciário	Todos os anos PNE 2050 - Damped Pegels	1,03%
Outros	Todos os anos PDE 2014-2023 - Standard Pegels	0,49%

Fonte: a autora (2015)

Sendo assim, segue na Figura 13 e Figura 14 os resultados gráficos de cada um desses melhores modelos em relação as pesquisas da EPE para cada caso.

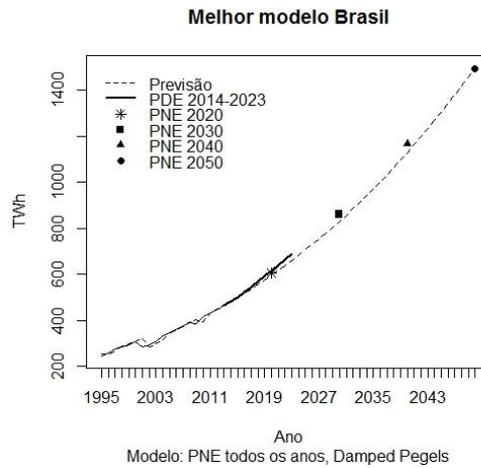


Figura 13 - Melhor modelo ajustado às previsões do PDE 2014-2023 e PNE 2050, total Brasil

Fonte: a autora (2015)

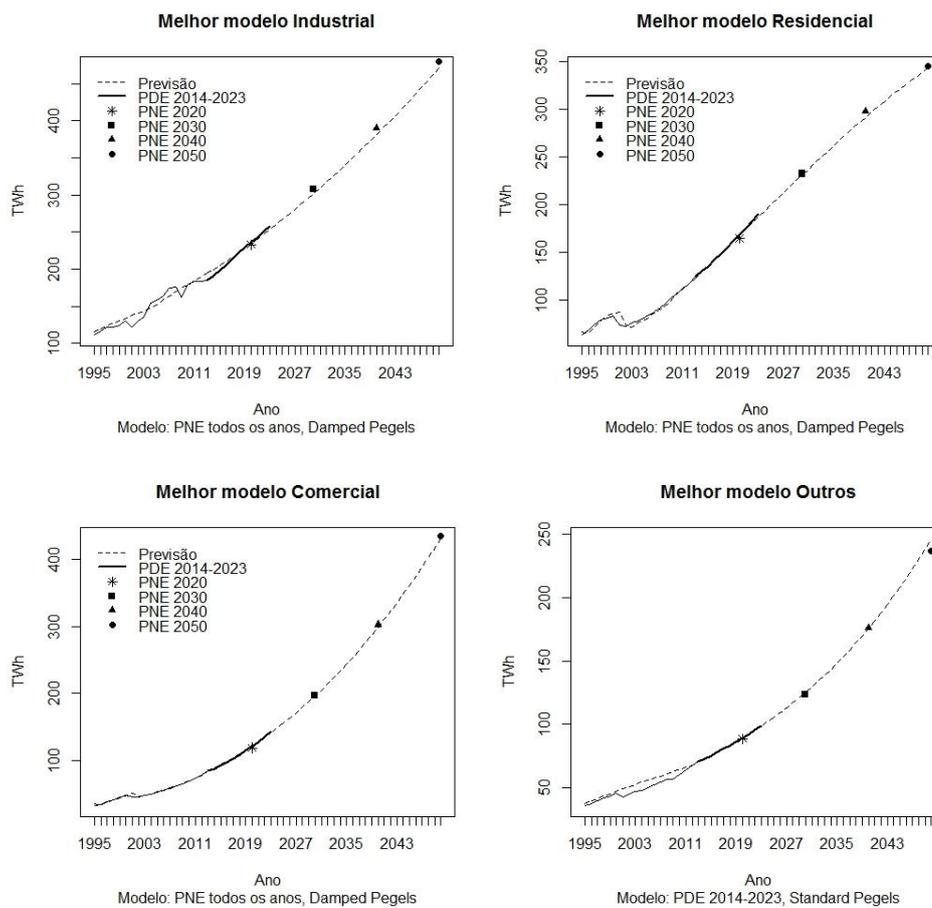


Figura 14 - Melhor modelo ajustado às previsões do PDE 2014-2023 e PNE 2050, por classe de consumo

Fonte: a autora (2015)

Na próxima seção serão apresentados os resultados obtidos ao aplicar a abordagem *bottom up*.

4.2

Abordagem *bottom-up*

A importância da classe residencial no consumo de energia elétrica no Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) pode ser reconhecida pela sua dimensão quantitativa, uma vez que, em 2013, concentrou 27% do consumo total e 85% de todos os consumidores. Além disso, nesta classe são empregadas as principais políticas públicas, tais como subsídios para unidades consumidoras habitadas por famílias de baixa renda, rotulagem e aumento da eficiência energética de aparelhos residenciais, entre outros. Por conta de tal importância, o foco da abordagem *bottom-up* será a classe de consumo residencial.

Em consequência da extensão territorial do Brasil, as características das regiões geográficas são completamente distintas, podendo o país ser dividido em cinco países diferentes. Neste contexto, e pelo fato do modelo FORECAST permitir, os dados de entrada do *software* serão desagregados por região geográfica, sendo elas: Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Norte e Nordeste, permitindo assim uma análise mais sensível das projeções futuras de consumo.

Na abordagem *bottom-up*, para calcular a demanda final de energia são necessárias informações macro econômicas, de cada bem final, entre outras. Particularmente para a plataforma FORECAST-Residential, uma inúmera quantidade de dados é requisitada e, por conta da escassez de dados históricos do Brasil, alguns ajustes tiveram que ser feitos. Na Tabela 9 estão presentes os dados que foram utilizados como *input* do *software*, as fontes e métodos de previsão, quando necessário.

Esta seção será dividida em três subseções, a primeira contemplando a previsão das variáveis macro econômicas necessárias para o funcionamento da plataforma FORECAST, a segunda com os dados por bem final e por fim a apresentação dos resultados finais de consumo de energia do setor residencial.

Tabela 9 – Variáveis de input plataforma FORECAST-Residencial

Variável	Horizonte	Fonte	Método de previsão
População	1991-2050	(IBGE, 2013)	Regressão Dinâmica
Número de domicílios	1991-2050	(IBGE, 2013)	Regressão Dinâmica
Habitantes por domicílios	1991-2050	-	Habitantes=População/Domicílios
PIB per capita	1991-2050	(MORAIS <i>et al.</i> , 2014)	Regressão Dinâmica
Preço da tarifa de energia	1991-2050	ANEEL	Standard Pegels
Taxa de posse dos bens-finais	1991-2050	(PROCEL, 2005a) e (EPE, 2014)	-
Distribuição do estoque por classe de eficiência	1991-2008	-	Estoque = Taxa de Posse * Número de Domicílios
Potência em uso dos bens-finais	constante	(PROCEL, 2005a)	-
Número de horas em uso dos bens-finais	constante	(PROCEL, 2005a)	-
Número de horas em <i>stand by</i> dos bens-finais	constante	(DANTAS, 2014)	-
Potência em <i>stand by</i> dos bens-finais	constante	(DANTAS, 2014)	-

Fonte: a autora (2015)

4.2.1

Previsão das variáveis macro econômicas

De acordo com a Tabela 9, os primeiros dados necessários para entrada na plataforma são de caráter macro econômico (população, número de domicílios, habitantes por domicílio, produto interno bruto per capita e preço da eletricidade) com horizonte de previsão até 2050.

Diretamente do estudo Projeções da População: Brasil e Unidades da Federação (IBGE, 2013) é possível extrair a população total brasileira até o horizonte desejado, enquanto para regiões o último ano previsto é 2030, com isso para extrapolar esse valor até 2050 foi aplicada a técnica regressão dinâmica (COCHRANE; ORCUTT, 1949) tendo como variável explicativa a população total do Brasil. Na Tabela 10, estão inseridos os coeficientes encontrados com regressão dinâmica para cada uma das regiões e a análise mais importante a ser extraída é a significância da variável população brasileira (Pop. Brasil) em todos os casos. Na Figura 15 é mostrada a evolução prevista até 2050 do número de habitantes para as regiões geográficas, o principal destaque se dá a aceleração no crescimento populacional esperado das regiões Nordeste e Centro-Oeste que crescem em média 19% ao comparar o ano de 2014 com o ano de 2050 contra um aumento de aproximadamente 10% das demais regiões para o mesmo período.

Tabela 10 - Parâmetros da regressão dinâmica para população por região

Região	Parâmetro	Estimativa	p valor
Norte	Intercepto	-9.870.000	0,000
	Pop. Brasil	0,134	0,000
Nordeste	Intercepto	7.522.000	0,000
	Pop. Brasil	0,239	0,000
Sudeste	Intercepto	5.991.000	0,000
	Pop. Brasil	0,390	0,000
Sul	Intercepto	3.949.000	0,000
	Pop. Brasil	0,124	0,000
Centro-Oeste	Intercepto	-7.592.000	0,000
	Pop. Brasil	0,114	0,000

Fonte: a autora (2015)

Evolução do número de habitantes por região (milhões)

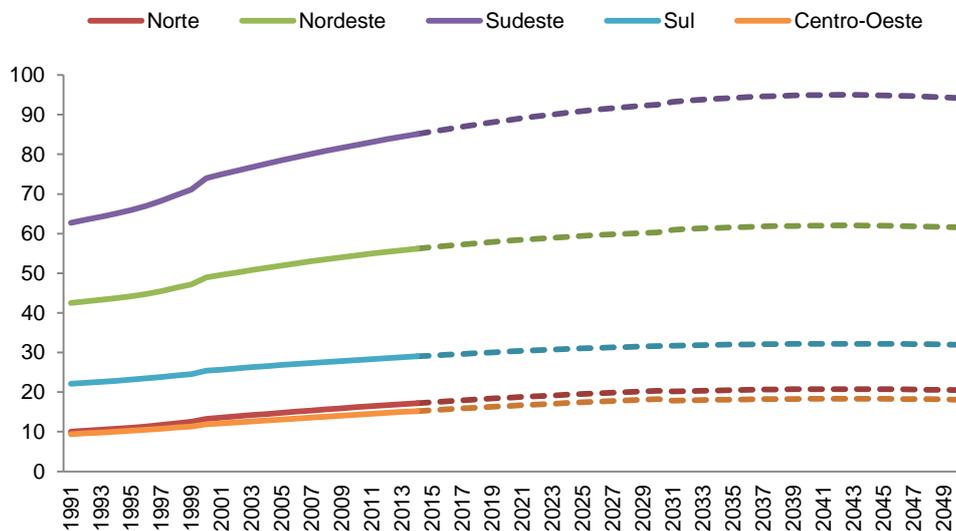


Figura 15 - Evolução esperada do número de habitantes até 2050 por região

Fonte: a autora (2015)

O número de domicílios para o Brasil e por região também se encontra disponível no estudo Projeções da População: Brasil e Unidades da Federação (IBGE, 2013) até 2030. Para extrapolar o resultado para todo o Brasil até 2050 foi aplicada a técnica de *Standard Pegels* e as estimativas obtidas para α , γ e φ podem ser vistas na Tabela 11.

Tabela 11 - Parâmetros do *Standard Pegels* para número de domicílios do Brasil

Setor	Parâmetros	Estimativa	MAPE <i>in sample</i>
Brasil	α	0,999	0,55%
	γ	0,179	
	φ	0,980	

Fonte: a autora (2015)

Para resolver a questão por região, novamente foi aplicada regressão dinâmica usando como variáveis explicativas o número de domicílios do Brasil e a população de cada região, as estimativas dos parâmetros obtidos podem ser vistos na Tabela 12. Destaca-se que para a região Norte, a variável população não foi significativa e por isso não foi incluída na modelagem. Na Figura 16 estão os resultados gráficos das previsões e analisa-se que, a região Norte foi a que apresentou maior crescimento esperado (74,6%) ao comparar 2050 com 2014, seguida da região Sul com 73,2%, do Sudeste com 65,6%, Centro-Oeste (65,3%) e por fim o Nordeste com crescimento esperado de 36,2%.

Tabela 12 - Parâmetros da regressão dinâmica para número de domicílios por região

Região	Parâmetro	Estimativa	p valor
Norte	Intercepto	-1.109.000	0,000
	Num. Dom. Brasil	0,086	0,000
Nordeste	Intercepto	-4.899.000	0,000
	Num. Dom. Brasil	0,103	0,000
	Pop. Nordeste	0,247	0,000
Sudeste	Intercepto	3.436.000	0,000
	Num. Dom. Brasil	0,511	0,000
	Pop. Sudeste	-0,086	0,000
Sul	Intercepto	3.310.000	0,000
	Num. Dom. Brasil	0,214	0,000
	Pop. Sul	-0,231	0,000
Centro-Oeste	Intercepto	-1.095.000	0,000
	Num. Dom. Brasil	0,077	0,000
	Pop. Centro-Oeste	0,070	0,000

Fonte: a autora (2015)

Evolução do número de domicílios por região (milhões)

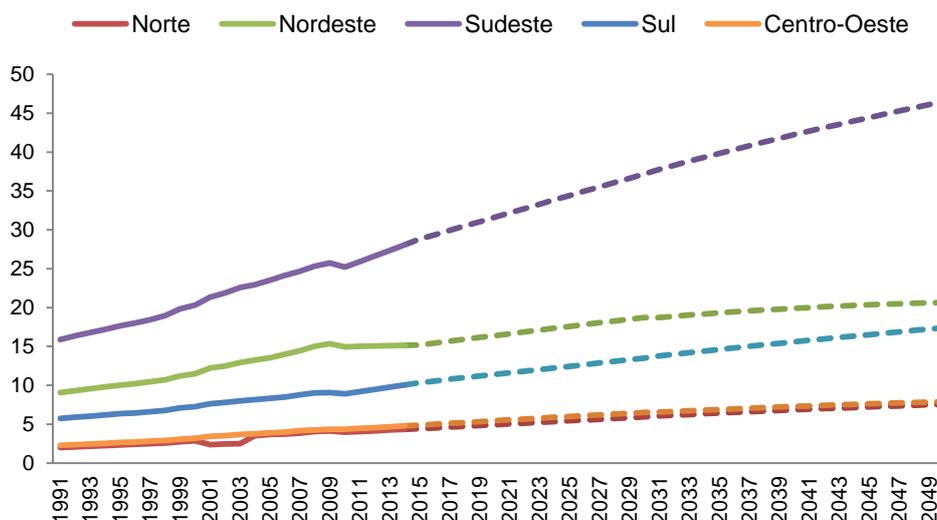


Figura 16 - Evolução esperada do número de domicílios até 2050 por região

Fonte: a autora (2015)

O cálculo do número de habitantes por domicílio é o resultado da divisão entre a população e número de domicílios por todo o horizonte e o resultado gráfico pode ser visto na Figura 17. Percebe-se uma quebra estrutural para a região Norte entre os anos 2001 e 2003, possivelmente geradas por algum erro na pesquisa de população ou domicílios, já que se trata do histórico dos dados. Outro fato que vale a pena chamar atenção é o declínio do número médio de habitantes em todas as regiões, sendo o Sul a região com menor média, chegando à expectativa de se ter menos de duas pessoas por residência em 2050, tal análise e conclusão foi realizada também em ALVES & CAVENAGHI (2012).

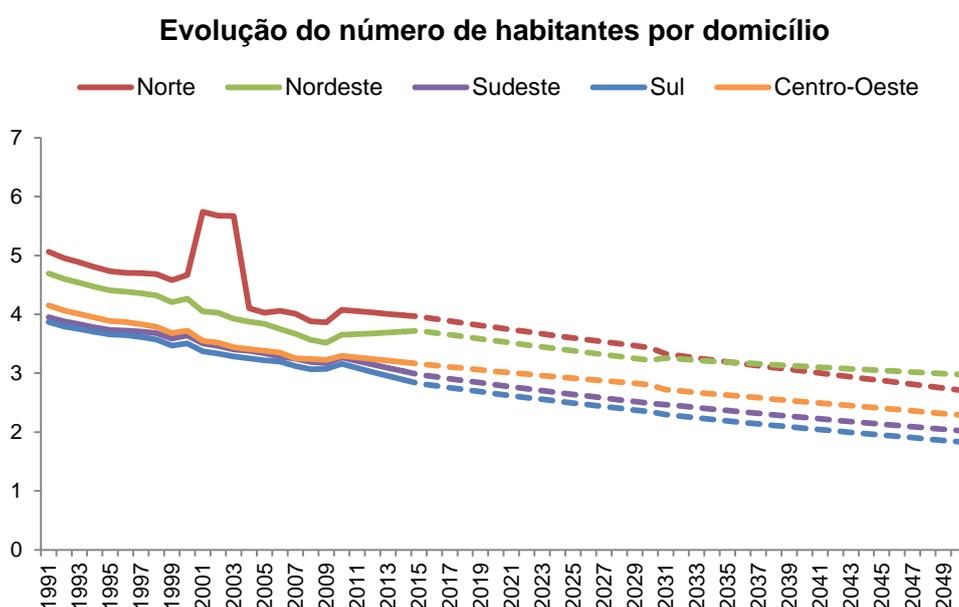


Figura 17 - Evolução esperada do número habitantes por domicílio até 2050 por região

Fonte: a autora (2015)

A projeção do PIB per capita do Brasil até 2050 foi extraída do artigo MORAIS *et al* (2014), que se baseia nas expectativas do PDE 2011-2020. Para obter as previsões por região geográfica, foram testadas as variáveis PIB per capita do Brasil e a própria população de cada região em uma regressão dinâmica. Na Tabela 13 encontram-se as estimativas e parâmetros resultantes e como se pode ver, somente para a região Norte o intercepto não foi significativo, não sendo levado em consideração no modelo final. Já para as regiões Nordeste e Sul a variável população não foi considerada por não ser significativa a um nível de significância de 5%.

Tabela 13 - Parâmetros da regressão dinâmica para produto interno bruto por região

Região	Parâmetro	Estimativa	p valor
Norte	PIB per capita Br.	0,944	0,000
	Pop. Norte	0,000	0,000
Nordeste	Intercepto	-434	0,000
	PIB per capita Br.	0,527	0,000
Sudeste	Intercepto	1.474	0,000
	PIB per capita Br.	1,289	0,000
Sul	Pop. Sudeste	0,000	0,000
	Intercepto	1.467	0,000
Centro-Oeste	PIB per capita Br.	0,965	0,000
	Intercepto	-8.674	0,000
Centro-Oeste	PIB per capita Br.	1,333	0,000
	Pop. Centro-Oeste	0,001	0,000

Fonte: a autora (2015)

Na Figura 18 podem-se ver as projeções até 2050 para cada região brasileira e a partir dela analisa-se que historicamente as regiões Norte e Nordeste possuem o menor PIB per capita com a expectativa de se manter assim até 2050. Porém no mesmo cenário espera-se que o Centro-Oeste ultrapasse o Sudeste como a região com maior PIB per capita.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1313499/CA

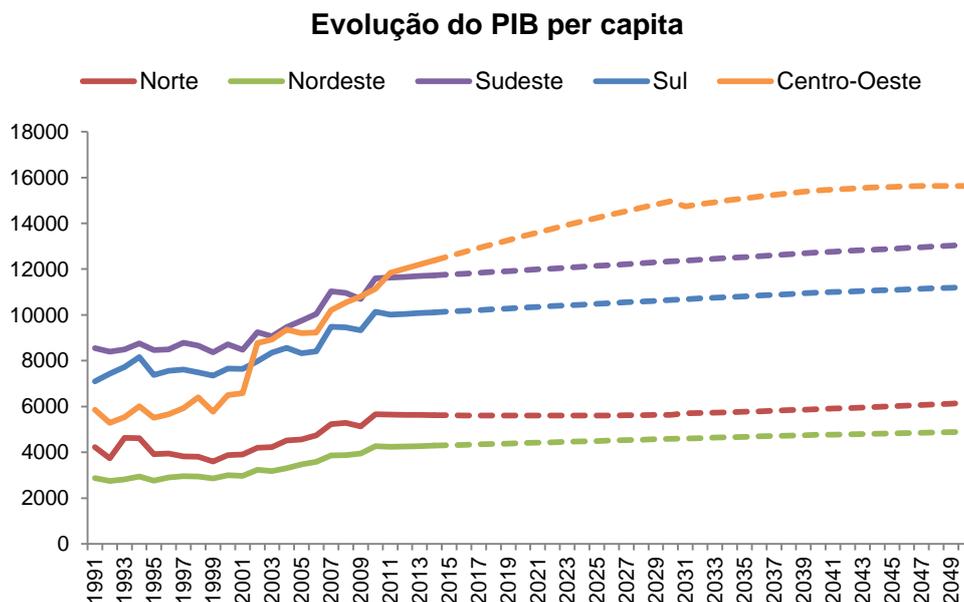


Figura 18 - Evolução esperada do PIB per capita até 2050 por região

Fonte: a autora (2015)

Para finalizar as variáveis macro econômicas, o histórico da média de preço de eletricidade por região foi obtido através do site da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) entre os anos de 2003 e 2013. Para realizar a previsão desses valores até 2050 foi utilizado o método univariado chamado de tendência

linear amortecida, ou *Standard Pegels*. Na Tabela 14 encontram-se os parâmetros ajustados para cada caso e na Figura 19 estão as projeções para o horizonte desejado. Por se tratar de um histórico com apenas 11 dados e com alta dispersão, as projeções realizadas retratam uma tendência linear com pouca inclinação. Ainda analisando as evoluções temporais esperadas nota-se que a região Nordeste é a que possui menor média, seguida pelo Sul, Sudeste, Centro-Oeste e Norte, este último apresentando um preço médio no histórico de R\$ 288,00 por kWh.

Tabela 14 - Parâmetros do *Standard Pegels* para preço médio de eletricidade por região

Setor	Parâmetros	Estimativa	MAPE <i>in sample</i>
Norte	α	0,001	4,35%
	γ	0,000	
	φ	0,865	
Nordeste	α	1,000	5,97%
	γ	0,000	
	φ	0,855	
Sudeste	α	0,000	4,83%
	γ	0,000	
	φ	0,867	
Sul	α	0,000	5,54%
	γ	0,000	
	φ	0,887	
Centro-Oeste	α	0,000	5,47%
	γ	0,000	
	φ	0,826	

Fonte: a autora (2015)

Evolução do preço médio de eletricidade

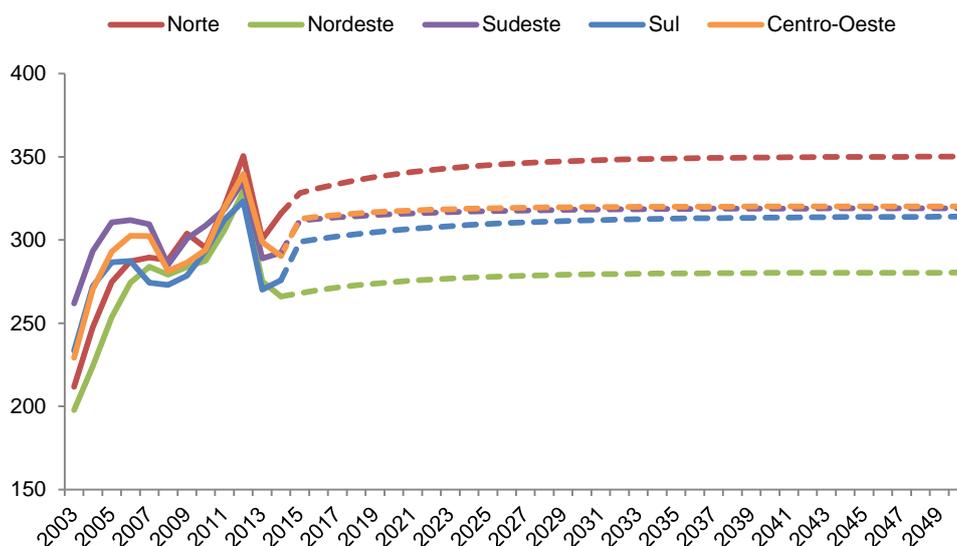


Figura 19 - Evolução esperada do preço médio de eletricidade até 2050 por região

Fonte: a autora (2015)

Na Tabela 15 está sendo apresentada a evolução no horizonte desejado de cada variável macro econômica a ser considerada na abordagem *bottom up* por região e também para o Brasil. Vale recordar que por se tratar de um modelo que constrói o preço final baseado em todas as variáveis de entrada, qualquer mudança no cenário base representará uma variação no consumo a ser calculado.

Tabela 15 - Variáveis macro econômicas

Setor	Variável	Unidade	2013	2014	2020	2030	2040	2050
Brasil	População	milhões	201,03	202,77	212,08	223,13	228,15	226,35
	Domicílios	milhões	61,11	62,37	69,75	81,84	91,83	99,98
	Hab./domicílio	hab./dom.	3,29	3,25	3,04	2,73	2,48	2,26
	PIB per capita	mil reais	8,93	8,96	9,17	9,52	9,85	10,10
	Tarifa energia	reais/kWh	286,73	288,11	310,59	315,34	316,48	316,77
Norte	População	milhões	16,98	17,23	18,58	20,36	20,74	20,50
	Domicílios	milhões	4,24	4,32	4,92	5,93	6,84	7,55
	Hab./domicílio	hab./dom.	4,01	3,99	3,78	3,43	3,03	2,72
	PIB per capita	mil reais	5,63	5,62	5,60	5,64	5,89	6,16
	Tarifa energia	reais/kWh	300,67	316,04	339,50	347,71	349,68	350,15
Nordeste	População	milhões	55,79	56,19	58,17	60,32	61,99	61,56
	Domicílios	milhões	15,11	15,16	16,39	18,73	19,90	20,65
	Hab./domicílio	hab./dom.	3,69	3,71	3,55	3,22	3,11	2,98
	PIB per capita	mil reais	4,27	4,29	4,40	4,59	4,76	4,89
	Tarifa energia	reais/kWh	275,18	266,00	274,80	279,27	280,20	280,39
Sudeste	População	milhões	84,47	85,12	88,60	92,56	94,91	94,21
	Domicílios	milhões	27,34	28,07	31,60	37,18	42,22	46,49
	Hab./domicílio	hab./dom.	3,09	3,03	2,80	2,49	2,25	2,03
	PIB per capita	mil reais	11,69	11,73	11,95	12,34	12,73	13,06
	Tarifa energia	reais/kWh	288,87	292,29	315,53	318,26	318,91	319,06
Sul	População	milhões	28,80	29,02	30,22	31,63	32,20	31,98
	Domicílios	milhões	9,75	10,05	11,39	13,48	15,59	17,40
	Hab./domicílio	hab./dom.	2,95	2,89	2,65	2,35	2,07	1,84
	PIB per capita	mil reais	10,08	10,11	10,31	10,65	10,97	11,21
	Tarifa energia	reais/kWh	270,10	275,82	305,81	311,71	313,50	314,04
Centro-Oeste	População	milhões	14,99	15,22	16,50	18,26	18,31	18,11
	Domicílios	milhões	4,67	4,78	5,44	6,51	7,28	7,90
	Hab./domicílio	hab./dom.	3,21	3,19	3,03	2,80	2,52	2,29
	PIB per capita	mil reais	12,20	12,39	13,43	14,96	15,43	15,64
	Tarifa energia	reais/kWh	298,81	290,38	317,31	319,77	320,14	320,19

Fonte: a autora (2015)

4.2.2

Bens finais

Para a abordagem *bottom-up*, os bens finais considerados para cálculo do consumo residencial serão: geladeira, freezer, televisão, chuveiro elétrico, iluminação (número de pontos de luz na residência) e ar-condicionado. Conforme indicado na Tabela 9, as variáveis necessárias para modelar o consumo específico

final de cada residência são a taxa de posse por aparelho, distribuição do estoque por classe de eficiência, potência em uso, número de horas em uso, potência do aparelho em *stand by* e número de horas em *stand by*.

Para o ano de 2005, foi possível extrair a taxa de posse de cada bem final através da Pesquisa de Posse e Hábitos (PPH) (PROCEL, 2005a) e para o ano de 2013 foi considerado o valor publicado no PNE 2050 (EPE, 2014). Para a construção do histórico dessa variável foi calculado um crescimento anual médio para preencher os anos intermediários. Atenta-se para o fato de que os valores considerados por região serão os mesmos que a média do Brasil, ou seja, não haverá diferença desses dados por região. Isso se deve ao fato de somente estar disponível até o momento a informação para todo o Brasil, e não por região geográfica, para o ano de 2013, segundo o PNE 2050.

O consumo específico de cada equipamento é calculado baseado, no número de horas em operação, potência em operação, número de horas em *standby* e potência em *standby*. Como só se tem dados dos hábitos do brasileiro para o ano de 2005 (através das PPH's), ficou decidido que o consumo específico seria congelado para os demais anos, ou seja, no cenário a ser considerado para o cálculo do consumo final de energia não haverá análise de eficiência dos bens finais. A variável número médio de horas em operação de cada bem final foi extraída, também, das Pesquisas de Posses e Hábitos (PROCEL, 2005a), já as potências médias em operação foram obtidas através de tabelas do site do PROCEL. As informações em *standby*, como número de horas e potência, foram obtidas em DANTAS (2014). Na Tabela 16 estão as taxas de posse a serem consideradas em 2005 e em 2013, além do consumo específico anual de cada bem final.

Tabela 16 - Taxa de posse e consumo específico em 2013

Bem final	Taxa de posse (uni./dom.) 2005	Taxa de posse (uni./dom.) 2013	Consumo específico (kWh/ano)
Geladeira	1,00	1,03	377,22
Freezer	0,24	0,18	450,88
Televisão	1,41	1,61	160,98
Chuveiro elétrico	0,89	0,70	710,40
Iluminação	8,02	8,25	55,28
Ar-condicionado	0,16	0,23	2.700,97

Fonte: a autora (2015)

4.2.3

Previsão do consumo de energia do setor residencial

Após realizar as premissas descritas nas subseções anteriores e coletar alguns outros dados, pode-se obter o resultado do consumo final esperado de energia do setor residencial por região de 2014 até 2050, ver Figura 17 e Tabela 17.

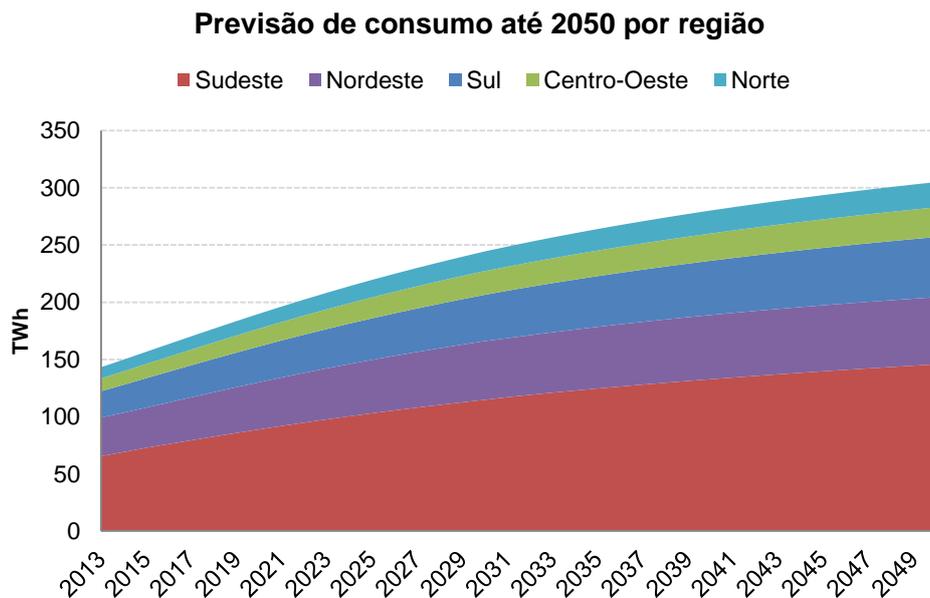


Figura 20 - Previsão da série de consumo por região com o FORECAST-Residencial

Fonte: a autora (2015)

Tabela 17 - Consumos previstos por região para o setor residencial com abordagem *bottom up* (TWh)

Região	2014	2020	2030	2040	2050
Norte	10,22	13,06	17,14	20,06	22,08
Nordeste	34,44	41,23	51,32	56,14	58,74
Sudeste	69,02	88,80	114,69	132,66	145,67
Sul	24,38	31,32	40,48	47,43	52,58
Centro-Oeste	11,81	15,56	20,79	23,83	25,93

Fonte: a autora (2015)

Em 2013 a região Sudeste foi a maior responsável pelo consumo total de energia do Brasil com 46%, seguida das regiões Nordeste (24%), Sul (16%), Centro-Oeste (8%) e Norte (7%). A partir da modelagem *bottom-up* espera-se que em 2050, a mesma dinâmica de divisão entre as regiões continue, onde o Sudeste representará a maior parte do consumo de energia (146 TWh, 48%), seguida da

região Nordeste (59 TWh, 19%) , Sul (53 TWh, 17%), Centro-Oeste (26 TWh, 9%) e por fim o Norte (22,08%). Essa dinâmica pode ser vista na sequência de gráficos da Figura 21 até a Figura 25, e o destaque vai para o aumento de 2% do consumo relativo do Sudeste, enquanto que a região Nordeste apresentou queda de 2%, comparando 2050 com 2014.

2014

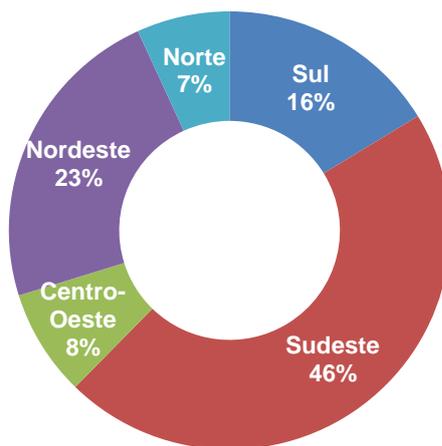


Figura 21 - Divisão percentual de consumo esperado por região em 2014

Fonte: a autora (2015)

2020

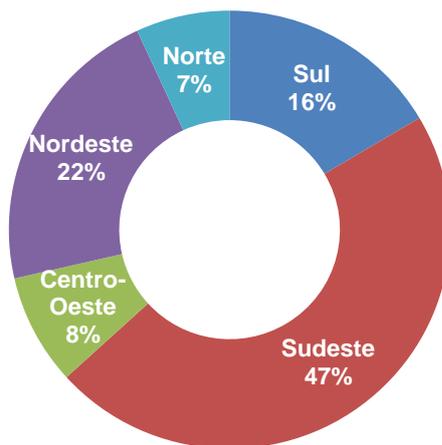


Figura 22 - Divisão percentual de consumo esperado por região em 2020

Fonte: a autora (2015)

2030

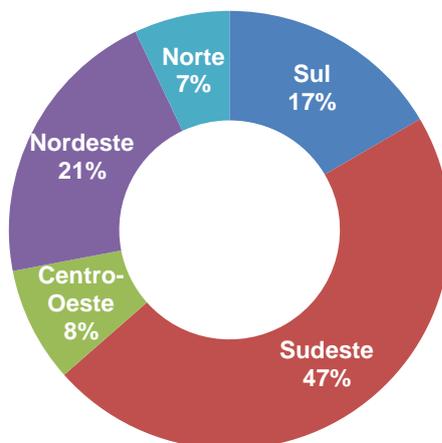


Figura 23 - Divisão percentual de consumo esperado por região em 2030

Fonte: a autora (2015)

2040

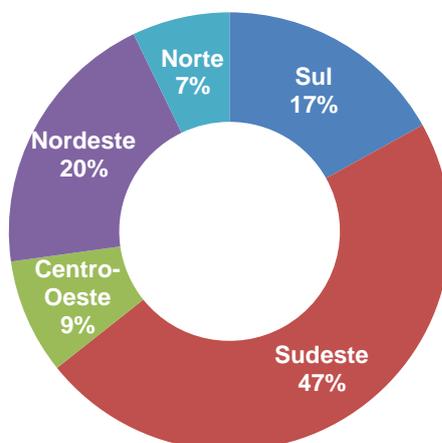


Figura 24 - Divisão percentual de consumo esperado por região em 2040

Fonte: a autora (2015)

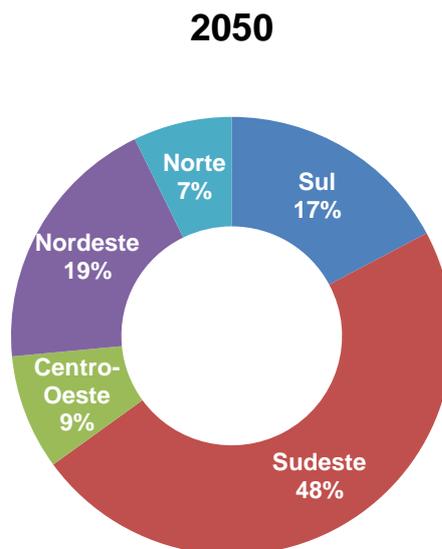


Figura 25 - Divisão percentual de consumo esperado por região em 2050

Fonte: a autora (2015)

O consumo final esperado de eletricidade para o setor residencial do Brasil até 2050 com a abordagem *bottom up* é obtido através da adição do consumo calculado de todas as regiões geográficas. Na Figura 26 é possível enxergar graficamente esses valores, as projeções do Plano Decenal de Energia 2014-2023 (PDE 2023) e do Plano Decenal Nacional 2050 (PNE 2050).

O resultado extraído com o FORECAST-*Residential* mesmo com todas as limitações de dados é no mesmo nível que o PNE 2050 com a diferença que se projeta um consumo menos acelerado, resultando em valores mais pessimistas para os anos finais (2040 e 2050). Comparando agora com o PDE 2023, conclui-se que a previsão encontrada está acima do esperado oficialmente e isso pode ter acontecido por diversos motivos, sendo o mais provável a não consideração de eficiência energética por parte do *bottom up*. Na Tabela 18 e Tabela 19 estão os valores pontuais encontrados com a abordagem atual e extraídos das pesquisas da EPE, as análises para essas tabelas são as mesmas feitas anteriormente.

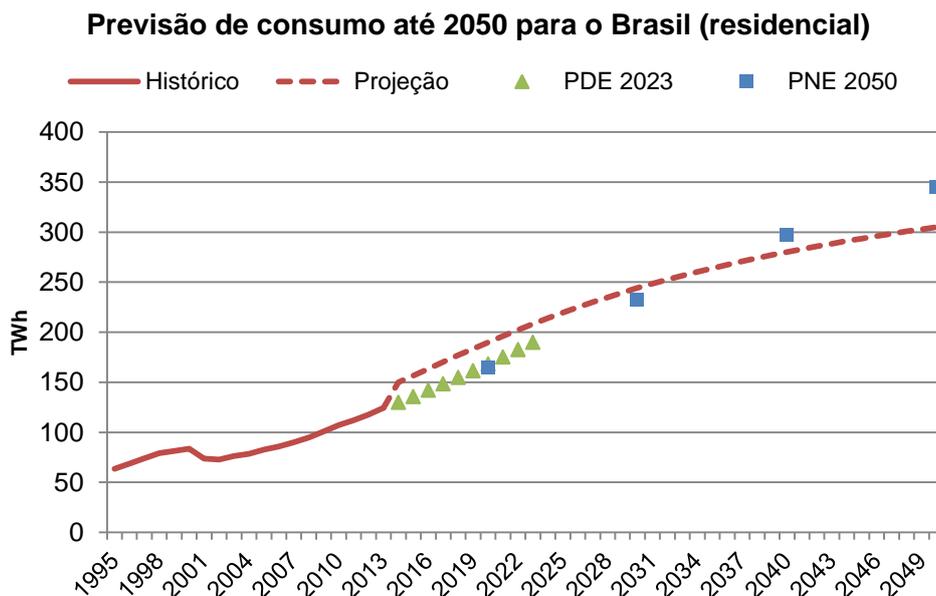


Figura 26 - Previsão da série de consumo do Brasil, setor residencial, com o FORECAST-Residential

Fonte: a autora (2015)

Tabela 18 - Comparação entre previsões do FORECAST-Residential e do PDE 2014-2023

Modelo	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
FORECAST-Residential	149,9	156,7	163,5	170,2	176,9	183,5	190,0	196,2	202,3	208,3
PDE 2014-2023	130,0	135,8	142,1	148,4	154,9	161,5	168,4	175,4	182,6	189,9

Fonte: a autora (2015)

Tabela 19 - Comparação entre previsões do FORECAST-Residential e do PNE 2050

Modelo	2020	2030	2040	2050
FORECAST-Residential	190,0	244,4	280,1	305,0
PNE 2050	164,7	232,4	297,4	345,2

Fonte: a autora (2015)

4.3

Comparação entre as abordagens *top-down* e *bottom-up*

Para expor as conclusões finais acerca das metodologias aqui aplicadas será realizada a comparação entre as abordagens *top-down* e *bottom-up* para o setor energético Residencial brasileiro.

Na Tabela 20 estão expostos os valores pontuais previstos através do melhor modelo da abordagem *top-down* (Residencial) e *bottom-up*, além do projetado pelo PDE 2014-2023, e na Tabela 21 a mesma comparação é feita com o PNE 2050.

Tabela 20 - Comparação entre as abordagens *top-down*, *bottom-up* e o PDE 2014-2023

Ano	PDE 2014-2023	<i>Top-down</i>	<i>Bottom-up</i>
2014	129,87	130,34	149,86
2015	135,60	136,42	156,71
2016	141,56	142,57	163,47
2017	147,73	148,78	170,23
2018	154,14	155,05	176,93
2019	160,78	161,35	183,52
2020	167,67	167,69	189,97
2021	174,80	174,06	196,25
2022	182,20	180,45	202,35
2023	189,86	186,85	208,26
Erro médio	-	0,06%	15,4%

Fonte: a autora (2015)

Tabela 21 - Comparação entre as abordagens *top-down*, *bottom-up* e o PNE 2050

Ano	PNE 2050	<i>Top-down</i>	<i>Bottom-up</i>
2020	164,73	167,69	189,97
2030	232,37	231,40	244,42
2040	297,45	291,31	280,13
2050	345,20	343,43	305,00
Erro médio	-	1,2%	20,6%

Fonte: a autora (2015)

Observa-se que os hiperparâmetros do modelo *top-down* utilizado foram otimizados para alcançar os valores do PNE 2050, porém também obteve êxito em ajustar os valores do PDE 2014-2023, sendo assim a melhor coleção de hiperparâmetros para ambas as pesquisas.

Quando comparado com as pesquisas da EPE e a abordagem *top-down*, a metodologia *bottom-up* superestimou todos os valores até meados de 2040, porém projetou consumos mais baixo após esse período. Concluindo-se assim que a taxa

de crescimento esperada pela plataforma FORECAST entre 2040 e 2050 é menor do que as projeções oficiais e conseqüentemente da metodologia *top-down*.

No próximo capítulo estão presentes as conclusões da pesquisa, considerações finais e possíveis trabalhos futuros.