



UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



EDSON MANCUZO

Impacto do Gerenciamento pelo Lado da Demanda no Consumo Residencial

BAURU
2017

EDSON MANCUZO

Impacto do Gerenciamento pelo Lado da Demanda no Consumo Residencial

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia de Bauru, da Universidade Estadual Paulista.

Orientador: Prof. Dr. André Nunes de Souza

BAURU

2017

Mancuzo, Edson.

Impacto do gerenciamento pelo lado da demanda no
consumo residencial / Edson Mancuzo, 2017
93 f.

Orientador: André Nunes de Souza

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2017

1. Gerenciamento pelo lado da demanda. 2. Smart
grid. 3. Eficiência energética. 4. Perdas Técnicas. I.
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE EDSON MANCUZO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 31 dias do mês de maio do ano de 2017, às 08:30 horas, no(a) Anfiteatro da Diretoria Técnica de Informática/FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. ANDRE NUNES DE SOUZA - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Doutor JOSÉ ANTONIO DONIZETE ROSSI do(a) - / Rossi Consultoria em P&D, ROSSI, Brasil, Prof. Dr. ANDRE LUIZ ANDREOLI do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru/UNESP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de EDSON MANCUZO, intitulada **IMPACTO DO GERENCIAMENTO PELO LADO DA DEMANDA NO CONSUMO RESIDENCIAL**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO ____ . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. ANDRE NUNES DE SOUZA

Doutor JOSÉ ANTONIO DONIZETE ROSSI

Prof. Dr. ANDRE LUIZ ANDREOLI

Dedico este trabalho a minha esposa e meus
filhos que sempre me incentivaram e
apoiaram para sua realização.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é apresentar o impacto do gerenciamento pelo lado da demanda no consumo residencial. A Eficiência Energética em uma área residencial pode ser aumentada de diversas formas, e a aplicação do gerenciamento pelo lado da demanda permite o ganho em eficiência e custos, tanto por parte do consumidor quanto por parte da concessionária. Este trabalho aborda a redução das perdas elétricas nos condutores (por efeito Joule) desde a saída dos transformadores de distribuição (MT / BT) até a entrada de energia elétrica de uma residência classe B1 com entrada em 127 / 220V bifásico e carga instalada entre 12 kW e 18 kW. Uma pesquisa foi elaborada para se obter hábitos de uso do consumidor residencial em relação aos equipamentos de sua residência. Um algoritmo para cálculo das perdas foi desenvolvido em Matlab com a finalidade de simular o consumo de energia em residências e linhas de distribuição de baixa tensão da região sudeste do Brasil. Aplicou-se os conceitos do gerenciamento pelo lado da demanda, apresentando o impacto no consumo residencial, assim como os custos relacionados à eficiência. As simulações demonstraram que foi possível otimizar o consumo de energia elétrica assim como diminuir a perda por dissipação nos condutores, reduzindo os custos.

Palavras-chave: gerenciamento pelo lado da demanda, *smart grid*, eficiência energética, perdas técnicas.

ABSTRACT

The goal of this paper is to present the impact of the management by the demand side in residential consumption. Energy Efficiency in a residential area can be increased in a number of ways, and the application of demand-side management allows for efficiency and cost gains by both the consumer and the utility. This work deals with the reduction of electrical losses in the conductors (Joule effect) from the output of the distribution transformers (MT / BT) to the electrical input of a class B1 residence with a biphasic 127 / 220V input and a load installed between 12 KW and 18 kW. A research was developed to obtain habits of use of the residential consumer in relation to the equipment of his residence. An algorithm for calculating losses was developed in Matlab with the purpose of simulating the energy consumption in homes and low voltage distribution lines in the southeastern region of Brazil. The management concepts were applied on the demand side, presenting the impact on residential consumption, as well as costs related to efficiency. The simulations demonstrated that it was possible to optimize the consumption of electric energy as well as to reduce the loss by dissipation in the conductors, reducing costs.

Keywords: demand side management, smart grid, energy efficiency, technical losses.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Oferta Interna de Energia por Fonte	13
Figura 2 - Potencial Hidrelétrico	14
Figura 3 - Técnicas de Gerenciamento de Cargas.....	23
Figura 4 - Comparativo entre a Tarifa Branca e a Tarifa Convencional	24
Figura 5 - Arquitetura de Aplicação das <i>Smart Grid</i>	27
Figura 6 - Topologia de Comunicação	28
Figura 7 - Participação dos Eletrodomésticos no Consumo Residencial - Brasil - 2005	36
Figura 8- Participação dos Eletrodomésticos no Consumo Residencial - Sudeste - 2005	36
Figura 9 - Curva de Carga Típica da Região Sudeste - 2007	37
Figura 10 - Cabos Multiplexados - Padrões	38
Figura 11 - Fluxograma Simplificado da Diretriz Metodológica	43
Figura 12 - Composição Setorial do Consumo de Eletricidade (%).....	44
Figura 13 - Circuito Proposto Para Estudo	49
Figura 14 - Ramo do Circuito para Cálculo de Perda.....	51
Figura 15 - Índices Gerados a Partir da Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso	57
Figura 16 - Composição dos Eletrodomésticos de uma Residência	66
Figura 17 - Perda por Hora Durante Um Dia - Sem GLD	69
Figura 18 - Perda por Hora Durante Um Dia - Estratégia 1 de GLD	70
Figura 19 - Perda por Hora Durante Um Dia - Estratégia 2 de GLD	71
Figura 20 - Perda por Hora Durante Um Dia - Estratégia 3 de GLD	72

Figura 21 - Resultados da Simulação - Perda.....	73
Figura 22 - Resultados da Simulação - Energia consumida.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição Setorial do Consumo de Eletricidade - %	15
Tabela 2 - Consumo de Eletricidade por Setor - gWh	15
Tabela 3 - Índice de Perda por Ano e Distribuidora - %	16
Tabela 4 - Limites de Variação de Tensão Secundária.....	39
Tabela 5 - Cabos dos Ramais de Ligação	39
Tabela 6 - Equipamentos de uma Residência e sua Utilização.....	46
Tabela 7 - Tabela de Potência dos Equipamentos.....	48
Tabela 8 - Horários de Utilização dos Equipamentos com Restrição (b)	58
Tabela 9 - Resultados da Pesquisa - Utilização	62
Tabela 10 - Resultados da Pesquisa - Horários	63
Tabela 11 - Resultados da Pesquisa - Alteração horário	64
Tabela 12 - Resultados da Simulação - Geral.....	68
Tabela 13 - Resultados da Simulação - Diferença	68
Tabela 14 - Resultados da Simulação - Valores tarifas 75%	76
Tabela 15 - Resultados da Simulação - Valores tarifas 85%	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABDI - Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial

ACB - Análise Custo Benefício

AMR - *Advanced Metering Infrastructure*

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

CAL - Condutor de Liga de Alumínio

COPEL - Companhia Paranaense de Energia

CE - Comissão Européia

DR - *Demand Response*

DSM - *Demand Side Management*

GTD - Geração Transmissão e Distribuição

GLD - Gerenciamento pelo Lado da Demanda

iAPTEL - Instituto da Associação de Empresas Proprietárias de Infraestrutura e de Sistemas Privados de Telecomunicações

IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia, Informações e Comunicações

MT/BT - Média Tensão / Baixa Tensão

NAN - *Neighborhood Area Network*

PBE - Programa Brasileiro de Etiquetagem

PNE - Plano Nacional de Energia

PNEf - Plano Nacional de Eficiência Energética

Procel - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

P&D - Pesquisa e Desenvolvimento

ROL - Receita Operacional Líquida

SG - *Smart Grid*

WAN - *Wide Area Network*

XLPE - Polietileno Reticulado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Contextualização.....	13
1.2	Objetivo da Pesquisa	20
1.3	Justificativa.....	20
1.4	Estrutura do Trabalho.....	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1	Gerenciamento pelo Lado da Demanda - GLD	22
2.2	Elasticidade da Carga	23
2.3	<i>Smart Grid</i>	25
2.4	Eficiência Energética.....	28
2.5	Perdas Elétricas	31
2.5.1	Classificação das Perdas Elétricas de Acordo com a Localização	31
2.5.2	Classificação das Perdas Elétricas de Acordo com sua Natureza ou Origem	32
2.5.3	Cálculo das Perdas Elétricas	32
a)	Perda Técnica	32
b)	Perda Não Técnica.....	34
2.6	Consumo de Energia no Setor Residencial.....	35
2.7	Rede Elétrica de Baixa Tensão Considerada.....	37
2.8	Aspectos gerais.....	40
3	DIRETRIZ METODOLÓGICA	41

3.1	Aspectos Gerais	41
3.2	Dados de Pesquisa	44
3.3	Definição do Sistema Elétrico de Baixa Tensão Considerado	48
3.4	Método de Cálculo das Perdas	50
3.5	Algoritmo para Cálculo das Perdas	53
3.6	Testes Realizados	55
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
4.1	Pesquisa Realizada	62
4.2	Simulações das Perdas	67
4.3	Simulações dos Valores Relacionados as Tarifas Branca e Convencional..	75
5	CONCLUSÕES	78
5.1	Aspectos Gerais	78
5.2	Possibilidades de Desdobramentos do Tema	79
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
7	ANEXOS	86
	A - Pesquisa de posse de equipamentos eletrodomésticos e hábitos de uso regionais	86
	B - Fluxograma 1	89
	C - Fluxograma 2	92

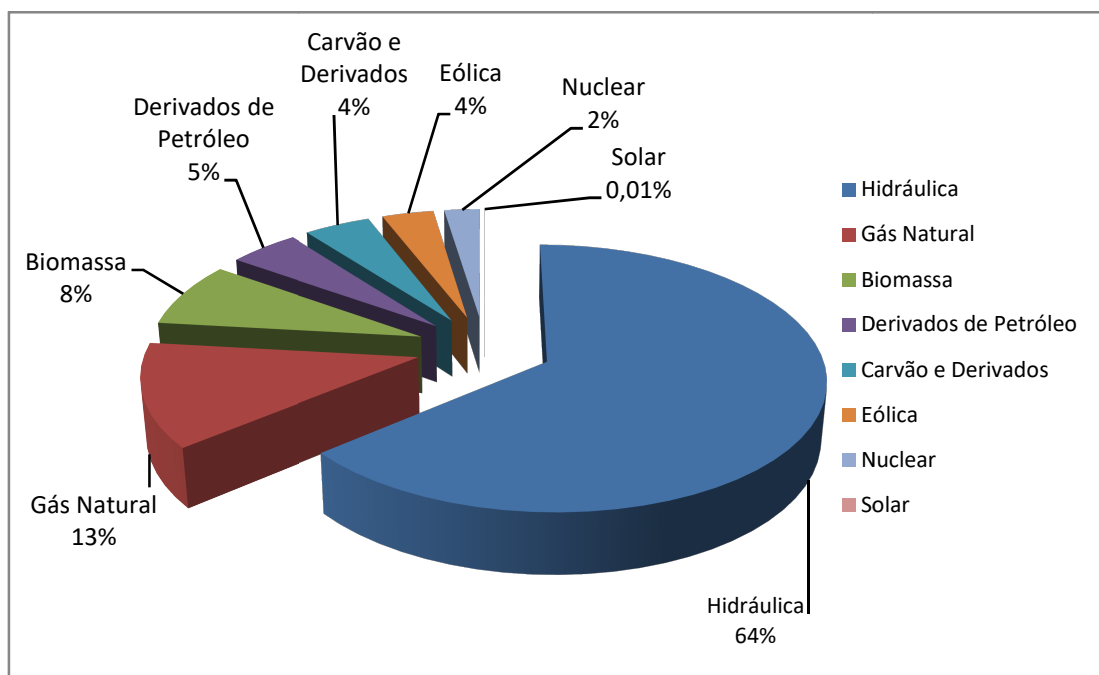
1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O consumo mundial de energia elétrica aumenta a cada ano, e com isso os governos em todo o mundo estão enfrentando inúmeros desafios para suprir a demanda, incluindo a diversificação da geração, sistemas de resposta à demanda, conservação de energia e redução das emissões de carbono global da indústria (FARHANGI,2010).

A geração de energia elétrica no Brasil é predominantemente de fonte hidráulica com participação de 64% do total da oferta interna, como pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 - Oferta Interna de Energia por Fonte



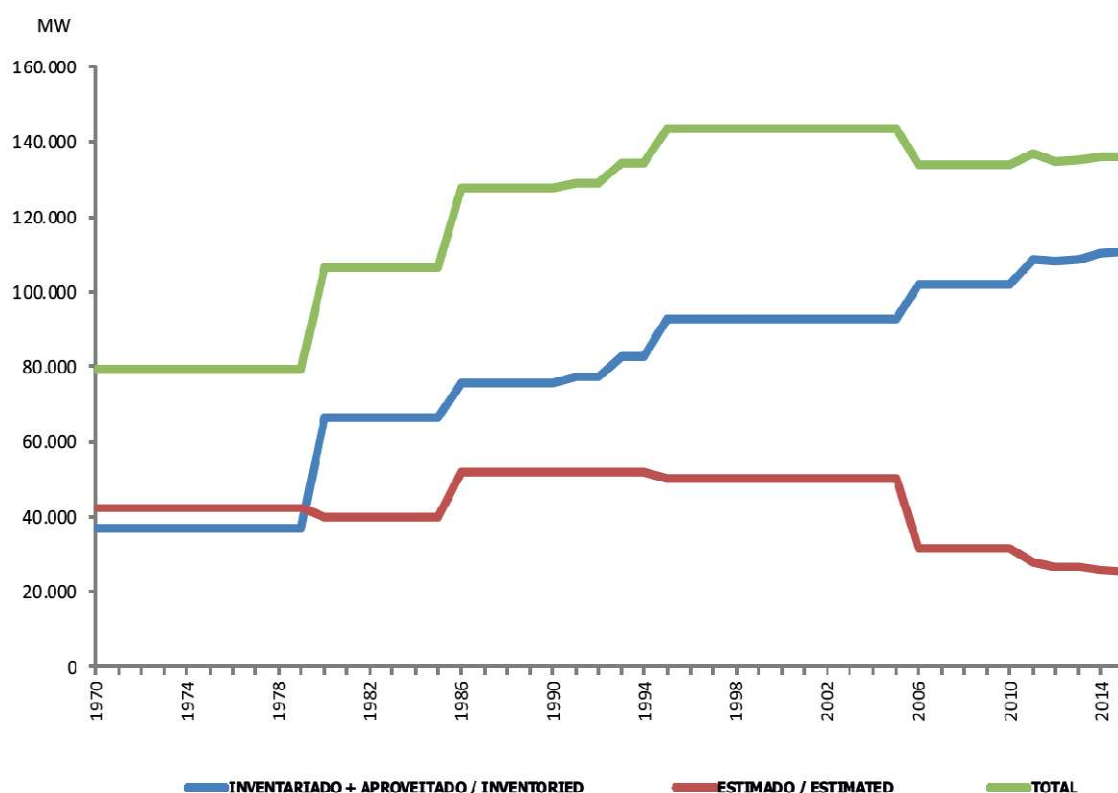
Fonte: Adaptado de (MME, 2016c).

Essa dependência da energia hidráulica faz com que haja escassez de geração em épocas de menor índice pluviométrico (chuvas), aumentando seu custo, pois passam a ser utilizadas outras fontes de energia. A usina termoelétrica é uma das opções utilizadas para suprir a carga demandada quando há diminuição de

geração por usinas hidrelétricas, o que traz aumento dos índices de carbono e custos, conforme já citado.

Um outro fator de impacto na geração de energia elétrica é o potencial hidrelétrico, que está próximo ao aproveitamento máximo com o tempo, conforme pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 - Potencial Hidrelétrico



Fonte: Adaptado de (MME, 2016c).

Entre os anos de 1978 e 1996 houve significativo aumento no aproveitamento hidráulico nacional, entretanto a partir de 2005 o potencial estimado diminuiu, pois as fontes existentes foram aproveitadas, elevando o índice, porém a soma total permaneceu praticamente estável.

O consumo de eletricidade pelo setor residencial vêm aumentando no decorrer dos anos conforme pode ser visto na Tabela 1. Observa-se que o setor residencial representava 22,0% do consumo total de energia elétrica em 2006, e em 2015 sua representatividade passou a ser de 25,1%. O setor industrial teve queda no consumo, que estava em 47% em 2006, caindo para 37,6% em 2015.

Tabela 1 - Composição Setorial do Consumo de Eletricidade - %

Setores	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Setor Energético	3,7	4,2	4,3	4,3	5,8	5,0	5,3	5,8	5,9	6,1
Residencial	22,0	22,1	22,3	23,6	23,1	23,3	23,6	24,2	24,8	25,1
Comercial	14,2	14,2	14,6	15,5	15,0	15,4	16,0	16,4	17,0	17,5
Público	8,5	8,2	8,1	8,3	8,0	7,9	8,0	8,0	8,0	8,2
Agropecuário	4,2	4,2	4,3	4,2	4,1	4,5	4,7	4,6	5,0	5,1
Transportes	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Industrial	47,0	46,7	46,1	43,8	43,8	43,5	42,1	40,7	38,9	37,6

Fonte: Adaptado de (MME, 2016c).

Comparando o consumo total de energia elétrica (gWh), entre 2006 e 2015, o aumento no consumo do setor residencial foi de 53 %, porém com uma queda de 0,75% no ano de 2015 quando comparado a 2014. A diminuição é reflexo do atual cenário econômico nacional. Os dados completos estão na Tabela 2.

Perdas na rede de distribuição são aquelas que ocorrem dentro do próprio sistema de distribuição e podem ser divididas em duas categorias, conforme sua causa: a perda técnica e perda não técnica.

Tabela 2 - Consumo de Eletricidade por Setor - gWh

Setores	2006	2008	2010	2012	2014	2015
Setor Energético	14.572	18.395	26.837	26.350	31.160	31.895
Residencial	85.810	95.585	107.215	117.646	132.302	131.315
Comercial	52.222	62.495	69.718	79.797	90.640	97.412
Público	33.049	34.553	36.979	39.818	42.851	42.672
Agropecuário	16.417	18.397	18.938	23.268	26.581	26.871
Transportes	1.462	1.607	1.662	1.885	1.979	2.055
Industrial	183.418	197.218	203.350	209.662	207.046	196.613
Consumo Final	389.950	428.250	464.699	498.386	532.559	522.833

Fonte: Adaptado de (MME, 2016c).

As perdas são um dos fatores que contribui para diminuir a eficiência energética do setor elétrico. Cada distribuidora de energia elétrica trabalha com um índice de perda elétrica, que é função das particularidades regionais e ambientais. A Tabela 3 apresenta alguns índices de perdas em função do ano e distribuidora.

Tabela 3 - Índice de Perda por Ano e Distribuidora - %

Ano	2011		2012		2013		2014	
Perdas	Técnicas	Total	Técnicas	Total	Técnicas	Total	Técnicas	Total
Cemig	9,66	11,11	10,02	11,57	9,66	11,11	10,28	11,83
Copel	6,52	8,12	6,48	8,65	6,58	8,20	6,22	8,10
CPFL Paulista	5,84	8,24	5,88	7,93	5,70	7,67	5,90	9,20
Eletropaulo	6,49	10,70	6,13	10,07	6,13	9,94	6,13	9,67
Light	6,67	21,56	7,08	23,90	7,14	22,57	-	-
Elektro	5,8	6,4	5,8	7,3	6,1	7,5	6,4	6,6

Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2017).

A perda técnica na distribuição de energia provém principalmente do aquecimento dos condutores pela passagem de corrente. A perda não técnica é a perda ocasionada por furtos de energia ou erros administrativos. A soma das duas é o total. Estas definições serão explicadas em detalhes no Capítulo 2. Observa-se que somente a Eletropaulo teve diminuição nos índices de perda técnica. As outras distribuidoras apresentaram aumento do mesmo com o tempo.

A necessidade de investimento em novas tecnologias para o aumento da eficiência energética do setor é fundamental para garantir a oferta de energia no futuro, e uma das alternativas que pode contribuir é o gerenciamento pelo lado da demanda em conjunto com o *smart grid*.

O gerenciamento pelo lado da demanda, (GLD), do inglês, *Demand Side Management*, é o planejamento e a implementação, que envolvem ações das concessionárias de energia elétrica, com o objetivo de reduzir consumo em horários específicos ou custos para a geração, transmissão e distribuição de energia utilizando de diversas estratégias, como conscientizar os consumidores de forma a produzir alterações desejadas na curva de carga. Outras ações englobam:

gerenciamento de carga, conservação de energia estratégica, geração de energia pelo lado do consumidor, substituição de equipamentos obsoletos por mais eficientes e estratégias para o crescimento da participação no mercado. Para que a capacidade da implementação seja bem sucedida, deve haver um equilíbrio das necessidades de serviços públicos junto ao cliente (GELLINGS, 1985).

Smart grid é o termo utilizado para referenciar redes de energia elétrica desde a geração, transmissão e até a distribuição (GTD), onde se tem infra estrutura de tráfego de dados bidirecional, com um certo nível de supervisão, controle e aquisição de dados de forma automatizada. Atualmente é crescente sua importância devido à necessidade de eficiência energética e conservação de energia, como citado acima.

A *smart grid* proporciona diversas possibilidades ao sistema nacional de GTD, como implementar os objetivos do gerenciamento pelo lado da demanda, fornecendo informações em tempo real que auxilia na tomada de decisão para o controle da demanda por parte do operador do sistema e também pelo cliente, que através de incentivos de tarifas pode decidir a forma de controle de seu consumo.

Em 15 abril de 2010 foi criado o Grupo de Trabalho para o estudo do conceito de *smart grid* e foram convidados os representantes das distribuidoras, órgãos reguladores do setor elétrico e de telecomunicações, setor acadêmico, entre outros como integrantes. Este grupo principal foi dividido em grupos específicos com o objetivo de cada um se aprofundar em uma área. As áreas ficaram:

- a) Estudos Econômicos responsável pela análise do custo-benefício;
- b) Tecnologia da Informação responsável pela análise da arquitetura de transmissão; e
- c) Medição e Mercado, responsável pela avaliação na flexibilização dos requisitos técnicos para pequenos agentes.

As iniciativas brasileiras para a implantação GLD em conjunto com as *smart grids* ainda são incipientes e barram na falta de legislação do setor e nos altos custos dos equipamentos. As concessionárias de energia elétrica passaram a investir nesta tecnologia em situações ou locais onde lhe sejam mais convenientes, por exemplo, onde tem alto índice de perdas não técnicas (MOREIRA, 2015). A

Companhia Paranaense de Energia - Copel implantou a *smart grid* em alguns bairros da área central de Curitiba focando a diminuição do tempo de restabelecimento da energia elétrica na rede não afetada em caso de queda de energia.

O Brasil possui atualmente diversos projetos pilotos de Cidades Inteligentes ou projetos que apenas instalam *smart grids* nos municípios. Segundo o Ministério da Ciência, Tecnologia, Informações e Comunicações - MCTI, levantamento realizado pela Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial - ABDI e pelo Instituto da Associação de Empresas Proprietárias de Infra estrutura e de Sistemas Privados de Telecomunicações - iAptel, há no Brasil mais de 200 projetos relacionados às *smart grids* com o envolvimento de 60 concessionárias de energia elétrica (MOREIRA, 2015). Entre eles pode-se destacar:

Eletrobrás Amazonas Energia em Parintins - AM;

Celpe em Fernando de Noronha - PE;

Cemig em Sete Lagoas - MG;

Ampla em Búzios - RJ;

Light no Rio de Janeiro - RJ;

Edp em Aparecida do Norte - SP; e

Eletropaulo em Barueri - SP

O piloto da AES Eletropaulo que está em fase de implantação de medidores inteligentes para 60 mil clientes na cidade de Barueri e região metropolitana de São Paulo (VELLANO, 2013).

A cidade de Barueri possui mais de 250 mil habitantes, e sua rede de energia possui mais de 304 km de linhas primárias aéreas, possuindo 34 circuitos e 4 subestações. O intuito é estudar e avaliar os novos equipamentos das redes, e os dados adquiridos, bem como verificar como será a participação da população neste novo conceito de energia através de palestras e iteração através de softwares desenvolvidos.

Em Búzios, a Ampla iniciou o projeto ao final de 2011 para demonstrar a aplicabilidade dos principais conceitos e tecnologias de *smart grid* em um cenário urbano, instalando medidores inteligentes, automação de rede, integração com energia renováveis, mobilidade elétrica e iluminação pública eficiente (RIB, 2017).

O projeto está em fase de implantação e atenderá 10.000 consumidores em 72 km de rede elétrica.

Na Europa, ainda na década de 90, surgiu a necessidade de diminuir o monopólio do mercado de energia. Foi elaborado em 1996 um pacote de medidas com este objetivo (conhecido como primeiro pacote). Mais tarde, em 2003, novas medidas surgiram (segundo pacote), permitindo que os consumidores escolhessem seu fornecedor de energia. Já em 2009, o terceiro pacote estabeleceu a continuidade desta política, porém considerando também a questão ambiental (UE, 2009).

No ano de 2007, também houve a publicação das metas para 2020 em relação a energia e clima, que estabelecia a redução em 20% de emissões de gases do efeito estufa em relação aos níveis de 1990, a elevação da participação das fontes de energia renováveis em 20%, e o aumento da eficiência energética em 20% (redução de consumo energético em relação ao PIB ou intensidade energética da UE). Estas metas ficaram conhecidas como *European 20/20/20 Targets* (ANP, 2014).

A diretiva 2009/72/CE, que faz parte do terceiro pacote, obrigou a implantação de medidores inteligentes em no mínimo 80% das residências dos estados membros até 2020, onde, através do estudo de viabilidade econômica (análise custo benefício - ACB), foi comprovado que a implantação dos medidores inteligentes são viáveis e trazem benefícios a longo prazo (UE, 2009).

O estudo de viabilidade foi completado em 2014, e o relatório da comissão comprovou que as análises custos-benefícios, em relação à eletricidade, se revelaram positivas em mais de dois terços dos casos e os Estados-Membros comprometeram-se a prosseguir a implantação de sistemas de medidores inteligentes (CE, 2014).

Os resultados das análises custos-benefícios foram:

a) Dezesesseis Estados-Membros (Áustria, Dinamarca, Espanha, Estônia, Finlândia, França, Grécia, Irlanda, Itália, Luxemburgo, Malta, Países Baixos, Polônia, Reino Unido, Romênia e Suécia) vão avançar com a implantação em grande escala dos medidores inteligentes até 2020. Em dois deles (Polônia e Romênia), as ACB deram resultados positivos, mas estão ainda pendentes de decisões oficiais sobre a implantação;

b) Em sete Estados-Membros (Alemanha, Bélgica, Eslováquia, Letônia, Lituânia, Portugal e República Checa), as ACB da implantação em grande escala até 2020 foram negativas ou inconclusivas, mas na Alemanha, Eslováquia e Letônia, considerou-se que a implantação de medidores inteligentes se justificava economicamente para determinados grupos de clientes;

c) Relativamente a quatro Estados-Membros (Bulgária, Chipre, Eslovênia e Hungria), não se dispunha de ACB ou de planos de implantação no momento da redação do relatório da CE; e

d) Na maioria dos Estados-Membros, está em vigor uma legislação que prevê um quadro legal para a implantação de contadores inteligentes de eletricidade e/ou que regula questões específicas, como o calendário da implantação, as especificações técnicas dos medidores, etc. Apenas cinco Estados-Membros (Bélgica, Bulgária, Hungria, Letônia e Lituânia) não dispõem de tal legislação.

Baseando-se nos dados pode-se considerar que a implantação dos medidores inteligentes trazem benefícios à maioria dos Estados-Membros.

1.2 Objetivo da Pesquisa

O objetivo da pesquisa é apresentar o impacto do gerenciamento pelo lado da demanda no consumo residencial através da análise da aplicação dos conceitos de GLD, definindo quantitativamente perdas e custos envolvidos.

1.3 Justificativa

Os estudos de sistemas que já foram implementados na Europa pela Comissão Europeia, mencionam a Eficiência Energética estimada baseando-se em

procedimentos teóricos de apuração, como por exemplo a ACB (análise custo benefício) (CE, 2014). Existem também diversas implementações de *smart grid* no Estados Unidos (USDE, 2014), onde, entre vários casos pesquisados, os dados fornecem apenas a eficiência média geral, não detalhando-as.

No Brasil, o consumo de energia elétrica do setor residencial é superado apenas pelo setor industrial, sendo que eles representam 25,1% e 37,6% do total respectivamente em 2015 (MME, 2016c). O potencial hidrelétrico brasileiro está praticamente estabilizado, não havendo possibilidade de expansão sem novos estudos a curto prazo. As perdas técnicas das distribuidoras de energia elétrica possuem tendência à aumento, baseando-se em histórico recente (Tabela 3). Esses dados justificam o estudo para o aumento da eficiência energética do setor.

1.4 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação apresenta no Capítulo 2 a fundamentação teórica sobre os conceitos técnicos de gerenciamento pelo lado da demanda, *smart grids*, *smart meter*, infra estrutura de medição avançada, elasticidade da carga, perdas técnicas e não técnicas. Também são apresentadas técnicas de obtenção de eficiência energética com GLD.

O Capítulo 3 apresenta a diretriz metodológica utilizada para a execução do trabalho, detalhando a pesquisa realizada, o algoritmo de cálculo das perdas, a definição da rede elétrica de baixa tensão proposta, a forma de cálculo das perdas e os testes realizados.

O Capítulo 4 traz os resultados da pesquisa e simulações com o Matlab, assim como as discussões sobre o trabalho.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões e possíveis desdobramentos do tema.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Gerenciamento pelo Lado da Demanda - GLD

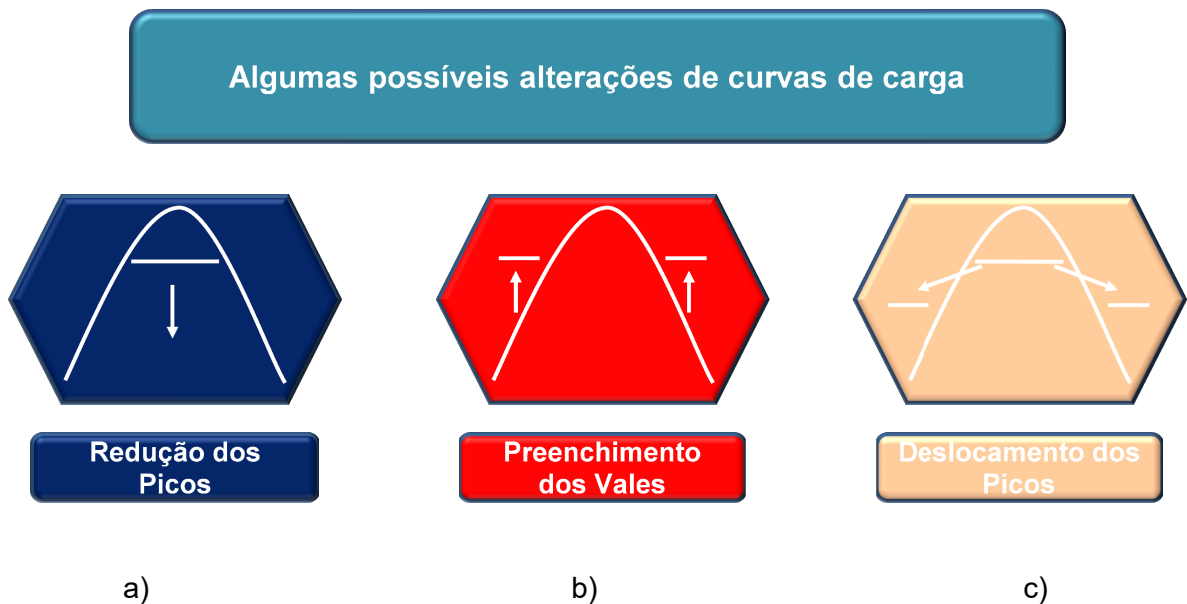
O gerenciamento pelo lado da demanda, (GLD) tem como objetivo reduzir consumo ou custos para a geração, transmissão e distribuição de energia utilizando de diversas estratégias, como o gerenciamento de carga, conservação de energia estratégica, geração de energia pelo lado do consumidor, entre outras. Com a aplicação do GLD é possível um uso mais eficaz dos recursos existentes, incluindo os ambientais, tornando possível postergar ou até mesmo cancelar a construção de novas usinas geradoras de energia elétrica e sua infra estrutura de transmissão (CAMARGO, NASSAR, CUNHA, 1999).

Para o aumento da eficiência energética com o GLD, considerando-se o gerenciamento de cargas, pode-se destacar as seguintes técnicas:

- a) Redução do pico, onde retira-se equipamentos de maior consumo dos horários de pico de consumo (Figura 3a);
- b) Preenchimento dos vales, que liga-se equipamentos em horário de baixo consumo geral (Figura 3b);
- c) Deslocamento de carga, onde se evita que muitos equipamentos sejam utilizados simultaneamente (Figura 3c);
- d) Conservação estratégica, onde a demanda é diminuída em todos os períodos, obtido através do aumento da eficiência do uso de energia ou mudança no padrão de uso;
- e) Crescimento estratégico da carga, é a mudança efetuada na curva de carga devido ao aumento de uso da energia elétrica em lugar de outra energia (fóssil, por exemplo), melhorando a produtividade dos consumidores; e
- f) Curva de carga flexível, onde pode existir contratos e tarifas específicas com a possibilidade do uso flexível dos equipamentos de consumidores.

Manter a curva de carga de forma mais distribuída (com picos menores) também contribui para diminuir a variação da tensão na rede elétrica.

Figura 3 - Técnicas de Gerenciamento de Cargas



Fonte: Adaptado de (GELLINGS, 1985)

O GLD possibilita redução nas emissões de CO₂, redução de custos, e contribui para aumentar a confiabilidade na geração de energia (ALI *et al.*, 2013).

2.2 Elasticidade da Carga

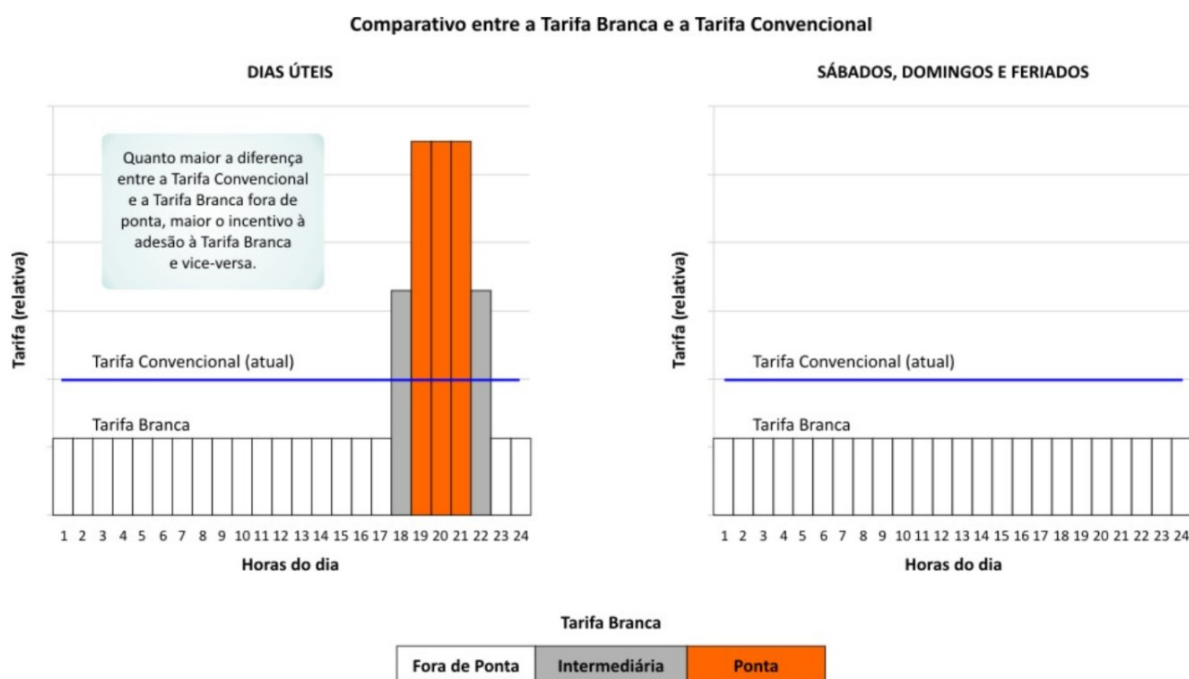
Como visto no tópico anterior, uma das estratégias que pode ser empregada para o GLD é o deslocamento de carga, onde se evita que muitos equipamentos sejam ligados simultaneamente, o que, de forma prática, reduz as perdas nos condutores por efeito Joule e, em conjunto com a técnica de preenchimento dos vales, minimiza as variações de tensão da rede elétrica. Em resumo, há possibilidade de se aplicar a curva de carga flexível, onde pode existir contratos e tarifas específicas com a possibilidade do uso flexível dos equipamentos de consumidores para se obter ganho em eficiência energética.

Para que o consumidor tenha interesse em deslocar o horário de operação de suas cargas, necessitam-se de fatores de benefícios, que podem ser tarifas menores em determinados horários ou incentivos financeiros na forma de créditos de energia / descontos na fatura.

No Brasil, a Aneel divulgou em 2013 a tarifa branca (Figura 4), onde o cliente da concessionária de energia elétrica pode vir a aderir, e que consiste em uma tarifa mais baixa fora dos horários de pico, tarifa intermediária entre as 17:00h e 18:00h e também 22:00h e 23:00h e tarifa mais alta nos horários de pico, considerado entre as 18:00h e 21:00h. Esta sistemática de cobrança é válida apenas para os dias da semana. Para os sábados, domingos e feriados a tarifa é única, ou seja, não há variação (ANEEL, 2016a).

A partir de 1º de janeiro de 2018, todas as distribuidoras do país deverão atender aos pedidos de adesão à tarifa branca das novas ligações e dos consumidores com média mensal superior a 500 kWh. Em 2019, unidades com consumo médio superior a 250 kWh/mês e, em 2020, para os consumidores de baixa tensão, qualquer que seja o consumo (ANEEL, 2016b).

Figura 4 - Comparativo entre a Tarifa Branca e a Tarifa Convencional



Fonte: (ANEEL, 2016a)

O horário de menor valor, métodos de controle dos equipamentos e benefícios das ações devem estar claros para o consumidor. O controle dos equipamentos deve estar automatizado com sistemas de gerenciamento de cargas, onde uma possibilidade são as tomadas inteligentes ou *smart plugs*, que realizam o

monitoramento do consumo por horário e podem desligá-las, se assim estiver programado.

Para que se possa medir o impacto da utilização de uma tarifa diferenciada na curva de carga dos clientes, é preciso modelar o comportamento da carga frente às variações do preço de energia elétrica (SANTOS, 2008).

A elasticidade da carga é um fator de alteração do uso da carga em função de algum parâmetro. Por exemplo, a elasticidade da carga-preço, indica o quanto varia a demanda de energia elétrica quando seu preço variar 1% a partir de um preço base.

Segundo HAGE, FERRAZ e DELGADO (2011), a elasticidade-preço da demanda de energia elétrica pode então ser definida pela equação 1.

$$\varepsilon = (\Delta q / q_0) / (\Delta p / p_0) \quad (1)$$

onde:

$(\Delta q / q_0)$ = variação percentual da quantidade de energia a partir do ponto q_0 .

$(\Delta p / p_0)$ = variação percentual do preço de energia a partir do preço p_0 .

ε = é a elasticidade-preço.

2.3 *Smart Grid*

De acordo com o relatório *Smart Grid System Report* (US-DE, 2014) e o relatório *Smart Grid* (MME - GTREI, 2010), as primeiras implantações dos *smart grid* ocorreram em meados da década passada em países desenvolvidos, como o Estados Unidos e o Reino Unido, com o objetivo de realizar testes pilotos para aquisição de dados e informações dos usuários domésticos de energia elétrica em tempo real.

A definição exata do que é "*smart grid*" muda conforme o contexto. A simples tradução remete a redes inteligentes, porém cada órgão ou empresa (*stackholder*)

acaba adotando a definição com base em sua ênfase desejada. De acordo com o Departamento de Energia dos Estados Unidos (US-DE, 2014), a *smart grid* utiliza tecnologia digital para melhorar a confiabilidade, segurança e eficiência do sistema elétrico. Segundo FARHANGI (2010) uma *smart grid* converge tecnologia da informação e engenharia de sistemas de energia para permitir o controle e monitoramento da rede elétrica.

Para ALI *et al.* (2013), uma *smart grid* pode ser descrita como um sistema transparente que manipula informações de consumo em duas vias, permitindo que a concessionária gerencie o fornecimento, e os consumidores possam ter mais controle sobre as decisões de seu consumo de energia.

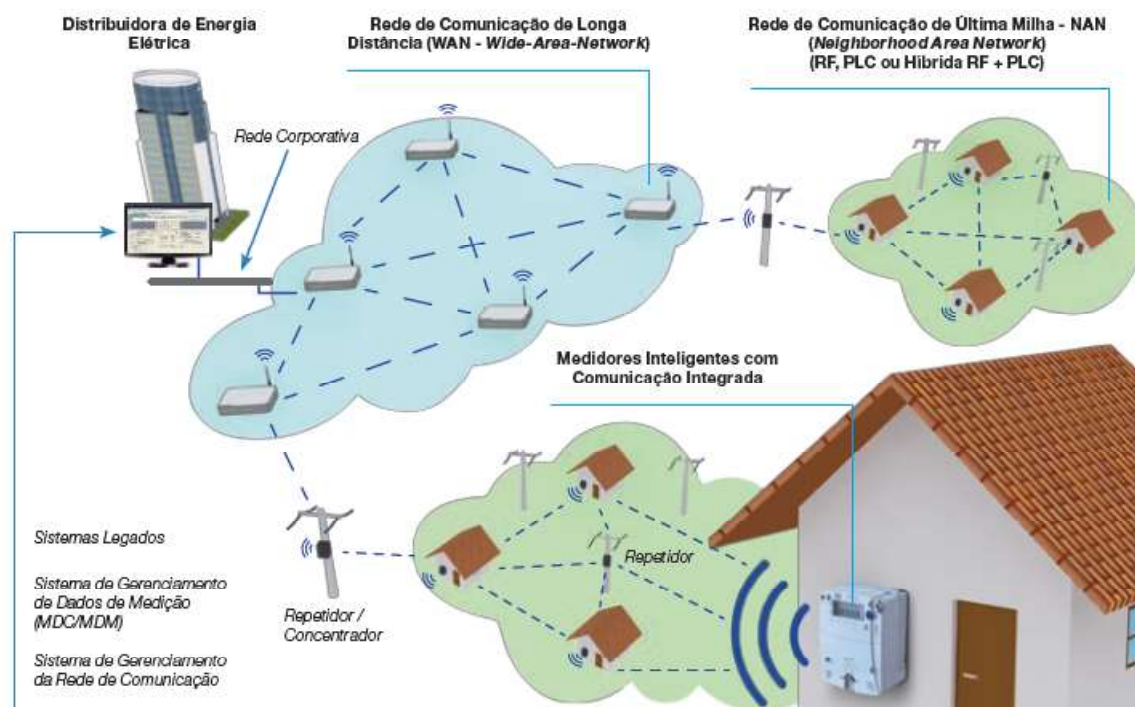
Considerando a distribuição de energia elétrica, uma *smart grid* contempla a comunicação em dois sentidos desde a área de gestão da empresa distribuidora até o consumidor final, passando pela Rede de Comunicação de Longa Distância (WAN - *Wide Area Network*), pela Rede de Comunicação de Última Milha - (NAN *Neighborhood Area Network*) até o *smart meter* que possua a comunicação integrada, conforme apresentado na Figura 5.

Quando se diz "comunicação em dois sentidos" significa que a empresa concessionária de energia elétrica tem as informações *online* do *status* da rede, assim como o consumidor tem a informação de seu consumo, que pode ser instantâneo ou acumulado (dependendo do *smart meter*), podendo tomar decisão qual equipamento manter ligado ou não. Com estas informações é possível por exemplo, diminuir o tempo de religamento de uma seccionadora remota, isolando também a área afetada em caso de interrupção de energia elétrica. Estas são algumas das possibilidades com o uso das *smart grid*.

Para a realização da função citada acima, surgiram as *smart grid* com Infra estrutura de Medição Avançadas ou *Automated Metering Infrastructure (AMI)*, que consistem em instalação de *smart meter* com comunicação nas unidades consumidoras, possibilitando a comunicação direta entre os centros de medição das empresas de energia elétrica e o consumidor. Com as informações em tempo real do estado da rede, abre-se várias possibilidades de eficiência energética, como por exemplo, o gerenciamento pelo lado da demanda, otimizando as perdas elétricas e custos.

Figura 5 - Arquitetura de Aplicação das *Smart Grid*

Arquitetura da Aplicação



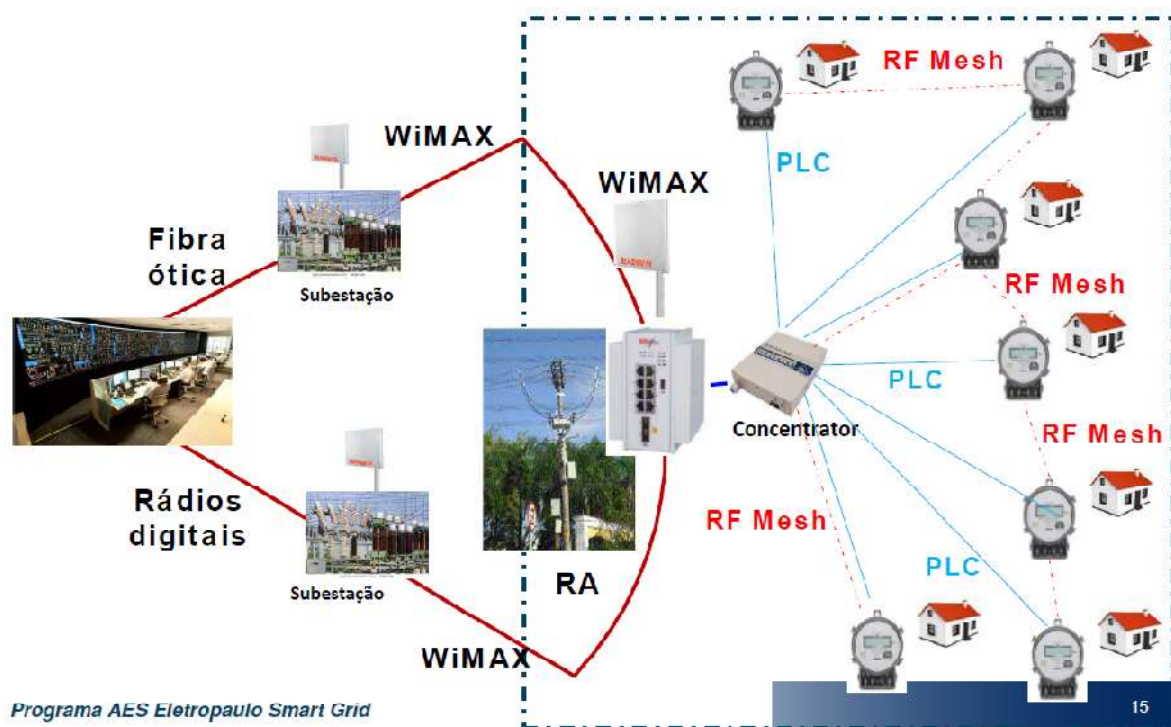
Fonte: (GRUPO WEG, 2015)

De forma prática, um exemplo é o sistema utilizado pela AES Eletropaulo na cidade de Barueri (SP). Ele é composto por *smart meter* da marca CISCO¹ que integra as tecnologias de rádio frequência, transmitido informações por meio de rede sem fio RF MESH 6LowPAN em 915 MHz em conjunto com PLC (*Power Line Communication*), ou seja, transmite também pelo próprio cabo energia elétrica. A adoção das duas tecnologias de forma simultânea tem por objetivo a redundância na comunicação da rede de última milha *NAN*. Para a rede de longa distância *WAN*, onde há necessidade de interligação da Central de Operações da Eletropaulo com as subestações, foi utilizado um *backbone* de fibra da TIM². Nas pontas da rede a distribuidora conectou os religadores automáticos que comutam a rede elétrica. A tecnologia escolhida foi o WiMAX, utilizando frequência de 2,4 GHz e 5,8 GHz, variando conforme a região. A Figura 6 apresenta a Topologia de Comunicação.

¹ Cisco é marca registrada de empresa de mesmo nome que atua na área da tecnologia da informação

² TIM é marca registrada de empresa de mesmo nome que atua na área de telefonia celular

Figura 6 - Topologia de Comunicação



Fonte: (VELLANO, 2013)

2.4 Eficiência Energética

A Eficiência Energética é um termo relativo, portanto deve ser analisado em relação a um valor já conhecido. A definição exata varia conforme o contexto. Quando aborda-se o consumo de energia elétrica para se realizar um trabalho ou tarefa, a eficiência energética pode ser alcançada, em um certo nível, quando utiliza-se uma quantidade menor de energia para se realizar esse trabalho, que a energia gasta anteriormente para se realizar o mesmo trabalho.

Segundo o Ministério de Minas e Energia (2011), eficiência energética refere-se a ações de diversas naturezas que culminam na redução da energia necessária para atender as demandas da sociedade por serviços de energia sob a forma de luz, calor/frio, acionamento, transportes e uso em processos. Objetiva, em síntese, atender às necessidades da economia com menor uso de energia primária e, portanto, menor impacto da natureza.

O Plano Nacional de Eficiência Energética - PNEf elaborado pelo Ministério de Minas e Energia considera ganhos de eficiência energética como provenientes de duas parcelas:

a) "Progresso Autônomo", que é aquele que se dá por iniciativa de mercado, sem interferência de políticas públicas e de forma espontânea, como a troca de equipamentos antigos por outros mais eficientes, ou novas tecnologias mais eficientes; e

b) "Progresso induzido", que se dá quando há estímulos através de políticas públicas.

As projeções de demanda no âmbito do Plano Nacional de Energia 2030 - PNE 2030 para o setor elétrico, considera redução de 5% a partir do progresso autônomo e outros 5% através do progresso induzido (MME, 2011).

No Brasil, a área de energia elétrica possui alguns programas de eficiência energética. Pode-se citar dois como principais e mais conhecidos:

a) O Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), foi criado em 30 de dezembro de 1985 para promover o uso eficiente da energia elétrica e combater o seu desperdício. O Procel implementa ações para aumentar a eficiência dos bens e serviços, para o desenvolvimento de hábitos e conhecimentos sobre o consumo eficiente da energia e, além disso, postergam os investimentos no setor elétrico, mitigando, assim, os impactos ambientais, contribuindo de forma direta com a sustentabilidade (MME, 2016); e

b) O Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), foi criado em 17 de outubro de 2001, conhecida como a Lei de Eficiência Energética. O Inmetro estabeleceu programas voluntários de etiquetagem que avalia a conformidade de produtos de forma compulsória, em relação à eficiência energética. Estes programas estabelecem requisitos mínimos de eficiência energética a cada tipo de produto estudado (INMETRO, 2016).

Especificamente não há programa de incentivo para a implantação de *smart grid* no Brasil. O que existe é o Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Aneel, que foi criado pela Lei nº 9991/00, com objetivo de gerar investimentos que

trouxessem inovações relevantes para o setor elétrico brasileiro e, por consequência, benefícios e melhorias para a empresa e para a sociedade. Os investimentos devem ser aplicados e gerenciados seguindo diretrizes e orientações estabelecidas pela Aneel em um Manual de P&D que regula todas as atividades da empresa relacionadas à Pesquisa e Desenvolvimento. Os principais pontos deste manual são:

- a) Aspectos legais e regulatórios;
- b) Formato de elaboração de projetos;
- c) Forma de fiscalização de projetos;
- d) Os parâmetros e critérios de avaliação; e
- e) Como será a validação dos investimentos realizados.

Este determina que as empresas concessionárias de distribuição, geração e transmissão de energia devem aplicar, anualmente, um percentual mínimo (0,5% no caso das distribuidoras) definido de sua receita operacional líquida (ROL), na realização de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento.

Os projetos são avaliados quanto a:

- a) Originalidade – o produto e/ou metodologia deve ser original, não existindo nada parecido no setor;
- b) Aplicabilidade – âmbito e potencial de aplicação do produto e/ou metodologia obtido e sua abrangência;
- c) Relevância – contribuições ou impactos do projeto em termos científicos, tecnológicos, econômicos e socioambientais; e
- d) Razoabilidade de Custos – impactos econômicos decorrentes da aplicação dos resultados do projeto, estudo de viabilidade econômica, expectativa de retorno financeiro realizado, levando-se em conta o investimento feito.

Esses quesitos serão avaliados de 1 a 5 pela Aneel, sendo “1” inadequado e “5” excelente. Assim, a partir da média aritmética calculada, o projeto pode ser integralmente reconhecido (100% dos gastos) ou apenas parcialmente.

A cidade inteligente de Buzios - RJ é um exemplo de implantação utilizando o P&D da Aneel. O projeto prevê cerca de 18 milhões de verba de P&D Aneel, além de 22 milhões entre patrocínio e capital próprio e visa demonstrar a aplicabilidade dos principais conceitos e tecnologias de *smart grid* em um cenário urbano, tais como medidores inteligentes, automação de rede, integração de energias renováveis, mobilidade elétrica e iluminação pública eficiente.

2.5 Perdas Elétricas

O sistema elétrico brasileiro é dividido em geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, comumente referenciado de GTD.

Durante cada uma destas etapas, temos uma parcela de energia elétrica que é consumida no sistema e não utilizada pelo consumidor final, são as perdas elétricas.

Nos sistemas de transmissão, as perdas são calculadas pela diferença entre a energia entregue ao sistema e a energia de saída do sistema. Estes valores são lidos através de medidores eletrônicos de energia.

2.5.1 Classificação das Perdas Elétricas de Acordo com a Localização

O Comitê de Distribuição (1996) classifica as perdas elétricas de diversas formas. De acordo com a localização das perdas elétricas, elas podem ser classificadas como perdas na geração, perdas na transmissão e perdas na distribuição da energia elétrica, de acordo com a equação 2.

$$PG = P_{Ger} + P_{Tra} + P_{Dis} \quad (2)$$

onde:

PG = perdas globais.

$PGer$ = perdas geração.

$PTra$ = perdas transmissão.

$PDis$ = perdas distribuição.

2.5.2 Classificação das Perdas Elétricas de Acordo com sua Natureza ou Origem

As perdas elétricas também podem ser classificadas pela sua natureza, em perdas por demanda e perdas de energia, ou em relação à origem, que consiste em perdas técnicas e perdas não técnicas (CODI, 1996).

A perda por demanda é a diferença entre a demanda requerida pelo sistema e a demanda comercializada pela concessionária neste mesmo sistema em determinado espaço de tempo. Ela é faturada ao consumidor se a diferença for superior a 5% em relação a contratada.

A perda de energia é a diferença entre a energia requerida pelo sistema e a energia comercializada pela concessionária neste mesmo sistema em um determinado intervalo de tempo.

A perda técnica de demanda ou energia é a perda devido ao processo de transporte e transformação da energia elétrica pela rede.

A perda não técnica é a demanda ou energia consumida, mas não faturada, ou seja, por furto de energia, inadimplência, erros administrativos e outras causas não técnicas.

As perdas não técnicas são o resultado a subtração das perdas totais (a diferença entre a energia entregue e a energia faturada) pelas perdas técnicas.

2.5.3 Cálculo das Perdas Elétricas

a) Perda Técnica

Existem diversas metodologias para o cálculo das perdas elétricas de um sistema elétrico completo. Elas são utilizadas para traçar planos de ação de melhoria de rede (LEAL, 2006) e estipular com a ANEEL o valor das perdas que serão utilizados para o cálculo das tarifas da distribuidora (ANEEL, 2017). Na prática, em função dos detalhes disponíveis, as metodologias podem ser divididas da seguinte forma (DOTORLINA; NADIRA, 2005):

Bottom-Up - utilizado em situações que se conhece o sistema de forma completa e detalhada, com curvas de carga dos consumidores, medidores, transformadores, etc. Assim é possível realizar os cálculos com maior precisão simulando o fluxo de potência a partir dos consumidores para a subestação.

Top-Down - utilizado em situações onde temos poucos dados do sistema, e o cálculo de perdas é realizado a partir da subestação para o consumidor.

Híbrida Top-Down / Bottom-Up - utilizado em situações que se tem dados detalhados apenas em parte da rede e em outras partes não.

A escolha do método para o cálculo das perdas técnicas nos sistemas de distribuição depende do objetivo da análise, do tempo disponível para o processamento dos cálculos e da quantidade de dados disponíveis (DE OLIVEIRA, 2009). A distribuidora que possui bases de dados atualizada pode utilizar a metodologia *Bottom-Up*, porém isto precisará de tempo de processamento e computadores com grande capacidade de processamento e avançados para resultados mais rápidos.

Segundo Oliveira (2009) outro fator importante para os cálculos das perdas técnicas é na forma como o sistema é representado. Em geral, os cálculos são realizados por segmentos de rede. São eles:

- Subestação de Distribuição (SE) - As maiores perdas são nos transformadores de subestação, que convertem tensão de nível de transmissão para nível de média tensão. A ordem de grandeza das perdas neste segmento está em torno de 0,5 a 1%;

- Rede de Média Tensão (MT) - As maiores perdas neste segmento estão relacionadas com a dissipação de potência nos condutores (efeito joule). A ordem de grandeza destas perdas estão em torno de 0,5 a 2,5%;

- Transformadores de Distribuição: As perdas mais significativas neste segmento são as perdas no ferro (corrente de Foucault e histerese) e as perdas no cobre (efeito Joule). A ordem de grandeza das perdas neste segmento está em torno de 1 a 3%;

- Rede de Baixa Tensão (BT) - Assim como na redes de Média Tensão, as maiores perdas neste segmento estão relacionadas com a dissipação de potência nos condutores (efeito joule). A ordem de grandeza destas perdas estão em torno de 0,5 a 2%;

- Ramal de Ligação - Neste segmento as perdas mais significativas também estão relacionadas com a dissipação de potência nos condutores (efeito Joule). A ordem de grandeza destas perdas estão em torno de 0,1 a 0,7%;

- Medidor de Energia - As maiores perdas neste segmento estão relacionadas com a bobina de corrente e na bobina de potencial. As perdas na bobina de corrente são de responsabilidade do consumidor, pois depende da carga utilizada, já as perdas na bobina de potencial é assumido pela concessionária; e

- Outros - (isoladores, reguladores de tensão, banco de capacitores, efeito corona, etc.) - As perdas neste segmento estão relacionadas com a dissipação de potência nos condutores (efeito joule). A ordem de grandeza destas perdas estão em torno de 0,45 a 1,4%.

b) Perda Não Técnica

Existem poucos trabalhos que abordam as perdas não técnicas em um sistema de distribuição. Em geral eles abordam a análise das curvas de carga do consumidor que têm comportamento anormal, identificando-os.

Uma outra forma de identificação é o cálculo da perda técnica de determinado setor e compará-la com a medição realizada. A diferença será a perda não técnica.

A partir da identificação, é necessário adotar estratégias para a eliminação da perda não técnica.

2.6 Consumo de Energia no Setor Residencial

Conforme apresentado nas Tabelas 1 e 2, o consumo de energia elétrica no setor residencial vem aumentando com o tempo, totalizando 53% de elevação no período de 2006 a 2015, quando representou 25,1% da energia elétrica gerada no país (MME, 2016c).

Para estudo do consumo de energia no setor residencial é necessário conhecer quais equipamentos uma residência possui e os hábitos de uso dos consumidores, porém devido a fatores como o clima e região, a curva de carga obtida é diferente para cada região brasileira.

Para se determinar o perfil de consumo e curvas de cargas típicas, o PROCEL realizou uma pesquisa declaratória de Posse e Hábitos de Uso que traça um perfil da posse e hábitos de consumo de equipamentos elétricos e nos setores residencial, comercial e industrial, com o intuito de avaliar o mercado de eficiência energética nas cinco regiões do Brasil (MME, 2016b).

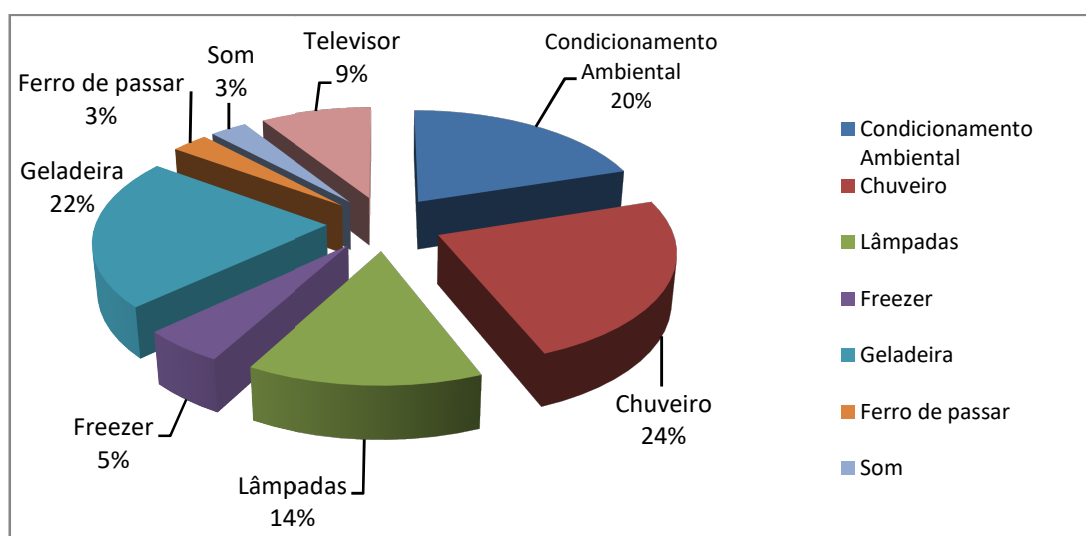
O Relatório dessa pesquisa da classe residencial foi elaborado em 2005 pelo Departamento de Planejamento e Estudos de Conservação de Energia da Eletrobrás em nível nacional, no âmbito do projeto de Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil. Além da posse e uso de equipamentos elétricos, foram verificados outros fatores nessa coleta de dados, tais como: condições socioeconômicas; qualidade do fornecimento; comportamento devido ao racionamento; satisfação do consumidor; iluminação pública, etc. As pesquisas de campo foram realizadas pelo Consórcio formado pela PUC-Rio e a Ecoluz.

Essa pesquisa apresentou entre diversos dados, as informações referente ao consumo de energia elétrica residencial em diversas regiões do Brasil, aferindo o consumo individual de cada um e quanto ele representa no consumo total de uma residência. Com isso é possível obter um cenário real de consumo de energia elétrica para o universo da pesquisa realizada (MME, 2016b).

É importante dizer que é praticamente impossível gerar curvas de carga sem erros, assim como curvas de carga que representem em sua totalidade cada região pesquisada.

De acordo com este estudo, a participação de cada eletrodoméstico no consumo residencial no Brasil está apresentado na Figura 7.

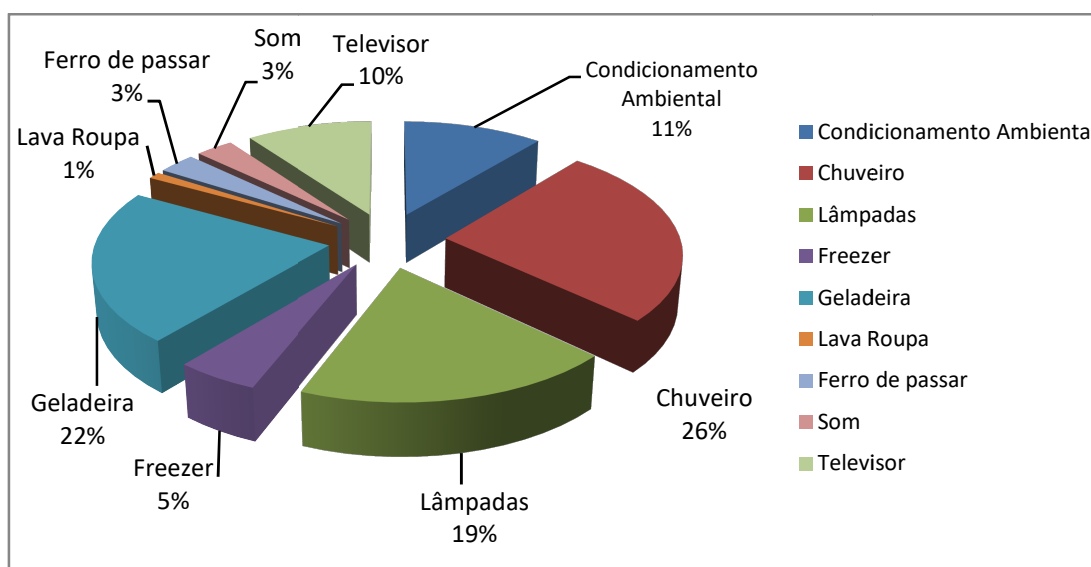
Figura 7 - Participação dos Eletrodomésticos no Consumo Residencial - Brasil - 2005



Fonte: (MME, 2007)

Na Figura 8 é apresentado a participação de cada eletrodoméstico na região Sudeste.

Figura 8- Participação dos Eletrodomésticos no Consumo Residencial - Sudeste - 2005



Fonte: (MME, 2007)

A curva de carga típica da região sudeste é apresentada na Figura 9. É possível observar um aumento de carga pela manhã, em torno das 7:00 horas e outro aumento de carga a noite, em torno das 20 horas. Esses dois picos de consumo prejudicam a rede elétrica, pois com o aumento da corrente há maior queda de tensão no sistema.

Figura 9 - Curva de Carga Típica da Região Sudeste - 2007



Fonte: Adaptado de (MME, 2007)

A curva de carga ideal para o sistema elétrico é aquela em que o consumo fosse constante durante todo o dia, assim não haveria alteração nos valores de tensão da rede elétrica.

2.7 Rede Elétrica de Baixa Tensão Considerada

A rede elétrica secundária de baixa tensão com cabos multiplexados considerada é o trecho entre a saída dos transformadores de distribuição (MT / BT) até a entrada de energia elétrica de uma residência, e segue os seguintes padrões técnicos:

- a) GED 3589 - Rede Secundária com Cabos Multiplexados - Conexões;
- b) GED 3596 - Rede Secundária com cabos Multiplexados - Construção;

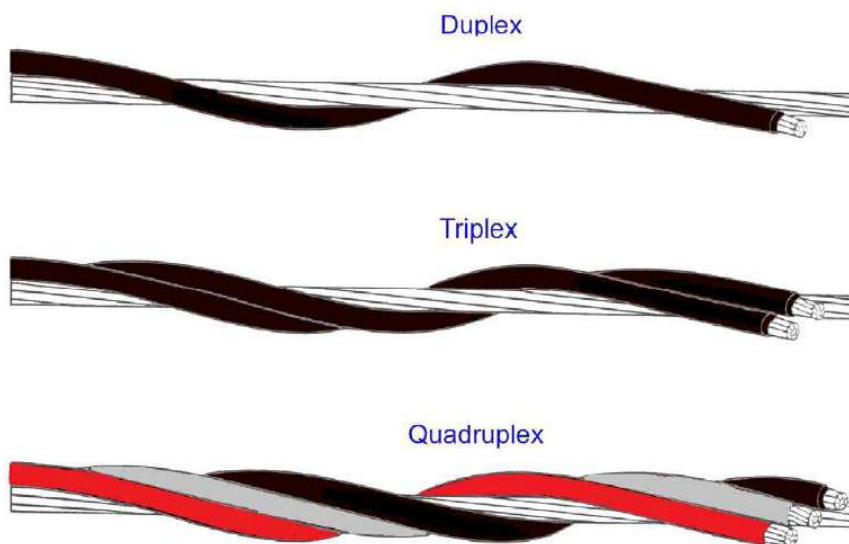
- c) GED 3597 - Rede Secundária com cabos Multiplexados - Montagem;
- d) GED 4319 - Ramal de Ligação - Montagem;
- e) GED 13 - Fornecimento em Tensão Secundária de Distribuição; e
- f) GED 921 - Cabo Multiplexado 0,6 - 1kV.

Os desenhos dos cabos multiplexados utilizados na rede são apresentados na Figura 10.

Os cabos multiplexados utilizados na conexão entre o poste do transformador e o ramal de entrada é quadruplex de alumínio na formação $3 \times 1 \times 70 \text{ mm}^2 + 70 \text{ mm}^2$, isolamento XLPE colorida e neutro nú CAL, conforme padronização da CPFL GED 3596 (CPFL, 2016b).

A conexão entre o transformador e a rede multiplexada é realizada por cabos de cobre de mesmas dimensões.

Figura 10 - Cabos Multiplexados - Padrões



Fonte: Adaptado de (CPFL, 2012d)

Existem padrões de ligações para transformadores que variam de 15 kW a 300 kW, sendo que, para efeito de simulação, foi escolhida a potência de 45 kW utilizando-se os cabos 70 mm^2 devido à corrente necessária e respectiva queda de tensão máxima permitida com os limites especificados na Tabela 4. É importante

observar que a escolha do condutor da rede secundária foi realizada após se efetuar as primeiras simulações do circuito completo, obtendo-se os valores de queda de tensão do circuito proposto.

Tabela 4 - Limites de Variação de Tensão Secundária

Tensão Nominal (V)	Limites adequados de variação da tensão	
	Mínimo (V)	Máximo (V)
220/127	202/117	231/133
380/220	250/202	399/231
230/115	212/106	242/121

Fonte: (CPFL, 2016a)

A tensão nominal da rede secundária utilizada nas simulações é de 127/220V trifásico, sendo considerada a distribuição balanceada de cargas entre as respectivas fases.

A definição do condutor do ramal de entrada também se deu a partir das primeiras simulações efetuadas comparando a queda de tensão e carga instalada (entre 12 e 18 kW) com as Tabelas 4 e 5. Com os valores dentro da faixa especificada, os condutores Triplex de 16mm² foram escolhidos considerando a residência com entrada bifásica 127/220V.

Tabela 5 - Cabos dos Ramais de Ligação

Tipo de Fornecimento	Carga Instalada (kW)	Ramal de Ligação (mm ²)
Monofásico	$C \leq 6$	10mm ² - Duplex
	$6 < C \leq 12$	16mm ² - Duplex
	$C \leq 12$	10mm ² - Duplex
Bifásico	$12 < C \leq 18$	16mm ² - Duplex
	$18 < C \leq 25$	25mm ² - Duplex

Fonte: Adaptado de (CPFL, 2012c)

Especificações mais detalhadas sobre os cabos estão disponíveis no Capítulo 3.

2.8 Aspectos gerais

O foco deste trabalho é analisar o impacto da aplicação dos conceitos do gerenciamento pelo lado da demanda no consumo residencial, avaliando as perdas técnicas na rede de distribuição de baixa tensão, utilizando a metodologia *Bottom-Up*, calculando o fluxo de potência desde o consumidor até a fonte, sem considerar os transformadores de MT/BT. Para os cálculos serão utilizadas informações de consumo dos equipamentos, assim como os hábitos de uso dos consumidores.

3 DIRETRIZ METODOLÓGICA

3.1 Aspectos Gerais

Este trabalho foi elaborado com o objetivo de apresentar o impacto do gerenciamento pelo lado da demanda no consumo residencial. A Eficiência Energética em uma área residencial pode ser aumentada de diversas formas, e a aplicação do gerenciamento pelo lado da demanda permite o ganho em eficiência e custos, tanto por parte do consumidor quanto por parte da concessionária. Este trabalho aborda a redução das perdas elétricas nos condutores (por efeito Joule) desde a saída dos transformadores de distribuição (MT / BT) até a entrada de energia elétrica de uma residência classe B1 com entrada em 127 / 220V bifásico e carga instalada entre 12 kW e 18 kW (CPFL, 2012a). Uma pesquisa foi elaborada para se obter hábitos de uso do consumidor residencial em relação aos equipamentos de sua residência. Um algoritmo para cálculo das perdas foi desenvolvido em Matlab com a finalidade de simular o consumo de energia em residências e linhas de distribuição de baixa tensão da região sudeste do Brasil. Aplicou-se os conceitos do gerenciamento pelo lado da demanda, apresentando o impacto no consumo residencial, assim como os custos relacionados a eficiência.

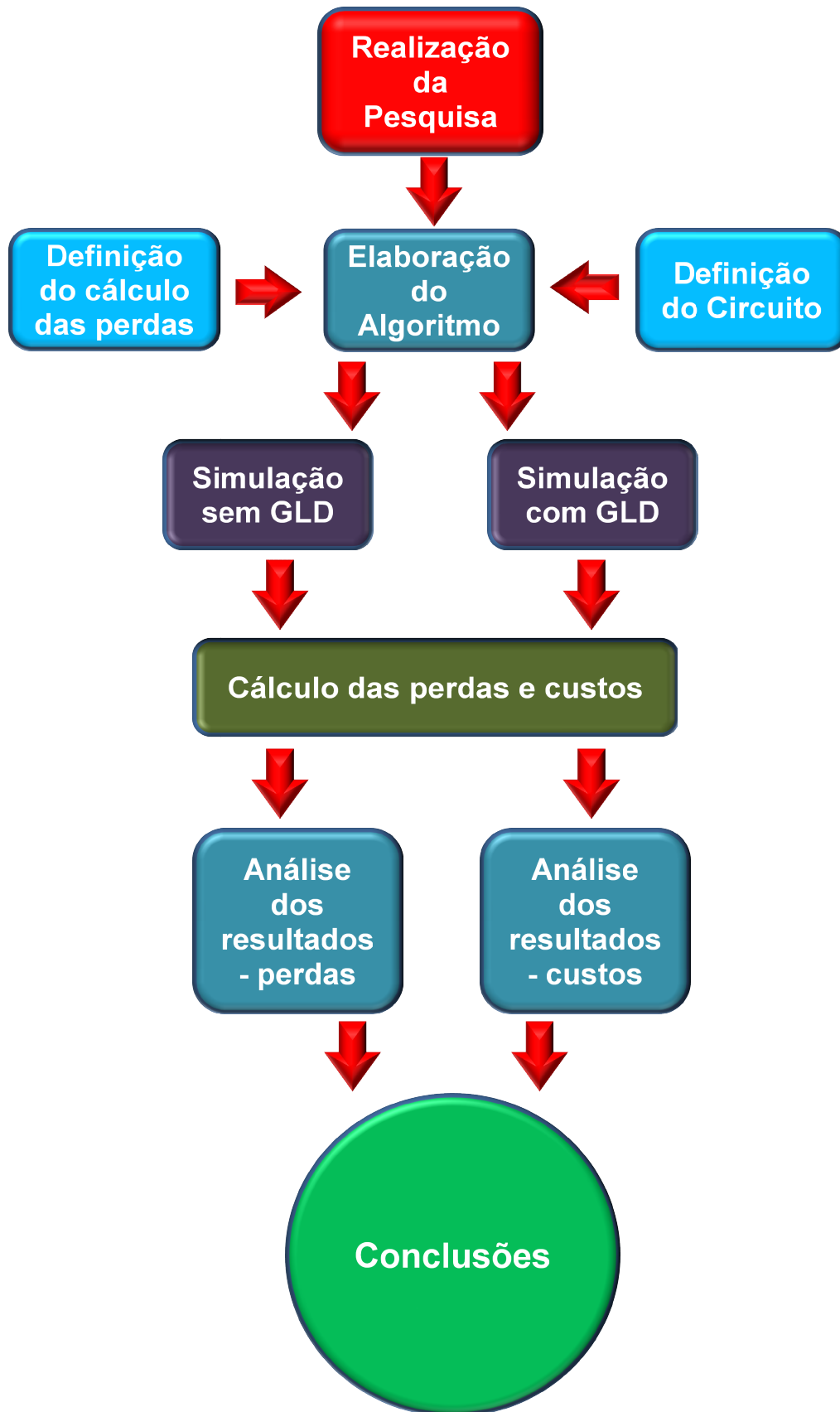
A categoria de residência B1 foi escolhida devido a ter a possibilidade de ligação bifásica 127/220V.

A Diretriz Metodológica adotada é apresentada de forma simplificada na Figura 11 e consiste em:

- a) Etapa 1 - realização da pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso regionais a partir do formulário de pesquisa;
- b) Etapa 2 - definição do circuito proposto para estudo;
- c) Etapa 3 - definição do método de cálculo das perdas;
- d) Etapa 4 - elaboração do algoritmo para o cálculo das perdas e custos;
- e) Etapa 5 - simulação do circuito sem GLD;
- f) Etapa 6 - simulação do circuito com GLD utilizando 3 estratégias diferentes;

- g) Etapa 7 - cálculo de perdas e custos com e sem tarifa branca;
- h) Etapa 8 - análise dos resultados das perdas;
- i) Etapa 9 - análise dos resultados dos custos com e sem tarifa branca;
- j) Etapa 10 - conclusões;

Figura 11 - Fluxograma Simplificado da Diretriz Metodológica



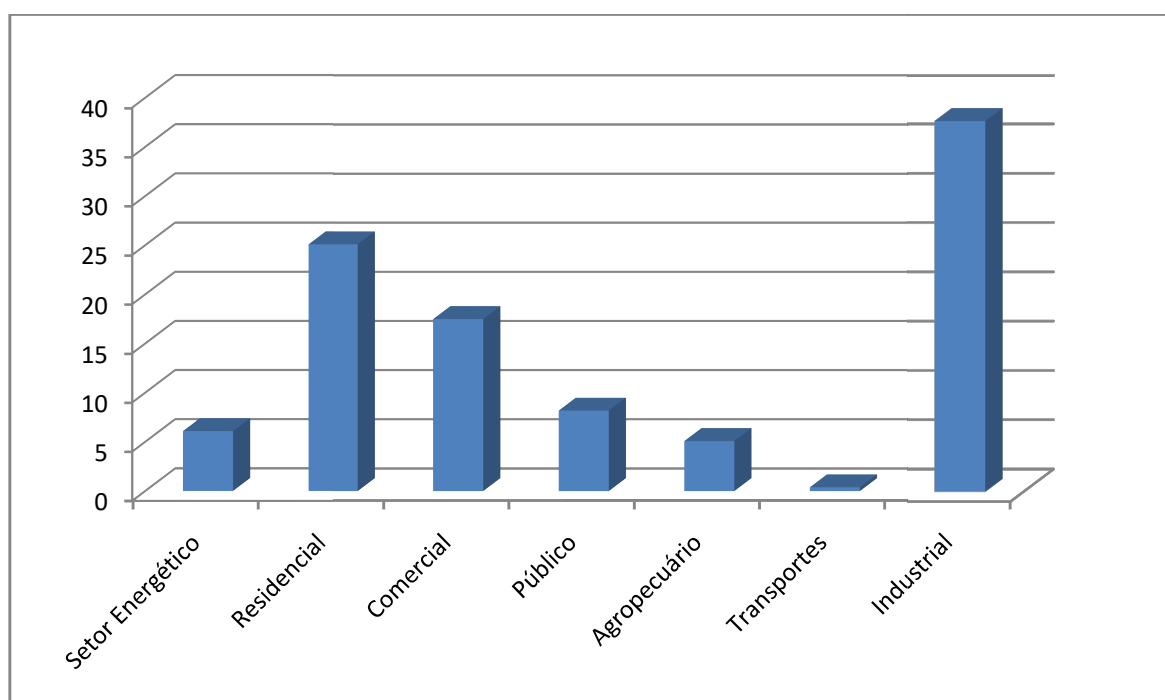
Fonte: Próprio autor

3.2 Dados de Pesquisa

De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2016 (MME, 2016c), ano base 2015, o consumo de energia elétrica por setores de economia no Brasil está dividida conforme a Figura 12.

Como já citado, é possível observar que o consumo de energia elétrica do setor residencial é superado apenas pelo setor industrial, sendo que eles representam 25,1% e 37,6% do total respectivamente em 2015. Este percentual justifica estudo para o aumento da eficiência energética do setor.

Figura 12 - Composição Setorial do Consumo de Eletricidade (%)



Fonte: Adaptado de (MME, 2016c)

Como já citado no Capítulo 2, o PROCEL realizou a Pesquisa de Posse de Eletrodomésticos e Hábitos de Uso - Classe Residencial em 2005, e além da posse e uso de equipamentos elétricos, foram verificados vários outros fatores nessa coleta de dados (MME, 2007).

É possível observar que o estudo apresentado pelo PROCEL foi realizado em 2005 e publicado em 2007, portanto é imprescindível que dados mais atuais sejam utilizados para avaliação da aplicação do gerenciamento pelo lado da demanda nos dias atuais. Estudos de hábitos de consumo são caros e necessita-se

que sejam realizados frequentemente, pois eles dependem das condições econômicas, sociais, culturais e ambientais (JARDINI; BRITTES; SILVEIRA; 2012).

Com o objetivo de estudar a posse de equipamentos e hábitos de uso na região, foi realizada uma pesquisa de campo através de formulário (Anexo A). Esta é a Etapa 1 da Figura 11. Para este estudo adotou-se parcialmente os dados da Tabela de consumo de equipamentos elétricos / eletrônicos, criada pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel), sendo complementada por uma nova Tabela originária da pesquisa "Pesquisa de posse de equipamentos eletrodomésticos e hábitos de uso regionais" nos anos de 2016 e 2017.

A pesquisa realizada foi elaborada entre novembro de 2016 e março de 2017, através de formulário próprio (anexo A). Foram preenchidos 31 formulários por pessoas de ensino médio incompleto, completo, cursando superior e superior completo, sendo alunos de graduação, alunos de nível médio, professores de nível médio, professores de nível superior e profissionais das empresas locais. A região pesquisada é a centro-oeste paulista, que incluem as cidades de Bauru, Garça, Agudos, Marília, Jaú entre outras. A partir da Tabela de equipamentos da pesquisa do PROCEL, os seguintes campos foram inseridos:

- a) Tempo de uso por dia (horas);
- b) Quantidade de vezes que utiliza por dia;
- c) Hora do dia inicial mínima de utilização (hora);
- d) Hora do dia final máxima de utilização (hora);

e) Aceitaria restringir o horário de utilização deste equipamento entre as 18:00 horas e 21:00 horas, para economia de energia e diminuição do valor pago na conta de energia? (sim ou não);

f) Se sim, para qual horário poderia ser deslocada a utilização deste equipamento? Antes das 18:00 horas ou após as 21:00 horas? ; e

g) Observação.

O formulário também trouxe as seguintes perguntas para que cada pessoa pesquisada respondesse:

a) Aceitaria restringir a utilização do chuveiro elétrico, do microondas e do ferro elétrico (somente pode ter um destes equipamentos ligados ao mesmo tempo)? (sim ou não) ; e

b) Aceitaria restringir a utilização do chuveiro elétrico ao mesmo tempo que do secador de cabelos (se o chuveiro estiver ligado, o secador de cabelos não pode ser utilizado)? (sim ou não).

Tabela 6 - Equipamentos de uma Residência e sua Utilização

Item	Equipamentos da residência			
	Equipamento	Potência (W)	Minutos (total/dia)	Utilização (vezes / dia)
1	Aparelho de som	80	180	5
2	Aparelho DVD	100	120	2
3	Aspirador de Pó	1000	20	1
4	Barbeador	10	30	1
5	Batedeira	120	20	1
6	Cafeteira	600	30	30
7	Chuveiro	4500	40	3
8	Computador	180	180	5
9	Espremedor	65	10	2
10	Ferro	1000	30	1
11	Fogão	60	2,5	5
12	Freezer	130	-	-
13	Geladeira	130	-	-
14	Iluminação 1	11	150	5
15	Iluminação 2	15	150	5
16	Iluminação 3	23	150	5
17	Lava Roupa	500	60	1
18	Liquidificador	300	15	3
19	Microondas	1200	10	5
20	Secador Cabelo	1400	10	2
21	Multiprocessador	420	30	3
21	TV 20	90	300	5
22	TV 29	110	300	5
23	Videogame	15	240	3

Fonte: (MME, 2016a)

O horário intermediário entre as 17:00 horas e 18:00 horas, assim como entre as 21:00 horas e as 22:00 horas, não foi pesquisado devido a possibilidade de falha no entendimento por parte dos entrevistados (intermediário e pico).

Com esta pesquisa foi possível observar outras características de uso dos equipamentos utilizados em relação à pesquisa realizada pelo Procel em 2005. Com isso, para este estudo será levado em consideração a junção dos dados das duas pesquisas de forma em que se possa evidenciar ou não a eficiência energética utilizando-se GLD.

Baseando-se na pesquisa realizada pelo PROCEL, foram escolhidos equipamentos de uma residência conforme Tabela 6 (Equipamentos de uma residência e sua utilização) extraída de (MME, 2016a).

A pesquisa "Pesquisa de posse de equipamentos eletrodomésticos e hábitos de uso regionais" utilizou uma Tabela baseada na Tabela do PROCEL, porém com algumas alterações, adaptando-se a realidade atual. Na Tabela 7 está a lista dos equipamentos e seus respectivos consumos que foram utilizados para a pesquisa de posse de equipamentos eletrodomésticos e hábitos de uso regionais.

As alterações realizadas na Tabela da pesquisa em relação à Tabela do PROCEL consistiu em:

- a) Excluir o fogão da Tabela devido a sua principal fonte de energia ser o gás;
- b) A segunda alteração foi a potência do videogame, que hoje está em torno de 180 W; e
- c) A terceira alteração se deu nas descrições dos televisores, que passou a ter tela maior e características de LCD (tela de cristal líquido). Elas foram classificadas em: TV até 32 polegadas, e TV acima de 32 polegadas, sendo que cada uma possui sua respectiva potência.

A partir da Tabela 7, considerando os dados da pesquisa "Pesquisa de posse de equipamentos eletrodomésticos e hábitos de uso regionais", foi desenvolvido um algoritmo em Matlab para gerar curvas de carga de consumidores residenciais.

Tabela 7 - Tabela de Potência dos Equipamentos

Equipamentos da residência		
Item	Equipamento	Potência (W)
1	Aparelho de som	80
2	Aparelho DVD	100
3	Aspirador de Pó	1000
4	Barbeador	10
5	Batedeira	120
6	Cafeteira	600
7	Chuveiro	4500
8	Computador	180
9	Espremedor	65
10	Ferro	1000
11	Fogão	-
12	Freezer	130
13	Geladeira	130
14	Iluminação quarto/banheiro	11
15	Iluminação sala/cozinha	15
16	Iluminação externa	23
17	Lava Roupa	500
18	Liquidificador	300
19	Microondas	1200
20	Secador Cabelo	1400
21	Multiprocessador	420
21	TV até 32 polegadas	90
22	TV acima de 32 polegadas	110
23	Videogame	180

Fonte: Próprio autor

3.3 Definição do Sistema Elétrico de Baixa Tensão Considerado

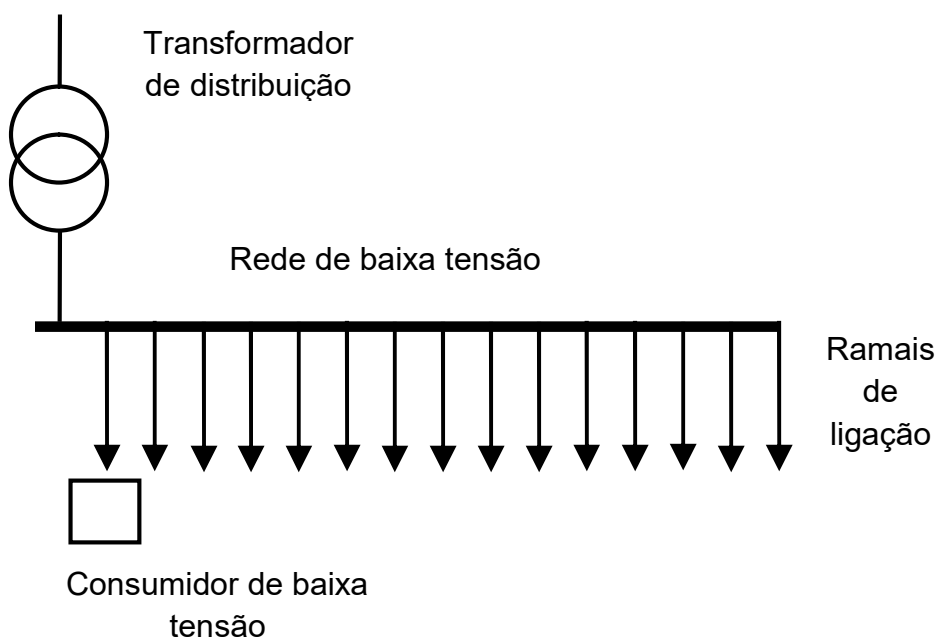
Este trabalho considerou as perdas técnicas desde a saída dos transformadores de distribuição (MT / BT) até a entrada de energia elétrica de uma residência classe B1 com entrada em 127 / 220 V bifásico e carga instalada entre 12 kW e 18 kW, conforme Tabela 1A do documento GED 13 - Dimensionamento do ramal de entrada - tensão 127 / 220V, página 46 (CPFL, 2012a).

A Etapa 2 consiste em definir o sistema elétrico de baixa tensão a ser utilizado nas simulações.

O ramal de entrada considerado consiste em três condutores de 16 mm² de cobre, com comprimento de 15 metros entre o ponto de conexão (rede multiplexada) e a medição e proteção da entrada do consumidor, sendo um condutor neutro e dois condutores fases. A definição do comprimento total do ramal de entrada baseou-se no GED 13 que estipula o comprimento máximo de 30 metros. Levando em consideração que a distância entre as conexões da rua varia de acordo com a medida dos terrenos e do poste mais próximo, e, considerando os postes a uma distância de 40 metros um do outro, terrenos de 10 metros de frente e a largura da rua em 10 metros, 15 metros foi o valor adotado para o comprimento total do ramal.

O circuito completo para o cálculo das perdas no sistema está representado na Figura 13.

Figura 13 - Circuito Proposto Para Estudo



Fonte: Próprio autor

O anexo 1 do GED 3667 (CPFL, 2016a) especifica a resistência e reatância para cada cabo a ser utilizado na rede secundária de transmissão. O cabo Triplex de alumínio 16 mm² é utilizado no ramal de entrada e possui resistência de 2,655 Ohm/km e reatância de 0,0999 Ohm/km.

O cabo multiplexado Quadruplex P70 alumínio de 70 mm² para a rede secundária de distribuição de baixa tensão possui resistência de 0,567 Ohm / km e reatância de 0,0929 Ohm / km.

3.4 Método de Cálculo das Perdas

A Etapa 3 consiste em definir o método para o cálculo da perdas no sistema elétrico de baixa tensão considerado (Etapa 2).

Existem diversos métodos para o cálculo das perdas técnicas. Em geral eles podem ser divididos em função dos detalhes disponíveis (DOTORLINA; NADIRA, 2005).

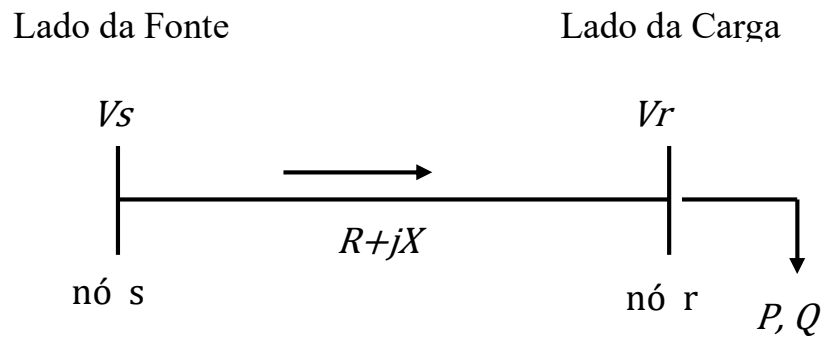
O método escolhido para o cálculo das perdas foi o PRODIST, Módulo 7 - Cálculo de Perdas na Distribuição revisão 4 de 15 de abril de 2015 (ANEEL, 2015), pois é o procedimento vigente para a obtenção das perdas na distribuição de acordo com a ANEEL.

Esse procedimento utiliza o método de fluxo de potência, onde calcula-se as potências ativas e reativas em cada nó do circuito assim como suas respectivas quedas de tensões por trecho.

Para o cálculo do fluxo de potência, utilizou-se o método proposto por Cespedes (1990), onde se elimina a necessidade do ângulo de fase nas equações, e trabalha-se com os módulos das tensões. É possível efetuar o cálculo para circuitos monofásicos ou trifásicos.

O método proposto consiste em resolver a equação 3 para cada ramo do circuito, conforme a figura 14.

Figura 14 - Ramo do Circuito para Cálculo de Perda



Fonte: Adaptado de (CESPEDES, 1990)

$$V_r^4 + [2 \cdot (PR + QX) - V_s^2] \cdot V_r^2 + (P^2 + Q^2) \cdot (R^2 + X^2) = 0 \quad (3)$$

Onde,

s = nó fonte;

r = nó à jusante;

V_s = módulo da tensão do nó fonte;

V_r = módulo da tensão do nó à jusante;

P = carga ativa;

Q = carga reativa;

R = resistência do ramo;

X = reatância do ramo.

As potências P e Q são cargas que estão conectadas ao nó r , somadas as cargas dos nós posteriores a ele (à jusante), assim como todas as perdas referentes a estes circuitos.

As perdas de potência ativa e reativa podem ser encontradas utilizando as equações 4 e 5.

$$Lp = R. (P^2 + Q^2)/V_r^2 \quad (4)$$

$$Lq = X. (P^2 + Q^2)/V_r^2 \quad (5)$$

Onde,

Lp = perdas ativas do ramo;

Lq = perdas reativas do ramo.

O processo de solução começa com o cálculo das potências no nó final somando-se as cargas alimentadas por ele e suas perdas. Repete-se este cálculo para cada nó desde o último até a fonte, acrescentando a carga do(s) nó(s) anterior(es) a cada um, conforme o circuito. Esta primeira parte chama-se iteração à montante, ou seja, desde os nós finais até o nó fonte.

Quando o processo de cálculo chega ao nó fonte, utiliza-se a equação 1 para se calcular V_r em cada nó, desde o nó fonte até o nó final. Esta é chamada de iteração à jusante.

Ao final desta etapa, a partir das novas tensões (V_r), deve-se recalcular as perdas. Se a diferença entre as perdas encontradas e as previamente calculadas forem superiores a uma tolerância (a ser especificada), o processo de cálculo deve ser repetido (a montante e a jusante) até que as diferenças sejam inferiores a tolerância especificada (CESPEDES, 1990).

A rede completa estudada consiste em 25 residências com instalação 127 / 220 V, 2 fases e 1 neutro com correntes de fases e neutro totalmente equilibradas.

3.5 Algoritmo para Cálculo das Perdas

A partir dos dados fornecidos pela realização da Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso Regionais (Etapa 1), a definição do sistema elétrico de baixa tensão (Etapa 2) e a definição do método de cálculo das perdas (Etapa 3), um algoritmo para cálculo das perdas e custos (Etapa 4) foi desenvolvido a partir do software Matlab³, estimando a hora provável de utilização de cada equipamento durante um dia da semana, assim como o período que ele permanece ligado. Foram desenvolvidos dois *scripts*, sendo um para gerar os números randômicos a partir da ponderação da probabilidade de uso do equipamento nos horários de início de funcionamento dos equipamentos e outro para gerar as curvas de carga e calcular as perdas e custos na rede de distribuição de baixa tensão.

Não é possível se determinar a distribuição dos horários de utilização dos equipamentos de forma precisa, porém a partir dos dados da pesquisa "Pesquisa de posse de equipamentos eletrodomésticos e hábitos de uso regionais", foi possível obter as informações regionais, calculando as probabilidades de uso para cada equipamento em cada horário, estimando as curvas de cargas para a residência considerada.

Para cada equipamento uma sub-rotina foi elaborada, tendo como variáveis os seguintes parâmetros:

a) Tempo de uso por dia (minutos) - total em minutos que o equipamento permanece ligado em média por dia;

b) Quantidade de vezes que utiliza por dia - média de vezes que o equipamento é ligado por dia;

c) Hora do dia inicial mínima de utilização (hora) - média do horário inicial de uso do equipamento subtraindo-se metade do desvio padrão da média;

³ - Matlab é um software de propriedade da empresa Math works

d) Hora do dia final máxima de utilização (hora) - média do horário final de uso do equipamento somando-se metade do desvio padrão da média;

e) Se o equipamento pode ou não ter seu horário de funcionamento restringido - a restrição refere-se ao horário das 18:00 horas as 21:00 horas, devido à tarifa branca que pode vir a ser utilizada na região. A pergunta também contempla a alteração do horário para antes ou depois do horário de restrição;

f) Horário de restrição inicial do equipamento - 18:00 horas;

g) Horário de restrição final do equipamento - 21:00 horas;

h) Se o equipamento pode ou não ser utilizado em conjunto com outro (ao mesmo tempo) - perguntou-se se o chuveiro elétrico pode ser utilizado em conjunto com o microondas e ferro de passar; e

i) Se o equipamento pode ou não ser utilizado em conjunto com outro (ao mesmo tempo) - perguntou-se se o chuveiro elétrico pode ser utilizado em conjunto com o secador de cabelos.

A partir destes parâmetros, elaborou-se uma função para gerar números pseudo-aleatórios utilizando-se a instrução "*rand*" no Matlab dentro dos intervalos pré-determinados pelo resultado da pesquisa.

Os parâmetros de restrição (se o equipamento pode ser restringido, horário inicial de restrição, horário final de restrição, a utilização em conjunto com outro e qual(is) equipamento(s) não pode(m) ser utilizado(s)) somente foram considerados para a simulação na situação com aplicação do GLD e dentro da quantidade de residência que aceitou restringir a utilização do equipamento e possui o mesmo, pois sem ele não é possível restringir.

Ao executar o algoritmo para cálculo das perdas, gera-se uma curva de carga para cada residência distribuindo randomicamente o horário de início de funcionamento de cada equipamento, com suas respectivas restrições (considerando GLD) ou sem restrições (sem considerar o GLD).

3.6 Testes Realizados

As perdas para cada circuito (25 residências) foram calculadas de forma independente de acordo com a curva de carga da respectiva residência aplicando-se o algoritmo para cálculo das perdas descrito e duas partes (Etapa 5 e Etapa 6 da Figura 11):

a) Primeiro - Foi utilizado o horário provável de uso de cada equipamento elétrico/eletrônico sem considerar nenhum conceito de GLD (Etapa 5); e

b) Segundo - Aplicando três estratégias distintas do gerenciamento pelo lado da demanda com deslocamento de cargas, de forma independente, uma a uma, que serão detalhadas no capítulo 4 (Etapa 6).

Levando em consideração os dados da pesquisa "Pesquisa de posse de equipamentos eletrodomésticos e hábitos de uso regionais", obteve-se diversos coeficientes que refletem os seguintes parâmetros:

a) Índice de consumidores que concordam em deslocar o uso do respectivo equipamento retirando-os dos horários de pico, informando ainda se o uso deslocado ocorrerá antes ou após este horário. Este índice foi chamado de ICa para antes (equação 6) e ICd para depois (equação 7);

b) Índice de consumidores que concordam em deslocar o uso do chuveiro elétrico, microondas e ferro de passar de forma que não coincidam em horário de utilização entre si. Este índice foi chamado de ICr na equação 8; e

c) Índice de residências que concordam em deslocar o uso do chuveiro elétrico e secador de cabelos de forma que não coincidam em horário de utilização entre si. Este índice não foi calculado devido a já ser calculado com o chuveiro no item (b).

d) Também foi criado um índice para cada equipamento, que corresponde a quantidade de residências que possui este equipamento em relação ao total de residências pesquisadas ICe .

Com a adoção desta metodologia ao invés de se definir uma casa padrão com "n" equipamentos, foi definido uma tabela de equipamentos que a residência

pode ter (Tabela 6). O resultado da pesquisa forneceu o índice ICe , onde pôde ser aferido quais equipamentos cada residência possui na região pesquisada (equação 10).

Os índices criados estão explicados de forma simplificada na Figura 15. O Fluxograma 1 (Anexo B) e o Fluxograma 2 (Anexo C) detalham a aplicação das Equações 3 a 16.

$$RCa = ICa * RCe \quad (6)$$

Onde,

ICa = índice de deslocamento para antes do horário de pico;

RCa = quantidade de residências de deslocamento para antes do horário de pico; e

RCe = quantidade de residências do circuito que possuem o respectivo equipamento.

$$RCd = ICd * RCe \quad (7)$$

Onde,

ICd = índice de deslocamento para depois do horário de pico; e

RCd = quantidade de residências de deslocamento para depois do horário de pico.

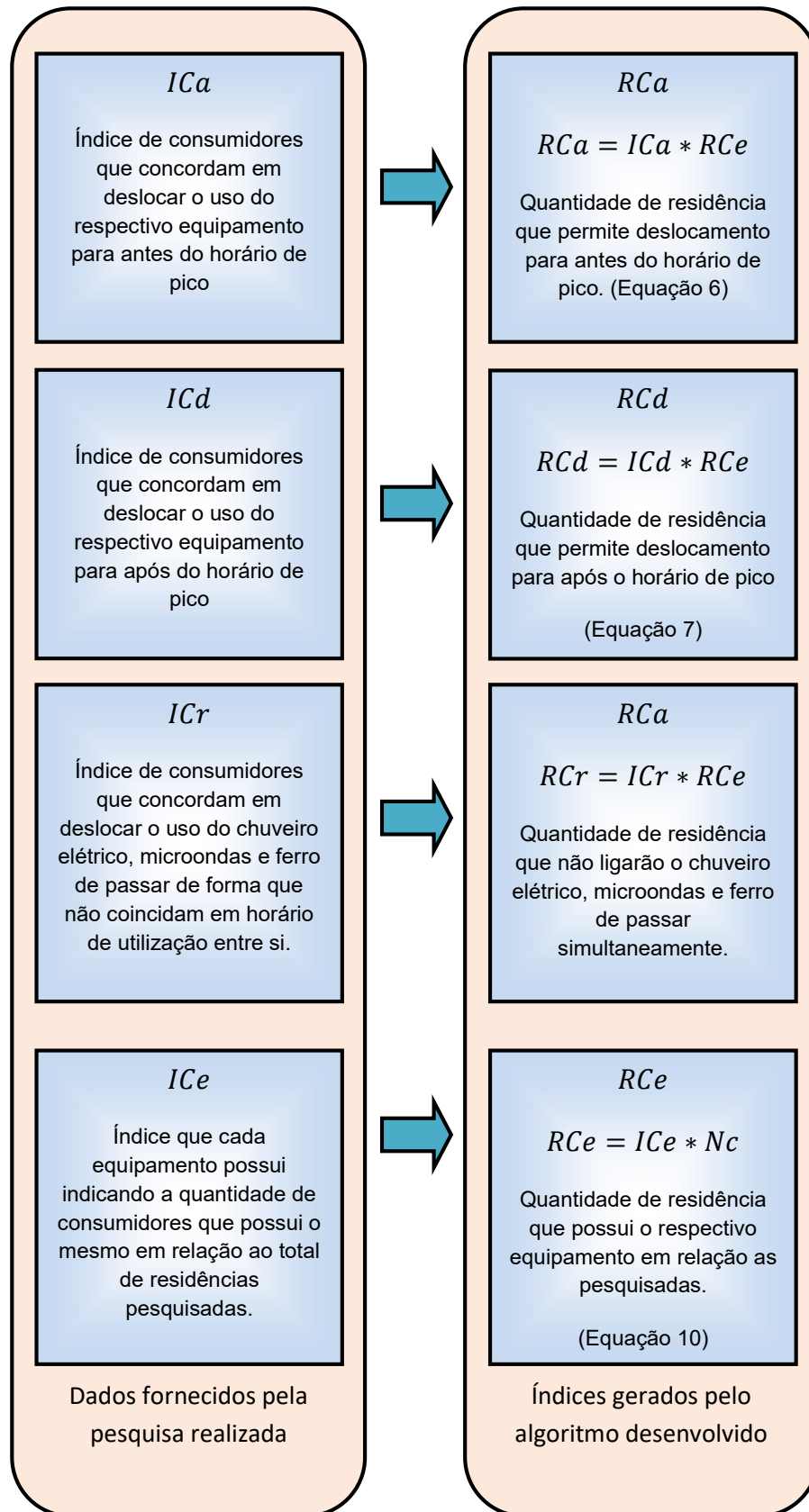
$$RCr = ICr * RCe \quad (8)$$

Onde,

ICr = índice de restrição de chuveiro elétrico, ferro de passar e microondas ; e

RCr = quantidade de residências de restrição de chuveiro elétrico, ferro de passar e microondas.

Figura 15 - Índices Gerados a Partir da Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso



Fonte: Próprio autor

Os parâmetros de horário de início e fim quando há restrição foram elaborados baseando-se na premissa de que os equipamentos de maior consumo (chuveiro elétrico, ferro de passar e microondas) não podem ser utilizados simultaneamente, devem ser utilizados pela quantidade de vezes definida na pesquisa realizada e devendo contemplar o deslocamento para fora do horário e pico. A Tabela 8 apresenta esses valores.

Tabela 8 - Horários de Utilização dos Equipamentos com Restrição (b)

Equipamento	Início 1	Fim 1	Início 2	Fim 2	Início 3	Fim 3	Início 4	Fim 4
Chuveiro	06:30	08:00	08:45	10:30	14:30	17:00	21:00	23:30
Microondas	08:00	08:45	12:00	12:45	17:00	17:45	-	-
Ferro de passar	10:30	12:00	13:00	14:30	-	-	-	-

Fonte: Próprio autor

O chuveiro elétrico pode ser ligado 4 vezes, o microondas 3 vezes e o ferro de passar 2 vezes por dia.

Quando o equipamento não é chuveiro elétrico, microondas ou ferro de passar, e a residência está incluída no índice *RCa* ou *RCd*, a forma de cálculo aplica os parâmetros de início e fim otimizados (a) deslocando os horários de utilização dos equipamentos para imediatamente antes do horário de pico, ou imediatamente depois do horário de pico, considerando um intervalo de utilização, conforme a equação 9.

$$IU = (T_{tut} - 180) / Vd \quad (9)$$

Onde,

IU = tempo de intervalo de utilização;

T_{tut} = tempo total de utilização em um dia;

Vd = quantidade de vezes de utilização em um dia;e

180 = constante - 180 minutos.

$$RC = ICe * NC \quad (10)$$

Onde,

ICe = índice de residência que possui o respectivo equipamento;

RCe = quantidade de residência que possui o respectivo equipamento;e

NC = quantidade de residências do circuito.

O algoritmo de cálculo utilizou as equações 3 a 16, conforme detalhado no Fluxograma 1 (Anexo B) e Fluxograma 2 (Anexo C).

O Fluxograma 1 (Anexo B) apresenta a forma de cálculo das potências para cada residência que compõe um circuito.

O Fluxograma 2 (Anexo C) apresenta o cálculo das perdas em cada circuito de 25 residências (Etapa 7). Os custos relacionados ao consumo com, e sem a tarifa branca são calculados após as perdas. O consumo de potência individual (de cada residência) minuto a minuto é armazenado em uma matriz de 25 linhas (residências) e 1440 colunas (minutos de um dia).

O Fluxograma 2 (Anexo C) tem a seguinte sequência detalhada de cálculo:

a) Potência do nó, já disponível na matriz de potência (Fluxograma 1 - Anexo B);

b) Perdas no ramal, equação 11 e 12;

$$PAram = (Rram * (((Pa^2) + (Qr^2)) / (Vr^2))) \quad (11)$$

$$PRram = (Xram * (((Pa^2) + (Qr^2)) / (Vr^2))) \quad (12)$$

Onde:

PA_{ram} = perda ativa do ramal;

PR_{ram} = perda reativa do ramal;

R_{ram} = resistência total do ramal;

X_{ram} = reatância total do ramal;

Pa = potência ativa do nó;

Qr = potência reativa do nó;e

Vr = tensão no nó.

c) Perdas até o próximo nó (montante) , equação 13 e 14;

$$PA_{lin} = (R_{lin} * (((Pa^2) + (Qr^2)) / (Vr^2))) \quad (13)$$

$$PR_{lin} = (X_{lin} * (((Pa^2) + (Qr^2)) / (Vr^2))) \quad (14)$$

Onde:

PA_{lin} = perda ativa da linha;

PR_{lin} = perda reativa da linha;

R_{lin} = resistência da linha no trecho;e

X_{lin} = reatância da linha no trecho.

d) Soma da potência com as perdas, equação 15 e 16;

$$PA_t = (Pa + PA_{ram} + PA_{lin}) \quad (15)$$

$$PR_t = (Qr + PR_{ram} + PR_{lin}) \quad (16)$$

Onde:

PA_t = potência ativa mais perdas;

PR_t = potência reativa mais perdas;

Pa = potência ativa do nó; e

Qr = potência reativa do nó.

e) Armazena valores;

f) Os cálculos foram efetuados para todos os nós? Se não, volta ao passo a. Se sim prossegue;

g) Aplica a equação 3, 4 e 5 para o nó a jusante;

h) Todos cálculos efetuados até o último nó? Se não, retorna ao passo g. Se sim prossegue; e

i) Compara as perdas calculadas a montante com as perdas calculadas a jusante. Se a diferença for inferior a 1%, finaliza os cálculos. Se for maior, retorna ao passo a, atualizando os valores das quedas de tensões em cada nó (V_s e V_r).

Todas as perdas foram somadas ao final fornecendo um vetor em kWh/h, considerando um dia de semana de medição (24 horas). O processo foi repetido para 20 circuitos (500 residências) com o objetivo de verificar a repetitividade dos valores.

A análise dos resultados das perdas (Etapa 8) e análise dos resultados de custos (Etapa 9) serão executadas no Capítulo 4.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Pesquisa Realizada

A pesquisa realizada entre novembro de 2016 e março de 2017, na região centro-oeste paulista, utilizou-se do método descritivo, onde dados foram coletados através de questionário específico (Anexo A). O questionário foi entregue ao entrevistado e uma explicação oral sobre o preenchimento foi realizada. O entrevistado teve acompanhamento durante todo o preenchimento do formulário.

Tabela 9 - Resultados da Pesquisa - Utilização

Item	Equipamento	Potência (W)	Minutos de utilização (por dia)	Utilização (vezes/dia)
1	Aparelho de som	80	107	2
2	Aparelho DVD	100	111	1
3	Aspirador de Pó	1000	22	1
4	Barbeador	10	62	1
5	Batedeira	120	16	1
6	Cafeteira	600	30	2
7	Chuveiro	4500	88	4
8	Computador	180	308	2
9	Espremedor	65	12	1
10	Ferro	1000	40	2
11	Fogão	0	0	0
12	Freezer	130	600	60
13	Geladeira	130	600	60
14	Iluminação quarto/banheiro	11	211	5
15	Iluminação sala/cozinha	15	306	4
16	Iluminação externa	23	244	2
17	Lava Roupa	500	62	1
18	Liquidificador	300	22	1
19	Microondas	1200	38	3
20	Secador Cabelo	1400	28	2
21	Multiprocessador	420	60	1
22	TV até 32 pol	90	383	3
23	TV acima 32 pol	110	405	3
24	Videogame	180	201	2

Fonte: Próprio autor

Com a análise dos resultados, foi possível elaborar a Tabela 9 para o tempo de utilização de cada equipamento por dia (em minutos) e a quantidade de vezes que se utiliza o equipamento por dia (em vezes/dia).

Foram respondidas 31 pesquisas, sendo 10 de Garça, 10 de Bauru, 9 de Marília, 1 de Agudos e 1 de Vera Cruz. A média de pessoas por residência foi de 3,6. Os entrevistados possuem escolaridade entre nível fundamental completo, médio completo e superior completo.

Observe que o freezer e a geladeira foram considerados como de uso contínuo, ou seja, eles permanecem ligados 24 horas por dia, entretanto o funcionamento do compressor de refrigeração não é contínuo, funcionando em ciclos. Foi adotado o tempo total por dia de funcionamento de 10 horas, sendo acionado 60 vezes por dia.

Tabela 10 - Resultados da Pesquisa - Horários

Item	Equipamento	Início de utilização (hora do dia)	Fim de utilização (hora do dia)	Tempo total em que pode ligar (por dia - hh:mm)
1	Aparelho de som	09:18	19:18	10:00
2	Aparelho DVD	17:16	23:42	06:26
3	Aspirador de Pó	08:32	16:22	07:51
4	Barbeador	11:23	18:46	07:23
5	Batedeira	08:22	20:56	12:34
6	Cafeteira	06:53	19:13	12:21
7	Chuveiro	07:02	22:36	15:34
8	Computador	09:31	23:02	13:30
9	Espremedor	11:26	18:15	06:49
10	Ferro	09:58	19:26	09:27
11	Iluminação quarto/banheiro	12:22	23:39	11:17
12	Iluminação sala/cozinha	13:56	23:03	09:06
13	Iluminação externa	15:46	00:00	08:30
14	Lava Roupa	09:04	16:16	07:12
15	Liquidificador	09:27	19:43	10:15
16	Microondas	08:40	21:51	13:11
17	Secador Cabelo	11:16	20:12	08:56
18	Multiprocessador	08:33	20:00	11:26
19	TV até 32 pol	08:28	23:14	14:46
20	TV acima 32 pol	09:18	23:22	14:03
21	Videogame	10:08	23:21	13:12

Fonte: Próprio autor

Os resultados encontrados para o horário inicial de utilização mínimo, horário final de utilização máximo e o tempo total em que permite-se que os equipamentos fiquem ligados estão descritos na Tabela 10.

Os dados da pesquisa demonstraram diferenças em relação à pesquisa do PROCEL, confirmando que os hábitos de uso são particularidades de cada região e também são alterados com o tempo e novas tecnologias. Algumas mudanças podem ser observadas, como por exemplo, o uso dos computadores e do chuveiro elétrico, que eram 180 e 40 minutos respectivamente na Tabela do PROCEL (MME, 2016a) e saltaram para 308 e 88 minutos respectivamente na pesquisa "Pesquisa de posse de equipamentos eletrodomésticos e hábitos de uso regionais".

Tabela 11 - Resultados da Pesquisa - Alteração horário

Item	Equipamento	Aceitaram alterar o uso	Antes do horário de pico	Após o horário de pico
1	Aparelho de som	46,15%	50,00%	50,00%
2	Aparelho DVD	0,00%	0,00%	0,00%
3	Aspirador de Pó	63,64%	71,43%	0,00%
4	Barbeador	33,33%	100,00%	0,00%
5	Batedeira	66,67%	100,00%	0,00%
6	Cafeteira	42,86%	100,00%	0,00%
7	Chuveiro	57,14%	56,25%	43,75%
8	Computador	33,33%	55,56%	44,44%
9	Espremedor	50,00%	100,00%	0,00%
10	Ferro	31,82%	85,71%	14,29%
11	Fogão	0,00%	0,00%	0,00%
12	Freezer	0,00%	0,00%	0,00%
13	Geladeira	0,00%	0,00%	0,00%
14	Iluminação quarto/banheiro	28,57%	25,00%	75,00%
15	Iluminação sala/cozinha	33,33%	11,11%	88,89%
16	Iluminação externa	28,57%	16,67%	83,33%
17	Lava Roupa	36,00%	100,00%	0,00%
18	Liquidificador	30,00%	100,00%	0,00%
19	Microondas	36,84%	57,14%	57,14%
20	Secador Cabelo	41,67%	40,00%	60,00%
21	Multiprocessador	50,00%	100,00%	0,00%
22	TV até 32 pol	23,08%	33,33%	66,67%
23	TV acima 32 pol	31,58%	33,33%	66,67%
24	Videogame	40,00%	25,00%	75,00%

Fonte: Próprio autor

A aceitação dos pesquisados para a alteração do horário de utilização dos equipamentos em função do horário de pico, considerando o deslocamento de utilização do mesmo para antes ou depois deste horário, foi apresentada na Tabela 11.

A coluna "Aceitaram alterar o uso" apresenta o total, em porcentagem, de entrevistados que aceitam alterar o uso deste equipamento para antes ou após o horário de pico. A coluna "Antes do horário de pico" é a porcentagem de quem aceitou alterar o horário para antes do horário de pico e a coluna "Após o horário de pico" é a porcentagem de quem aceitou alterar o uso do equipamento para após o horário de pico. Os resultados que estão em zero significa que não houve pesquisado que aceitou a condição.

Os índices de pesquisados que aceitaram alterar o uso do chuveiro elétrico, ferro elétrico e microondas são:

a) Chuveiro elétrico - 57,14% concordaram, sendo que destes, 56,25% preferem deslocar o uso para antes do horário de pico e 43,75% para após o horário de pico;

b) Ferro elétrico - 31,82% concordaram, sendo que destes, 85,71% preferem deslocar o uso para antes do horário de pico e 14,29% para após o horário de pico; e

c) Microondas - 36,84% concordaram, sendo que destes, 57,14% preferem deslocar o uso para antes do horário de pico e 42,86% para após o horário de pico.

Quando foram perguntados sobre " Se o equipamento pode ou não ser utilizado em conjunto com outro - ao mesmo tempo (perguntou-se se o chuveiro elétrico pode ser utilizado em conjunto com o microondas e ferro de passar) teve 57,14% de respostas sim. Com isso pode-se concluir que 60% dos consumidores da região pesquisada concordam em deslocar seus equipamentos de maior consumo, o que certamente trará benefícios não só pelo lado do consumidor como também pelo lado da concessionária de energia elétrica.

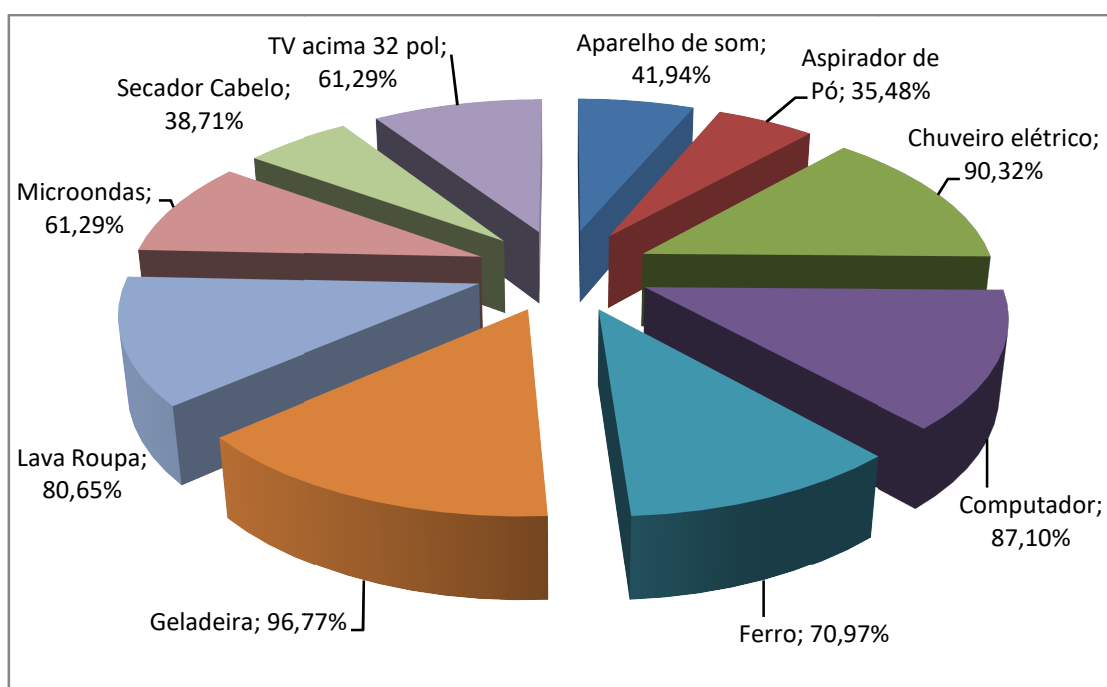
A pergunta " Se o equipamento pode ou não ser utilizado em conjunto com outro - ao mesmo tempo (perguntou-se se o chuveiro elétrico pode ser utilizado em

conjunto com o secador de cabelos) teve 64,52% de respostas sim. Isso reforça a idéia de que a redução do pico de consumo para o horário de pico pode ser alcançado com a utilização do GLD em conjunto com *smart grid*, pois uma das perguntas que pretende-se responder é: "O consumidor concordará em deslocar a utilização de alguns de seus equipamentos para diferentes horários de uso para que não coincidam com outros de maior consumo ou mesmo em horários de maior pico de consumo?" (MANCUZO *et al.*, 2016).

É possível que o grande número de pessoas que responderam sim a pergunta " Aceitaria restringir o horário de utilização deste equipamento entre as 18:00 horas e 21:00 horas para economia de energia e diminuição do valor pago na conta de energia? " responderam "sim" devido a sugestão da variação no preço em função do horário, conforme SANTOS (2008) citou em seu trabalho. Assim como possivelmente veremos no futuro, a tarifa branca, quando aplicada, terá grande influência no consumo durante o horário de pico.

Com a pesquisa foi possível também determinar quais equipamentos que as residências da região possuíam e sua representatividade sobre o total de casas pesquisadas. A Figura 16 apresenta as informações de alguns equipamentos.

Figura 16 - Composição dos Eletrodomésticos de uma Residência



Fonte: Próprio autor

O chuveiro elétrico está presente em 90,32% das residências pesquisadas, assim como o ferro de passar está em 70,97% e o microondas está em 61,29%. Devido a isso é importante que estes equipamentos não sejam ligados simultaneamente, o que justifica a pergunta referente a eles.

Com esses dados, ao invés de se definir uma casa padrão com "n" equipamentos para a realização do estudo, foi definido uma tabela de equipamentos que a residência pode ter. O resultado da pesquisa forneceu o índice ICe , onde pôde ser aferido quais equipamentos cada residência possui.

4.2 Simulações das Perdas

As perdas foram apuradas utilizando-se a estratégia de deslocamento de cargas para o gerenciamento pelo lado da demanda de três formas diferentes:

a) A primeira consiste em aplicar o índice de deslocamento para antes do horário de pico ICa , o índice de deslocamento para depois do horário de pico ICd , e o índice de restrição de chuveiro elétrico, ferro de passar e microondas simultâneos ICr às residências;

b) A segunda estratégia consiste em também utilizar os índices ICa e ICd , porém sem o ICr ;e

c) A terceira estratégia considera apenas o ICr , com uma nova tabela de horários de utilização dos equipamentos com restrição (b), permitindo que eles possam ser utilizados durante o horário de pico.

Cinco simulações foram executadas para cada estratégia de GLD, assim como outras cinco sem considerar nenhum conceito de GLD. A média dos resultados estão nas Tabelas 12 e 13.

A condição "Sem GLD" é a condição onde não há aplicação dos conceitos e GLD, ou seja, todos equipamentos da residência foram utilizados de acordo com seu respectivo horário de funcionamento conforme Tabela 10 (Etapa 5 da Figura 11).

Tabela 12 - Resultados da Simulação - Geral

25 residências - 1 circuito				
	Energia total consumida (Wh / dia)	Perda média (Wh)	Perda máxima (Wh)	Energia total consumida em perdas (Wh / dia)
Sem GLD	276.661,9	662,7	1.425,8	15.903,9
GLD estratégia 1	269.784,5	644,5	1.908,1	15.467,1
GLD estratégia 2	262.002,0	656,2	3.877,8	15.748,3
GLD estratégia 3	276.889,4	640,5	1.790,2	15.372,6

Fonte: Próprio autor

A condição "GLD estratégia 1", "GLD estratégia 2" e "GLD estratégia 3" utilizam o conceito GLD, variando apenas os índices de horários e equipamentos conforme detalhado anteriormente (Etapa 6 da Figura 11).

A Tabela 13 apresenta a diferença em porcentagem dos dados relativos à Tabela 12.

Tabela 13 - Resultados da Simulação - Diferença

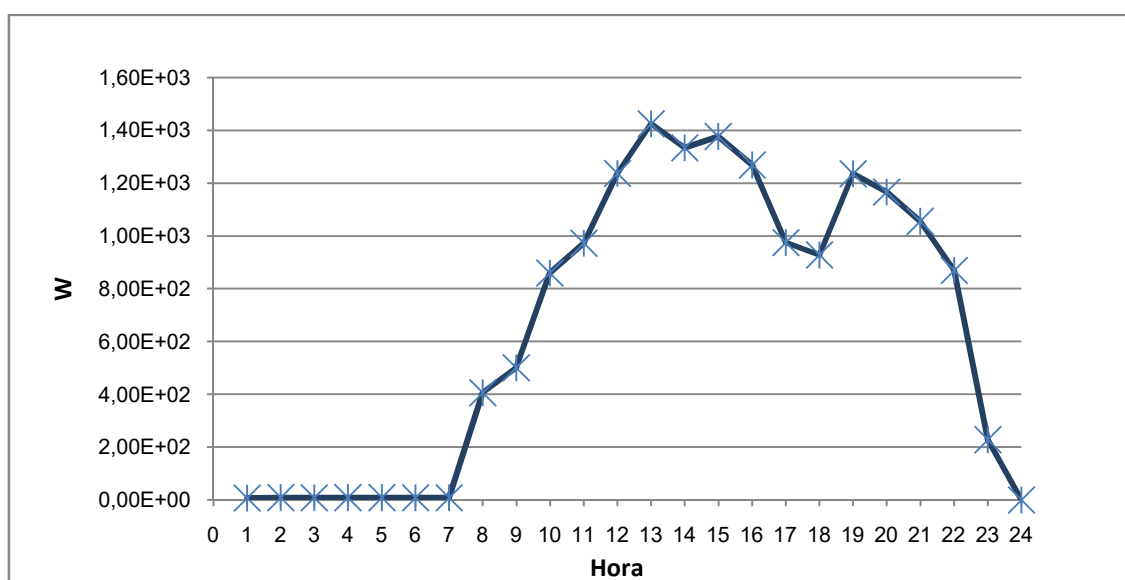
Comparação entre estratégias em relação Sem GLD				
	Diferença energia total consumida (%)	Diferença perda média (%)	Diferença perda máxima (%)	Diferença energia total consumida em perdas (%)
Sem GLD	-	-	-	-
GLD estratégia 1	-2,486	-2,746	33,831	-2,746
GLD estratégia 2	-5,299	-0,978	171,977	-0,978
GLD estratégia 3	0,082	-3,341	25,561	-3,341

Fonte: Próprio autor

As Tabelas e os gráficos apresentam os resultados considerando 25 residências (1 circuito). A perda média para a simulação sem o GLD foi de 662,7 Wh durante um dia. As outras estratégias apresentaram perda menor quando comparada a ela, conforme pode ser observado na Tabela 13.

As Figuras 17 a 20 apresentam as perdas em cada estratégia de GLD adotada.

Figura 17 - Perda por Hora Durante Um Dia - Sem GLD

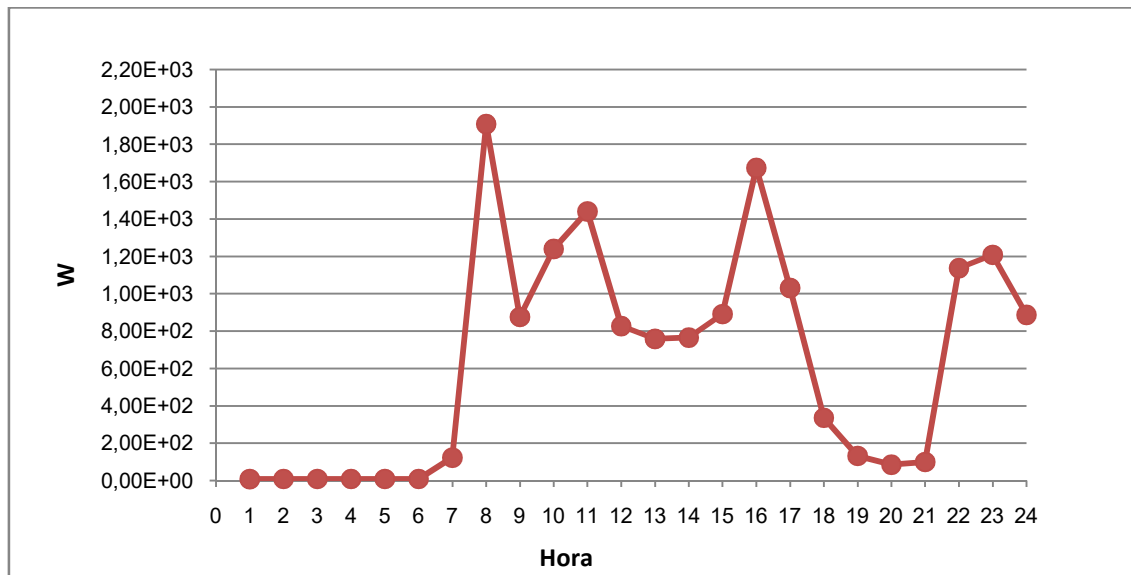


Fonte: Próprio autor

A Figura 17 apresenta a perda por hora em um dia (24 horas) na simulação sem utilizar os conceitos de GLD.

A estratégia 1 (Figura 20) de GLD demonstrou uma queda de 2,746% em relação a não utilização do GLD, porém com um pico 33,83% maior durante o dia. Analisando o gráfico é possível notar que os picos de perda são provenientes do horário próximo às 08:00 horas e às 16:00 horas, onde a regra de utilização do chuveiro elétrico está ativa, ocasionando consumo excessivo na rede.

Figura 18 - Perda por Hora Durante Um Dia - Estratégia 1 de GLD



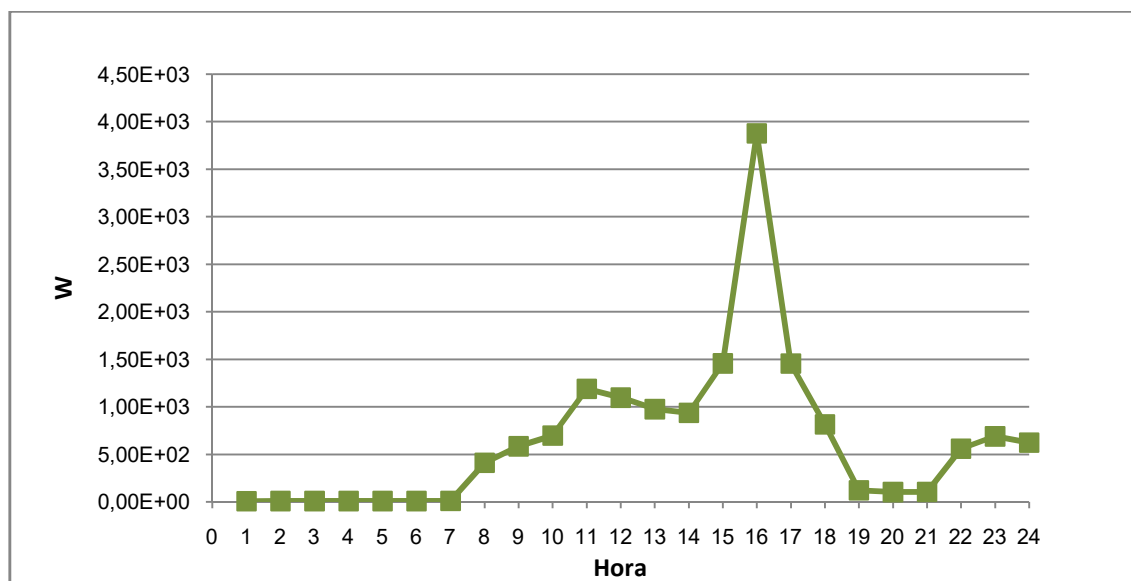
Fonte: Próprio autor

Devido a estratégia 1 ser baseada no deslocamento dos equipamentos de maior consumo (chuveiro elétrico, microondas e ferro de passar), e também retirar os equipamentos do horário de pico (entre 18:00 horas e 21:00 horas), o tempo necessário total para que eles possam ser utilizados (Tabelas 5 e 3), diminuiu provocando o efeito contrário ao desejado, acumulando equipamentos ligados ao mesmo tempo, mas não simultâneos na mesma residência. Este efeito faz com que a tensão nos pontos mais distantes da rede seja mais baixa. Os cálculos demonstraram que durante horário de maior pico, no local mais distante do transformador, a rede elétrica apresentava 204,5 V, para uma tensão nominal de 220 V.

O benefício que a estratégia 1 traz é a diminuição na perda média durante o dia, sendo uma opção de controle de carga no sistema analisado.

A estratégia 2 (Figura 21) de GLD atingiu uma queda de 0,978% em relação a não utilização do GLD, mas o pico de perda foi 171,98% maior durante o dia, prejudicando o sistema de distribuição. Com o gráfico é possível observar que o pico de perda está no horário próximo as 16:00 horas.

Figura 19 - Perda por Hora Durante Um Dia - Estratégia 2 de GLD



Fonte: Próprio autor

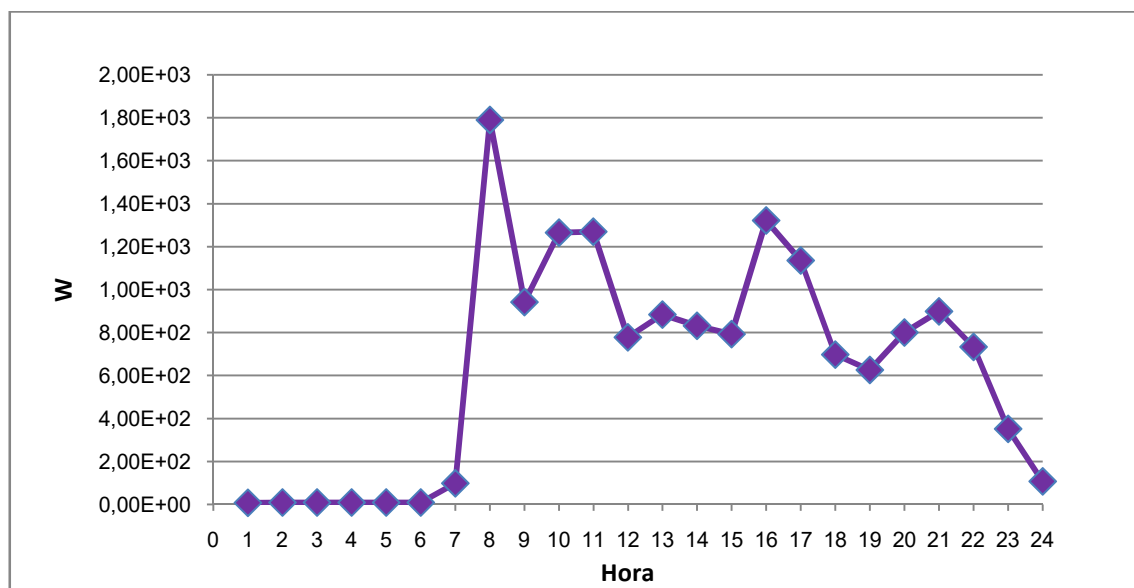
O consumo excessivo neste horário se deve a estratégia 2 ser baseada no deslocamento dos equipamentos, retirando-os do horário de pico (entre 18:00 horas e 21:00 horas), assim eles são utilizados, em sua maioria de acordo com a Tabela 6, ou seja, antes do horário de pico.

Foram realizadas diversas outras simulações para diminuir o efeito provocado por esta estratégia, porém como a Tabela 4 e 5 mostram, o chuveiro elétrico deve ser utilizado 4 vezes por dia e nos horários entre 07:02 e 22:36, e sem o índice de restrição de chuveiro elétrico, ferro de passar e microondas simultâneos ICr , o chuveiro acaba sendo utilizado duas vezes durante o horário anterior, próximo ao horário de pico.

Esta estratégia demonstrou pequeno benefício para diminuição na perda média, porém nenhum em relação aos picos no sistema analisado.

A estratégia 3 (Figura 20) de GLD apresentou uma queda de 3,341% na perda em relação a não utilização do GLD, porém com um pico 25,56% maior durante o dia. Através do gráfico é possível notar que os picos de perda é proveniente do horário próximo às 08:00 horas, onde a regra de utilização do chuveiro elétrico está ativa. Não há picos consideráveis durante os outros horários.

Figura 20 - Perda por Hora Durante Um Dia - Estratégia 3 de GLD



Fonte: Próprio autor

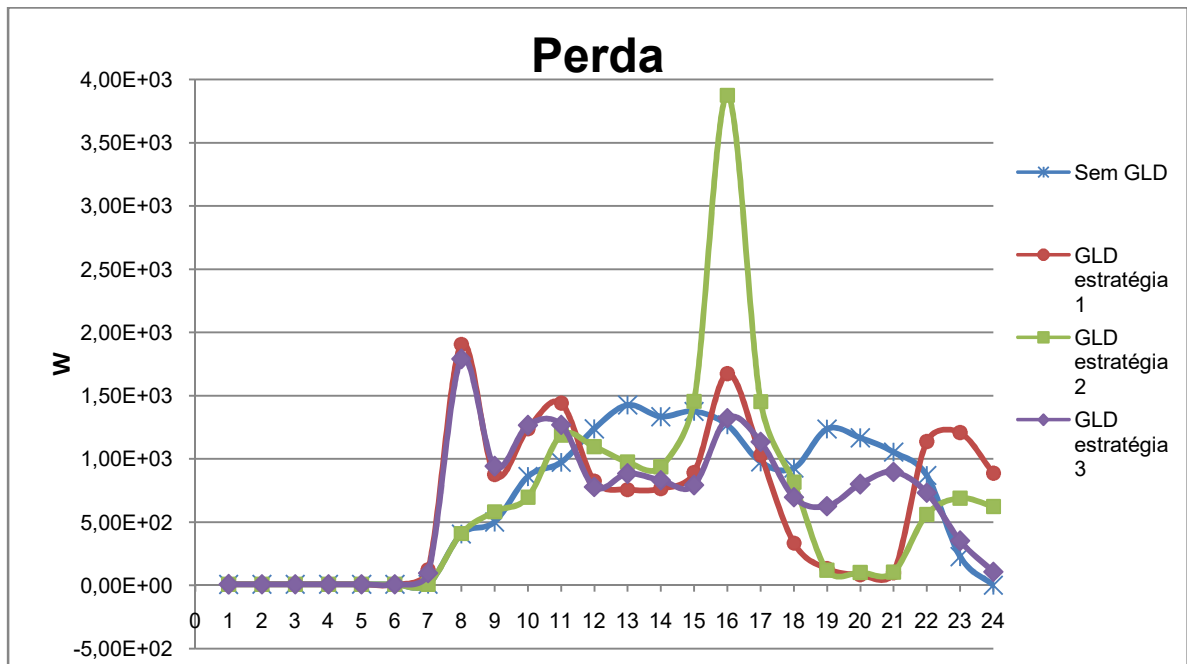
Assim como a estratégia 1, a estratégia 3 é baseada no deslocamento dos equipamentos de maior consumo (chuveiro elétrico, microondas e ferro de passar), não permitindo a utilização simultânea. Observe que os equipamentos (todos) podem ser utilizados durante o horário de pico.

O benefício que esta estratégia traz também é a diminuição na perda média durante o dia, sendo uma opção de controle de carga no sistema analisado, porém pode trazer desvantagem de custo devido a ela permitir a utilização de todos equipamentos durante o horário de pico.

A energia consumida nos condutores (perda) do sistema de distribuição de baixa tensão (Watts/hora) em um dia (24 horas) está apresentada na Figura 21 e a energia consumida pelo sistema de distribuição de baixa tensão (Watts / hora) em um dia (24 horas) está apresentada no Figura 22, de forma que se possa compará-las graficamente (juntas).

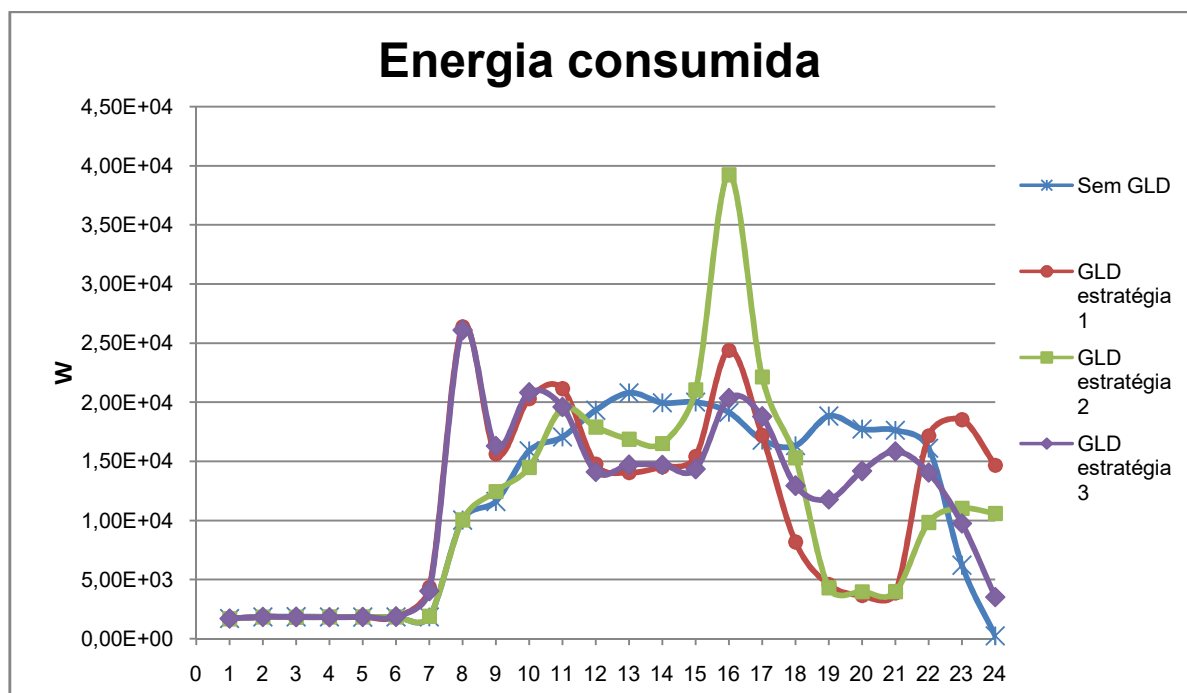
Observando a Figura 22, pode-se determinar que houve alteração nos picos de energia consumida para cada estratégia, assim como as estratégias 1 e 2 diminuíram o consumo durante o horário de pico.

Figura 21 - Resultados da Simulação - Perda



Fonte: Próprio autor

Figura 22 - Resultados da Simulação - Energia consumida



Fonte: Próprio autor

É importante afirmar que para se alcançar a redução nos valores de perda na prática (dia a dia) conforme a simulação apresentou, há a necessidade da utilização de dispositivos inteligentes com estratégias de controle pré-definidas através do gerenciamento pelo lado da demanda e conectados aos medidores inteligentes. Hoje estes dispositivos fazem parte da *Smart Home* - (em tradução livre, Casa Inteligente), e vem sendo utilizados cada vez mais.

A casa inteligente pode ser definida como uma casa que compreende uma comunicação de rede entre todos os dispositivos da mesma, permitindo o controle, monitoramento e acesso remoto de todas as aplicações e serviços do sistema de gerenciamento (FERNANDES *et al.*, 2016).

Nestas simulações, houve priorização de uso para a geladeira e o freezer, não permitindo seu desligamento ou deslocamento de horário em função das estratégias de GLD adotadas. As outras cargas não tiveram priorização de uso. A definição de quais equipamentos foram utilizados em cada residência, ou seja na prática, quais equipamentos cada uma possuía, foi realizada de acordo com os índices aferidos na pesquisa de posse e hábitos de uso, levando em consideração os equipamentos que cada pesquisado declarou possuir em sua residência.

Em situação real de aplicação, a definição de cargas prioritárias que possam ser desligadas, deve ser realizada pelo próprio consumidor. Para a utilização desta técnica na prática, deverá haver uma interface ao usuário, onde ele poderá colocar seus limites e intervalos de acordo com a rotina de seu dia a dia.

Como já citado, a Elasticidade da Carga é fator fundamental para a correta aplicação do GLD, e o quanto ela pode variar dentro da possibilidade do consumidor e concessionária não é possível definir neste momento, mas pode-se observar que o consumidor é receptivo a incentivos de custos para alteração de sua rotina.

Em testes realizados para aferir se o algoritmo para cálculo das perdas desenvolvido atendia ao objetivo do trabalho, utilizou-se de diversas matrizes de dados, com diversos horários e restrições, e foi possível observar que a estratégia de controle para a definição dos horários de utilização de cada equipamento em que há restrição é fundamental para se alcançar a eficiência energética. Isto também foi comprovado pelas diversas estratégias de GLD adotadas para a simulação.

O índice de pessoas que responderam que concordam em alterar o horário de utilização para fora do horário de pico, (que foi de 64,51%), acabou por fazer grande diferença no consumo durante o horário de pico, diminuindo a carga para aproximadamente 20% do total em relação ao pico de consumo. Isto também trouxe ligeira alteração após as 22:00h, provocando um pico posterior, quando comparado aos resultados sem GLD.

4.3 Simulações dos Valores Relacionados as Tarifas Branca e Convencional

Como não há definição oficial sobre quais serão os valores da tarifa branca, tarifa de semi-pico e a tarifa de pico a ser aplicada na região pesquisada, a partir da tarifa convencional vigente no mês de fevereiro de 2017, no valor de R\$0,44719 o kWh, composta pela a tarifa de uso do sistema (TUSD) no valor de R\$0,17548 e a tarifa de energia (TE) no valor de R\$ 0,27171, duas abordagens foram adotadas para se calcular os custos envolvidos na utilização da tarifa branca. A primeira considera a tarifa branca como sendo 75% do valor da tarifa convencional e a segunda considera 85% do valor da convencional. Os valores da tarifa semi-pico e pico ficaram definidas como sendo 15% e 100% maiores que a tarifa convencional respectivamente. Estes valores foram adotados para se ter uma referência comparativa entre as diversas estratégias de GLD e a aplicação sem GLD.

A Tabela 14 apresenta os valores de custos relacionados a utilização da tarifa branca em relação a tarifa convencional considerando que a tarifa branca possui valor de 75% da tarifa convencional.

Observe que a tabela contempla duas colunas para os custos para uma residência por dia, e duas colunas de custos para uma residência por mês, considerando 30 dias. É importante atentar que o consumo aos sábados e domingos são diferentes do consumo aos dias da semana, fato que não foi levado em consideração neste cálculo. Estes valores são média de todos cálculos efetuados para cada estratégia de GLD.

A Tabela 15 apresenta os valores de custos relacionados a utilização da tarifa branca em relação a tarifa convencional considerando que a tarifa branca possui valor de 85% da tarifa convencional.

Tabela 14 - Resultados da Simulação - Valores tarifas 75%

	Custos para uma residência /dia		Custos para uma residência / 30 dias	
	Custo tarifa branca	Custo tarifa convencional	Custo tarifa branca	Custo tarifa convencional
Sem GLD	R\$ 5,04	R\$ 4,95	R\$ 151,23	R\$ 148,46
GLD estratégia 1	R\$ 3,95	R\$ 4,83	R\$ 118,45	R\$ 144,77
GLD estratégia 2	R\$ 3,90	R\$ 4,69	R\$ 116,97	R\$ 140,60
GLD estratégia 3	R\$ 4,74	R\$ 4,95	R\$ 142,27	R\$ 148,59

Fonte: Próprio autor

Tabela 15 - Resultados da Simulação - Valores tarifas 85%

	Custos para uma residência /dia		Custos para uma residência / 30 dias	
	Custo tarifa branca	Custo tarifa convencional	Custo tarifa branca	Custo tarifa convencional
Sem GLD	R\$ 5,38	R\$ 4,95	R\$ 161,28	R\$ 148,58
GLD estratégia 1	R\$ 4,39	R\$ 4,83	R\$ 131,75	R\$ 144,84
GLD estratégia 2	R\$ 4,34	R\$ 4,71	R\$ 130,12	R\$ 141,16
GLD estratégia 3	R\$ 5,14	R\$ 4,95	R\$ 154,31	R\$ 148,55

Fonte: Próprio autor

A partir da Tabela 14, onde foi considerado que a tarifa branca tem o valor de 75% da tarifa convencional, nota-se que aplicada a tarifa branca em uma residência sem as estratégias de GLD, o custo aumentou em 1,87% em relação a tarifa convencional.

Realizando também análise para a Tabela 15, onde considera-se que a tarifa branca tem o valor de 85% da tarifa convencional, o custo aumentou 8,55% em relação a convencional. Pode-se observar que a tarifa branca não traz benefício sem a utilização de uma estratégia de GLD.

A estratégia 1 de GLD diminuiu os custos em 18,18% e 9,04% para as Tabelas 9 e 10 respectivamente, ou seja, retirando os equipamentos do horário de pico, mesmo que existam picos de consumo maiores no período, os custos finais são inferiores para a tarifa branca, considerando os dois fatores adotados (75% e 85%).

A estratégia 2 de GLD também trouxe diminuição de custos. Para a tarifa branca em 75%, a diminuição é de 16,81%, e em 85% é de 7,82% menor. Assim como a estratégia 1, a estratégia 2 também traz benefícios em relação a custos.

A estratégia 3 de GLD apresentou resultados distintos, pois quando aplicada a Tabela 9 (75%), a tarifa branca teve custo 4,25% inferior a tarifa convencional, porém com 85%, o custo da tarifa branca ficou 3,88% maior que a tarifa convencional. Esta estratégia traz redução da perda, porém a diminuição dos custos com tarifas está atrelada a relação de valores que existirá entre a tarifa branca e a tarifa convencional..

Pode-se observar que a utilização da tarifa branca trará benefício de custo desde que a relação entre ela e a convencional (custo) seja adequada, e seja adotada uma estratégia de gerenciamento pelo lado da demanda focada aos hábitos de uso dos equipamentos, e automação coerente com os resultados que se pretende ter.

Com os resultados da simulação, considerando que são aplicáveis apenas a região centro-oeste paulista (cidades pesquisadas), a aplicação do GLD com o *smart grid* reduz perdas, que é um fator importante às empresas concessionárias, e também gera redução de custos para os consumidores.

5 CONCLUSÕES

5.1 Aspectos Gerais

Considerando os dados da pesquisa realizada entre novembro de 2016 e janeiro de 2017, na região centro-oeste paulista, pode-se concluir que há clientes das concessionárias de energia elétrica que estão dispostos a alterar sua rotina diária no que tange ao consumo de energia elétrica, desde que haja a contrapartida, com a diminuição dos custos nos horários fora de pico. Percebe-se que o principal motor da mudança é financeiro, comprovando assim a possibilidade de estudos pela Elasticidade da Carga.

Comparando as perdas e custos nas estratégias adotadas de GLD de uma forma direta e classificando-as em níveis de impacto (maior, intermediário e menor), pode-se afirmar que a estratégia 3, que não permite utilização simultânea dos equipamentos de maior potência, mas podem ser ligados durante o horário de pico, possui o menor nível de perdas porém com maior custo com a tarifa branca.

A estratégia 2, que permite a utilização simultânea dos equipamentos, mas evita que sejam ligados durante o horário de pico, tem o maior nível de perdas porém com o menor custo.

Já a estratégia 1, que não permite a utilização simultânea dos equipamentos de maior potência, nem que sejam ligados durante o horário de pico, oferece nível intermediário de perdas e custos, mostrando ser a melhor escolha entre elas.

Com isso, as simulações efetuadas demonstraram que é possível otimizar o consumo de energia elétrica assim como diminuir a perda por dissipação nos condutores do sistema de distribuição de energia pela aplicação do gerenciamento pelo lado da demanda, mas também fica claro que a estratégia de controle dos horários em que os equipamentos podem ser ligados está estreitamente ligada ao sucesso da implementação. Ainda não se sabe como será esta tecnologia de controle a ser implementada nas residências brasileiras, mas é certo que ela deverá

ter configurações a serem testadas pelos usuários, para definir sua melhor ação em eficiência.

Os horários de restrição de utilização dos equipamentos são fator importante para se evitar picos de perda e consumo, e não dependem apenas da residência do consumidor. Os dados evidenciaram que será necessário realizar análise de um conjunto de residências e talvez propor ao consumidor gerenciamento externo baseado em hábitos de uso do bairro através de Redes Neurais Artificiais - RNA, por exemplo. Há a possibilidade de avaliar os hábitos de uso dos consumidores e propor estratégias de GLD baseadas nos horários de menor consumo da região.

Pode-se idealizar um sistema que faça a sugestão de uso dos equipamentos de uma residência baseado no histórico da residência e utilização geral na região, objetivando diminuir os picos de consumo e deslocamento dos horários de pico. Para isso será necessário obter dados *on-line* da utilização de cada equipamento e utilizá-los no sistema RNA, através de técnicas não-intrusivas.

A adoção da tarifa branca poderá trazer ganho de custos ao consumidor desde que uma estratégia de gerenciamento pelo lado da demanda coerente e adaptada a suas necessidades seja admitida em conjunto. A simples adoção da tarifa branca sem as estratégias de GLD não trarão benefício.

Outro fator que influenciará a migração para a tarifa branca será a diferença entre o valor cobrado da mesma em relação a tarifa convencional. Maior diferença será mais vantajoso ao consumidor, porém é necessário verificar os custos durante o semi-pico e pico, pois se for necessário utilizar equipamentos neste horário, a vantagem da tarifa branca poderá ser anulada.

5.2 Possibilidades de Desdobramentos do Tema

Este trabalho aplicou os conceitos de gerenciamento pelo lado da demanda na região centro-oeste paulista. Outras regiões podem ter resultados diferentes, pois a utilização dos equipamentos de uma residência e hábitos de uso dos consumidores são outros, assim como o consumo de energia elétrica também varia em função da época do ano. Fica a proposta de novos trabalhos aplicando a

mesma metodologia à outras regiões do Brasil, com hábitos de uso diferentes, assim como outros equipamentos nas residências.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Nota Técnica nº 0153/2012-SRD/ANEEL**. Nota técnica. Brasília, 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST- Módulo 7 - Cálculo de perdas na distribuição**. Procedimento. Brasília, 2015.

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Tarifa Branca - Aneel**. Brasília, 2016a. Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br/tarifa-branca>>. Acesso em 13 de jan. 2017.

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Perdas Elétricas - Aneel**. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=801&idPerfil=4>>. Acesso em 17 de abr. 2017.

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **ANEEL aprova tarifa branca, nova opção para os consumidores a partir de 2018**. Brasília, 2016b. Disponível em: < http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/aneel-aprova-tarifa-branca-nova-opcao-para-os-consumidores-a-partir-de-2018/656877?inheritRedirect=false>. Acesso em 10 de mar. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Eficiência Energética no Setor de Transportes da União Européia**. Estudo Temático, Brasília, 2014. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/?dw=69992>>. Acesso em 14 de set. 2016.

ALI, A. S. *et al.* **Smart grids opportunities, developments and trends**. North Rockhampton, QLD, Austrália: Springer, 2013.

BRASIL. Ministério das Minas e Energias - MME. **Tabela estimativa de consumo médio mensal de eletrodomésticos de acordo com um uso hipotético**. Tabela, Brasília, 2016a. Disponível em : < <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7BE6BC2A5F-E787-48AF-B485-439862B17000%7D>> Acesso em 07 de nov. 2016.

BRASIL. Ministério das Minas e Energias - MME. **www.procelinfo.com.br**. Site, Brasília, 2016b. Disponível em :<
<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?Team=%7B505FF883%2DA273%2D4C47%2DA14E%2D0055586F97FC%7D>>. Acesso em 17 de out. 2016.

BRASIL. Ministério das Minas e Energias - MME. **Balanco Energético Nacional - BNE 2016**. Relatório. Brasília, 2016c.

BRASIL. Ministério das Minas e Energias - MME. (2007). **Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso - Classe Residencial**. Pesquisa, Brasília, 2007.

BRASIL. Ministério das Minas e Energias - MME. (2011). **Plano Nacional de Eficiência Energética - Premissas e Diretrizes Básicas**. Relatório, Brasília, 2011.

BRASIL. Ministério das Minas e energias - Grupo de trabalho de redes elétricas inteligentes (MME - GTREI). **Smart Grid**. Relatório, Brasília, 2014. Disponível em: <
http://www.mme.gov.br/documents/10584/1256641/Relatxrio_GT_Smart_Grid_Portaria_440-2010.pdf/3661c46c-5f86-4274-b8d7-72d72e7e115>. Acesso em 19 de set. 2016.

CAMARGO, C. C. B.; NASSAR, S. M., CUNHA, C. A. Administração do Consumo de Energia Elétrica em residências: Um estudo de caso utilizando questionários. **Revista de Administração Pública - RAP**, Rio de janeiro, RJ, v. 33, n. 3, p. 161-174, mai / jun 1999.

CESPEDES, R. G. New method for the analysis of distribution networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 5, n. 1, p 391-396, jan 1990.

COMISSÃO EUROPÉIA (CE). **Análise comparativa da implantação de contadores inteligentes na UE-27, com ênfase na eletricidade**. Bruxelas: EUR - LEX - Acess to European Union law,2014.

COMITÊ DE DISTRIBUIÇÃO - (CODI). **Método para determinação, análise e otimização das perdas técnicas em sistemas de distribuição**. Documento Técnico. CODI-3.2.19.34.0, Rio de Janeiro ago. 1996. 205 p.

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ - CPFL. **Ged 13 - Fornecimento em Tensão Secundária de Distribuição, V2.7**. São Paulo, 2012a.

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ - CPFL. **Ged 3667 - Projeto de Rede de Distribuição - Cálculo Elétrico, V1.13.** São Paulo, 2016a.

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ - CPFL. **Ged 3589 - Rede Secundária com Cabos Multiplexados - Conexões, V1.9.** São Paulo, 2012b.

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ - CPFL. **Ged 3596 - Rede Secundária com Cabos Multiplexados - Construção, V2.1.** São Paulo, 2016b.

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ - CPFL. **Ged 3597 - Rede Secundária com Cabos Multiplexados - Montagem V1.16.** São Paulo, 2013.

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ - CPFL. **Ged 4319 - Ramal de Ligação - Montagem V2.1.** São Paulo, 2012c.

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ - CPFL. **Ged 921 - Cabo Multiplexado 0,6 - 1kV, V2.3.** São Paulo, 2012d.

DOTORLINA, C. A.; NADIRA, R. **The loss that is unknown is no loss at all: a top-down/bottom-up approach for estimating distribution losses.** IEEE Transactions Power, New York, v. 20, n. 2, p. 1119-1125, 2005.

FARHANGI, H. The path of the smart grid. **IEEE power & energy magazine**, v. 8, n. 1, p 18-28, jan./fev. 2010.

FERNANDES, F. *et al.* **Dinamic loads and micro-generation method for a house management system.** Clenson University Power Systems Conference (PSC), 7., 2016, South Carolina, IEEE Conference Publications. South Carolina, 2016.

GELLINGS, C. W. The concept of demand-side management for electric utilities. **Proceedings of the IEEE**, v. 73, n. 10, p. 1468-1470, out. 1985.

GRUPO WEG. **Soluções para Smart Grid.** Jaraguá do Sul: WEG, 2015. Disponível em: < <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-solucoes-para-smart-grid-50049586-catalogo-portugues-br.pdf> > Acesso 03 de nov. 2016.

HAGE, F.S.E.; FERRAZ, L.P.C.; DELGADO, M.A.P. **A Estrutura Tarifária de Energia Elétrica - Teoria e Aplicação.** 1. ed. São Paulo: Synergia, 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA - (INMETRO). **www2.inmetro.gov.br**. Disponível em:< <http://www2.inmetro.gov.br/pbe/historico.php>> Acesso em 17 de out.2016.

JARDINI, J.A.; BRITTES, J.L.P.; SILVEIRA, P.O. **Consumer loading characterization based on measurement campaigns - A prospective approach**. Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA), 6., 2012, Montevideo, IEEE Conference Publications. Montevideo, 2012.

LEAL, A. G. **Sistema para determinação de perdas em redes de distribuição de energia elétrica utilizando curvas de demanda típicas de consumidores e redes neurais artificiais**. 2006. 154 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MANCUZO, E; SOUZA, A. N.; AMARAL, H. L.; GASTALDELLO, D. S. **Smart grid com Foco em Eficiência Energética**. 12th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications INDUSCON 2016, Curitiba, 2016.

MOREIRA, B. Falta de regulação entrava smart grid no país. **O setor elétrico**, Belo Horizonte, MG, v. 115, p. 140, ago. 2015. Disponível em: <<http://www.osetoreletrico.com.br/web/a-revista/edicoes/1745-falta-de-regulacao-entrava-smart-grid-no-pais.html>>. Acesso em: 13 de set. 2016.

DE OLIVEIRA, M.E. **Avaliação de Metodologias de Cálculo de Perdas Técnicas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 2009. 137 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha solteira, 2009.

PARLAMENTO EUROPEU E O CONSELHO DE UNIÃO EUROPÉIA (UE). **Diretiva 2009/72/CE**, de 13 de julho de 2009. Estabelece regras comuns para o mercado interno de eletricidade. Bruxelas, Suíça, 2009.

REDES INTELIGENTES BRASIL (RIB). **Cidade Inteligente Búzios**. Brasília, 2017. Disponível em:< <http://redesinteligentesbrasil.org.br/cidade-inteligente-buzios.html>>. Acesso em 17 de abr. 2017.

SANTOS, P.E.S. **Tarifa de distribuição para unidades consumidoras e micro geradores considerando a elasticidade** - Preço das cargas. 2008. 163 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2008.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (US-DE). Smart Grid System Report. Washington, DC: United States Department of Energy, 2014.

VELLANO, M. T. Programa smart grid da AES Eletropaulo - A energia das metrópoles do futuro. In: FÓRUM LATINO AMERICANO DE SMART GRID, 6., 2013, São Paulo, **Anais eletrônicos**... São Paulo: Smart grid, 2013. Disponível em: <http://www.smartgrid.com.br/eventos/smartgrid2013/apresentacao/maria_tereza_travassos_vellano.pdf>. Acesso em 13 de set. 2016.

7 ANEXOS

A - Pesquisa de posse de equipamentos eletrodomésticos e hábitos de uso regionais

Pesquisa de posse de equipamentos eletrodomésticos e hábitos de uso regionais

Nome: _____ Telefone: _____ Data: ____/____/____ Cidade: _____

e-mail: _____ Quantidade de pessoas na casa: _____ Escolaridade: _____

Esta pesquisa se destina a aquisição de dados de posse de equipamentos eletrodomésticos e a forma como eles são utilizados no dia a dia para um trabalho de Pós Graduação. Solicito a gentileza de preencher os dados abaixo com o máximo de clareza possível, e deixe em branco os equipamentos que não possui.

Item	Equipamentos da residência							
	Equipamento	Tempo de uso por dia (horas)	Quantidade de vezes que utiliza por dia	Hora do dia inicial mínima de utilização (Hora)	Hora do dia final máxima de utilização (Hora)	Aceitaria restringir o horário de utilização deste equipamento entre as 18:00h e 21:00h para economia de energia e diminuição do valor pago na conta de energia? (sim ou não)	Se sim, para qual horário poderia ser deslocada a utilização deste equipamento? Antes das 18:00 ou após das 21:00?	Observação
1	Aparelho de som							
2	Aparelho DVD							
3	Aspirador de Pó							
4	Barbeador							
5	Batedeira							
6	Cafeteira							
7	Chuveiro							
8	Computador							
9	Espremedor							
10	Ferro							
11	Fogão							
12	Freezer							
13	Geladeira							
14	Iluminação							

Item	Equipamentos da residência							
	Equipamento	Tempo de uso por dia (horas)	Quantidade de vezes que utiliza por dia	Hora do dia inicial mínima de utilização (Hora)	Hora do dia final máxima de utilização (Hora)	Aceitaria restringir o horário de utilização deste equipamento entre as 18:00h e 21:00h para economia de energia e diminuição do valor pago na conta de energia? (sim ou não)	Se sim, para qual horário poderia ser deslocada a utilização deste equipamento? Antes das 18:00 ou após das 21:00?	Observação
15	Iluminação							
16	Iluminação externa							
17	Lava Roupa							
18	Liquidificador							
19	Microondas							
20	Secador Cabelo							
21	Multiprocessador							
21	TV até 32 pol							
22	TV acima 32 pol							
23	Videogame							

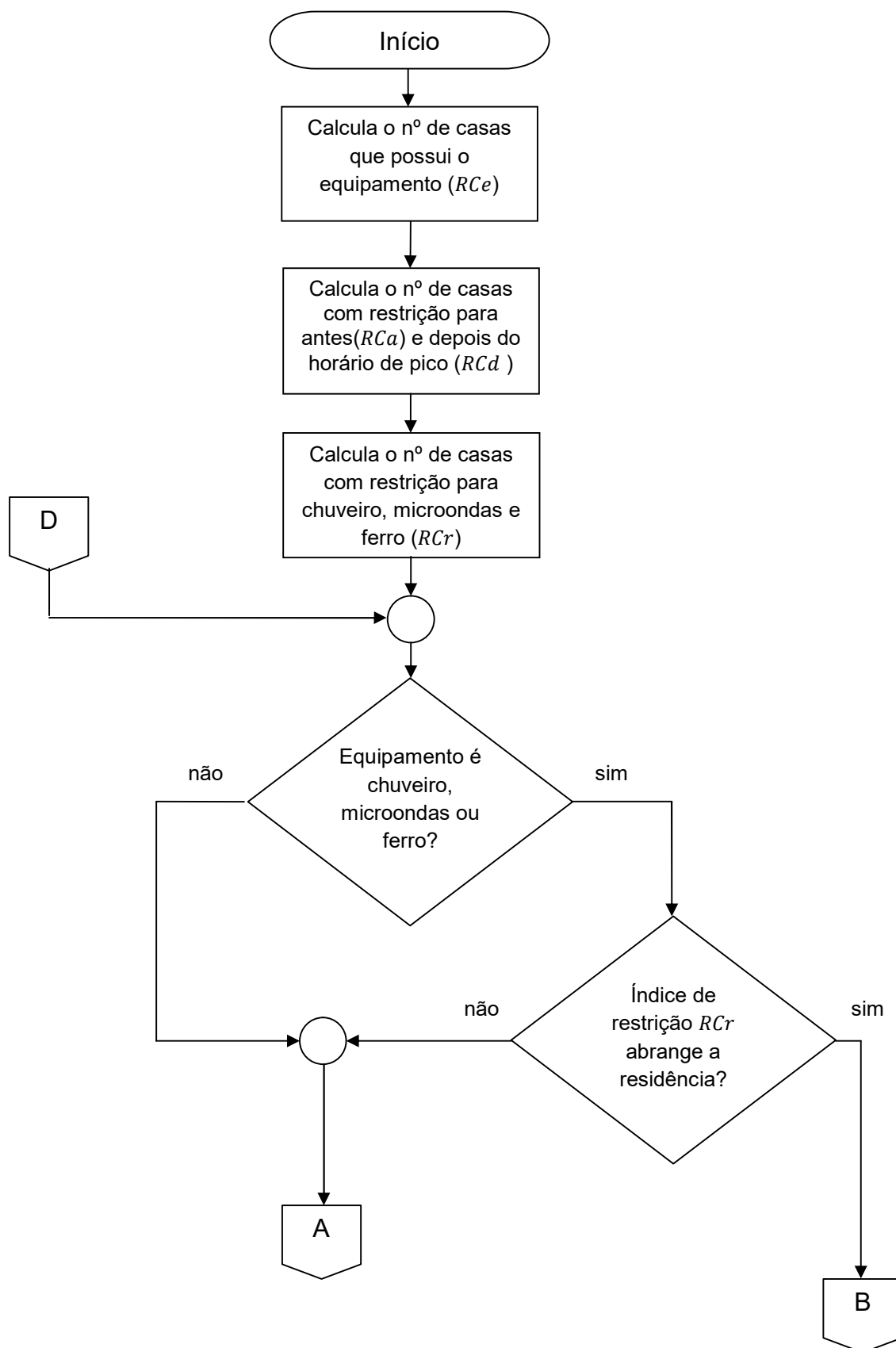
Perguntas:

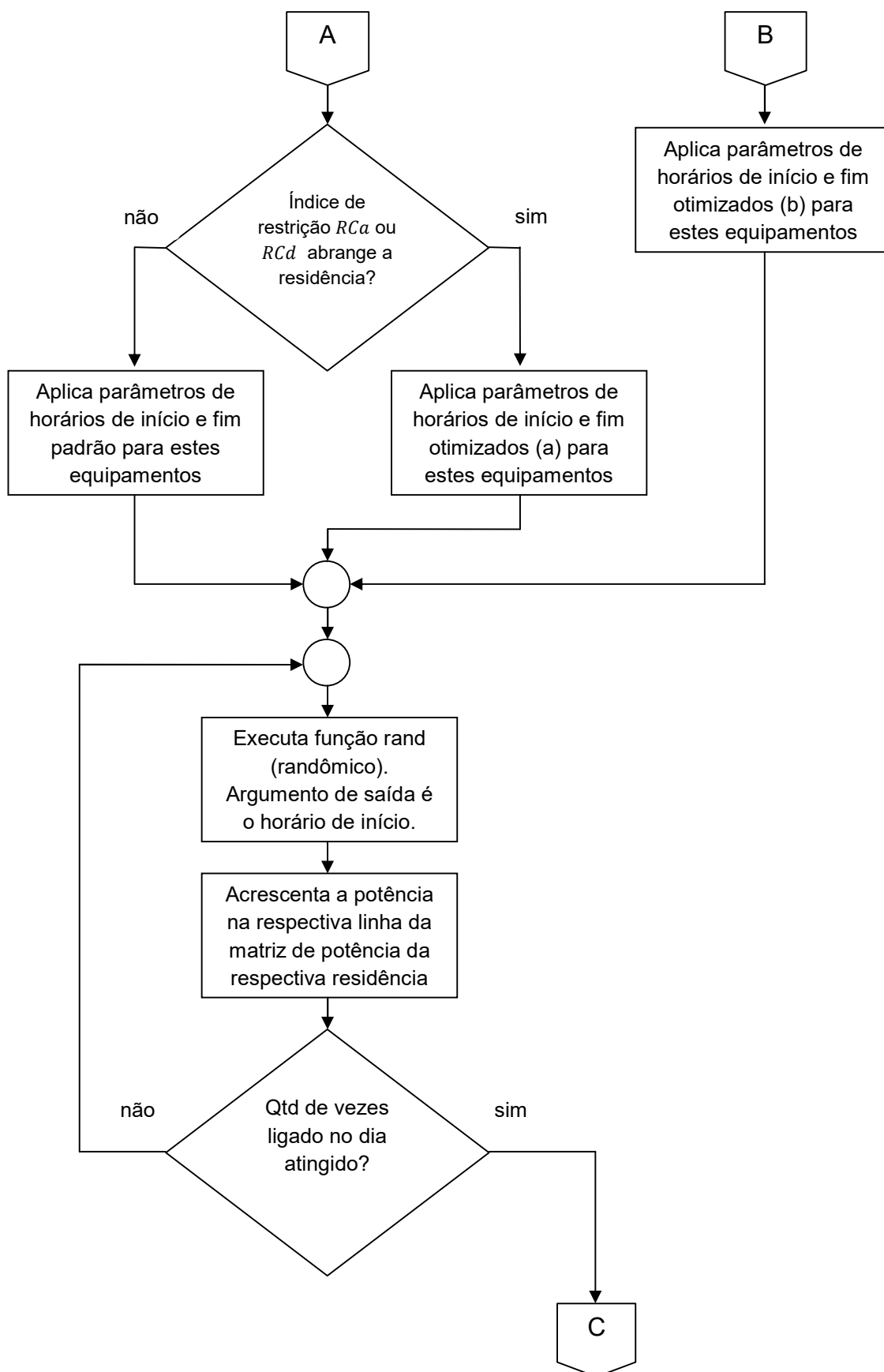
Aceitaria restringir a utilização do chuveiro elétrico, o microondas e o ferro elétrico (somente pode ter um destes equipamentos ligados ao mesmo tempo)? (sim ou não) : _____

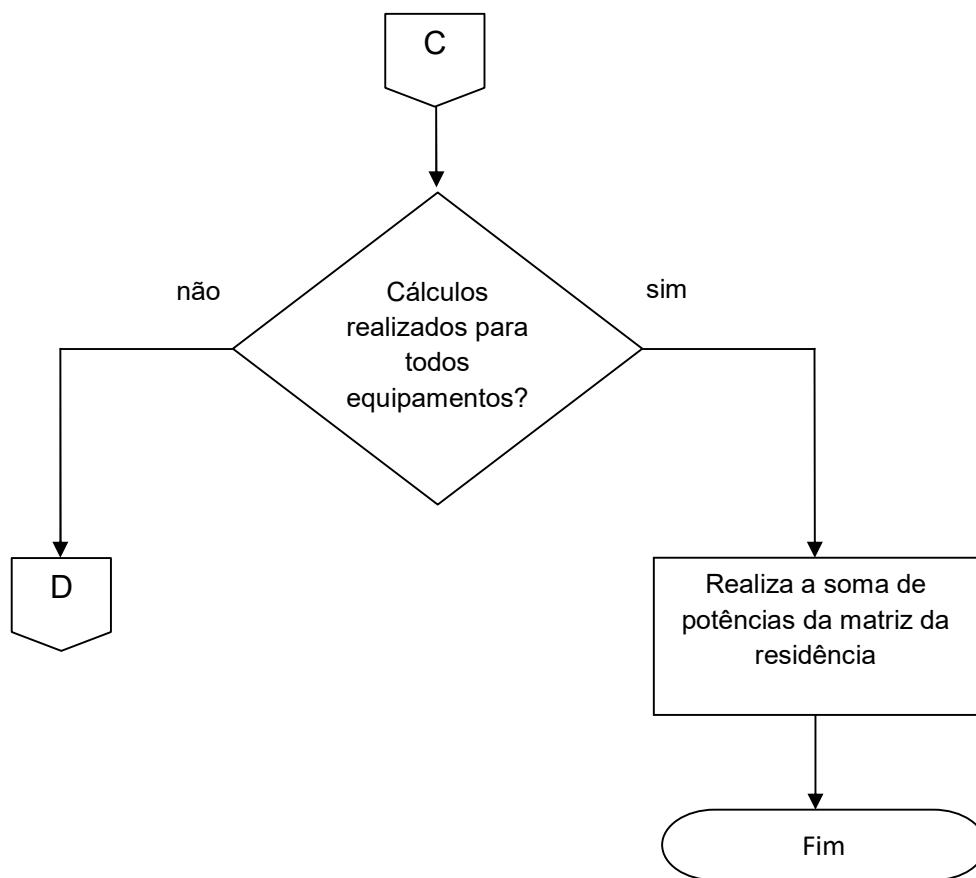
Aceitaria restringir a utilização do chuveiro elétrico ao mesmo tempo que o secador de cabelos (se o chuveiro estiver ligado, o secador de cabelos não pode ser utilizado)? (sim ou não) : _____

Para a pergunta " Aceitaria restringir o horário de utilização deste equipamento entre as 18:00h e 21:00h para economia de energia e diminuição do valor pago na conta de energia? " considere que futuramente haverá aumento da tarifa de energia elétrica neste horário (hora de ponta).

B - Fluxograma 1







C - Fluxograma 2

