

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LEONARDO NORBERTO SCHERER

**DESPACHO ÓTIMO E ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E
ECONÔMICA DE *SMART-HOUSES* CONSIDERANDO
GERENCIAMENTO PELO LADO DA DEMANDA**

Curitiba - PR
2019

LEONARDO NORBERTO SCHERER

**DESPACHO ÓTIMO E ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E
ECONÔMICA DE *SMART-HOUSES* CONSIDERANDO
GERENCIAMENTO PELO LADO DA DEMANDA**

Plano de trabalho apresentado ao
Curso de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal do Paraná, como
requisito parcial para obtenção do grau
de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Clodomiro Un-
sihuay Vila

Curitiba - PR
2019

TERMO DE APROVAÇÃO

LEONARDO NORBERTO SCHERER

DESPACHO ÓTIMO E ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE *SMART-HOUSES* CONSIDERANDO GERENCIAMENTO PELO LADO DA DEMANDA

Trabalho de conclusão de curso aprovado como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista no Curso de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Prof. Dr. Clodomiro Unsihuay Vila
Orientador - Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Prof. Eng. Tibiriçá K. Moreira
Avaliador - Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Prof. Dr. Sebastião Ribeiro Junior
Avaliador - Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Curitiba
2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar ao meu Deus.

Agradeço em especial a minha noiva por todo apoio e compreensão durante estes meses.

Agradeço aos meus amigos e minha família por estarem ao meu lado em todos os momentos.

Agradeço o Professor Dr. Clodomiro Unsihuay Vila, pela sua orientação, dedicação, comprometimento, sugestões e correções que foram de suma importância para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço o Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná (UFPR), seus docentes e funcionários técnicos-administrativos, que proporcionaram a base acadêmica necessária para alcançar este objetivo.

“Tenho espírito justiceiro e entendo que o amor deve seguir estes graus de preferência: Deus, humanidade, pátria, família e indivíduo.”

Sua Majestade Imperial, Dom Pedro II do Brasil.

RESUMO

A humanidade apresenta uma tendência de crescimento de consumo de energia elétrica para os próximos anos e o Brasil possui grande potencial para suprir esta demanda, tanto com energias renováveis, quanto com energias não renováveis. Deve-se destacar a geração descentralizada, que dão origem à *micro-grids*, que tem crescido cada vez mais e têm necessidade de serem integradas ao Sistema Interligado Nacional. Aliado a isso, existe uma crescente preocupação com o uso eficiente da energia, o que leva ao surgimento de *smart-houses* e *smart-grids*, cujo objetivo é gerenciar o uso de energia de forma inteligente, reduzindo custos e os picos de demanda na rede. O surgimento destes elementos tornará a rede elétrica cada vez mais complexa, porém, para o usuário final só interessa o seu gasto com energia. Por este motivo, é importante estudar a viabilidade técnica e econômica dos principais componentes de uma *smart-house*, sendo estes um sistema de microgeração distribuída, um sistema de armazenamento de energia e um veículo elétrico, além da alocação inteligente das cargas possíveis. Para tal, fez-se a análise da viabilidade técnica de microgeração fotovoltaica e eólica na cidade de Curitiba, estudando os potenciais da região e verificando quanta energia pode ser gerada através de cada fonte. Com esses dados em mãos, utilizou-se em um modelo computacional que simula o impacto que estes componentes e a sua alocação inteligente apresentam na curva de consumo de uma residência e, por consequência, no gasto diário com energia elétrica. Com este modelo, pôde-se estudar o impacto de cada componente na curva de consumo e compará-lo com uma alocação inteligente desses componentes, o que equivale a uma *smart-house*. Desta forma, foi possível concluir que a inserção de elementos de geração e armazenamento distribuídos de energia pode apresentar uma redução significativa nos gastos com energia elétrica que podem ser ainda maiores se estes elementos estiverem associados a uma alocação inteligente das cargas.

Palavras-chave: *Smart-house*. *Smart-grid*. Alocação inteligente de cargas. Micro-geração. Armazenamento distribuído de energia elétrica.

ABSTRACT

Humankind has shown a tendency of consumption growth in the coming years, and Brazil has great potential to supply this demand, with both renewable and non renewable sources. One must pay special attention to decentralised generation sources, that originate the smart-grids, which have been growing and need to be integrated to the larger grid. With that, there is a growing concern with energy efficiency, which leads to the creation of smart-grids and smart-houses, which have the purpose of managing the usage of electricity in a smart way, reducing costs and peaks of demand on the grid. The arising of these elements will make the power grid more complicated, but for the consumer, all that matters is his energy bill. For that reason, it's important to study the technical and economical viability of the main components of a smart-house, that is a micro-generation system, an energy storage system, an electrical vehicle and it's smart allocation, amongst with the smart allocation of charges. For such, the technical viability of wind and solar micro-generation was analysed, studying the energy potential and verifying the amount of energy that could be generated from each source in Curitiba. With the results of that and using a virtual model that simulates the impact caused by those components and their smart allocation on the consumption of energy, and therefore, the daily expense with energy. With that model, one could study the of each component individually and compare it with the smart allocation of these components, which is equivalent to a smart-house. With that, one can verify that distributed generation and storage components can decrease significantly the expenses with energy, and those results can be even better if those components are associated with smart allocation of charges.

Key-words: Smart-house. Smart-grid. Smart allocation of charges. Micro-generation. Energy distributed storage.

Lista de Figuras

1	Projeção da demanda mundial de energia.	1
2	Esquemático de uma <i>smart-house</i>	4
3	Vista dos componentes internos do sistema <i>Powerwall</i>	6
4	Quantidade de conexões de geração distribuída no Brasil.	7
5	Proporção de conexões de geração distribuída por setor.	8
6	Curva linearizada e reta ajustada para dados da cidade de Curitiba.	10
7	Esquemático da extração de energia do disco atuador.	21
8	Dados obtidos do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro.	26
9	Resultados do método da máxima verossimilhança.	27
10	Oscilação horária dos valores de velocidade do vento na cidade de Curitiba - 2004-2015.	28
11	Densidade do ar em diversas cidades no estado do Paraná.	30
12	Parâmetros do veículo elétrico.	34
13	Dados das cargas controláveis.	35
14	Períodos permitidos ou não para alocação de cada carga controlável.	36
15	Períodos e tempos de operação das cargas controláveis e veículo elétrico sem nenhuma alocação inteligente de cargas.	37
16	Dados das cargas não controláveis.	38
17	Curva de consumo padrão das cargas não controláveis.	38
18	Períodos e tempos de operação das cargas não controláveis.	39
19	Curva de consumo para o Caso A.	42
20	Curva de consumo para o Caso B.	42
21	Custo estimado para instalação de micro-geração fotovoltaica.	43
22	Curva de consumo para o Caso C.	44
23	Curva de consumo para o Caso D.	45
24	Curva de consumo para o Caso E.	46
25	Curva de consumo para o Caso F.	47
26	Curva de consumo para o Caso G.	48
27	Curva de consumo para o Caso I.	49
28	Curva de consumo para o Caso J.	50

Lista de Tabelas

1	Velocidade média do vento em cada período do dia no município de Curitiba - PR.	29
2	Especificações técnicas do aerogerador modelo ELV-H3.1 – 1 kW.	31
3	Especificações técnicas do aerogerador modelo ELV-H8.0 – 10 kW.	31
4	Especificações técnicas do gerador fotovoltaico.	32
5	Radiação solar média em cada período no município de Curitiba, estado do Paraná.	32
6	Energia gerada através do sistema solar da residência.	33
7	Parâmetros de entrada referêntes ao veículo elétrico.	34
8	Parâmetros de entrada do sistema de armazenamento.	35
9	Tarifa branca para o subgrupo B1.	40
10	Análise de viabilidade econômica do sistema de geração fotovoltaico.	43
11	Análise de viabilidade econômica do sistema de geração fotovoltaico com alocação de cargas.	44
12	Análise de viabilidade econômica sistema de armazenamento.	45
13	Análise de viabilidade econômica do sistema de armazenamento com alocação de cargas.	46
14	Análise de viabilidade econômica dos sistemas fotovoltaico e de armazenamento.	47
15	Análise de viabilidade econômica dos sistemas fotovoltaico e de armazenamento com alocação de cargas.	48
16	Análise de viabilidade econômica do veículo elétrico e sistemas fotovoltaico e de armazenamento.	49
17	Análise de viabilidade econômica do veículo elétrico e sistemas fotovoltaico e de armazenamento com alocação de cargas.	50
18	Comparação econômica dos casos, parte 1.	51
19	Comparação econômica dos casos, parte 2.	51
20	Comparação econômica dos casos, parte 3.	51

Conteúdo

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	MOTIVAÇÕES	1
1.2	JUSTIFICATIVA	1
1.3	OBJETIVOS	2
1.3.1	Objetivo Geral	2
1.3.2	Objetivos Específicos	2
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2	REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1	<i>SMART-HOUSE</i>	4
2.2	<i>SMART-GRID</i>	5
2.3	<i>MICROGRID</i>	5
2.4	CARGAS CONTROLÁVEIS E CARGAS NÃO CONTROLÁVEIS	5
2.5	RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS	5
2.5.1	Sistemas de Armazenamento de Energia	5
2.5.2	Geração Distribuída	6
2.5.2.1	Créditos de Energia	8
2.6	VEÍCULOS ELÉTRICOS	9
2.7	DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL	9
2.7.1	Método Gráfico	10
2.7.2	Método dos Momentos	11
2.7.3	Método da Densidade de Potência	12
2.7.4	Método da Máxima Verossimilhança	12
2.8	ANÁLISE ECONÔMICA	12
2.8.1	Fluxo de Caixa	13
2.8.2	Taxa Mínima de Atratividade	13
2.8.3	<i>Payback</i> Simples	13
2.8.4	Valor Presente Líquido	13
2.8.5	Taxa Interna de Retorno	14
3	METODOLOGIA	15
3.1	MODELAGEM MATEMÁTICA DAS <i>MICROGRIDS</i>	15
3.1.1	Função Objetivo e Equações Gerais	15
3.1.2	Cargas Controláveis	17
3.1.3	Sistemas de Armazenamento	18
3.1.4	Veículos Elétricos	19
3.1.5	Microgeração Solar	21
3.1.6	Microgeração Eólica	21
3.1.7	Modelo Matemático Para <i>Smart-Houses</i>	22
3.2	VIABILIDADE TÉCNICA DA MICRO-GERAÇÃO EM CURITIBA - PR	25
3.2.1	Parâmetros de Weibull	25
3.2.2	Micro-geração eólica	28
3.2.3	Micro-geração Fotovoltaica	31
3.3	PARÂMETROS E DADOS DE ENTRADA	33
3.3.1	Função Objetivo	33
3.3.2	Veículo Elétrico	33
3.3.3	Sistema de Armazenamento	35
3.3.4	Cargas Controláveis	35
3.3.5	Cargas Não Controláveis	37
3.3.6	Tarifas de Energia Elétrica	40

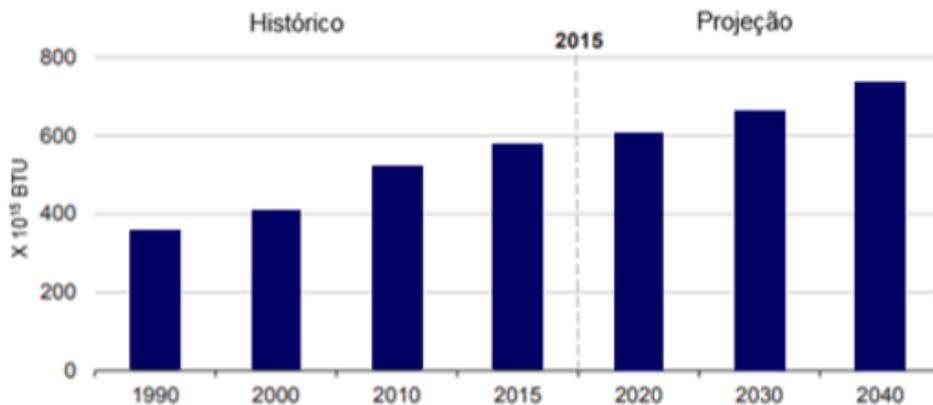
4	RESULTADOS	41
4.1	VIABILIDADE ECONÔMICA	41
4.1.1	Caso A - Caso Base	41
4.1.2	Caso B - Sistema Fotovoltaico	42
4.1.3	Caso C - Sistema Fotovoltaico Com Alocação de Cargas	43
4.1.4	Caso D - Sistema de Armazenamento	44
4.1.5	Caso E - Sistema de Armazenamento Com Alocação de Cargas	45
4.1.6	Caso F - Sistema Fotovoltaico e Sistema de Armazenamento	46
4.1.7	Caso G - Sistema Fotovoltaico e Sistema de Armazenamento Com Alocação de Cargas	47
4.1.8	Caso H - Veículo Elétrico e Sistemas Fotovoltaico e de Armazenamento	48
4.1.9	Caso I - Veículo Elétrico e Sistemas Fotovoltaico e de Armazenamento Com Alocação de Cargas	49
4.1.10	Caso J - Alocação de cargas	50
4.2	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	51
5	CONCLUSÃO	53
5.1	TRABALHOS FUTUROS	53
6	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	54

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÕES

De acordo com estudos realizados pela *International Energy Agency* (IEA), o consumo mundial de energia tem uma tendência de crescimento nas próximas décadas. Estima-se que a demanda crescerá 28% entre 2015 e 2040, passando de 575 quatrilhões de BTU's para 736 quatrilhões de BTU's. As previsões da IEA também indicam que a demanda mundial de energia chegará aos 30 PWh em 2020 (VILLALVA e GAZOLI, 2015).

Figura 1: Projeção da demanda mundial de energia.



Fonte: ULLMANN (2018).

No Brasil, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) estima que o consumo de energia elétrica terá um aumento médio de 0,6% ao ano entre 2016 e 2026, chegando a atingir 741TWh em 2026 (EPE, 2017).

Se contrapondo a este crescimento, no Brasil existe grande potencial energético ainda não aproveitado, tanto de fontes renováveis, quanto de fontes não renováveis (EPE, 2018).

O aproveitamento de potenciais não renováveis está limitado por questões ambientais. Os potenciais hidráulicos, além de comumente estarem longe dos centros de consumo, é fortemente afetado por questões ambientais e sociais relacionadas ao alagamento.

Com isto, as unidades geradoras renováveis e descentralizadas ganham vantagem sobre as grandes usinas, além do fato de trazerem economia ao consumidor. Junto a isso, existe a necessidade de integrar essas unidades geradoras ao Sistema Interligado Nacional, que, aliado aos programas de eficiência energética e necessidade de confiabilidade do sistema, leva a rede elétrica a evoluir na direção das *smart-grids*, ou redes elétricas inteligentes (RIVERA, ESPOSITO e TEIXEIRA, 2013).

Dentro das *smart-grids*, as *smart-houses*, ou residências inteligentes, fazem o consumidor deixar de ser um agente passivo, apenas consumidor, tornando-se agora um agente ativo do sistema elétrico, gerando e armazenando energia, além de alocar seu consumo de forma a evitar picos de consumo.

Neste novo cenário do sistema elétrico, estudos e análises aprofundadas serão necessários para possibilitar a operação integrada e otimizada do sistema de distribuição e das *smart-houses*.

1.2 JUSTIFICATIVA

Existe uma tendência mundial de aumento no consumo de energia elétrica e, como as fontes de energia são limitadas, mesmo as renováveis, é cada vez mais importante desenvolver maneiras de usar a energia de forma mais inteligente e eficiente. Um dos principais métodos que está sendo desenvolvido recentemente é a implementação de redes elétricas inteligentes e microrredes.

Cada vez mais os consumidores de energia elétrica terão autonomia sobre o gerenciamento da energia, isso se deve a tendência de mercado em organizar os sistemas na forma de microrredes e redes elétricas inteligentes.

As microrredes podem ser descritas como subsistemas do sistema de distribuição que contém geração e armazenamento distribuídos e os consumidores, podendo operar de forma autônoma em paralelo ou isolada do sistema de distribuição.

As redes elétricas inteligentes consistem em redes elétricas com sistemas integrados de tecnologias de informação e comunicação, capazes de otimizar a produção, geração, distribuição e consumo de energia. Este tipo de sistema possui fluxo bidirecional de informação, levando dados sobre consumo e geração em cada unidade à concessionária, e de volta às unidades geradoras e consumidoras sobre como e quando devem entrar em ação, de forma a otimizar o funcionamento do sistema como um todo.

De acordo com estudos do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES, 2012), a implantação das redes elétricas inteligentes no Brasil trará benefícios aos consumidores como a redução das perdas técnicas e não técnicas e a melhoria da qualidade do serviço prestado pelas concessionárias de distribuição.

Dessa forma, os consumidores passam a ser entes ativos no sistema elétrico de potência, fazendo com que este seja influenciado pelo lado da demanda, o que confere aos consumidores a denominação de prosumidores (do inglês *prosumers*), ou seja, os consumidores também são produtores de energia.

Segundo pesquisas do Centro de Gestão de Estudos Estratégicos (CGEE, 2012), a implementação de redes elétricas inteligentes trará grandes mudanças no sistema elétrico que afetarão principalmente os consumidores e o sistema de distribuição. Neste cenário, as microrredes terão um papel fundamental, visto que serão os principais blocos de implementação das redes elétricas inteligentes.

Assim, o gerenciamento do sistema elétrico se dará cada vez mais pelo lado da demanda, e sempre será importante encontrar o despacho ótimo, beneficiando todos os envolvidos, desde os geradores até os consumidores.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é estudar o despacho ótimo de *smart-hoses*, considerando gerenciamento pelo lado da demanda e, na sequência, estudar também a sua viabilidade econômica. Para isso serão levados em consideração a geração distribuída a partir de fontes eólica e solar, armazenamento distribuído, veículos elétricos e cargas dos tipos residencial. Associado a este levantamento bibliográfico, será utilizado um software capaz de analisar a *smart-house* e seus componentes, de forma a encontrar um despacho ótimo, beneficiando os usuários do sistema elétrico de potência como um todo, visando sempre a economia financeira e energética e a busca por um método mais eficiente de gerenciar o sistema elétrico.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Levantamento bibliográfico dos componentes da *smart-house* levados em consideração neste estudo;
- Estudo da viabilidade técnica da migro-geração de energia eólica e fotovoltaica em Curitiba;
- Modelar cada componente e implementá-los em um software de simulação;
- Realizar simulações e analisar seus resultados;
- Ajustar o software de forma a torná-lo mais próximo possível da realidade;
- Estudar a viabilidade econômica dos diversos componentes da *smart-house* e diversas combinações destes.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido em seis capítulos, sendo o primeiro uma contextualização sobre o assunto aqui tratado, justificativa e os objetivos a serem alcançados.

O segundo capítulo trás o embasamento teórico, trazendo uma explicação técnica dos assuntos abordados e uma revisão literária.

O terceiro capítulo apresenta as equações e metodologias de cálculo dos componentes do sistema em estudo, bem como os parâmetros de entrada do programa base.

O quarto capítulo apresenta os resultados das simulações em dez diferentes cenários e o estudo de viabilidade econômica dos equipamentos implementados na residência.

No quinto capítulo estão expostas as conclusões e as considerações finais do trabalho.

Por fim, o sexto capítulo apresenta o referencial bibliográfico que trouxe o embasamento teórico deste trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

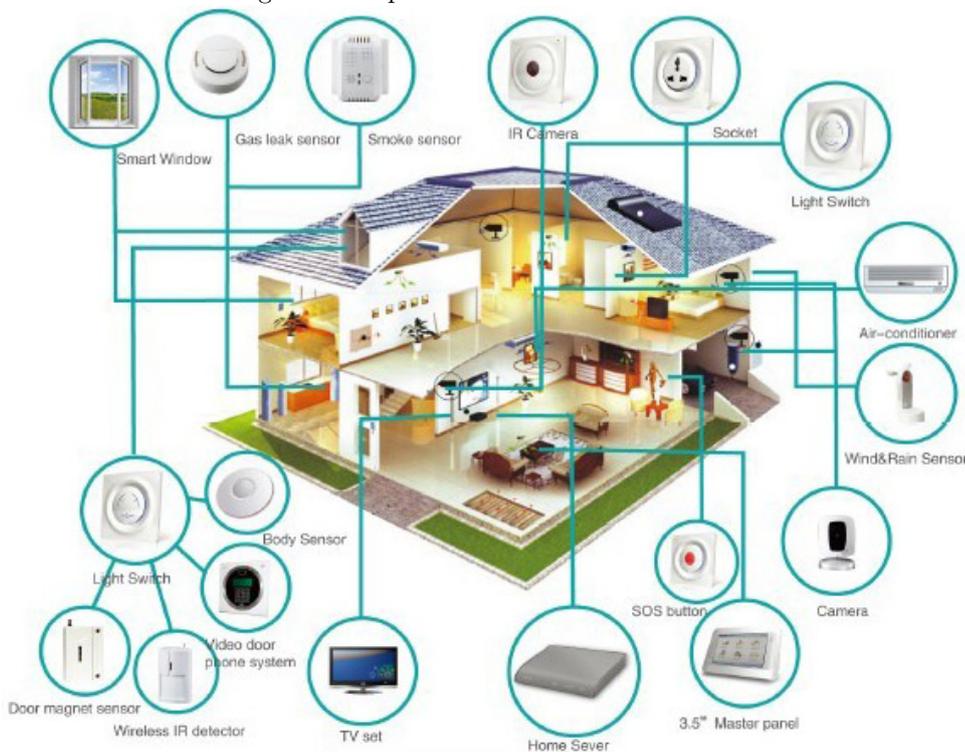
2.1 SMART-HOUSE

De acordo com BOUKOUTAYA e YAHIAOUI, uma *smart-house*, ou *smart-home*, se refere à gestão centralizada dos equipamento elétricos de uma casa, também conhecido como domótica, do francês *domotique*, ‘proveniente da junção Domus “casa” com Imotique “automático”, que se refere a automatizar e integrar equipamentos de um espaço, simplificando o cotidiano das pessoas que o frequentam e utilizando a energia elétrica de forma mais eficiente.

As *smart-houses* são basicamente residências cujos equipamentos estejam integrados, podendo ser controlados através de um *smart-phone*, computador ou até mesmo com inteligência artificial, de forma a tornar o uso dos equipamentos mais eficiente e prático.

A Figura 2 apresenta um exemplo de uma *smart-house*, com diversos equipamentos automatizados e integrados.

Figura 2: Esquemático de uma *smart-house*.



Fonte: SMART HOME ENERGY (2012).

De acordo com o site SMART HOME ENERGY (2012), uma *smart-house* usa tecnologias de automação para prover os proprietários e usuários da casa com um *feedback* inteligente monitorando diversos aspectos da casa. Por exemplo, a geladeira pode ser capaz de apresentar uma lista com seu conteúdo, sugerir receitas e alternativas mais saudáveis e até mesmo comprar os itens que estão acabando. As possibilidades de automação inteligente em uma casa são muitas, desde geladeiras inteligentes até cortinas automáticas.

2.2 SMART-GRID

De acordo com o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (2012), *smart-grid*, ou rede elétrica inteligente é uma rede elétrica que contenha sistemas e tecnologias avançados de monitoramento do fluxo de potência em tempo real e informações bidirecionais, interligando todo o sistema, desde a geração, até o consumidor final.

Isso significa que o fluxo de potência será gerenciado de forma mais eficiente, trazendo economia tanto ao consumidor, quando ao agente distribuidor, pois este terá mais informações sobre a demanda de energia em cada região, podendo assim fazer ampliações onde estas são realmente necessárias e também tornando-as menos necessárias, pois o consumo será distribuído de maneira mais inteligente ao longo do dia.

2.3 MICROGRID

De acordo com Lasseter (2001) uma *microgrid*, ou microrrede é um conjunto de fontes microgeradoras, sistemas de armazenamentos e cargas que se apresentam à rede elétrica como um único agente que responde a sinais de controle centrais.

Do ponto de vista do consumidor, a *microgrid* se apresenta como um sistema autônomo funcionando de forma ótima para atender às necessidades do consumidor, já do ponto de vista da rede elétrica, a *microgrid* se apresenta como um consumidor ideal.

2.4 CARGAS CONTROLÁVEIS E CARGAS NÃO CONTROLÁVEIS

As cargas, ou os aparelhos que consomem energia em uma residência, serão divididas em duas categorias, as controláveis ou elásticas e as não controláveis, ou inelásticas.

As cargas não controláveis são aquelas cujos horários de funcionamento não podem ser escolhidos, como por exemplo a geladeira. Já as cargas controláveis, são aquelas cujos horários de funcionamento podem ser escolhidos, como por exemplo uma máquina de lavar roupa. Ao contrário da geladeira, a máquina de lavar roupa pode ser utilizada em qualquer horário do dia, dependendo apenas da conveniência do usuário em uma residência comum. Porém, em uma *smart-house*, uma carga controlável será alocada de forma inteligente, ativando-a fora dos horários de ponta ou quando existe energia sendo gerada.

2.5 RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS

2.5.1 Sistemas de Armazenamento de Energia

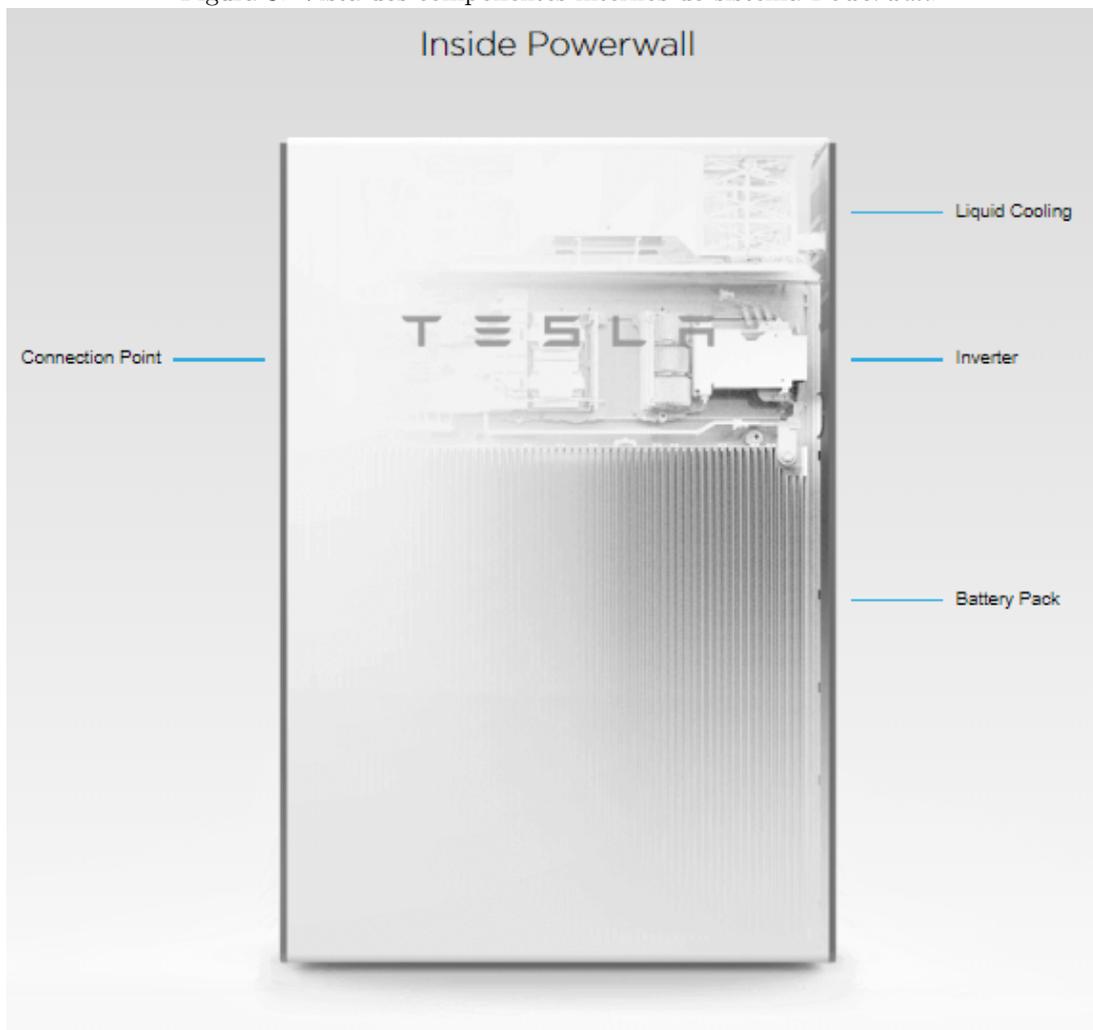
De acordo com Silva e Bortoni (2016) os sistemas de armazenamento de energia são constituídos por elementos capazes de reter e fornecer energia elétrica, sendo os principais os sistemas de ar comprimido, supercapacitores, bombeamento hidráulico, volantes de inércia e baterias.

De acordo com Pinho e Galdino (2014), as baterias eletroquímicas de chumbo-ácido são as mais utilizadas para aplicação em geração distribuída devido ao seu custo reduzido em relação às demais tecnologias.

A Tesla desenvolveu um sistema de armazenamento, pensado especificamente para *smart-houses* e *microgrids* que operam isoladas ou não, com ou sem sistema de micro-geração distribuída. o Sistema se chama *Powerwall*.

O sistema *Powerwall* pode ser instalado no piso ou dentro da parede, não ocupando espaço da casa.

Figura 3: Vista dos componentes internos do sistema *Powerwall*.



Fonte: TESLA (2019).

Como foi projetado para *smart-houses*, o sistema pode ser controlado através de um aplicativo para *smart-phones*, podendo ser integrado aos veículos elétricos da residência, para que um carregue o outro de acordo com a necessidade do usuário, da mesma forma, pode ser integrado à uma rede de geração distribuída, utilizando o excedente da produção para se carregar.

2.5.2 Geração Distribuída

No sistema elétrico de potência tradicional, a geração de energia se dá de forma centralizada, ou seja, é de grande porte e distante dos centros de consumo. Já com a geração distribuída, os pontos de geração estão distribuídos em diversos pontos do sistema elétrico, sendo normalmente de pequeno porte e próximo dos locais de consumo, sendo que, em muitos casos, estão diretamente integradas a uma unidade consumidora, seja residencial, comercial ou industrial.

O Módulo 1 dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST) da ANEEL (2016) define a geração distribuída como centrais geradoras de qualquer potência cujas instalações estejam diretamente conectadas ao sistema de distribuição ou indiretamente através de instalações consumidoras que podem operar em paralelo ou isoladas, podendo ou não ser despachadas pelo Operador Nacional do Sistema (ONS).

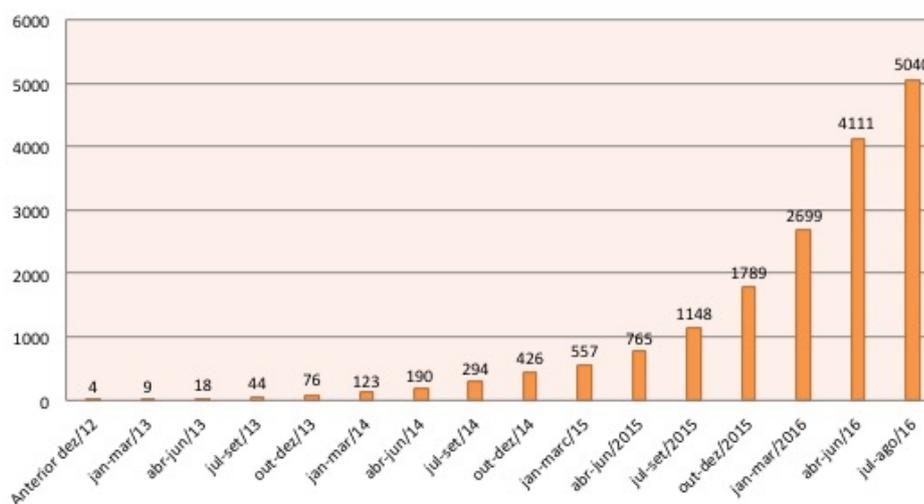
De acordo com o *site* Super Nova Engenharia, os principais benefícios da geração distribuída são:

- Redução nas perdas de transmissão e distribuição;
- Diminuição da necessidade de expansão dos sistemas de distribuição e transmissão;
- Redução dos impactos ambientais;
- Melhoras nos níveis de tensão nos horários de ponta, se aliado a *smart-houses*;
- Diversificação da matriz energética nacional;
- Independência dos consumidores em relação às concessionárias;
- Economia financeira ao consumidor.

É importante salientar que a geração distribuída trás uma disrupção do modelo vigente do sistema elétrico, trazendo uma grande descentralização da rede, dando autonomia ao consumidor.

De acordo com a ANEEL, em 2016, o Brasil ultrapassou cinco mil conexões de unidades de geração distribuída. O gráfico da Figura 4 apresenta o crescimento numérico quase exponencial de unidades consumidoras com geração distribuída.

Figura 4: Quantidade de conexões de geração distribuída no Brasil.

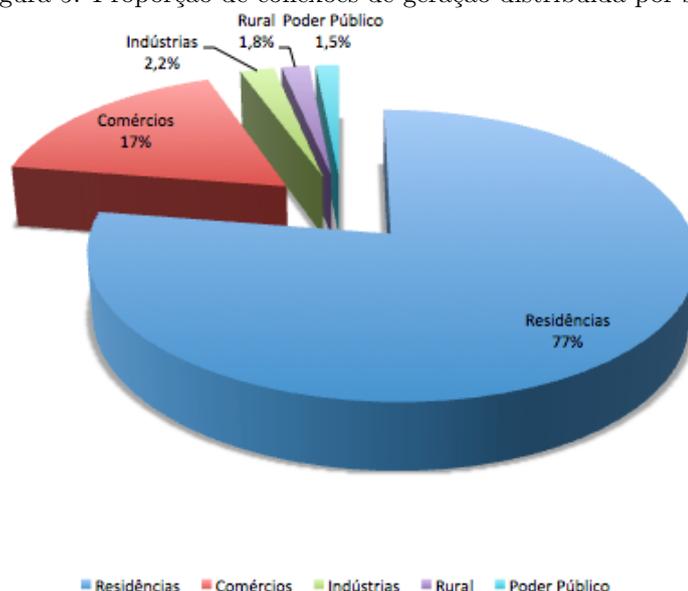


Fonte: SUPER NOVA ENGENHARIA (2016).

A fonte mais adotada pelos usuários é a energia solar fotovoltaica, com 4955 conexões seguida da eólica com 39 instalações (Super Nova Engenharia, 2016).

A Figura 5 apresenta o percentual de usuários com geração distribuída por setor. Nota-se que 77,5% do total são unidades residenciais, seguidos por unidades comerciais, com 17%.

Figura 5: Proporção de conexões de geração distribuída por setor.



Fonte: SUPER NOVA ENGENHARIA (2017).

2.5.2.1 Créditos de Energia

A Resolução Normativa 482 de 2012 da ANEEL, estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, criando assim o sistema de compensação de energia elétrica. A RN482/12 é conhecida popularmente como “Lei de Incentivo a Energia Solar” de acordo com o Portal Solar, e permite que o usuário “troque” energia com a rede, rendendo-lhe créditos, caso a geração seja maior do que o seu consumo, que possuem validade de 60 meses.

A RN482/12 também prevê a possibilidade de compensação de créditos por posto horário, ou seja, grandes consumidores, ou unidades residenciais que se enquadram na tarifação branca, que pagam diferentes valores de energia de acordo com os horários de pico estabelecidos pela concessionária, terão seus créditos com o valor do horário em que foram injetados na rede. Isto significa que os créditos pela energia injetada na rede da concessionário em horários de ponta, valem três vezes mais do que os créditos referentes a energia injetada fora dos horários de ponta.

Os créditos referentes a energia e injetada que não forem compensados no local que produziu, poderão ser utilizados para compensar o consumo de outros locais, desde que cadastrados para esse fim e atendidos pela mesma distribuidora de energia, cujo titular seja o mesmo, tanto para pessoas físicas como para empresas.

O consumidor deverá definir a ordem de prioridade das unidades consumidoras participantes do sistema de compensação de energia elétrica. Sendo que a primeira é onde está instalado o sistema de geração.

Outra Resolução Normativa, a RN 687/15 estabelece o autoconsumo remoto, o que torna possível que locais que não possuam área suficiente, ou que estejam em regiões com baixo potencial energético (seja solar, eólico ou hidráulico), possam produzir sua própria energia. Isso permite que a usina esteja fisicamente distante do local de consumo, desde que ambas estejam na área sob concessão da mesma distribuidora. Ou seja, o autoconsumo remoto permite que uma exista uma unidade de geração distribuída sem cargas, que gere créditos para uma unidade consumidora em outro local.

2.6 VEÍCULOS ELÉTRICOS

Os veículos elétricos podem ser divididos em três categorias, os veículos com baterias, veículos híbridos e veículos híbridos do tipo *plug-in*.

Os veículos elétricos a bateria são movidos unicamente por motores elétricos cuja energia provém de baterias instaladas no veículo. Já os veículos híbridos, combinam motores elétricos com motores a combustão interna. (CASTRO, 2015; RASKIN; SHAH, 2006).

2.7 DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

De acordo com Ozawa (2017), a distribuição de Weibull é uma expressão desenvolvida por Ernst Hjalmar Waloddi Weibull (1887-1979) que apresentou o modelo de planejamento estatístico sobre fadiga de materiais, permitindo a representação gráfica simplificada das falhas aleatórias e devidas ao desgaste.

A distribuição de Weibull é definida como uma função de distribuição de probabilidade contínua e unimodal, que pode ser utilizada com dois ou três parâmetros, podendo ser aplicada na representação da distribuição da velocidade do vento de uma região, como afirma Barbosa (2016).

Segundo Justus et. al. (1978), para uma determinada velocidade de vento v , a distribuição de Weibull pode ser expressa pela seguinte função de densidade de probabilidade:

$$f(v) = \frac{dF(v)}{dv} = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (1)$$

Onde:

- $f(v)$ - função densidade de probabilidade;
- c - fator de escala da distribuição de Weibull;
- k - fator de forma da distribuição de Weibull;
- v - velocidade do vento.

A função de probabilidade acumulada é dada por:

$$F(v) = \int_0^v f(v)dv = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2)$$

De acordo com Barbosa (2016), os parâmetros c e k controlam o comportamento da função em relação à variável aplicada, sendo o primeiro mais relacionado à velocidade média e o último ao desvio padrão.

A principal dificuldade na utilização da distribuição de Weibull na representação do regime de ventos, é a estimativa de seus parâmetros, de maneira que se alcance um ajuste com o menor erro possível. Para tal, pode-se utilizar diversos métodos numéricos, tais como:

- Método Gráfico ou Método dos Mínimos Quadrados;
- Método dos Momentos;
- Método Empírico ou Método do Desvio Padrão;
- Método da Densidade de Potência ou Método do Fator de Energia Padrão;
- Método da Máxima Verossimilhança;
- Método da Máxima Verossimilhança Modificado;
- Método da Energia Equivalente.

Optou-se por escolher entre quatro destes métodos, que serão melhor explicados a seguir.

2.7.1 Método Gráfico

O método gráfico, também conhecido como método dos mínimos quadrados, é implementado através da plotagem de um gráfico no qual a sua distribuição cumulativa de Weibull se aproxime de uma reta na qual os dados da série temporal são classificados.

De acordo com Johnson e Kotz (1970), a equação da função densidade de probabilidade, após ser transformada, pode ser expressa da seguinte forma:

$$\ln\{-\ln[1 - F(v)]\} = k.\ln(v) - k.\ln(c) \quad (3)$$

Que pode ser ajustada com o método dos mínimos quadrados:

$$y = a.x + b \quad (4)$$

Sendo:

$$y = \ln\{-\ln[1 - F(v)]\} \quad (5)$$

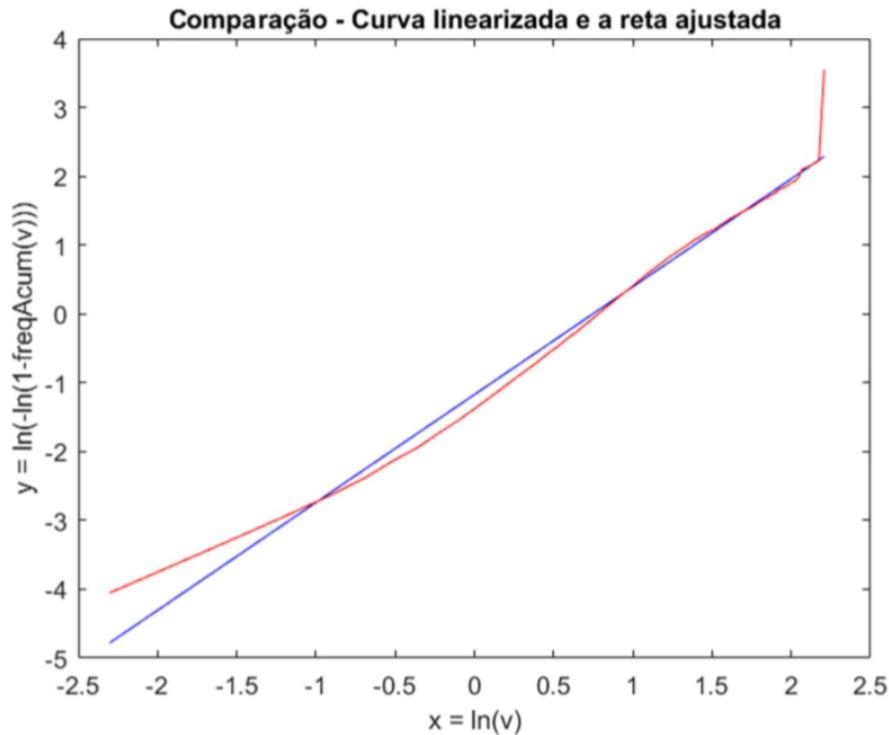
$$x = \ln(v) \quad (6)$$

$$a = k \quad (7)$$

$$b = k.\ln(c) \quad (8)$$

A Figura 6 apresenta uma comparação entre a curva linearizada e a reta ajustada.

Figura 6: Curva linearizada e reta ajustada para dados da cidade de Curitiba.



Fonte: OZAWA (2017).

O parâmetro de forma (k) é definido pelo valor do coeficiente angular da reta, e o fator de escala (c) pela expressão:

$$c = e^{-\left(\frac{b}{k}\right)} \quad (9)$$

A distribuição acumulada pode ser estimada utilizando a seguinte equação, obtida de Bernard e Bos-levenbach (1953).

$$F(v) = \frac{i - 0,3}{N + 0,4} \quad (10)$$

Onde:

- i - Número de observações da velocidade do vento;
- N - Total de observações.

2.7.2 Método dos Momentos

O método dos momentos é o mais difundido no campo da estimativa dos parâmetros de Weibull, baseando-se na iteração numérica do desvio padrão e da média das velocidades do vento, como explicam Kumar e Gaddada (2015), de acordo com as seguintes equações:

$$v_m = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N v_i \quad (11)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (v_i - v_m)^2} \quad (12)$$

Onde:

- v_m - Velocidade média do vento;
- i - Número da observação da velocidade do vento;
- σ - Desvio padrão das velocidades do vento.

Os parâmetros de forma (k) e escala (c) de Weibull podem ser obtidos a partir das seguintes equações:

$$k = \left(\frac{0,9874}{\frac{\sigma}{v_m}} \right)^2 \quad (13)$$

$$c = \frac{v_m}{\Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right)} \quad (14)$$

A velocidade média do vento pode ser expressa em função de c e k derivados da função:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} y^{x-1} \cdot e^{-y} dy \quad (15)$$

Onde:

$$y = \left(\frac{v}{c} \right)^k \quad (16)$$

$$\frac{v}{c} = y^{x-1} \quad (17)$$

$$x = 1 + \frac{1}{k} \quad (18)$$

Com isso, após algumas manipulações matemáticas podemos chegar a seguinte equação para a velocidade média:

$$v_m = c + \Gamma \cdot \left(1 + \frac{1}{k}\right) = 0,8525 + 0,0135 \cdot k + e^{-[2+3(k-1)]} \quad (19)$$

2.7.3 Método da Densidade de Potência

Segundo Akdag e Dinler (2009), o método da densidade de potência, ou método do fator de energia padrão, emprega a relação entre a velocidade média a cubo e a velocidade cúbica do vento no cálculo do fator de energia padrão ($Ep f$), de acordo com a seguinte equação:

$$Ep f = \frac{\overline{v^3}}{v_m^3} = \frac{1}{v_m^3} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{v_i^3}{N} = \frac{\Gamma \cdot \left(1 + \frac{3}{k}\right)}{\Gamma^3 \cdot \left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (20)$$

De onde pode-se observar que o valor da velocidade cúbica é:

$$\overline{v^3} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^n v_i^3 \quad (21)$$

Uma vez encontrado o valor de $Ep f$, os fatores de forma e escala de Weibull podem ser estimados a partir das seguintes equações:

$$k = 1 + \frac{3,69}{Ep f^2} \quad (22)$$

$$c = \frac{v_m}{\Gamma \cdot \left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (23)$$

2.7.4 Método da Máxima Verossimilhança

De acordo com Harter e Moore (1965a, 1965b) e Cohen (1965), o método da máxima verossimilhança é um procedimento regularmente usado, pois possui propriedades desejáveis. Segundo Kidmo et al. (2015), este método apresenta uma solução por meio de iterações. Os fatores de forma e escala são estimados pelas expressões a seguir:

$$k = \left[\frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \cdot \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^n v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(v_i)}{n} \right]^{-1} \quad (24)$$

$$c = \left(N^{-1} \cdot \sum_{i=1}^n v_i^k \right)^{\frac{1}{k}} \quad (25)$$

Onde n representa o número de valores não nulos.

2.8 ANÁLISE ECONÔMICA

Os principais indicadores para a viabilidade econômica de projetos e empreendimentos são:

- *Payback* simples;
- Valor presente líquido (VPL);
- Taxa interna de retorno (TIR).

Estes e outros indicadores serão explicitados a seguir.

2.8.1 Fluxo de Caixa

O fluxo de caixa é um instrumento de gestão financeira. Seu objetivo é projetar as receitas e despesas em períodos futuros. É usado principalmente para criar uma estimativa de saldo em caixa durante ou após um período de tempo.

2.8.2 Taxa Mínima de Atratividade

A taxa mínima de atratividade é a taxa de juros mínima que um investidor se propõe a ganhar quando faz um investimento ou o máximo que se propõe a pagar de juros quando faz um financiamento.

Esta taxa é formada por três componentes:

- Custo de oportunidade: é a remuneração que pode ser obtida em outras opções de investimento;
- Risco do negócio: o ganho com o investimento tem que remunerar o risco de uma nova ação. Quanto maior o risco, maior a remuneração;
- Liquidez: Capacidade ou velocidade em que se pode sair de uma posição no mercado para assumir outra.

É inevitavelmente uma variável pessoal, pois a propensão ao risco varia entre cada investidor e também pode variar com o tempo, por isso, não existe forma de calculá-la.

2.8.3 Payback Simples

O *payback* se refere ao tempo que um empreendimento leva para pagar seu investimento inicial.

O *payback* simples é o método mais simples de se analisar a viabilidade de um empreendimento, sendo definido como a quantidade de períodos (sejam anos, meses, semanas, etc.) necessários para recuperar um investimento inicial.

2.8.4 Valor Presente Líquido

O valor presente líquido é o método mais comumente utilizado em análise econômica, tendo por objetivo trazer para o período inicial todo o fluxo de caixa do projeto ao longo de toda sua vida útil, levando em consideração as taxas de juro, receitas e despesas de cada período.

O valor presente líquido pode ser calculado de acordo com a equação 26. Se o valor for negativo, considera-se que o empreendimento é economicamente inviável. Se o valor for maior ou igual a zero considera-se que o empreendimento é economicamente viável e quanto maior o valor, mais atrativo é o projeto.

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_n}{(1+i)^t} - I_0 \quad (26)$$

Onde:

- VPL - Valor presente líquido;
- FC_n - Fluxo de caixa no período n ;
- n - Número de períodos;
- I_0 - Investimento inicial;
- i - Taxa de juros de desconto.

2.8.5 Taxa Interna de Retorno

A taxa interna de retorno representa a taxa para a qual o VPL do projeto se iguala a zero, ou seja, durante toda a vida útil do projeto, o lucro líquido que este geraria seria suficiente apenas para pagar o investimento. Para calcular esta taxa, é aplicada a mesma equação do valor presente líquido, porém agora a variável VPL é nula e a incógnita passa a ser a variável i , como mostrado na equação a seguir:

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{FC_n}{(1+i)^t} - I_0 \quad (27)$$

3 METODOLOGIA

3.1 MODELAGEM MATEMÁTICA DAS MICROGRIDS

As “*smart-houses*” (casas inteligentes) são residências cujos equipamentos elétricos são controlados automaticamente, de forma a auxiliar no controle do fluxo de potência.

Estas casas possuem cargas controláveis e não controláveis, veículo elétrico, geração distribuída e sistema de armazenamento. Cargas controláveis, são aquelas que se pode escolher o horário de funcionamento (chuveiro, lavadora e secadora de roupas, etc.), estas têm seu uso otimizado, de forma a melhorar o controle do fluxo de potência. Cargas não controláveis são aquelas que não se pode escolher os horários de funcionamento ou que operem de forma contínua ou cíclica (iluminação, geladeira, etc.), sendo estas apenas parâmetros com valores conhecidos no problema.

A *smart-house* e os componentes ligados à ela, foram modelados através de equações e restrições matemáticas e então englobados em um problema de otimização com objetivo de:

- Minimizar os gastos com energia dos consumidores;
- Minimizar os ciclos de carga e descarga dos veículos elétricos.

Dentro da *smart-house*, o fluxo de potência é desprezado, pois, por definição, pode-se considerar que as unidades consumidores estejam muito próximas.

Resumidamente, um problema de otimização se trata da maximização ou minimização de uma função objetivo sujeito a um conjunto de restrições.

3.1.1 Função Objetivo e Equações Gerais

De acordo com Coelho (2016), a função objetivo global (equação 28) é multi-objetiva, ou seja, possui um objetivo principal, com maior peso (nesse caso, reduzir os gastos com energia elétrica) e um objetivo “secundário”, com peso menor (nesse caso, reduzir os ciclos de carga e descarga do veículo elétrico da residência).

$$\text{Min} \lambda^{custos} \frac{F_{obj}^{custos}}{F_{obj}^{custos.otima}} + \lambda^{ciclos} \frac{F_{obj}^{ciclos}}{F_{obj}^{ciclos.otima}} \quad (28)$$

Onde:

- F_{obj}^{custos} - função objetivo relativa aos custos com energia elétrica;
- F_{obj}^{ciclos} - função objetivo relativa aos ciclos de carga e descarga do veículo elétrico;
- λ^{custos} - peso da função relativa aos custos;
- λ^{ciclos} - peso da função relativa aos ciclos;
- $F_{obj}^{custos.otima}$ - valor ótimo da função objetivo relativa aos custos;
- $F_{obj}^{ciclos.otima}$ - valor ótimo da função objetivo relativa aos ciclos.

O cálculo da função objetivo de custos (Equação 29), representa a soma dos custos totais de cada período, possibilitando a modelagem de uma tarifa sazonal.

$$F_{obj}^{custos} = \sum_{t=1}^{Nper} [(E_t^{result} + Aux_t^{result}) \cdot Precio_t^{compra} - Aux_t^{result} \cdot Precio_t^{venda}] \quad (29)$$

Onde:

- $Nper$ - Número de períodos;

- $Preco_t^{compra}$ - Preço de compra de energia da rede no período t ;
- $Preco_t^{venda}$ - Preço de venda de energia à rede no período t ;
- E_t^{result} - Energia resultante da casa no período t ;
- Aux_t^{result} - Variável que indica se a energia resultante está sendo demandada ou injetada na rede.

Se $E_t^{result} < 0$, significa que a energia está sendo injetada (vendida) na rede, caso contrário, significa energia demandada (comprada) da rede.

A variável auxiliar Aux_t^{result} , que indica o sinal da energia resultante, foi necessária para manter a linearidade do problema de otimização referente a função objetivo de custos. Seu valor é calculado através da equação 30, através da qual, nota-se que, quando a energia está sendo vendida ($E_t^{result} < 0$) temos que $Aux_t^{result} = -E_t^{result}$ e, quando a energia está sendo comprada ($E_t^{result} \geq 0$), temos que $Aux_t^{result} = 0$.

$$Aux_t^{result} = \frac{|E_t^{result}| - E_t^{result}}{2} \quad (30)$$

Assim, quando a energia estiver sendo vendida, a equação 28 terá seu primeiro termo forçado à zero, quando a energia estiver sendo comprada, o segundo termo da equação 28 será forçado a zero.

Para se obter o módulo de uma variável em um problema de otimização, é necessário o uso de uma outra variável, que representa o valor deste módulo. Esta nova variável, é representada por duas restrições ao problema de otimização, representadas nas equações 31 e 32.

$$|E_t^{result}| \geq E_t^{result} \quad (31)$$

$$|E_t^{result}| \geq -E_t^{result} \quad (32)$$

A equação 33 representa a função objetivo de ciclos.

$$F_{obj}^{ciclos} = \sum_{t=1}^{Nper} (Y_t^{ve.carga.ON} + Z_t^{ve.desc.ON}) \quad (33)$$

Onde:

- $Y_t^{ve.carga.ON}$ - Indicador de início de ciclo de carregamento durante o período t ;
- $Z_t^{ve.desc.ON}$ - Indicador de início de ciclo de descarregamento durante o período t .

Para a modelagem apropriada do veículo elétrico, é necessário saber em qual período t este início um ciclo de carga e de descarga. Para isso, fez-se uso das variáveis Y_t^{ON} e Z_t^{ON} , que assumem valor unitário no período em que foi iniciado um ciclo de carga ou de descarga respectivamente.

Dessa forma, a energia resultante da casa no período t é dada pela equação 34.

$$E_t^{result} = C_t^{total} - G_t + A_t^{result} + VE_t^{result} \quad (34)$$

Onde:

- C_t^{total} - Consumo total da casa no período t ;
- G_t - Energia gerada pela casa no período t . Tem seu valor calculado previamente através da previsão de geração solar e eólica na casa;
- A_t^{result} - Energia resultante do sistema de armazenamento no período t ;
- VE_t^{result} - Energia resultante do veículo elétrico no período t .

O sinal dos termos das energias resultantes do veículo elétrico e do sistema de armazenamento indicam se estes estão demandando ou injetando energia na rede da casa. Se for negativo estão injetando energia, se for positivo, estão demandando energia.

O consumo total da casa é dado pela equação 35.

$$C_t^{total} = C_t^{ncont} + \sum_{n=1}^{N^{C^{cont}}} \left(C_{t,n}^{cont} \cdot \frac{W_{t,n}^{cont}}{60} \right) \quad (35)$$

Onde:

- $N^{C^{cont}}$ - Número de cargas controláveis da casa;
- C_t^{ncont} - Consumo das cargas não controláveis no período t ;
- $C_{t,n}^{cont}$ - Consumo da carga controlável n no período t ;
- $W_{t,n}^{cont}$ - Tempo de operação da carga controlável n no período t em minutos.

3.1.2 Cargas Controláveis

O usuário determinará quais são os equipamentos da sua casa serão cargas controláveis, ou seja, quais equipamentos têm seu uso passível de ser alocado durante o dia. Para essas cargas, será solicitado que o usuário diga quantos ciclos e o tempo de operação de cada ciclo em minutos. Este tempo será convertido para horas e será denominado Mínimo Tempo de Operação (MTO) real da carga controlável (MTO_n^{real}).

Além do MTO, será necessário contar quantos períodos de operação, através de uma variável auxiliar (MTO_n^{aux}). Assim, quando o MTO real não for um valor inteiro, esta variável auxiliar será calculado arredondando-se o valor do MTO real para o valor inteiro imediatamente superior.

As equações a seguir, obtidas de Quiñenez (2015) e Santos (2016), necessitam do MTO_n^{aux} , pois elas restringem a quantidade de períodos nos quais a carga irá trabalhar.

$$(MTO_n^{aux} - 1) \cdot \left(Y_{n,t}^{cont.ON} + \sum_{l=1}^{MTO_n^{aux} - 1} Z_{n,t+l}^{cont.OFF} \right) \leq MTO_n^{aux} - 1 \quad (36)$$

$$Y_{n,t+MTO_n^{aux}}^{cont.ON} - X_{n,t+MTO_n^{aux}}^{cont} \geq Y_{n,t}^{cont.ON} - X_{n,t}^{cont} - (1 - Y_{n,t}^{cont.ON}) \quad (37)$$

Onde:

- $Y_{n,t}^{cont.ON}$ - Indica se a carga controlável n iniciou ou não um ciclo de operação no período t ;
- $Z_{n,t}^{cont.OFF}$ - Indica se a carga controlável n termina ou não um ciclo de operação no período t ;
- $X_{n,t}^{cont}$ - Indica se a carga controlável n está operando ou não.

Dessa forma, quando inicia-se um ciclo de operação ($Y_{n,t}^{cont.ON} = 1$), a equação 36 força a variável referente ao término do ciclo a ficar com valor nulo até que se complete este ciclo.

A equação 36 delimita o intervalo de períodos entre o início e o fim de um ciclo de operação.

A equação 37 contabiliza o número de ciclos consecutivos de operação de uma carga. Esta equação força $Y_{n,t}^{cont.ON} = X_{n,t}^{cont}$ nos períodos em que se inicia um ciclo de operação e no período seguinte ao término de um ciclo. Dessa forma, se a carga continuar a operar no período seguinte ao término do ciclo, a equação força $Y_{n,t}^{cont.ON} = 1$, indicando o início de mais um ciclo de operação.

Quiñenez (2015), descreve a equação 38, que serve para identificar quando a carga entra em operação e quando ela finaliza seu ciclo de operação.

$$X_{n,t}^{cont} - X_{n,t-1}^{cont} = Y_{n,t}^{cont.ON} - Z_{n,t}^{cont.OFF} \quad (38)$$

De acordo com Santos (2016), a equação 39 limita o tempo total de operação, em minutos, da carga no horizonte analisado, apresentando-o como a soma da variável que armazena o tempo de operação em cada período em todos os períodos.

$$\sum_{t=1}^{24} W_{t,n}^{cont} = 60.Nciclos_n^{cont}.MTO_n^{real} \quad (39)$$

A equação 40 limita o tempo por período, ou seja, quando a carga está em operação, o tempo máximo de operação em um período é de 60 minutos, que é a duração do período.

$$W_{t,n}^{cont} \leq 60.X_{n,t}^{cont} \quad (40)$$

A equação 41 força que a carga cumpra o tempo completo do seu ciclo de operação, uma vez que este seja iniciado.

$$\sum_{l=0}^{MTO_n^{aux}-1} W_{t,n}^{cont} \geq 60.MTO_n^{real}.Y_{n,t}^{cont.ON} \quad (41)$$

3.1.3 Sistemas de Armazenamento

De acordo com Wu, Wang e Bie (2012), a energia resultante do sistema de armazenamento pode ser calculada da seguinte forma:

$$A_t^{result} = \frac{A_t^{carga}}{\eta^{Acarga}} - \eta^{Adesc}.A_t^{desc} \quad (42)$$

Onde:

- A_t^{carga} - Energia carregada no período t ;
- η^{Acarga} - Eficiência de carga do sistema de armazenamento;
- η^{Adesc} - Eficiência de descarga do sistema de armazenamento;
- A_t^{desc} - Energia descarregada do sistema de armazenamento no período t .

A equação 42 possui tanto termos referentes à carga quanto à descarga, porém um deles sempre será nulo, pois o sistema não pode se carregar e descarregar ao mesmo tempo. Para representar isto no problema de otimização, é necessário criar uma restrição:

$$X_t^{carga} + X_t^{desc} \leq 1 \quad (43)$$

Onde:

- X_t^{carga} - Assume valor unitário se o sistema está carregando no período t e nulo quando não está carregando;
- X_t^{desc} - Assume valor unitário se o sistema está descarregando e nulo quando não está.

De acordo com Chiu, Sun e Poor (2017), a energia total armazenada no sistema de armazenamento ao final do período t é dado pela seguinte equação:

$$A_t^{total} = A_{t-1}^{total} + A_t^{carga} - A_t^{desc} \quad (44)$$

Todo sistema de armazenamento possui limites máximo e mínimo de nível de energia armazenada e, tais limites, definem quando o sistema estará demandando ou injetando energia à rede da casa. De acordo com Wu, Wang e Bie (2012), estes limites são calculados pela equação 45 e os limites de quanta energia pode ser carregada ou descarregada são calculados pelas equações 46 e 47.

$$A^{\%min} \cdot A^{cap.max} \leq A_t^{total} \leq A^{\%max} \cdot A^{cap.max} \quad (45)$$

$$0 \leq A_t^{carga} \leq A^{max.carga} \cdot X_t^{carga} \quad (46)$$

$$0 \leq A_t^{desc} \leq A^{max.desc} \cdot X_t^{desc} \quad (47)$$

Onde:

- $A^{max.carga}$ - Limite máximo de energia carregada no sistema de armazenamento em um período;
- $A^{max.desc}$ - Limite máximo de energia descarregada no sistema de armazenamento em um período;
- $A^{cap.max}$ - Capacidade máxima de armazenamento do sistema;
- $A^{\%min}$ - Nível mínimo de armazenamento do sistema;
- $A^{\%max}$ - Nível máximo de armazenamento do sistema.

3.1.4 Veículos Elétricos

De acordo com Coelho (2016), a energia armazenada em um veículo elétrico ao final do período t pode ser calculada da seguinte forma:

$$VE_t^{total} = (VE_{t-1}^{total} + VE_t^{carga} - VE_t^{desc}) \cdot X_t^{VE.ON} + VE_t^{cheg} \quad (48)$$

Onde:

- VE_t^{total} - Energia que está armazenada no veículo ao final do período t ;
- VE_t^{carga} - Energia carregada no veículo no período t ;
- VE_t^{desc} - Energia descarregada no veículo no período t ;
- $X_t^{VE.ON}$ - Indica se o veículo está ou não conectado à rede da casa no período t , assumindo valor unitário caso esteja e nulo caso não esteja;
- VE_t^{cheg} - Energia armazenada no veículo se ele é conectado à rede da casa no período t , caso não chegou no período t , o valor é nulo.

Esta equação apresenta três casos possíveis nos quais será calculada a energia armazenada no veículo em cada período t :

- Quando o veículo está conectado à rede da casa, soma-se a energia carregada ou descarrega à energia armazenada;
- Quando o veículo não está na casa, a energia total armazenada no veículo é igual a zero;
- Quando o veículo chega na casa $VE_t^{total} = E_t^{cheg}$.

A energia resultante no veículo elétrico é calculada de forma idêntica à energia resultante do sistema de armazenamento:

$$VE_t^{result} = \frac{VE_t^{carga}}{\eta^{VEcarga}} - \eta^{VEdesc} \cdot VE_t^{desc} \quad (49)$$

Da mesma forma que no sistema de armazenamento, a equação 49 possui os termos para carga e descarga, porém um deles deverá ser sempre nulo. Da mesma forma que para o sistema de armazenamento, isto é retratado na forma de uma restrição para o problema de otimização:

$$X_t^{VEcarga} + X_t^{VEdesc} \leq X_t^{VE.ON} \quad (50)$$

Ainda como no sistema de armazenamento, o veículo elétrico possui limites máximo e mínimo da energia armazenada (equação 51).

$$VE^{tot.min} \leq VE_t^{total} \leq VE^{tot.max} \quad (51)$$

Onde:

- $VE^{tot.min}$ - Energia mínima armazenada na bateria do veículo;
- $VE^{tot.max}$ - Energia máxima armazenada na bateria do veículo;

Os limites máximo e mínimo de energia armazenada no veículo são definidos respectivamente pelas equações 52 e 53, baseado em Coelho (2016) e Quiñenoz (2015)

$$VE^{tot.max} = VE^{%.max} . VE^{cap.max} . X_t^{VE.ON} \quad (52)$$

$$VE^{tot.min} = (VE^{%.min} . VE^{cap.max} + VE_t^{viagem}) . X_t^{VE.ON} \quad (53)$$

Onde:

- $VE^{%.min}$ - Nível mínimo de armazenamento do veículo;
- $VE^{%.max}$ - Nível máximo de armazenamento do veículo;
- $VE^{cap.max}$ - Capacidade máxima de armazenamento do veículo;
- VE_t^{viagem} - Energia armazenada no veículo necessária para um trajeto no período t .

Nota-se que o limite máximo será reduzido a zero quando o veículo não estiver conectado à casa ($X_t^{VE.ON} = 0$). Para definir o limite mínimo de carregamento, além do mínimo necessário para manter a vida útil da bateria, considera-se uma quantidade a mais de energia, suficiente para uma viagem com o veículo no período t . Assim, o usuário terá que definir um valor de VE_t^{viagem} para cada período, definindo se ele deseja ter uma reserva para viagens de emergência, ou apenas ter carga nos períodos em que ele sabe que utilizará o veículo. Tais limites estão definidos pelas equações 54 e 55

$$0 \leq VE_t^{carga} \leq VE^{max.carga} . X_t^{VE.carga} \quad (54)$$

$$0 \leq VE_t^{desc} \leq VE^{max.desc} . X_t^{VE.desc} \quad (55)$$

De acordo com Quiñenoz (2015), o número de ciclos de carga e descarga do veículo elétrico ao longo do horizonte de tempo analisado é calculado pelas equações 56 e 57.

$$X_t^{VE.carga} - X_{t-1}^{VE.carga} = Y_t^{VE.carga.ON} - Y_t^{VE.carga.OFF} \quad (56)$$

$$X_t^{VE.desc} - X_{t-1}^{VE.desc} = Z_t^{VE.desc.ON} - Z_t^{VE.desc.OFF} \quad (57)$$

Onde:

- $Y_t^{VE.carga.ON}$ - Valor unitário quando houve início de um ciclo de carga;
- $Y_t^{VE.carga.OFF}$ - Valor unitário quando houve fim de um ciclo de carga;
- $Z_t^{VE.desc.ON}$ - Valor unitário quando houve início de um ciclo de descarga;
- $Z_t^{VE.desc.OFF}$ - Valor unitário quando houve fim de um ciclo de descarga.

3.1.5 Microgeração Solar

A equação 58, obtida de Villalva e Gazoli (2015), será usada como modelo para o sistema de geração solar.

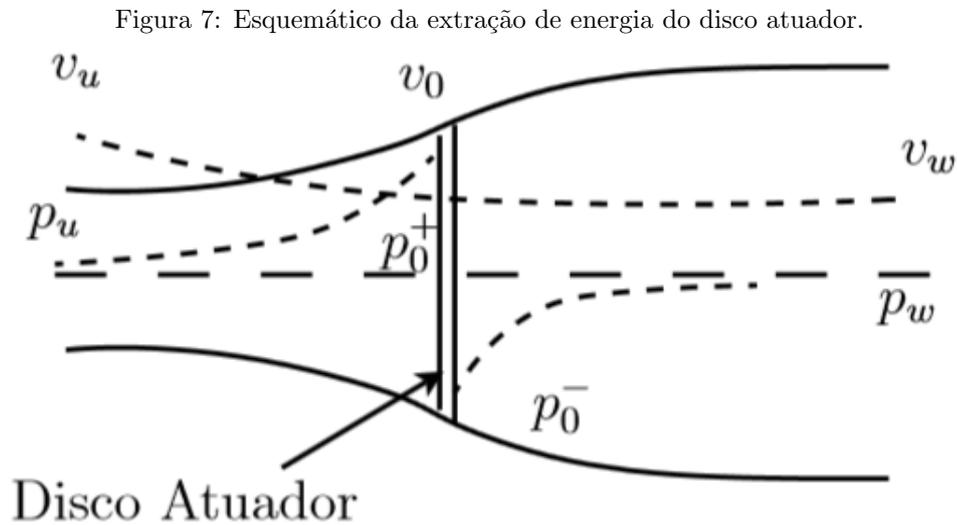
$$G_t^{sol} = \eta^{mod} \cdot N^{mod} \cdot A^{mod} \cdot \eta^{inv} \cdot I_t \cdot (1 - perdas) \quad (58)$$

Onde:

- G_t - Energia gerada pelo sistema fotovoltaico no período t ;
- η^{mod} - Rendimento do módulo fotovoltaico;
- N^{mod} - Número de módulos instalados;
- A^{mod} - Área ocupada pelo módulo;
- η^{inv} - Rendimento do inversor;
- I_t - Insolação no período t ;
- $perdas$ - Perdas elétricas do sistema fotovoltaico.

3.1.6 Microgeração Eólica

As equações para a modelagem do sistema de geração eólica foram obtidos de Dobbin (2014), considerando uma turbina com eixo horizontal. Este considera que o mecanismo de extração da energia do vento pode ser obtido analisando a passagem do ar por um disco atuador que cria um tubo de escoamento, mostrado na Figura 7.



Fonte: DOBBIN (2014).

Onde v são as velocidades e p são as pressões ao longo do tubo, sendo aquelas com subscrito u antes do disco, com subscrito w estão depois do disco e as com subscrito 0 estão no disco atuador.

Através do momento linear da massa de ar e da equação de Bernoulli, Dobbin (2014) conclui que a potência contida nos ventos é:

$$P_v = \frac{\rho \cdot A \cdot v^3}{2} \quad (59)$$

Onde:

- A - Área do tubo;
- v - velocidade do vento;
- ρ - Densidade do ar.

Dubbin (2014), define o coeficiente de potência da turbina como a razão entre a potência gerada pela turbina e a potência contida no vento:

$$C_p = \frac{P}{P_v} = 4a(1 - a)^2 \quad (60)$$

A partir das equações 59 e 60, pode-se chegar a:

$$G_t^{eolico} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_p \cdot v_t^3 \cdot f_t(v_t) \quad (61)$$

Onde:

- $A = \pi \cdot R^2$ - Área varrida pelo rotor;
- C_p - Coeficiente de potência da turbina;
- $f_t(v)$ - Função densidade de probabilidade de Weibull no período t .

Existe uma limite para o coeficiente de potência da turbina, este é em torno de 0,59, conhecido como *Limite de Betz*.

3.1.7 Modelo Matemático Para *Smart-Houses*

A partir das equações citadas acima, chega-se à um problema de otimização linear, cuja função objetivo e as restrições são detalhadas a seguir.

MINIMIZAR:

$$\lambda^{custos} \frac{F_{obj}^{custos}}{F_{obj}^{custos.otima}} + \lambda^{ciclos} \frac{F_{obj}^{ciclos}}{F_{obj}^{ciclos.otima}} \quad (62)$$

Sujeito a:

$$F_{obj}^{custos} = \sum_{t=1}^{Nper} [(E_t^{result} + Aux_t^{result}) \cdot Preco_t^{compra} - Aux_t^{result} \cdot Preco_t^{venda}] \quad (63)$$

$$Aux_t^{result} = \frac{|E_t^{result}| - E_t^{result}}{2} \quad (64)$$

$$|E_t^{result}| \geq E_t^{result} \quad (65)$$

$$|E_t^{result}| \geq -E_t^{result} \quad (66)$$

$$F_{obj}^{ciclos} = \sum_{t=1}^{Nper} (Y_t^{ve.carga.ON} + Z_t^{ve.desc.ON}) \quad (67)$$

$$E_t^{result} = C_t^{total} - G_t + A_t^{result} + VE_t^{result} \quad (68)$$

$$C_t^{total} = C_t^{ncont} + \sum_{n=1}^{N^{Ccont}} \left(C_{t,n}^{cont} \cdot \frac{W_{t,n}^{cont}}{60} \right) \quad (69)$$

$$A_t^{result} = \frac{A_t^{carga}}{\eta^{Acarga}} - \eta^{Adesc} \cdot A_t^{desc} \quad (70)$$

$$A_t^{total} = A_{t-1}^{total} + A_t^{carga} - A_t^{desc} \quad (71)$$

$$A^{%min} \cdot A^{cap.max} \leq A_t^{total} \leq A^{%max} \cdot A^{cap.max} \quad (72)$$

$$0 \leq A_t^{carga} \leq A^{max.carga} \cdot X_t^{carga} \quad (73)$$

$$0 \leq A_t^{desc} \leq A^{max.desc} \cdot X_t^{desc} \quad (74)$$

$$X_t^{carga} + X_t^{desc} \leq 1 \quad (75)$$

$$VE_t^{total} = (VE_{t-1}^{total} + VE_t^{carga} - VE_t^{desc}) \cdot X_t^{VE.ON} + VE_t^{cheg} \quad (76)$$

$$VE_t^{result} = \frac{VE_t^{carga}}{\eta^{VEcarga}} - \eta^{VEdesc} \cdot VE_t^{desc} \quad (77)$$

$$VE^{tot.min} \leq VE_t^{total} \leq VE^{tot.max} \quad (78)$$

$$VE^{tot.max} = VE^{\%.max} . VE^{cap.max} . X_t^{VE.ON} \quad (79)$$

$$VE^{tot.min} = (VE^{\%.min} . VE^{cap.max} + VE_t^{viagem}) . X_t^{VE.ON} \quad (80)$$

$$0 \leq VE_t^{carga} \leq VE^{max.carga} . X_t^{VEcarga} \quad (81)$$

$$0 \leq VE_t^{desc} \leq VE^{max.desc} . X_t^{VEdesc} \quad (82)$$

$$X_t^{VEcarga} + X_t^{VEdesc} \leq X_t^{VE.ON} \quad (83)$$

$$X_t^{VE.carga} - X_{t-1}^{VE.carga} = Y_t^{VE.carga.ON} - Y_t^{VE.carga.OFF} \quad (84)$$

$$X_t^{VE.desc} - X_{t-1}^{VE.desc} = Z_t^{VE.desc.ON} - Z_t^{VE.desc.OFF} \quad (85)$$

$$(MTO_n^{aux} - 1) . \left(Y_{n,t}^{cont.ON} + \sum_{l=1}^{MTO_n^{aux}-1} Z_{n,t+l}^{cont.OFF} \right) \leq MTO_n^{aux} - 1 \quad (86)$$

$$Y_{n,t+MTO_n^{aux}}^{cont.ON} - X_{n,t+MTO_n^{aux}}^{cont} \geq Y_{n,t}^{cont.ON} - X_{n,t}^{cont} - (1 - Y_{n,t}^{cont.ON}) \quad (87)$$

$$X_{n,t}^{cont} - X_{n,t-1}^{cont} = Y_{n,t}^{cont.ON} - Z_{n,t}^{cont.OFF} \quad (88)$$

$$\sum_{t=1}^{24} W_{t,n}^{cont} = 60.Nciclos_n^{cont}.MTO_n^{real} \quad (89)$$

$$W_{t,n}^{cont} \leq 60.X_{n,t}^{cont} \quad (90)$$

$$\sum_{l=0}^{MTO_n^{aux}-1} W_{t,n}^{cont} \geq 60.MTO_n^{real}.Y_{n,t}^{cont.ON} \quad (91)$$

$$0 \leq Y_{n,t}^{cont.ON}, X_{n,t}^{cont}, Z_{n,t}^{cont.OFF}, X_t^{VE.desc}, X_t^{VE.carga}, Y_t^{VE.carga.ON}, Y_t^{VE.carga.OFF}, Z_t^{VE.desc.ON}, Z_t^{VE.desc.OFF}, X_t^{VE.ON}, X_t^{carga}, X_t^{desc} \leq 1 \quad (92)$$

$$\forall t \in \{1, 2 \dots N_{per}\}$$

$$\forall n \in \{1, 2 \dots N^{C^{cont}}\}$$

3.2 VIABILIDADE TÉCNICA DA MICRO-GERAÇÃO EM CURITIBA - PR

3.2.1 Parâmetros de Weibull

Para analisar a viabilidade técnica do aproveitamento de um potencial eólico, deve-se obter os parâmetros estatísticos de forma e escala de Weibull, que são característicos de cada região. O Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (2001) apresenta dados dos regimes de vento, como velocidade, direções predominantes e parâmetros estatísticos de Weibull, para todo o território nacional, fornecendo informações para a tomada de decisões sobre investimentos em aproveitamentos de potenciais eólicos no país.

A Figura 8 trás dados provenientes do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Desta, pode-se obter os parâmetros de forma e escala de Weibull, bem como a velocidade média e a densidade de potência em diversas cidades do Paraná, incluindo Curitiba, que será foco deste estudo.

Figura 8: Dados obtidos do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro.

Cidade	k	c [m/s]	Velocidade Média [m/s]	DP [W/m ²]
Campina da Lagoa	1,95	6,72	5,96	259
Castro	2,37	6,01	5,33	154
Cidade Gaucha	2,16	6,58	5,83	218
Clevelandia	2,1	6,35	5,62	201
Colombo	2,1	5,18	4,59	110
Curitiba	2,18	4,29	3,8	60
Diamante do Norte	2,17	6,06	5,37	170
Dois Vizinhos	2,21	6,72	5,95	227
Foz do Iguaçu	2,19	5,82	5,15	149
General Carneiro	2,19	5,74	5,08	142
Icaraíma	2,19	6,9	6,11	248
Ilha do Mel	1,76	5,4	4,81	153
Inácio Martins	2,17	5,27	4,67	112
Ivaí	2,19	6,65	5,89	222
Japira	2,07	5,41	4,79	126
Joaquim Távora	2,11	6,2	5,49	186
Laranjeiras do Sul	2,05	7,59	6,72	351
Marechal Cândido Rondon	2,2	6,55	5,8	211
Maringá	2,16	6,59	5,84	220
Morretes	1,89	3,44	3,05	36
Nova Fátima	2,24	6,24	5,53	179
Nova Tebas	2,23	5,49	4,86	123
Paranapoema	2,05	6,81	6,03	254
Planalto	2,1	6,2	5,49	187
São Mateus do Sul	2,28	5,22	4,62	103
Ventania	2,12	6,38	5,65	202

Fonte: OZAWA (2017).

Conforme demonstrado por Ozawa (2017), o método da máxima verossimilhança obteve os melhores resultados para os parâmetros de Weibull em 21 das 26 cidades estudadas, entre elas, Curitiba. Por tanto, no presente trabalho usar-se-á este método como referência. Os resultados do método da máxima verossimilhança estão na figura a seguir e foram fundamentados nos valores das séries temporais de dados de velocidade do vento do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2011).

Figura 9: Resultados do método da máxima verossimilhança.

Cidade	k	c [m/s]	Velocidade média [m/s]	RMSE	R ²	DP [W/m ²]
Campina da Lagoa	2,44	3,47	3,08	0,0200	0,9728	26,18
Castro	1,47	1,98	1,79	0,0463	0,8947	8,73
Cidade Gaucha	1,60	2,25	2,02	0,0222	0,9714	11,71
Clelandia	1,03	3,10	3,06	0,1809	0,1354	86,33
Colombo	1,79	1,60	1,42	0,0330	0,9777	3,36
Curitiba	1,72	2,23	1,99	0,0216	0,9790	9,67
Diamante do Norte	1,92	2,97	2,64	0,0257	0,9423	20,85
Dois Vizinhos	2,03	2,91	2,58	0,0226	0,9692	18,35
Foz do Iguaçu	1,04	2,79	2,75	0,0672	0,6263	65,77
General Carneiro	1,29	1,48	1,37	0,0593	0,9130	4,84
Icaraíma	2,08	3,86	3,42	0,0158	0,9744	42,01
Ilha do Mel	1,55	2,66	2,39	0,0265	0,9538	21,15
Inácio Martins	1,84	2,71	2,41	0,0474	0,8498	15,41
Ivaí	1,53	1,70	1,53	0,0511	0,9120	5,40
Japira	1,28	2,58	2,39	0,0560	0,6862	27,08
Joaquim Távora	2,77	1,19	2,77	0,0205	0,9478	0,99
Laranjeiras do Sul	1,77	1,91	1,70	0,0345	0,9656	5,84
Marechal Cândido Rondon	1,59	3,79	3,40	0,0435	0,6783	56,72
Maringá	2,13	2,54	2,25	0,0268	0,9590	11,43
Morretes	1,19	1,25	1,18	0,0327	0,9791	3,98
Nova Fátima	1,82	3,69	3,28	0,0192	0,9545	41,31
Nova Tebas	1,89	2,73	2,43	0,0255	0,9506	16,17
Paranapoema	1,51	3,31	2,99	0,0137	0,9750	41,28
Planalto	2,08	3,19	2,82	0,0254	0,9514	23,68
São Mateus do Sul	1,17	1,04	0,99	0,0957	0,8834	2,28
Ventania	2,70	3,78	3,36	0,0131	0,9878	30,37

Fonte: OZAWA (2017).

Da Figura 9, pode se obter os valores dos parâmetros de escala e forma de Weibull para a cidade de Curitiba, sendo:

- $c = 2,23\text{m/s}$;
- $k = 1,72$.

Dessa forma, calcula-se a função densidade de probabilidade com a equação 1 em função da velocidade do vento:

$$f(v) = \frac{1,72}{2,23} \cdot \left(\frac{v}{2,23}\right)^{1,72-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{2,23}\right)^{1,72}} = 0,432956 \cdot v^{0,72} \cdot e^{-\frac{v^{1,72}}{3,9726871}} \quad (93)$$

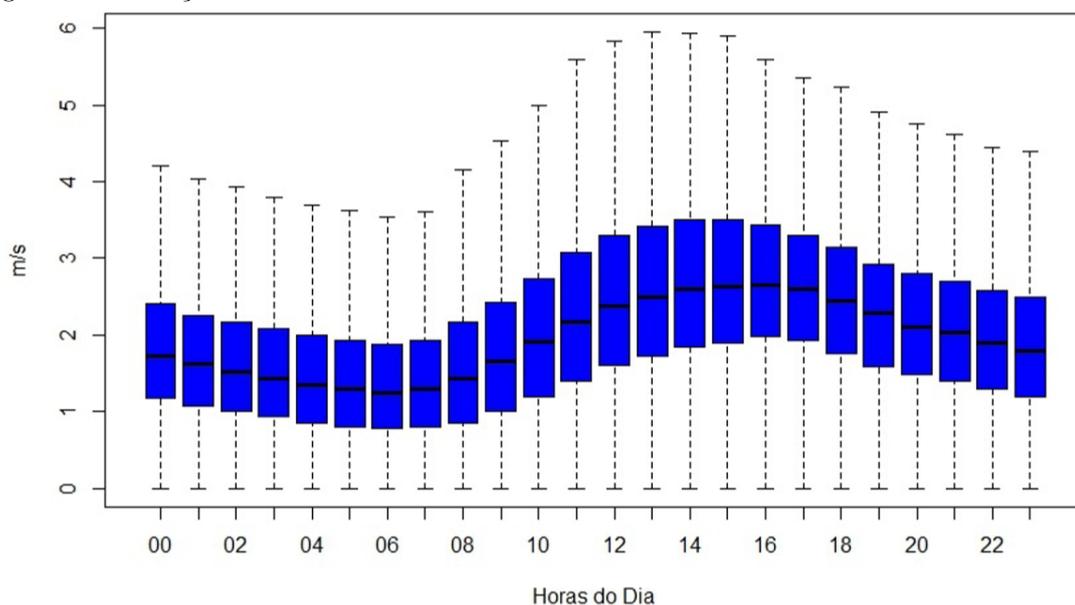
Assim, a função densidade de probabilidade de Weibull no período t será:

$$f_t(v_t) = 0,432956.v_t^{0,72}.e^{-\frac{v_t^{1,72}}{3,9726871}} \quad (94)$$

3.2.2 Micro-geração eólica

Os dados da velocidade do vento foram obtidos de Castelhana e Roseghini (2018), que apresenta os dados de acordo com a Figura 10. Esta trás um gráfico da variação da velocidade do vento ao longo do dia em Curitiba - PR feito com dados obtidos de 2004 a 2015.

Figura 10: Oscilação horária dos valores de velocidade do vento na cidade de Curitiba - 2004-2015.



Fonte: CASTELHANO e ROSEGHINI (2018).

Pode-se observar que os horários da madrugada e início da manhã registram as menores velocidades, tanto de média quanto de limite superior.

Já a partir das 08h, observa-se um aumento gradual na velocidade até as 14h, quando se inicia uma diminuição.

No período entre as 12h e 16h, encontra-se as maiores velocidades, com limite superior próximo de $6m/s$, com média próxima de $2,5m/s$. Já nos horários com velocidade mais baixa, entre 04h e 07h, o limite superior chegou a $8m/s$ com médias em torno de $1,3m/s$.

A partir da Figura 10, criou-se a Tabela 1, que apresenta a velocidade média do vento em cada período do dia, de acordo com os dados de Castelhana e Roseghini (2018). Estes dados serão usados para calcular a geração de energia através do vento.

Tabela 1: Velocidade média do vento em cada período do dia no município de Curitiba - PR.

Período	Velocidade média do vento (m/s)
0	1,8
1	1,7
2	1,6
3	1,4
4	1,35
5	1,35
6	1,3
7	1,35
8	1,5
9	1,75
10	1,9
11	2
12	2
13	2,3
14	2,4
15	2,5
16	2,5
17	2,45
18	2,3
19	2,1
20	2
21	1,9
22	1,9
23	1,8

Fonte: O AUTOR (2019).

O valor da densidade do ar pode ser obtido da Figura 11, que apresenta valores de densidade do ar para diversas cidades do estado do Paraná para 10 e 50 metros acima do solo.

Em Curitiba, foco deste estudo, a densidade do ar vale $1,0898\text{kg}/\text{m}^3$ a 10 metros e $1,085\text{kg}/\text{m}^3$ a 50 metros acima do solo.

Figura 11: Densidade do ar em diversas cidades no estado do Paraná.

Cidade	Massa específica do ar (ρ)				
	Temperatura média [°C]	Temperatura média [°K]	Altitude [m]	ρ (10m) [kg/m ³]	ρ (50m) [kg/m ³]
Campina da Lagoa	21,30	294,45	598	1,1177	1,113
Castro	16,60	289,75	994	1,0830	1,078
Cidade Gaucha	22,50	295,65	366	1,1436	1,138
Clevelandia	16,10	289,25	966	1,0883	1,083
Colombo	16,30	289,45	950	1,0897	1,085
Curitiba	17,30	290,45	923	1,0898	1,085
Diamante do Norte	22,25	295,40	368	1,1443	1,139
Dois Vizinhos	19,90	293,05	546	1,1295	1,124
Foz do Iguaçu	21,40	294,55	235	1,1652	1,160
General Carneiro	16,20	289,35	1009	1,0825	1,077
Icaraíma	23,10	296,25	381	1,1394	1,134
Ilha do Mel	21,30	294,45	4	1,1971	1,192
Inácio Martins	16,50	289,65	1209	1,0564	1,051
Ivaí	18,20	291,35	513	1,1400	1,135
Japira	19,20	292,35	693	1,1128	1,108
Joaquim Távora	20,40	293,55	513	1,1320	1,127
Laranjeiras do Sul	18,70	291,85	835	1,0963	1,091
Marechal Cândido Rondon	20,60	293,75	392	1,1472	1,142
Maringá	22,00	295,15	549	1,1216	1,116
Morretes	20,00	293,15	50	1,1960	1,190
Nova Fátima	20,00	293,15	664	1,1138	1,109
Nova Tebas	19,90	293,05	656	1,1152	1,110
Paranapoema	22,50	295,65	309	1,1511	1,146
Planalto	20,80	293,95	399	1,1456	1,140
São Mateus do Sul	16,50	289,65	780	1,1109	1,106
Ventania	16,60	289,75	1093	1,0705	1,066

Fonte: OZAWA (2017).

Para os aerogeradores, obteve-se os dados do *site* da empresa ELETROVENTO para os Modelos ELV-H3.1 e ELV-H8.0, que estão apresentados nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2: Especificações técnicas do aerogerador modelo ELV-H3.1 – 1 kW.

Especificações técnicas	
Potência Nominal	1kW
Potência Máxima	2kW
Número de Pás	3
Diâmetro das Pás	3,1 metros
Velocidade Nominal do Vento	9m/s
Faixa de Velocidade de Operação	3 - 25 m/s
Velocidade de Vento Máxima	50m/s
Rotação Nominal	500 RPM
Eficiência do Gerador	80%
Coefficiente de Potência	0,45

Fonte: Adaptado de ELETROVENTO (2019).

Tabela 3: Especificações técnicas do aerogerador modelo ELV-H8.0 – 10 kW.

Especificações técnicas	
Potência Nominal	10kW
Potência Máxima	15kW
Número de Pás	3
Diâmetro das Pás	8,1 metros
Velocidade Nominal do Vento	10m/s
Faixa de Velocidade de Operação	3 - 25 m/s
Velocidade de Vento Máxima	50m/s
Rotação Nominal	132 RPM
Eficiência do Gerador	85%
Coefficiente de Potência	0,4

Fonte: Adaptado de ELETROVENTO (2019).

Das Tabelas 2 e 3 nota-se que a velocidade mínima do vento para operação dos aerogeradores é de $3m/s$. Já da Tabela 1 pode-se observar que a velocidade média do vento em Curitiba não passa de $2,5m/s$, ou seja, fora da faixa de operação de ambos os aerogeradores, logo a geração de energia ao longo de um dia seria nula.

Outros aerogeradores de menor porte do mesmo fabricante também possuem velocidade do vento mínima de $3m/s$.

3.2.3 Micro-geração Fotovoltaica

As especificações técnicas do sistema de geração fotovoltaica estão apresentados na tabela a seguir, elaborada a partir de dados apresentados por Solon (2014) e Santos (2016).

Tabela 4: Especificações técnicas do gerador fotovoltaico.

Especificações técnicas	
η^{mod}	0,1524
N^{mod}	30
A^{mod}	$1,64m^2$
η^{inv}	0,95
$Perdas$	0,2
P_{max}	$255W_p$
Tensão máxima do sistema	1000V

Fonte: O AUTOR (2019).

A Tabela 5, apresenta os dados da radiação solar média em cada período do dia em Curitiba.

Tabela 5: Radiação solar média em cada período no município de Curitiba, estado do Paraná.

Período	Radiação (W/m^2)
0	0
1	0
2	0
3	0
4	4
5	48
6	150
7	273
8	395
9	486
10	534
11	534
12	486
13	395
14	273
15	150
16	48
17	4
18	0
19	0
20	0
21	0
22	0
23	0

Fonte: ULLMANN (2018).

A partir dos dados apresentados nas Tabelas 4 e 5, associados à equação 58, calculou-se a energia gerada em cada período do dia a partir do sistema fotovoltaico, cujos resultados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Energia gerada através do sistema solar da residência.

Período	G [kWh]
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0,022794163
5	0,273529958
6	0,85478112
7	1,555701638
8	2,250923616
9	2,769490829
10	3,043020787
11	3,043020787
12	2,769490829
13	2,250923616
14	1,555701638
15	0,85478112
16	0,273529958
17	0,022794163
18	0
19	0
20	0
21	0
22	0
23	0

Fonte: O AUTOR (2019).

3.3 PARÂMETROS E DADOS DE ENTRADA

3.3.1 Função Objetivo

De forma a garantir a redução do peso do ciclo na função objetivo global, sem afetar tanto a redução dos custos, que é o objetivo principal, os pesos de cada função serão:

- $\lambda^{custos} = 0,9$;
- $\lambda^{ciclos} = 0,1$;

3.3.2 Veículo Elétrico

Os parâmetros de entrada utilizados para o veículo elétrico foram obtidos de Plugincars (2016) e estão apresentados na tabela a seguir.

Tabela 7: Parâmetros de entrada referêntes ao veículo elétrico.

$VE^{%.max}$	90%
$VE^{%.min}$	20%
$VE^{cap.max}$	24kWh
$VE^{max.desc}$ e $VE^{max.carga}$	6kWh
η^{VEdesc} e $\eta^{VEcarga}$	0,909
VE_t^{viagem}	3kWh; equivalente a um trajeto de 15km
VE_t^{cheg}	18,6kWh; apenas no período 18

Fonte: Elaborada a partir de PLUGINCARS (2016).

Além destes, a Figura 12 apresenta uma tabela com as informações sobre quais períodos o veículo está ou não conectado à casa.

Figura 12: Parâmetros do veículo elétrico.

Períodos	$X_t^{VEconec}$	VE_t^{cheg} (kWh)
1	1	0
2	1	0
3	1	0
4	1	0
5	1	0
6	1	0
7	1	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	1	18,6
19	1	0
20	1	0
21	1	0
22	1	0
23	1	0
24	1	0

Fonte: SANTOS (2016).

3.3.3 Sistema de Armazenamento

Para o sistema de armazenamento de energia, baseou-se no *Powerwall*, da Tesla.

O *Powerwall* é um sistema de armazenamento desenvolvido para *smart-houses* pela Tesla, com o objetivo de suprir a residência em caso de falta de energia, sistemas *off-grid* e residências com micro-geração, especialmente solar.

Os parâmetros do sistema de armazenamento são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Parâmetros de entrada do sistema de armazenamento.

Parâmetro	Valor
$A^{%max}$	100%
$A^{%min}$	10%
$A^{cap.max}$	6,4 kWh
$A^{max.carg} = A^{max.desc}$	3 kWh
$\eta^{Acarga} = \eta^{Adesc}$	0,925

3.3.4 Cargas Controláveis

A Figura 13 apresenta uma tabela com as potências, tempo mínimo de operação e quantidade de ciclos de operação das cargas controláveis.

Figura 13: Dados das cargas controláveis.

Carga Controlável	Potência [kW]	$MTO_n^{real,cont}$ [min]	$Nciclos_n^{cont}$ [un.]
Chuveiro	7,5	20	3
Lavadora de Louça	1,5	90	1
Lavadora de Roupa	1	60	1
Ferro de Passar	1	30	1
Secadora de Roupa	1	60	1
Secador de Cabelo	1,4	15	2
Soma	13,4	-	-

Fonte: SANTOS (2016).

A Figura 14 apresenta uma tabela com os períodos nos quais é permitida a alocação das cargas controláveis. Certas cargas, mesmo sendo controláveis, não podem ser acionadas em qualquer período, o ferro de passar, por exemplo, não é utilizado de madrugada quando os moradores estão dormindo, a lavadora de roupas não pode ser ligada de madrugada devido ao barulho. Assim, as cargas não são alocadas apenas pensando na economia financeira, mas também no conforto dos moradores.

Figura 14: Períodos permitidos ou não para alocação de cada carga controlável.

Períodos	Chuveiro	Lavadora Louça	Lavadora Roupa	Ferro de Passar	Secadora Roupa	Secadora Cabelo
1	0	1	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	1	0	0	0	0
7	1	1	0	1	1	1
8	0	1	1	1	1	0
9	0	1	1	1	1	0
10	0	1	1	1	1	0
11	0	1	1	1	1	0
12	0	1	1	1	1	0
13	0	1	1	1	1	0
14	0	1	1	1	1	0
15	0	1	1	1	1	0
16	0	1	1	1	1	0
17	0	1	1	1	1	0
18	1	1	1	1	1	0
19	1	1	1	1	1	1
20	1	1	1	1	1	1
21	1	1	1	1	1	1
22	1	1	1	1	1	1
23	1	1	0	1	1	1
24	1	1	0	1	1	1

Fonte: SANTOS (2016).

A Figura 15 apresenta os períodos nos quais as cargas controláveis estarão ativas sem nenhuma alocação inteligente.

Figura 15: Períodos e tempos de operação das cargas controláveis e veículo elétrico sem nenhuma alocação inteligente de cargas.

Período	Cargas controláveis						Veículo elétrico
	Chuveiro	Ferro elétrico	Maq. lavar pratos	Maq. lavar roupas	Secador de cabelos	Secadora de roupa	
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0
18	20	0	0	0	0	0	0
19	20	0	60	60	0	0	60
20	20	0	30	0	0	60	60
21	20	30	0	0	30	0	60
22	0	0	0	0	0	0	36
23	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: SANTOS (2016).

3.3.5 Cargas Não Controláveis

As cargas não controláveis serão inseridas como parâmetros imutáveis, cujos dados estão relacionados na Figura 16, com suas respectivas potências e horas de uso.

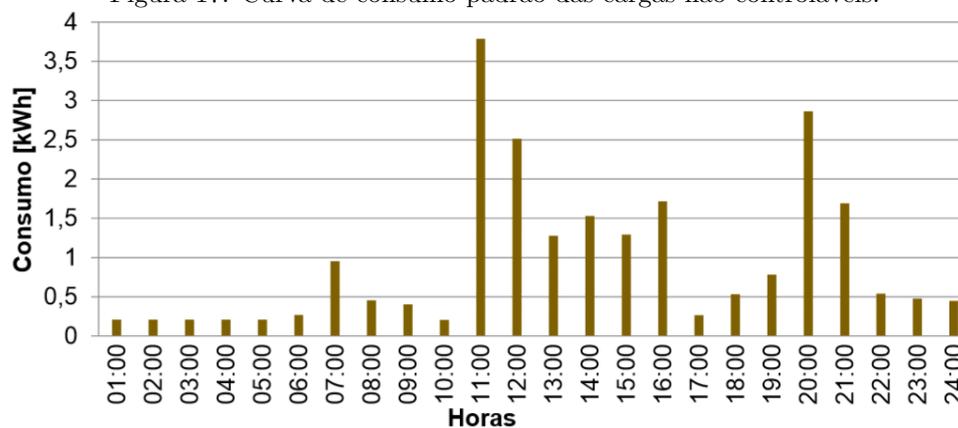
A partir dos dados apresentados na Figura 18, que apresenta os tempos e períodos de operação das cargas não controláveis, obteve-se uma curva de consumo padrão, apresentada na Figura 17.

Figura 16: Dados das cargas não controláveis.

Descrição da carga	Potência [W]	Horas diárias de uso
Amplificador/codificador – parabólica	30	6
Ar condicionado 10000 btus	950	8
Aspirador de pó residencial	750	0,2
Barbeador elétrico	50	0,1
Cafeteira elétrica	500	1
Carregador de telefone celular	5	1
Exaustor para fogão	100	4
Faca elétrica	140	0,1
Fogão elétrico	2000	2
Forno de micro ondas	1150	0,2
Freezer vertical 120l	130	8
Frigobar	80	8
Geladeira triplex 430l	380	8
Lâmpada fluorescente	20	2
Liquidificador	200	0,1
Telefone sem fio	10	24
Televisor acima 30 polegadas	200	6
Torneira elétrica	3500	0,5
Vídeo game	120	2
Soma	10315	-

Fonte: SANTOS (2016).

Figura 17: Curva de consumo padrão das cargas não controláveis.



Fonte: SANTOS (2016).

Figura 18: Períodos e tempos de operação das cargas não controláveis.

Período	Video game	Tom. elet.	TV	Tel. sem fio	Liquidif.	Lâmp. fluores.	Gelad. triplex 430l	Frigobar	Freezer vertical 120l	Forno micro ondas	Fogão elét.	Faca elét.	Exaust.	Carreg. celular	Caf. elét.	Barb. elét.	Aspir. de pó	Ar cond.	Codific. Parab.
1	0	0	0	60	0	0	20	20	20	0	0	0	0	60	0	0	0	0	0
2	0	0	0	60	0	0	20	20	20	0	0	0	0	60	0	0	0	0	0
3	0	0	0	60	0	0	20	20	20	0	0	0	0	60	0	0	0	0	0
4	0	0	0	60	0	0	20	20	20	0	0	0	0	60	0	0	0	0	0
5	0	0	0	60	0	0	20	20	20	0	0	0	0	60	0	0	0	0	0
6	0	0	0	60	0	(3x)60	20	20	20	0	0	0	0	60	0	0	0	0	0
7	0	0	60	60	5	(3x)60	20	20	20	5	0	0	0	0	30	0	0	0	60
8	0	0	60	60	0	(1x)60	20	20	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60
9	0	0	60	60	0	0	20	20	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	60	0	0	20	20	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	60	60	0	0	20	20	20	10	60	60	60	0	0	0	0	60	0
12	0	20	60	60	0	0	20	20	20	0	0	0	0	60	0	0	0	60	0
13	60	0	0	60	0	0	20	20	20	0	0	0	0	60	0	0	0	60	0
14	60	0	0	60	0	0	20	20	20	0	0	0	0	60	0	0	20	60	0
15	60	0	0	60	5	0	20	20	20	0	0	0	0	0	0	0	0	60	0
16	60	0	0	60	0	0	20	20	20	5	0	0	0	0	30	0	0	60	0
17	0	0	0	60	0	(3x)60	20	20	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	60	60	0	(5x)60	20	20	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60
19	0	0	60	60	0	(5x)60	20	20	20	0	0	0	0	0	30	0	0	0	60
20	0	0	60	60	0	(6x)60	20	20	20	10	60	0	60	0	0	20	0	0	60
21	0	20	60	60	0	(5x)60	20	20	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60
22	0	0	60	60	0	(5x)60	20	20	20	0	0	0	0	60	0	0	0	0	60
23	0	0	60	60	0	(2x)60	20	20	20	0	0	0	0	60	0	0	0	0	60
24	0	0	60	60	0	(2x)60	20	20	20	0	0	0	0	60	0	0	0	0	0

Fonte: SANTOS (2016).

3.3.6 Tarifas de Energia Elétrica

Os preços de energia foram obtidos do site da COPEL (2018), expostos na Tabela 9, para a tarifa branca no subgrupo B1.

Tabela 9: Tarifa branca para o subgrupo B1.

Tarifa Branca	Horário	Custo (R\$/kWh)
B1 - Residencial	Ponta	1,39355
	Intermediário	0,90439
	Fora de Ponta	0,66012

Fonte: Adaptado de COPEL (2018).

4 RESULTADOS

Conforme demonstrado no capítulo 3.2, não existe viabilidade técnica para geração de energia eólica em Curitiba, por tanto, esta foi deixada de fora das simulações.

Foram elaborados nove casos para estudo e comparação da viabilidade econômica:

- Caso A - Caso base, contém apenas as cargas controláveis e não controláveis e o veículo elétrico, que atua apenas como carga;
- Caso B - Adição de um sistema de micro-geração distribuída fotovoltaico ao Caso A;
- Caso C - Aplicação da alocação inteligente de cargas ao Caso B;
- Caso D - Adição de um sistema de armazenamento de energia ao Caso A;
- Caso E - Aplicação da alocação inteligente de cargas ao Caso D;
- Caso F - Adição de um sistema de micro-geração distribuída fotovoltaico e de um sistema de armazenamento de energia ao Caso A;
- Caso G - Aplicação da alocação inteligente de cargas ao Caso F;
- Caso H - Impacto do veículo elétrico na viabilidade econômica do Caso F, considerando a possibilidade de se utilizar o veículo para armazenar energia;
- Caso I - Aplicação da alocação inteligente de cargas ao Caso;
- Caso J - Aplicação da alocação inteligente de cargas ao Caso A.

4.1 VIABILIDADE ECONÔMICA

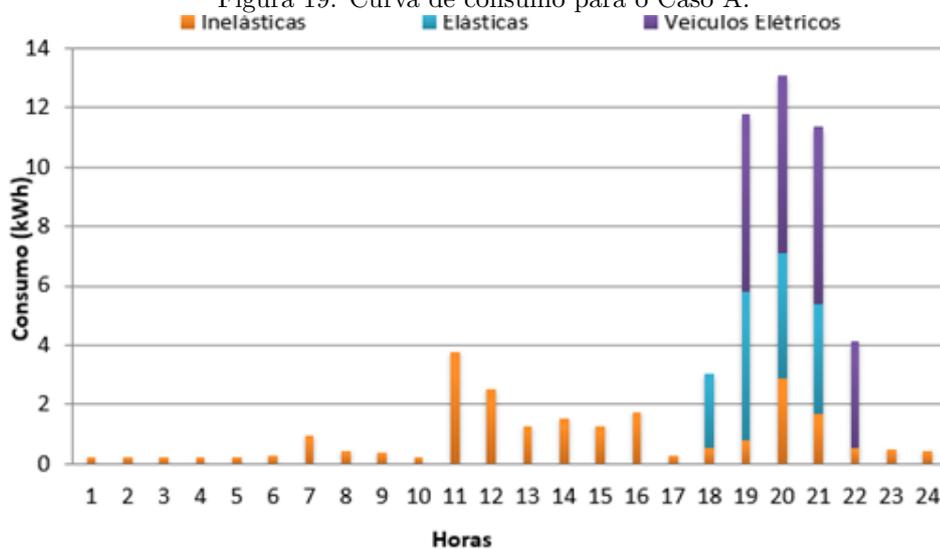
4.1.1 Caso A - Caso Base

As potências e os períodos das cargas controláveis foram obtidos das Figuras 13 e 15 respectivamente, enquanto as potências das cargas não controláveis foram obtidas da Figura 16 e já apresentados anteriormente na forma de gráfico, na Figura 17.

Para uma análise apropriada da viabilidade econômica dos componentes instalados na residência, é necessário primeiramente conhecer os gastos com energia antes da instalação de qualquer componente, assim, o Caso A será o caso base para comparação da economia entre os demais casos simulados.

O Caso A, considera a mesma residência das simulações anteriores com apenas cargas controláveis e não controláveis não alocadas de maneira inteligente e o veículo elétrico, considerando-o apenas como uma carga não alocada de maneira inteligente. Ou seja, o Caso A é idêntico ao Caso Base do Primeiro Cenário nas simulações anteriores. A sua curva de consumo é apresentada na Figura 19 e o gasto diário com energia na Tarifa Branca é de R\$61,51 em um dia útil e R\$39,666 em finais de semana, totalizando R\$1.670,60 mensais. Estes valores serão tidos como base para analisar a viabilidade econômica dos casos apresentados a seguir.

Figura 19: Curva de consumo para o Caso A.



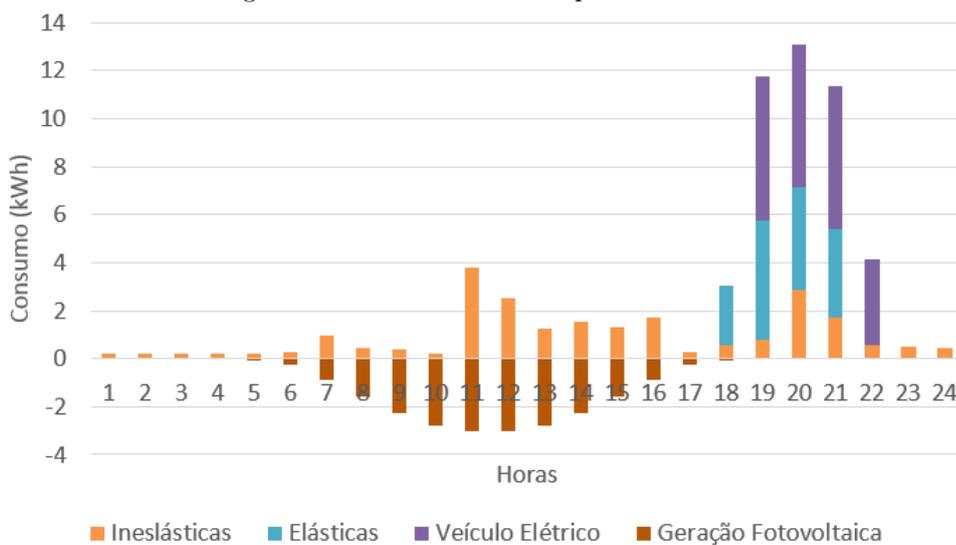
Fonte: O AUTOR (2019).

Pode-se notar uma grande concentração de cargas nos horários de ponta, algo comum em residências sem alocação inteligente de cargas. Isto se deve ao fato de, comumente, ser nesses horários que os residentes chegam em casa e utilizam os equipamentos. Tal problema é agravado pelo veículo elétrico, que é colocado para se carregar no momento em que chega a residência.

4.1.2 Caso B - Sistema Fotovoltaico

O Caso B acrescentará ao Caso A um sistema de geração fotovoltaico, ainda não será feita nenhuma alocação de cargas. A curva de consumo deste caso é apresentada na Figura 20.

Figura 20: Curva de consumo para o Caso B.



Fonte: O AUTOR (2019).

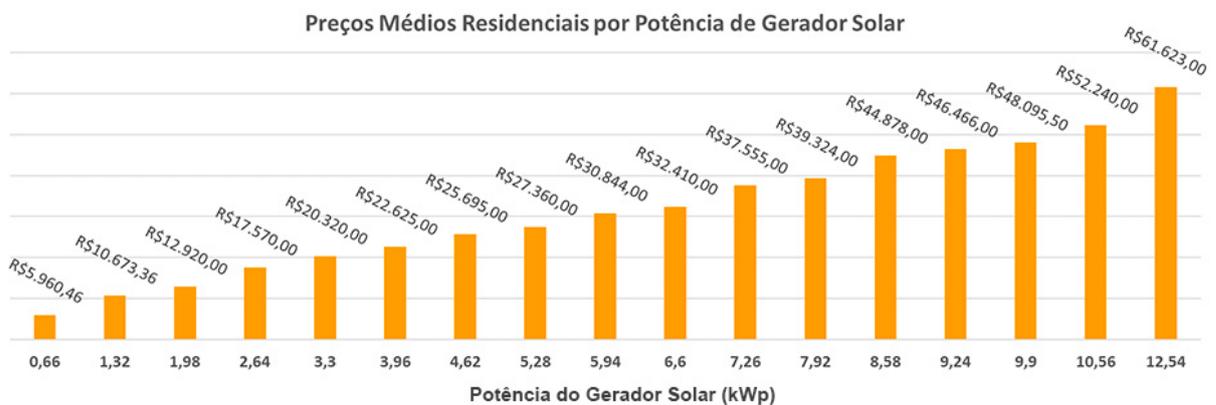
A energia gerada que não é consumida na residência, é vendida para a concessionária, abatendo os custos de compra de energia, porém, esta energia é gerada fora da ponta, períodos nos quais o preço é menor, e é consumida em períodos de ponta, mais caros.

Neste caso, considerando a Tarifa Branca, o gasto diário com energia é de R\$47,29 em dias úteis e R\$25,44 nos finais de semana, totalizando R\$1.244,02.

O Caso B apresenta uma economia mensal de R\$426,58 em relação ao Caso A.

No presente trabalho, considerou-se a instalação de 30 painéis, com potência individual de 0,255kWp (Tabela 4), totalizando 7,65kWp. Do site Portal Solar, estimou-se os custos para instalação de painéis fotovoltaicos com 7,92kWp em aproximadamente R\$39.324,00, já considerando os custos do inversor, como apresentado na figura a seguir.

Figura 21: Custo estimado para instalação de micro-geração fotovoltaica.



Fonte: PORTAL SOLAR (2018).

De acordo com Weiller (2018) o custo anual da manutenção do sistema fotovoltaico é em torno de 1% do valor do investimento inicial, neste caso, o custo anual com manutenção será de aproximadamente R\$393,24.

A Tabela 10 apresenta os dados econômicos do sistema de geração solar, considerando-se um horizonte de tempo de 20 anos e uma Taxa Mínima de Atratividade de 10%.

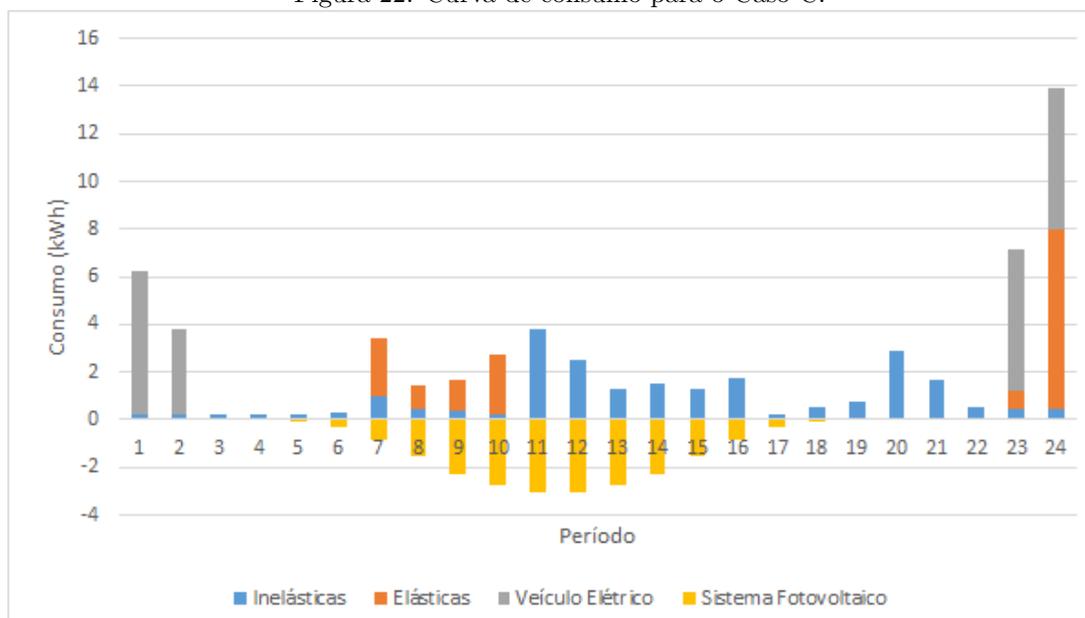
Tabela 10: Análise de viabilidade econômica do sistema de geração fotovoltaico.

Investimento Inicial	R\$39.324,00
Fluxo de Caixa Anual	R\$4.725,72
Taxa Mínima de Atratividade	10%
Valor Presente Líquido	R\$206,19
Taxa Interna de Retorno	10,08%
Tempo de Retorno	8,3 anos

4.1.3 Caso C - Sistema Fotovoltaico Com Alocação de Cargas

Para o Caso C, será considerada uma alocação inteligente das cargas do Caso B, alocando também o veículo elétrico, porém ainda desconsiderando a possibilidade de utilizá-lo como um sistema de armazenamento de energia elétrica. A curva de consumo do Caso C está apresentada na figura a seguir.

Figura 22: Curva de consumo para o Caso C.



Fonte: O AUTOR (2019).

Neste cenário, o gasto com energia é de R\$29,11 em um dia útil e R\$25,44 nos finais de semana, totalizando R\$843,90 em um mês, representando uma economia mensal de R\$826,70 em relação ao Caso A.

A tabela a seguir apresenta a viabilidade econômica, considerando-se um horizonte de tempo de 20 anos, uma Taxa Mínima de Atratividade de 10% e os mesmos valores de investimento inicial e gastos com manutenção do Caso B.

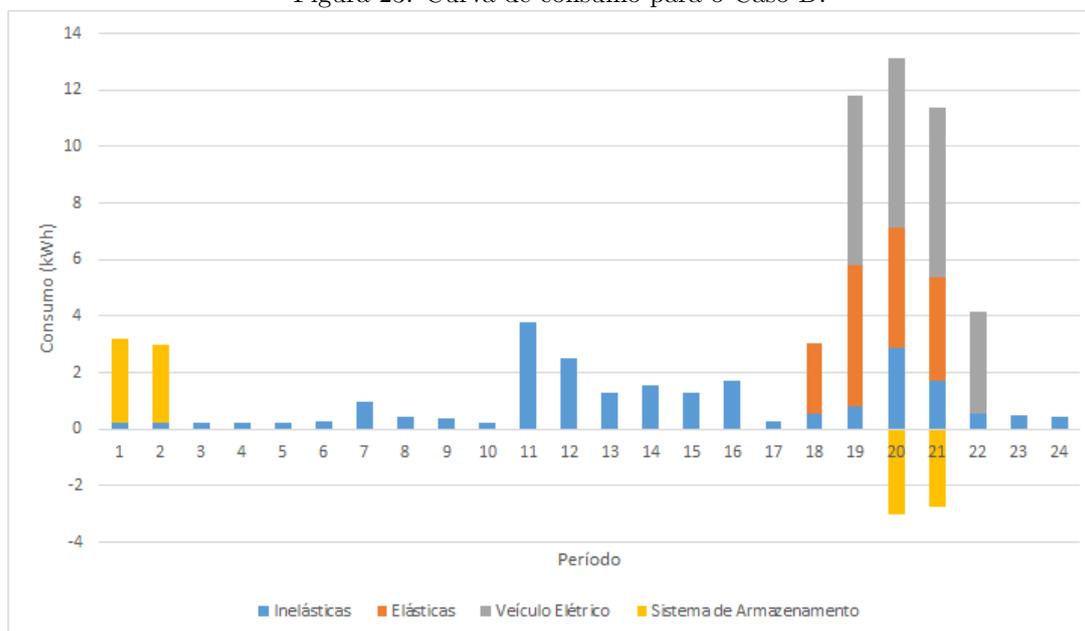
Tabela 11: Análise de viabilidade econômica do sistema de geração fotovoltaico com alocação de cargas.

Investimento Inicial	R\$39.324,00
Fluxo de Caixa Anual	R\$9.527,11
Taxa Mínima de Atratividade	10%
Valor Presente Líquido	R\$40.369,51
Taxa Interna de Retorno	23,81%
Tempo de Retorno	4,1 anos

4.1.4 Caso D - Sistema de Armazenamento

O Caso D considera apenas a adição de um sistema de armazenamento de energia a Caso A, que se carrega nos horários fora de ponta e se descarrega nos horários de ponta. Sua curva de consumo é apresentada na figura a seguir.

Figura 23: Curva de consumo para o Caso D.



Fonte: O AUTOR (2019).

Neste caso, o gasto com energia é de R\$57,92 em um dia útil e R\$39,66 nos finais de semana, totalizando R\$1.577,66 mensais, o que equivale a uma economia mensal de R\$92,94 em relação ao Caso A.

Do site da Tesla, obteve-se os custos do sistema *Powerwall*, já considerando os custos de instalação, em aproximadamente US\$ 10.00,00, equivalente a R\$38.600,00 (a cotação do dólar foi obtida do site Melhor Câmbio no dia 11/06/2019). De acordo com o site da Tesla, não é necessária manutenção periódica do sistema.

A partir disto calculou-se o Valor Presente Líquido e a Taxa Interna de Retorno para o sistema de armazenamento de energia, exposto na tabela a seguir, considerando um horizonte de 20 anos e uma Taxa Mínima de Atratividade de 10%

Tabela 12: Análise de viabilidade econômica sistema de armazenamento.

Investimento Inicial	R\$38.600,00
Fluxo de Caixa Anual	R\$1.115,28
Taxa Mínima de Atratividade	10%
Valor Presente Líquido	-R\$29.270,00
Taxa Interna de Retorno	-5,39%
Tempo de Retorno	34,6 anos

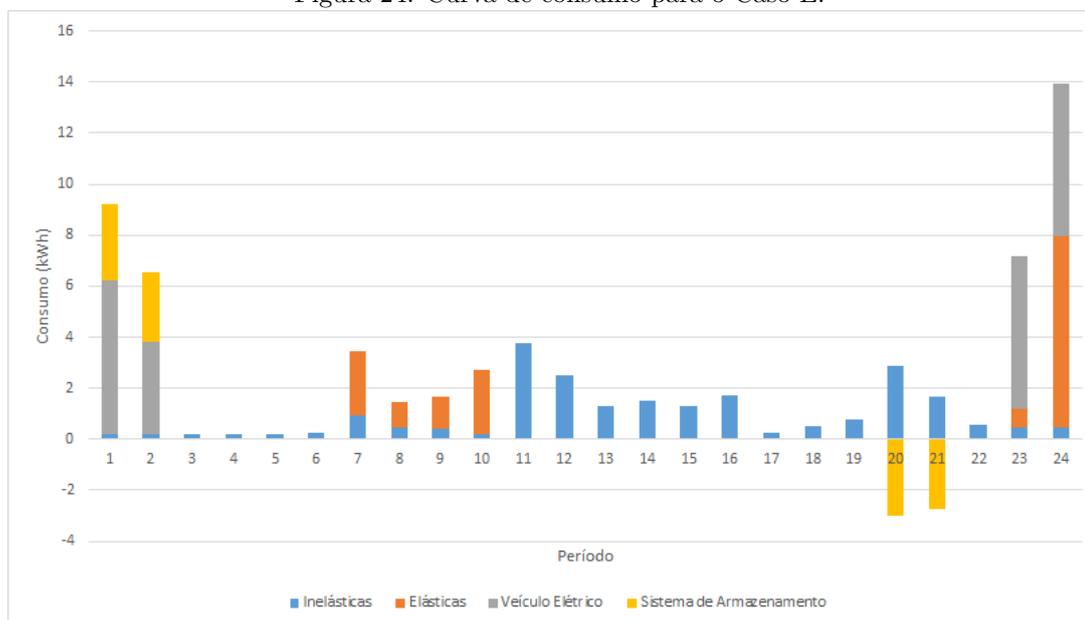
Fonte: O AUTOR (2019).

4.1.5 Caso E - Sistema de Armazenamento Com Alocação de Cargas

O Caso E, terá os mesmos componentes do Caso D, porém as cargas controláveis e o veículo elétrico serão alocados de maneira inteligente, ainda sem considerar a possibilidade de utilizar o veículo elétrico como sistema de armazenamento de energia.

Sua curva de consumo está apresentada na figura a seguir.

Figura 24: Curva de consumo para o Caso E.



Fonte: O AUTOR (2019).

Neste caso, o gasto diário com energia é de R\$39,10 em um dia útil e R\$39,66 nos finais de semana, totalizando R\$1.177,54 mensais. Isto significa uma economia mensal de R\$493,06 em relação ao Caso A.

A tabela a seguir apresenta a viabilidade econômica, considerando-se um horizonte de tempo de 20 anos, uma Taxa Mínima de Atratividade de 10% e os mesmos valores de investimento inicial e gastos com manutenção do Caso D.

Tabela 13: Análise de viabilidade econômica do sistema de armazenamento com alocação de cargas.

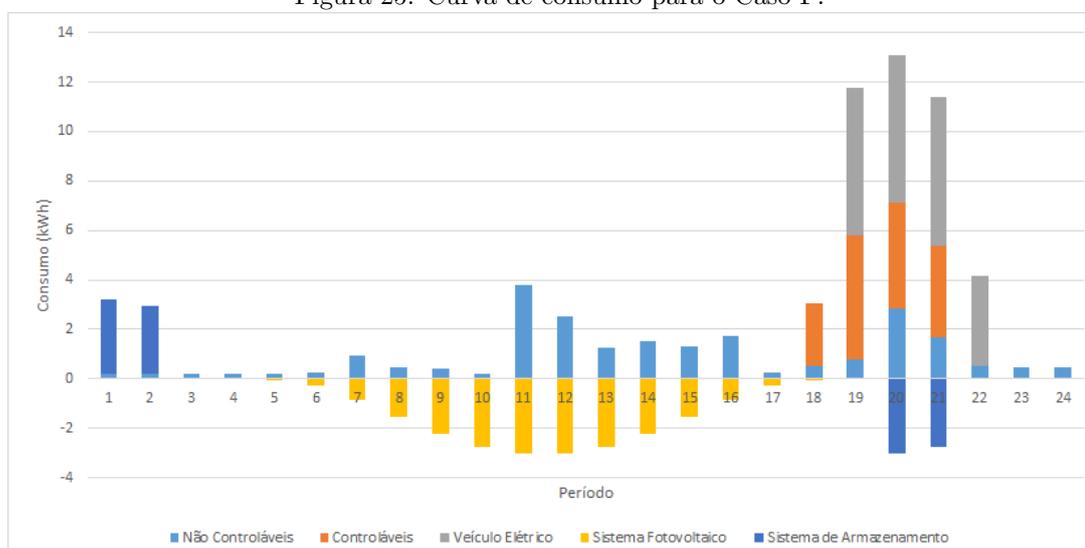
Investimento Inicial	R\$38.600,00
Fluxo de Caixa Anual	R\$5.916,68
Taxa Mínima de Atratividade	10%
Valor Presente Líquido	R\$10.892,56
Taxa Interna de Retorno	14,07%
Tempo de Retorno	6,5 anos

Fonte: O AUTOR (2019).

4.1.6 Caso F - Sistema Fotovoltaico e Sistema de Armazenamento

O Caso F, considera, além das cargas controláveis e não controláveis e do veículo elétrico, um sistema fotovoltaico e um sistema de armazenamento de energia, ainda sem considerar nenhum tipo de alocação de cargas e que o veículo elétrico se comporta apenas como uma carga. Sua curva de consumo está apresentada na figura a seguir.

Figura 25: Curva de consumo para o Caso F.



Fonte: O AUTOR (2019).

O custo diário com energia é de R\$43,07 em dias úteis e R\$25,44 nos finais de semana, totalizando R\$1.151,08 mensais. A economia em relação ao Caso A foi de R\$519,52 por mês.

Neste caso, soma-se os custos iniciais dos sistemas fotovoltaico e de armazenamento, totalizando R\$77.924,00. Como o sistema de armazenamento não possui manutenção periódica, o gasto anual com manutenção é igual ao do sistema fotovoltaico, R\$393,24.

A partir destes dados e considerando uma Taxa Mínima de Atratividade de 10% e um horizonte de 20 anos, calculou-se a Taxa Interna de Retorno e o Valor Presente Líquido, apresentados na tabela a seguir.

Tabela 14: Análise de viabilidade econômica dos sistemas fotovoltaico e de armazenamento.

Investimento Inicial	R\$77.924,00
Fluxo de Caixa Anual	R\$5.840,99
Taxa Mínima de Atratividade	10%
Valor Presente Líquido	-R\$29.064,59
Taxa Interna de Retorno	3,82%
Tempo de Retorno	13,3 anos

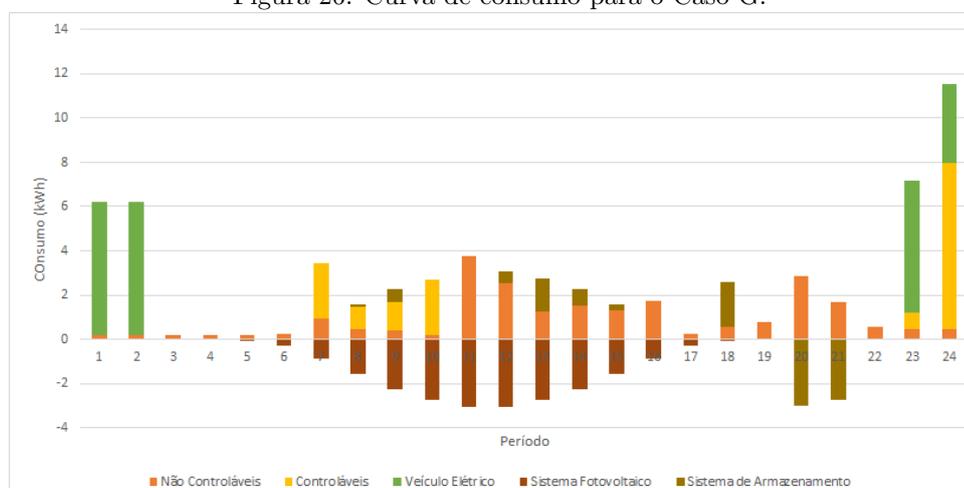
Fonte: O AUTOR (2019).

4.1.7 Caso G - Sistema Fotovoltaico e Sistema de Armazenamento Com Alocação de Cargas

O Caso G, considera os mesmos equipamentos do Caso F, porém agora alocando as cargas de forma inteligente. O sistema de armazenamento também foi alocado, de forma armazenar energia nos momentos em que esta ultrapassa o consumo, se carregando completamente antes do horário de ponta, e liberando energia nos horários de ponta.

A curva de consumo é apresentada na figura a seguir.

Figura 26: Curva de consumo para o Caso G.



Fonte: O AUTOR (2019).

O gasto diário com energia neste caso é de R\$24,88 em dias úteis e R\$25,44 nos finais de semana, totalizando R\$750,96 mensais. Isto representa uma economia de R\$919,64 em relação ao Caso A.

A tabela a seguir apresenta a viabilidade econômica, considerando-se um horizonte de tempo de 20 anos, uma Taxa Mínima de Atratividade de 10% e os mesmos valores de investimento inicial e gastos com manutenção do Caso F.

Tabela 15: Análise de viabilidade econômica dos sistemas fotovoltaico e de armazenamento com alocação de cargas.

Investimento Inicial	R\$77.924,00
Fluxo de Caixa Anual	R\$10.642,39
Taxa Mínima de Atratividade	10%
Valor Presente Líquido	R\$11.098,74
Taxa Interna de Retorno	12,1%
Tempo de Retorno	7,3 anos

Fonte: O AUTOR (2019).

4.1.8 Caso H - Veículo Elétrico e Sistemas Fotovoltaico e de Armazenamento

Neste caso, será levado em consideração os valores de investimento inicial e de manutenção anual do veículo elétrico, ainda não considerando a possibilidade de utilizá-lo como forma de armazenar energia e alocação de cargas. Além disso, será considerada a economia com a combustível com a utilização de um veículo elétrico.

A curva de consumo do Caso H é idêntica ao Caso F, apresentada na Figura 25. Os gastos diários com energia são de R\$43,07 nos dias úteis e R\$25,44 nos finais de semana, equivalente a R\$1.151,08 mensais, representando uma economia mensal de R\$519,52, da mesma forma que no Caso F.

Os valores dos veículos elétricos no Brasil variam entre R\$120.000,00 e R\$200.000,00 (FELDMAN, 2018) e, de acordo com Divo (2017), o custo anual com manutenção de um veículo elétrico é em torno de R\$829,00.

Assim, neste caso, o custo do investimento inicial será de R\$197.924,00 e o gasto total anual com manutenção é de R\$1.222,24.

De acordo com BRITO e REIS (2018), o veículo a gasolina tem um custo de R\$0,19/km, enquanto do veículo elétrico o custo é de R\$0,11/km, representando uma economia de R\$0,08/km. De acordo com a Gazeta do Povo (2019), um paranaense dirige em média 13.100km por ano. Isto representa uma economia anual com gasolina de R\$1048,00.

A tabela a seguir apresenta a viabilidade econômica, considerando-se um horizonte de tempo de 20 anos, uma Taxa Mínima de Atratividade de 10%.

Tabela 16: Análise de viabilidade econômica do veículo elétrico e sistemas fotovoltaico e de armazenamento.

Investimento Inicial	R\$197.924,00
Fluxo de Caixa Anual	R\$6.059,23
Taxa Mínima de Atratividade	10%
Valor Presente Líquido	-R\$ 147.239,03
Taxa Interna de Retorno	-4.92%
Tempo de Retorno	32,6 anos

Fonte: O AUTOR (2019).

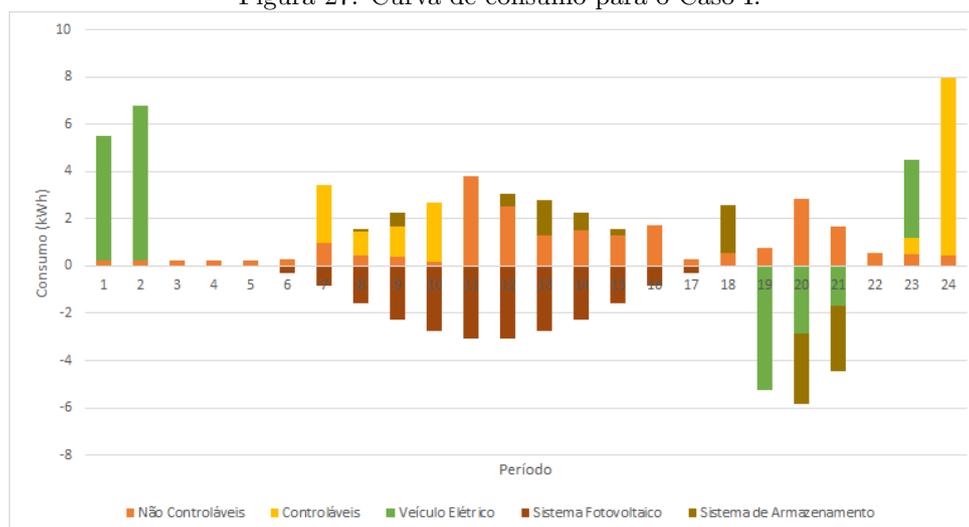
Importante ressaltar que um veículo elétrico tem como função principal o transporte de pessoas, não auxiliar no gerenciamento da energia em uma *smart-house*. Além disso, uma residência desse padrão já teria um veículo nessa faixa de valores e a manutenção de um veículo elétrico é menor do que de um veículo a combustão interna, sendo de R\$829,00 por ano no veículo elétrico e de R\$1.982,00 no veículo a combustão (DIVO, 2017).

4.1.9 Caso I - Veículo Elétrico e Sistemas Fotovoltaico e de Armazenamento Com Alocação de Cargas

Neste caso, além da alocação inteligente das cargas, será levada em consideração a possibilidade de se utilizar o veículo elétrico como um sistema de armazenamento que injeta energia na rede nos horários de ponta.

A curva de consumo do Caso I está apresentada na figura a seguir.

Figura 27: Curva de consumo para o Caso I.



Fonte: O AUTOR (2019).

Neste caso, o gasto diário com energia elétrica é de R\$9,55 em dias úteis e R\$14,74 nos finais de semana, totalizando R\$328,11 mensais. Isto representa uma economia de R\$1.342,48 por mês em relação ao Caso A. Da mesma forma que no Caso H, a economia com combustível foi considerada.

A tabela a seguir apresenta a viabilidade econômica, considerando-se um horizonte de tempo de 20 anos, uma Taxa Mínima de Atratividade de 10% e os mesmos valores de investimento inicial e gastos com manutenção do Caso H.

Tabela 17: Análise de viabilidade econômica do veículo elétrico e sistemas fotovoltaico e de armazenamento com alocação de cargas.

Investimento Inicial	R\$197.924,00
Fluxo de Caixa Anual	R\$15.935,58
Taxa Mínima de Atratividade	10%
Valor Presente Líquido	-R\$64.624,15
Taxa Interna de Retorno	4,67%
Tempo de Retorno	12,4 anos

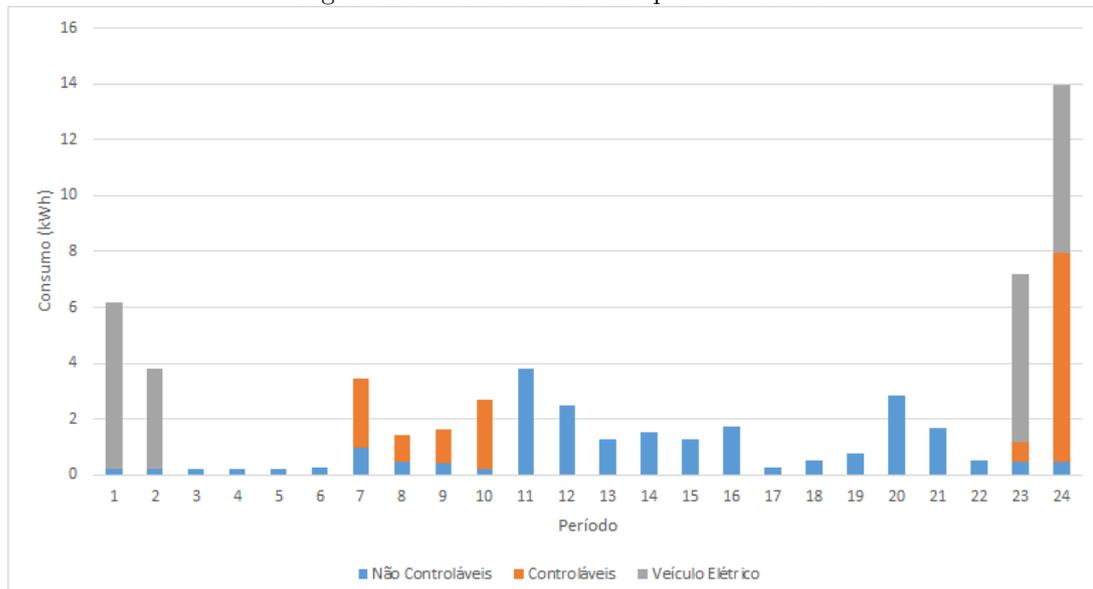
Fonte: O AUTOR (2019).

4.1.10 Caso J - Alocação de cargas

O Caso J é simplesmente a alocação inteligente das cargas do Caso A, considerando o veículo elétrico como apenas uma carga, para analisar os impactos da alocação de cargas.

A curva de consumo está apresentada na figura a seguir.

Figura 28: Curva de consumo para o Caso J.



Fonte: O AUTOR (2019).

Neste caso, o gasto diário com energia foi de R\$43,33 em dias úteis e R\$39,66 nos finais de semana, equivalente a R\$1.270,48 mensais. Isto equivale a R\$400,12 de economia por mês.

4.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Para comparação da análise da viabilidade dos casos, foram criadas as tabelas a seguir, com os parâmetros econômicos de cada caso comparado ao Caso A.

Tabela 18: Comparação econômica dos casos, parte 1.

Caso B		Caso C		Caso D		Caso E	
Economia Mensal*	R\$426,58	Economia Mensal*	R\$826,70	Economia Mensal*	R\$92,94	Economia Mensal*	R\$493,06
VPL	R\$206,19	VPL	R\$40.369,51	VPL	-R\$29.270,00	VPL	R\$10.892,56
TIR	10,08%	TIR	23,81%	TIR	-5,39%	TIR	14,07%
Tempo de Retorno	8,3 anos	Tempo de Retorno	4,1 anos	Tempo de Retorno	34,6 anos	Tempo de Retorno	6,5 anos

*Economias mensais se referem apenas a economia na fatura de energia.

Fonte: O AUTOR (2019).

Tabela 19: Comparação econômica dos casos, parte 2.

Caso F		Caso G		Caso H	
Economia Mensal*	R\$519,52	Economia Mensal*	R\$919,64	Economia Mensal*	R\$519,52
VPL	-R\$29.064,59	VPL	R\$11.098,74	VPL	-R\$147.239,03
TIR	3,82%	TIR	12,1%	TIR	-4,92%
Tempo de Retorno	13,3 anos	Tempo de Retorno	7,3 anos	Tempo de Retorno	32,6 anos

*Economias mensais se referem apenas a economia na fatura de energia.

Fonte: O AUTOR (2019).

Tabela 20: Comparação econômica dos casos, parte 3.

Caso I		Caso J	
Economia Mensal*	R\$1.342,48	Economia Mensal*	R\$400,12
VPL	-R\$64.624,15	VPL	R\$40.163,66
TIR	4,67%	TIR	-
Tempo de Retorno	12,4 anos	Tempo de Retorno	-

*Economias mensais se referem apenas a economia na fatura de energia.

Fonte: O AUTOR (2019).

Pode-se notar que, em todos os casos simulados, houve economia na fatura de energia em relação ao Caso A, porém, devido aos altos custos de investimento inicial e manutenção dos equipamentos envolvidos, alguns casos são economicamente inviáveis, por exemplo os Casos D e F. Porém, com a aplicação da alocação inteligente das cargas nestes casos, chegando-se aos Casos E e G, a economia de energia aumenta significativamente, tornando os casos economicamente viáveis.

Pode-se observar pelo Caso J, que a alocação inteligente das cargas por si só já trás grande economia sem nenhum investimento inicial.

Pode-se observar também o impacto do veículo elétrico, tanto no valor do investimento inicial, quanto na economia gerada quando este é utilizado como uma forma de armazenar energia. Além da economia com energia elétrica, o veículo elétrico também traz uma redução nos gastos com combustível e com manutenção, quando comparado a um veículo a combustão interna.

5 CONCLUSÃO

A geração de energia eólica em Curitiba se mostrou tecnicamente inviável, pois as velocidades médias consideradas não chegam à velocidade mínima para a operação do aerogerador.

Já a geração fotovoltaica se mostrou técnica e economicamente viável, principalmente quando associada ao sistema de armazenamento de energia, permitindo que a energia gerada seja armazenada e injetada na rede nos horários de ponta, gerando créditos com valor três vezes maior do que se fosse injetada nos momentos em que foi gerada, permitindo assim maior economia ao usuário.

Analisando os resultados dos capítulos anteriores pode-se observar o impacto significativo do gerenciamento inteligente de cargas associado com o uso de sistemas de geração e armazenamento de energia elétrica. Apesar dos equipamentos envolvidos serem baseados em uma tecnologia em desenvolvimento e recente no mercado, que, por isso, ainda possui baixa eficiência e vida útil e alto custo, o investimento é economicamente viável. A tendência é que esses equipamentos evoluam, se tornando mais baratos e mais eficientes, tornando esses sistemas cada vez mais viáveis.

Nota-se que o veículo elétrico aumenta consideravelmente o custo e, por tanto, o tempo de retorno do investimento, não só devido ao seu alto custo, mas também devido ao seu custo de manutenção, que praticamente anula a economia obtida pelo sistema. Porém, auxiliar no gerenciamento da demanda de energia da residência é uma função secundária do veículo elétrico. Dessa forma, seu custo não pode ser considerado inerente aos custos de gerenciamento de uma *smart-house*. Por tanto, não se pode dizer que uma *smart-house* com sistema de geração fotovoltaica e de armazenamento e um veículo elétrico é economicamente inviável.

Pode-se notar o impacto significativo da alocação de cargas, que pode ser potencializado pela associação com sistemas de geração e armazenamento de energia elétrica. Pode-se obter uma grande economia sem nenhum investimento inicial, apenas utilizando-se da alocação inteligente das cargas da residência.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Em trabalhos futuros, pode-se fazer a mesma análise da viabilidade técnica e econômica em outra região do país, por exemplo na região nordeste, onde existe mais insolação e os ventos são mais fortes, o que pode tornar a geração eólica viável.

Pode-se também analisar a viabilidade econômica da integração destas *smart-houses* com a rede elétrica e verificar o impacto econômico não só ao usuário, mas também à distribuidora de energia. Além do impacto econômico, pode-se também estudar de que forma a geração distribuída e a alocação de cargas afeta o gerenciamento pelo lado da concessionária, desenvolvendo uma metodologia para alocar as cargas de forma mais diluída ao longo do dia, evitando picos de consumo.

Além disso, pode-se incluir nas análises econômicas, a depreciação dos equipamentos e o aumento nas tarifas de energia, o que pode alterar a economia ao longo dos anos.

Outra possibilidade é incluir na função objetivo global uma função objetivo que reduza os ciclos de carga e descarga do sistema de armazenamento, não apenas do veículo elétrico.

6 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

[1] ANEEL. **PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL (PRODIST): MÓDULO 1 – INTRODUÇÃO**.1. ed. rev. e atual. 2017a. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo1_Revisao_9/1b78da82-6503-4965-abc1-a2266eb5f4d7>. Acesso em: 05 dez. 2017.

[2] ANEEL. **PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL (PRODIST): MÓDULO 8 – QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**.1. ed. rev. e atual. 2017b. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/Módulo8_Revisao_8/9c78cfab-a7d7-4066-b6ba-cfbda3058d19>. Acesso em: 05 dez. 2017.

[3] ALMADA, J. B. **MODELAGEM, CONTROLE E GERENCIAMENTO DA OPERAÇÃO DE MICRORREDES COM FONTES RENOVÁVEIS**. 2013. 216 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

[4] BARAN, R.; LEGEY, L. F. L. **VEÍCULOS ELÉTRICOS: HISTÓRIA E PERSPECTIVAS NO BRASIL**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 33, p. 207-224, 2011.

[5] CASTRO, E. S. de. **IMPACTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NA OPERAÇÃO EM REGIME PERMANENTE DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

[6] CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES: CONTEXTO NACIONAL**. 2012.

[7] CHOWDHURY, S. P.; CROSSLEY, P.; CHOWDHURY, S. **MICROGRIDS AND ACTIVE DISTRIBUTION NETWORKS**. 1. ed. The Institution of Engineering and Technology, 2009.

[8] ULLMANN, Vanessa M. **MODELO COMPUTACIONAL PARA OPERAÇÃO INTEGRADA DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO E MICRORREDES COM GERAÇÃO E ARMAZENAMENTO DISTRIBUÍDOS E VEÍCULOS ELÉTRICOS** Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica - Universidade Federal do Paraná - 2018.

[9] MAZINI, Achila A. **OS DESAFIOS DA IMPLEMENTAÇÃO DE MERCADOS DE ENERGIA ELÉTRICA EM SMART GRIDS: ESTADO DA ARTE** Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Juiz de Fora - 2017.

[10] CERQUEIRA, Sidney. SAAVEDRA, Osvaldo. LIMA, SHIGEAKI. **MICROGRID ECONOMIC DISPATCH WITH STORAGE SYSTEMS BY PARTICLE SWARM OPTIMIZATION** Universidade Federal do Maranhão.

[11] RIBEIRO, Driele P. da S. **GESTÃO INTELIGENTE DE ENERGIA EM CONSUMIDORES RESIDENCIAIS** Dissertação de mestrado de Engenharia Elétrica - Universidade Estadual de Campinas - 2016.

[12] CERQUEIRA, Sidney. SAAVEDRA, Osvaldo. **DESPACHO ECONÔMICO E AMBIENTAL EM MICRORREDES USANDO ALGORITMO DE BUSCA DIRETA** VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - 2016.

- [13] SILVA, Hendrigo B. SANTIAGO, Leonardo P. **POLÍTICA ÓTIMA DE COMERCIALIZAÇÃO DE UM MICROGRID DE ENERGIA SOLAR CONECTADO AO GRID E A VEÍCULOS ELÉTRICOS HÍBRIDOS** XLIX Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional - 2017.
- [14] MARYAMA, Victor - **GERENCIAMENTO ENERGÉTICO PARA MICRORREDES INTELIGENTES** Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Santa Catarina - 2013.
- [15] COELHO, Roberto F. SCHIMITZ, Lennon. MACEDO, Lucas T. MARTINS, Denizar C. **ESTRATÉGIA PARA CONTROLE DO FLUXO DE POTÊNCIA EM UMA MICRORREDE HÍBRIDA DESTINADA A ALIMENTAÇÃO DE CARGAS CC CRÍTICAS** Eletrônica de Potência, Campo Grande, v. 20, n.2, p. 205-214, maio 2015.
- [16] ROCHE, Robin **QU'EST-CE QU'UN MICRO-RÉSEAU ÉLETRIQUE?** Artigo publicado em site pessoal do Prof. Dr. Robin Roche, 2018 - Disponível em: <<https://www.robinroche.com/pico/assets/microgrids.pdf>>
- [17] Connaissance des Énergies **RÉSEAU INTELLIGENT (SMART GRID): DÉFINITION, APPLICATIONS E ENJEUX**. 2015 - Disponível em: <<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/reseau-intelligent-smart-grid>>
- [18] U.S. Department of Energy **THE SMART GRID: AN INTRODUCTION** prepared for the U.S. Department of Energy by Litos Strategic Communication - 2009.
- [19] COPEL **TARIFAS E TAXAS**. 2017. Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Ftarifas%2Fpagcopel2.nsf%2Fverdocatual%2F23BF37E67261209C03257488005939EB>>. Acesso em: 06 dez. 2017.
- [20] CRESEB-CEPEL. **MANUAL DE ENGENHARIA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**, 2014. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia.FV_2014.pdf>. Acesso em: 06 dez. 2017.
- [21] CUSTÓDIO, R. S. **ENERGIA EÓLICA PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2009.
- [22] HATZIARGYRIOU, N. **MICROGRIDS: ARCHITECTURES AND CONTROL**. 1. ed. John Wiley & Sons, 2013.
- [23] MONTICELLI, A. J. **FLUXO DE CARGA EM REDES DE ENERGIA ELÉTRICA**. São Paulo: E. Blucher, 1983.
- [24] SANTOS, H. de S. **PROGRAMAÇÃO DIÁRIA DA OPERAÇÃO COORDENADA DE MICRORREDES E REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, CONSIDERANDO GERAÇÃO FOTOVOLTAICA, ARMAZENAMENTO DISTRIBUÍDO E VEÍCULOS ELÉTRICOS**. 2016. 166 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.
- [25] VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J.R. **ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: CONCEITOS E APLICAÇÕES**. 2 ed. São Paulo: Érica, 2015.
- [26] LEITE, J. V. A.; CRUZ, A. F. **S.ESTUDO E APLICAÇÃO DA SMART GRIT NO SISTEMA ELÉTRICO DE DISTRIBUIÇÃO BRASILEIRO**. In: XVI SEPA - Seminário Estudantil de Produção Acadêmica, Salvador: UNIFACS, 2017.

- [27] ANTUNES, V. J. L. **DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE DIDÁTICO PARA ANÁLISE DO CÁLCULO DO FLUXO DE POTÊNCIA** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.
- [28] CHAPMAN, S. J. **PROGRAMAÇÃO EM MATLAB PARA ENGENHEIROS**. 2. ed. Cengage Learning 2011.
- [29] SANTOS, Henrique de S. **PROGRAMAÇÃO DIÁRIA DA OPERAÇÃO COORDENADA DE MICRORREDES E REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, CONSIDERANDO GERAÇÃO FOTOVOLTAICA, ARMAZENAMENTO DISTRIBUÍDO E VEÍCULOS ELÉTRICOS** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.
- [30] CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES: Contexto Nacional** 2012.
- [31] COELHO, Vitor N. **MULTI-OBJECTIVE MICROGRID STORAGE PLANNING PROBLEM USING PLUG-IN ELETRIC VEHICLES** Tese de doutorado - Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.
- [32] CASTELHANO, F. J.; ROSEGHINI, W. F. F. **CARACTERIZAÇÃO DA DINÂMICA DOS VENTOS EM CURITIBA - PR**. Geosp – Espaço e Tempo (Online), v. 22, n. 1, p. 227-240. 2018.ISSN 2179-0892. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/geosp/article/view/>>
- [33] DOBBIN, Trevor M. C. V. do C. **MODELAGEM E CONTROLE DE UM AEROGERADOR DUPLAMENTE ALIMENTADO COM TURBINA DE VELOCIDADE VARIÁVEL PARA ESTUDOS DE ESTABILIDADE ELETROMECHANICA** Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.
- [34] OZAWA, Maurilio T. **APLICAÇÃO DE PARÂMETROS DA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL NA ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE UM MICROGERADOR EÓLICO EM CIDADES DO ESTADO DO PARANÁ** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2016.
- [35] KUMAR, K. S. P., GADDADA, S. **STATISTICAL SCRUTINY OF WEIBULL PARAMETERS FOR WIND ENERGY POTENTIAL APPRAISAL IN THE AREA OF NORTHERN ETHIOPIA** Renewables: Wind, Water and Solar. ISSN: 2198-994X (Online). 2015.
- [36] BERNARD, A., BOS-LEVENBACH, E. C. **HET UITZETTEN VAN WAARNEMINGEN OP WAARSCHIJNLIJKDEIDSPAPIER (THE PLOTTING OF OBSERVATIONS ON PROBABILITY PAPER)**. Statistica Neerlandica, 1953.
- [37] AKDAG, S. A. e DINLER, A. **A NEW METHOD TO ESTIMATE WEIBULL PARAMETERS FOR WIND ENERGY APPLICATIONS**. Energy Conversion and Management, 2009.
- [38]HARTER, H. L.; MOORE, A. H. **POINT AND INTERVAL ESTIMATORS BASED ON ORDER STATISTICS FOR THE SCALE PARAMETER OF A WEIBULL POPULATION WITH KNOWN SHAPE PARAMETER**. Technometrics, Vol. 7, No. 3, 1965A.
- [39] HARTE, H. L.; MOORE, A. H. **MAXIMUM LIKELIHOOD ESTIMATION OF THE PARAMETERS OF GAMMA AND WEIBULL POPULATIONSS FROM COMPLETE AND FROM CENSORED SAMPLES**. Technometrics, Vol. 7, No. 4, 1965b.

[40] COHEN, A. C. **MAXIMUM LIKELIHOOD ESTIMATION IN THE WEIBULL DISTRIBUTION BASED ON COMPLETE AND ON CENSORED SMAPLES**. *Technometrics*, Vol. 7, No. 4, 1965.

[41] DANWE, R.; DJONGYANG, N.; DOKA, S. Y.; KIDMO, D. K.. **STATISTICAL ANALYSIS OF WIND SPEED DISTRIBUTION BASED ON SIX WEIBULL METHODS FOR WIND POWER EVALUATION IN GAROUA, CAMERRON**. *Revenue des energies renouvelables*, 2015.

[42] CENTEMERO, Filippo e BASTOS, Pedro Z. B. **PROJETO E ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA DA INSTALAÇÃO DE UMA UNIDADE DE MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA SOLAR E EÓLICA EM UMA INDÚSTRIA**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

[43] LASSETER, Robert H. **ROLE OF DISTRIBUTED GENERATION IN REINFORCING THE CRITICAL ELECTRIC POWER INFRASTRUCTURE** IEEE WM Panel, 2001.

[44] HATZIARGYRIOU, Nikos **MICROGRIDS: ARCHITECTURES AND CONTROL** IEEE PRESS, 2013.

[45] SILVA, Y. F. F. C.; BORTONI, E. C. **SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA EM REDES INTELIGENTES: CARACTERÍSTICAS, OPORTUNIDADES E BARREIRAS**. *Revista Brasileira de Energia*, v. 22, 2016.

[46] FELDMAN, Boris **CARROS ELÉTRICOS: ALGUNS MODELOS JÁ TEM PREÇO E DATA PARA CHEGAR NO BRASIL** Auto Papo, Dicas do Boris, 2018. Disponível em: <<https://autopapo.com.br/blog-do-boris/carros-eletricos-modelos-chegar-brasil/>>. Data de acesso: 19/05/2019.

[47] SUPER NOVA ENGENHARIA **O QUE É GERAÇÃO DISTRIBUÍDA?** - Publicado em: 27/09/2016. Disponível em: <<http://supernovaengenharia.com/o-que-e-geracao-distribuida/>>. Data de acesso: 25/05/2019.

[48] SUPER NOVA ENGENHARIA **GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO BRASIL ULTRAPASSA 8,9 MIL CONEXÕES, ATINGINDO 100MW INSTALADOS**. - 20/03/2017. Disponível em: <<http://supernovaengenharia.com/geracao-distribuida-no-brasil-ultrapassa-89-conexoes-atingindo-100mw-instalados/>>. Data de acesso: 25/05/2019.

[49] RAGNINI, Giovanni **ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA INSTALAÇÃO DE TELHAS FOTOVOLTAICAS CONECTADA À REDE DE DISTRIBUIÇÃO EM NOVAS RESIDÊNCIAS EFICIENTES**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

[50] ANEEL. **REVISÃO DAS REGRAS APLICÁVEIS À MICRO E MINI GERAÇÃO DISTRIBUÍDA - RESOLUÇÃO NORMATIVA N 482/2012** Brasília, 06/12/2018.

[51] ANEEL. **PERGUNTAS E RESPOSTAS SOBRE A APLICAÇÃO DA RESOLUÇÃO NORMATIVA N 482/2012 - ATUALIZADO EM 25/05/2017** - 2017.

[52] - ANEEL. **MICRO E MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA- Sistema de Compensação de Energia Elétrica**, segunda edição. Cadernos temáticos ANEEL. Brasília, 2016.

- [53] PORTAL SOLAR, **A REGULAMENTAÇÃO DOS CRÉDITOS DE ENERGIA SOLAR** Disponível em <https://www.portalsolar.com.br/a_regulamentacao_dos_creditos_de_energia.html>. Data de acesso 29/05/2019.
- [54] ANEEL **RESOLUÇÃO NORMATIVA 482/2012** AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 17 de Abril de 2012.
- [55] WEILLER, Filipe **QUANTO CUSTA A MANUTENÇÃO NO SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO?** Energon Brasil, 02/09/2018. Disponível em <<http://energonbrasil.com.br/quanto-custa-a-manutencao-no-sistema-solar-fotovoltaico/>>. Data de acesso: 29/05/2019.
- [56] DIVO, Mário **OS CUSTOS DE MANUTENÇÃO DO CARRO ELÉTRICO**, Automóvel Clube Brasileiro, 31/05/2017. Disponível em: <<https://www.automovelclubebritano.com.br/blog/2017/05/31/os-custos-de-manutencao-do-carro-eletrico/>> Data de acesso: 29/05/2019.
- [57] EL YAHIAOUI, Khadija e BOUKOUTAYA, Abdel Adem, **RÉALISATION D'UNE MAISON INTELLIGENTE À BASE D'ARDUINO** Trabalho de Conclusão de Curso. Faculte des Sciences Rabat, Universite Mohamed V, 2016.
- [58] Smart Home Energy **WHAT IS A “SMART HOME”?**. Publicado em 31/05/2012. Disponível em: <smarthomeenergy.co.uk/what-smart-home>. Data de acesso: 02/06/2019.
- [59] BRITO, Eugênio A., REIS, Alessandro, **DONOS DE CARRO ELÉTRICO CONTAM QUANTO PAGAM DE CONTA DE LUZ AQUI NO BRASIL** UOL, 11/05/2018.
- [60] GAZETA DO POVO **PESQUISA REVELA A MÉDIA ANUAL DE KM RODADO DE CARRO PELO BRASILEIRO**. Jornal Gazeta do Povo, 2019. Disponível em: <<https://www.gazetadopovo.com.br/automoveis/km-rodado-ano-carro-motorista-brasil/>>. Data de Acesso: 13/06/2019.