

DAS Departamento de Automação e Sistemas
CTC **Centro Tecnológico**
UFSC Universidade Federal de Santa Catarina

Concepção de Usinas Virtuais de Energia no Cenário Brasileiro: Controle e Gerenciamento da Demanda

*Relatório submetido à Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito para a aprovação na disciplina
DAS 5511: Projeto de Fim de Curso*

Daniel Gomes Makohin

Florianópolis, Agosto de 2015

Concepção de Usinas Virtuais de Energia no Cenário Brasileiro: Controle e Gerenciamento da Demanda

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina
DAS5511: Projeto de Fim de Curso
e aprovada na sua forma final pelo
Curso de Engenharia de Controle e Automação

Prof. Erlon Cristian Finardi

Assinatura do Orientador

Banca Examinadora:

Cesare Quinteiro Pica
Orientador na Empresa

Erlon Cristian Finardi
Orientador no Curso

Julio Elias Normey Rico
Responsável pela disciplina

Avaliador

Debatedores

Agradecimentos

Gostaria de dedicar estes trabalhos às pessoas que estiveram ao meu lado durante a longa caminhada

de toda a graduação: familiares, amigos, professores e colegas de trabalho, sem os quais não haveria condições de percorrer este caminho. Citar todos seria impossível.

Merecem méritos, também, todos os colegas de trabalho do Centro de Energia Sustentável da Fundação CERTI que me apoiaram e me ajudaram na busca de conhecimento. Principalmente ao chefe, que se revelou líder e amigo, Cesare, que me motivou a seguir em minha carreira profissional sempre olhando não apenas pela remuneração material mas pelo propósito de impulsionar a inovação no país.

Não menor importantes, dedico este trabalho ao professor Rubiara Fernandes do IFSC por me apresentar ao conhecimento fundamental aos trabalhos aqui desenvolvidos, e ao professor Erlon Cristian Finardi da UFSC por me orientar durante este trabalho.

Em especial, e acima de tudo, gostaria de agradecer aos meus pais, Joel e Marcia pelo apoio incondicional e constante, que me deu condições de seguir adiante mesmo nos momentos mais difíceis e moldaram quem sou hoje profissionalmente e pessoalmente. Sem eles, nada disso seria possível.

Resumo

Devido à demanda crescente por energia, novas soluções para questão energética vêm sendo concebidas de forma a mudar a forma com a qual as pessoas interagem com o sistema elétrico. Desde a inserção da geração distribuída na matriz energética nacional, a rede elétrica vem sofrendo transformações que podem ser muito benéficas por um lado, ao reforçar a capacidade de geração disponível, mas que pode se tornar um problema caso adquira uma escala maior do que o que é previsto pelas concessionárias. Somada à geração distribuída, a presença de consumidores com sistemas de automação permite que estes possam interagir de maneira ativa com as distribuidoras, oferecendo serviços e colaborando para o funcionamento estável da rede. De modo a potencializar os ganhos obtidos com a geração distribuída e a inteligência embarcada em consumidores, as Usinas Virtuais de Energia surgiram como uma solução que permite otimizar a operação de pequenas fontes despacháveis, realizar o controle da demanda de maneira a reduzir os custos do sistema de forma geral e ainda prestar serviços ancilares a distribuidoras por meio dos seus recursos distribuídos de energia. De modo a seguir as tendências mundiais de energia, este trabalho, desenvolvido dentro da Fundação CERTI, visa construir soluções que permitam a operação deste tipo de usinas virtuais no Brasil, de forma este trabalho foi executado para iniciar a concepção deste tipo de solução.

Abstract

Due to the arousal in energy demand, new solutions in the power industry are been conceived to help changing the way consumers interact to the electrical network. Since the advent of distributed generation into the national energy supply, the power grid suffers changes, which may help providing energy to consumers, but may also bring problems if the amount of these energy resources grow out of control. In addition, automated and controlled systems embedded in the consumers offer the possibility of interaction between consumers and utility, thus creating new services to help maintain grid stability. In order to increase the gain provided by distributed energy resources, the Virtual Power Plants were conceived as a solution to optimize small energy resources usage and control demand to make the overall system operation cheaper and more efficient. This work, developed inside of CERTI Foundation, aims to build solutions that allow the operation of such power plants in the Brazilian scenery.

Sumário

Agradecimentos.....	5
Resumo	6
Abstract	7
Sumário	8
Simbologia.....	11
Capítulo 1: Introdução	12
1.1: Finalidade das Atividades e Motivação	13
1.2: Organização do Trabalho.....	14
Capítulo 2: Conceito de Usinas Virtuais de Energia	15
2.1: Agregadores.....	16
2.2: Unidades de Geração Distribuída	18
2.2.1: Unidades Despacháveis de Geração	18
2.2.2: Unidades de Geração Intermitente.....	19
2.3: Unidades Despacháveis de Armazenamento	20
2.4: Consumidores Inteligentes.....	21
2.5: Finalidades de Uma VPP	23
2.5.1: Infraestrutura de Medição Avançada	23
2.5.2: Controle da Demanda	24
2.6: Tipos de Usinas Virtuais	27
2.6.1: Usina Virtual Técnica [10].....	27
2.6.2: Usina Virtual Comercial [10]	28
2.7: Cases Mundiais de VPPs.....	28
2.7.1: SchwarmEnergie – LichBlick (Alemanha) [13].....	28
2.7.2: RWE Virtual Power Plant (Alemanha) [14]	29

Capítulo 3: Aspectos Regulatórios e de Mercado Relativos a VPPs	30
3.1: Resolução Normativa 482/2012 [5]	32
3.2: Resolução Normativa 654/2015 [2]	33
3.3: VPPs e o cenário regulatório	34
Capítulo 4: Infraestrutura de Informação e Comunicação de VPPs	36
4.1: Meios Físicos Para Comunicação.....	36
4.1.1: Cabeados	36
4.1.2: Sem Fio	38
4.2: Protocolos de Comunicação	42
4.2.1: Open ADR [10]	42
4.2.2: IEC 61850 [25].....	43
4.3: O Problema da Segurança e Privacidade	43
Capítulo 5: Modelagem e implementação do Sistema de Agendamento de Cargas.....	45
5.1: Modelagem das Cargas	45
5.1.1: Cargas Estáticas	46
5.1.2: Cargas Estáticas Janeladas	47
5.1.3: Cargas Despacháveis	47
5.1.4: Cargas Despacháveis Com Restrição de Operação	47
5.2: Funções de Otimização	48
5.2.1: Priorizando o Custo	48
5.2.2: Priorizando a Redução do PAR [27].....	49
5.3: Outputs para Uso do Agregador	49
5.4: Construção da Ferramenta	49
5.4.1: Planilha de Inputs	50
5.4.2: Agendamento de Cargas em Java	52

Capítulo 6: Resultados dos Testes	61
6.1: Comparação entre Otimização via Minimização de Custos, Redução da Relação Pico e Média	62
6.2: Geração de Resultados para Oito Residências Diferentes	64
6.2.1: Simulação com Tarifa Convencional	65
6.2.2: Minimização de Custo	67
6.2.3: Minimização do PAR	70
Capítulo 7: Conclusões, Perspectivas e Discussões	73
Referências	75

Simbologia

VPP	Virtual Power Plant (Usina Virtual de Energia)
PAR	<i>Peak to Average Ratio</i> (Releção de pico e média)
DEMS	<i>Decentralized Energy Management System</i> (Sistema de gerenciamento de energia descentralizada)
V2G	<i>Vehicle to Grid</i> (veículo para a rede)
GD	Geração Distribuída
AMI	<i>Advanced Metering Infrastructure</i> (Infraestrutura de medição avançada)
DER	<i>Decentralized Energy Resource</i> (recurso descentralizado de energia)
TOU	<i>Peak to average ratio</i> (razão entre pico e média)
RTP	<i>Real time price</i> (precificação em tempo real)
CPP	<i>Critical peak pricing</i> (precificação de pico crítico)
EEX	<i>Energy Exchange</i> (Comercializadora de energia)
PLC	<i>Power Line Communication</i> (comunicação via linha de força)
LAN	<i>Local Area Network</i> (Rede de área local)
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica

Capítulo 1: Introdução

Diante de um cenário energético cada vez mais complexo dada a inserção de geração distribuída e sistemas inteligentes à rede elétrica, somada ao aumento constante da demanda por energia em todos os setores da economia para fins de produção, as detentoras da operação de controle do sistema vêm enfrentando problemas para tornar o exercício deste mais eficiente e adequado à nova realidade do mercado.

Por conta disso, novas tecnologias e abordagens surgiram para combater os impactos de *players* ativos nas áreas de concessão. Algumas destas soluções são advindas dos próprios consumidores, sendo exemplos as unidades de geração distribuída, principalmente fotovoltaica e eólica; unidades de armazenamento estacionário; e microrredes inteligentes, que fazem a gestão interna dos recursos energéticos e das cargas que se alimentam destes.

No entanto, estas soluções, por serem geralmente empregadas pelas unidades de consumo, as vezes sem interação direta com as distribuidoras, fazem prevalecer os interesses das unidades consumidoras sem levar em conta o sistema elétrico interligado como um todo, o que pode gerar problemas desde má qualidade de energia, até aumentos expressivos de custos por conta da introdução de novos picos de demanda em horários de tarifa mais baixa. Para mitigar problemas como estes, uma nova solução, que integra conceitos de redes inteligentes e recursos energéticos distribuídos, surgiu como ponte entre consumidores e distribuidoras: as usinas virtuais de energia elétrica (do inglês *Virtual Power Plant* - VPP) [1].

As VPPs são nada mais que unidades agregadoras que se comunicam, de um lado, diretamente com as fontes e cargas inscritas em seu programa de despacho para, possibilitando pleno conhecimento do que ocorre em sua área de atuação e permitindo despacho (ato de ativar uma fonte de energia para fornecer potência de maneira controlada) de fontes para operar de maneira ótima. Por outro lado se comunicam com os operadores do sistema para fornecer serviços ancilares ou para balancearem sua curva de demanda, diminuindo custos para ambos VPP e concessionária, de maneira similar ao que já é possível através das microrredes, mas de forma escalonada, impactando de maneira mais positiva da rede elétrica. Todas

estas operações são possíveis apenas com o uso extensivo de tecnologias de automação e controle embarcados nos diversos *players* que compõem a usina virtual.

Embora uma realidade em outros países, a regulação nacional ainda não permite a implantação desta abordagem para pequenos recursos distribuídos, no entanto, já há movimentação por parte da ANEEL no sentido de permitir este tipo de operação, mesmo que em primeiro momento, as ações estejam voltadas para grandes consumidores/geradores como é o caso da Resolução 654/2015 [2].

1.1: Finalidade das Atividades e Motivação

As atividades desenvolvidas neste trabalho foram impulsionadas pela oportunidade de negócios em vender soluções de gerenciamento energético para concessionárias que pretendem expandir seu mercado de atuação e buscar alternativas às mudanças do cenário energético frente à inserção de GDs e consumidores inteligentes que é previsto na evolução do sistema elétrico nacional para o universo das redes inteligentes (*Smart Grid*).

Sendo assim, foi requisitada pela Fundação CERTI a criação de modelos de usinas virtuais conceituais, desde o estudo do cenário regulatório e comercial, até a criação de ferramentas básicas que possibilitem a criação de uma solução final, sob medida, para cada caso de venda de projeto. Os estudos desenvolvidos durante este trabalho visam possibilitar a submissão de propostas às concessionárias e clientes interessado para implantar VPPs no curto e médio prazo.

Dado o conhecimento já intrínseco ao Centro de Energia Sustentável da Fundação CERTI e seus parceiros como UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina) e IFSC (Instituto Federal de Santa Catarina) na área de gerenciamento energético, é pertinente a criação de tais propostas de modo a proporcionar a evolução do cenário de energia no país, sendo fundamental a busca por soluções deste tipo que são tendência fora do Brasil.

Visto que já são desenvolvidos produtos para gerenciamento energético do ponto de vista da geração dentro do centro, que podem ser adaptados para os agregadores, do ponto de vista de desenvolvimento, este trabalho teve o objetivo de modelar o comportamento de cargas elétricas de um consumidor e empregar estes

mesmo modelos na criação de uma ferramenta para o controle da demanda a qual atuado do lado do consumo partindo do princípio de agendamento de cargas, sendo que esta terá sua produção continuada mesmo após a conclusão desta atividade. A escolha pelo lado do consumidor se justifica na necessidade de inteligente neste *player* para o melhor funcionamento de soluções de agregação de recursos energéticos da qual consumidores inteligentes fazem parte conforme será mostrado mais adiante.

1.2: Organização do Trabalho

Este trabalho foi organizado da seguinte forma:

O Capítulo 2 trata de estudos realizados para formar o conceito de VPP e contextualizar o leitor ao entender o propósito maior por trás da iniciativa de desenvolver uma ferramenta local de gerenciamento energético.

O Capítulo 3 aborda questões regulatórias e de mercado, as quais são fatores determinantes na implantação de modelos diferentes de atuação no mercado energético nacional, bem como faz menção às possíveis alterações que podem ser feitas para permitir operação das VPPs e de modelos de negócios similares no futuro em médio e longo prazo.

O Capítulo 4 expõe o problema da infraestrutura de comunicação necessária para a atuação de um agregador de usina virtual em grande área, bem como aspectos de segurança e privacidade envolvidas no assunto.

O Capítulo 5 traz a modelagem dos elementos que irão compor a ferramenta de gerenciamento local, dita como necessária no Capítulo 2, além de tratar de maneira sucinta a implementação da ferramenta.

O Capítulo 6 exhibe resultados de testes e simulações com a utilização da ferramenta para gerenciamento de cargas residenciais.

O Capítulo 7, por fim, trata das conclusões e perspectivas para o futuro das usinas virtuais e desenvolvimentos previstos para incrementar a ferramenta no sentido de transformá-la em produto no curto e médio prazo.

Capítulo 2: Conceito de Usinas Virtuais de Energia

As usinas virtuais de energia, VPPs, são uma espécie de junção de diversos elementos interligados ao sistema elétrico formando aglomerados que podem interagir com a rede como se fossem um único *player*, o que é possível por estarem integrados em duas camadas: no nível elétrico pela rede de distribuição; e no nível informacional através de tecnologias da informação e telecomunicações. A Figura 1 exemplifica do que consiste uma VPP onde na camada inferior é possível ver que há diversos recursos distribuídos de energia interligados pela rede elétrica para a troca de energia propriamente dita, enquanto que na camada superior, os sistemas inteligentes de cada um destes elementos se comunicam com uma unidade central de processamento para concentrar dados e despachar comandos. Mais à esquerda é visível a distribuidora, que troca energia virtualmente com toda a VPP ao mesmo tempo que interage com recolhimento de informações e envio de requisições à central da usina virtual para melhoria do sistema como um todo.

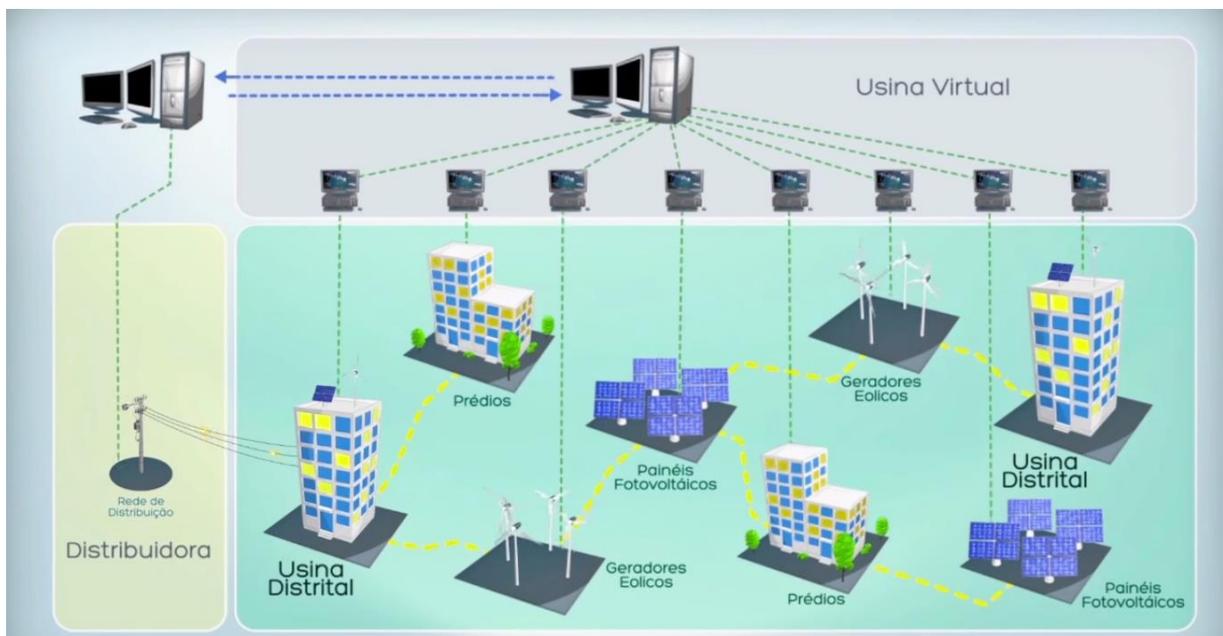


Figura 1 - Esquema simplificado de Usina Virtual de Energia [3]

Uma das características mais marcantes deste tipo de sistema, e que justifica o nome usina virtual, é o fato de que os diversos elementos que compõem a usina não necessitam estar geograficamente próximos, pelo contrário, eles podem estar muito distantes por conta de que o sistema elétrico é todo interligado. Sendo assim, para um exemplo no estado de Santa Catarina, uma usina virtual poderia agrupar consumidores e unidades de geração espalhados por todo o estado, representando-os no mercado de energia. Em termos práticos, uma VPP seria equivalente ao operador nacional do sistema, em escala reduzida, tratando dos seus *players* internos, sendo esses dos mais diversos tipos (entre consumidores e geradores), mas que realiza suas operações baseadas em obtenção de lucros (caso de uma VPP privada) ou estabilidade e eficiência da rede (VPP operada por uma concessionária).

A seguir serão descritos os múltiplos *players* que podem estar presentes ou não em uma VPP: os agregadores que concentram a informação, gerenciam o sistema interno e se comunicam com a concessionária; as unidades despacháveis de geração como geradores a diesel; as unidades de armazenamento; as unidades de geração distribuída intermitentes e consumidores inteligentes. Serão abordados também alguns *cases* que já estão em operação no mundo como forma de atestar a viabilidade destas soluções.

2.1: Agregadores

Um dos principais elementos das VPPs são os agregadores. Eles se comunicam diretamente com os *players* inscritos em seu programa de despacho, conhecendo, portanto, a demanda de cada um destes para um horizonte futuro que pode variar de solução para solução, bem como uma previsão da geração para o caso de fontes intermitentes. Por ter estas valiosas informações, as VPPs podem calcular qual a melhor forma de operar e utilizar os recursos energéticos sob sua tutela.

Para que o agregador possa trabalhar de forma correta são esperados *inputs* que lhe forneçam uma visão fiel do seu campo de atuação, sendo geralmente dados relativos a:

- Previsão de demanda
- Previsão de geração renovável
- Informações climáticas

- Disponibilidade de energia nas fontes despacháveis
- Informações do mercado de energia

Após obter os dados de *input*, os algoritmos do agregador entram em ação e calculam qual é a melhor forma de despachar as unidades de geração e as cargas controláveis, seja do ponto de vista de mercado, estabilidade da rede ou de qualquer estratégia de operação vigente. O despacho pode também ocorrer com base em requisições de serviços ancilares advindos de outro *player* do sistema. Nestes casos, o agregador processa a requisição e calcula o despacho ótimo com base nela demandando um valor para execução do pedido, e caso este seja aceito, o serviço é prestado.

A Figura 2 exemplifica um agregador onde existem entradas de demanda, geração e ofertas do mercado para cálculo da melhor forma de planejar seus recursos energéticos, culminando no despacho de fontes e cargas.

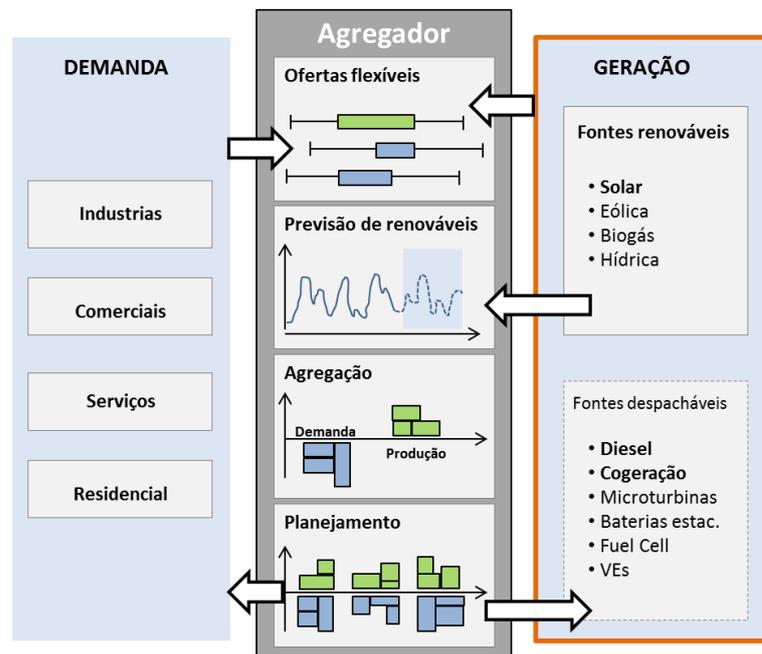


Figura 2 – Operação de um agregador

2.2: Unidades de Geração Distribuída

Unidades de geração distribuída são aquelas que possuem um potencial de geração com potência consideravelmente menor do que plantas de alta capacidade como as centrais hidrelétricas e termelétricas, cuja potência varia desde as centenas de megawatts até a casa de gigawatts. De acordo com a norma IEEE 1547 são consideradas unidades de geração distribuída aquelas que possuem uma potência nominal de até 10 MW [4], por exemplo.

No entanto, dada a redução de custos para fontes com capacidade menor, da ordem dos quilowatts, e a criação de normas que permitem a instalação destas unidades em pequenos edifícios como a Resolução 482/2012 da ANEEL [5] no Brasil, estas pequenas fontes tornam-se grandes candidatas a compor a matriz de geração de uma VPP, já que tendem a ficar extremamente próximas às cargas, aumentando consideravelmente a eficiência do sistema, dado que as perdas de distribuição e transmissão somam cerca de 11,2% (7,5% para distribuição e 4% para a transmissão) [6] para o caso de perdas técnicas calculáveis, para o caso brasileiro em que a matriz de GD não possui ainda representação expressiva.

Dentro da categoria de GD, os elementos de geração podem ser enquadrados em dois tipos específicos: despacháveis e intermitentes. As unidades despacháveis são aquelas que podem ser controladas e possuem energia garantida dentro das especificações técnicas individuais. Já as fontes intermitentes são aquelas que dependem de fatores não controláveis como o clima, como é o caso da geração fotovoltaica e eólica. A seguir serão descritos os dois tipos de GD para o caso de usinas virtuais.

2.2.1: Unidades Despacháveis de Geração

Um dos elementos de grande importância dentro da VPP consiste nas unidades de geração despacháveis. Através delas a VPP ganha flexibilidade para operar sob diversos cenários. Uma das possibilidades é utilizar as próprias fontes para suprir a demanda interna da usina virtual, permitindo inclusive operações em modo ilhado para casos onde os elementos estejam próximos geograficamente. Desta forma, a quantidade de energia importada da rede de distribuição é reduzida, o que é benéfico para a concessionária, principalmente em horários de ponta.

Um ponto importante relacionado a este tipo de geração é a impossibilidade, hoje, de que elas operem em paralelo com a rede, ou seja, caso uma unidade de pequeno porte (da casa de quilowatts) entre em atividade, a unidade consumidora deve se isolar, sendo alimentada puramente pela fonte de GD. Isso se deve ao fato da ausência de controle refinado embarcado na maioria destas fontes frente ao que é exigido pela ANEEL, visto que a adição deste poderia acarretar em maiores custos para a fonte. Isto é recorrente para fontes síncronas ausentes de elementos de eletrônica de potência como é o caso de geradores a diesel. Outras fontes como microturbinas, por possuírem alta rotação do rotor, possuem eletrônica embarcada para transformação do sinal de potência, podendo portanto operar em conjunto com a rede, dado que o controle de tensão e frequência irá seguir a referência imposta pelo sistema de distribuição.

De maneira geral, para o caso em VPPs, as fontes precisam informar ao agregador o custo de geração para determinando momento e a disponibilidade de potência que pode entregar ou está entregando no instante. De forma análoga, elas precisam aceitar sinais de despacho que satisfaçam as condições de operação impostas pelo gerenciador local.

2.2.2: Unidades de Geração Intermitente

Sendo tendência no ambiente de geração distribuída e de redes elétricas inteligentes e sustentáveis, a geração distribuída por meio de fontes renováveis intermitentes, principalmente fotovoltaica e eólica, ganham destaque no cenário das usinas virtuais. Embora não sejam despacháveis, o que reduz sua flexibilidade, elas permitem geração a custos baixos de manutenção e operação sendo cada vez mais viáveis a medida que o custo de instalação diminui.

A geração fotovoltaica merece destaque maior neste aspecto, principalmente em casos onde as fontes estão distribuídas geograficamente. A consequência desta distribuição é a redução dos efeitos de sombreamento por conta de nuvens, o que confere um perfil mais regular de geração.

Assim como as fontes despacháveis, as unidades locais de controle precisam ser capazes de informar a potência gerada para que a VPP possa calcular o modo ótimo de operação. Como o agregador necessita também de saber uma previsão da geração, o controlador local pode enviar a previsão já pronta para o horizonte futuro

de tempo, para desonerar o sistema central de forma que este possa tratar somente da otimização do sistema.

2.3: Unidades Despacháveis de Armazenamento

Outro elemento importante é o armazenamento de energia. Este pode se dar principalmente de duas formas: armazenamento estacionário ou veículos elétricos. Para o primeiro caso, mais comum, bancos de baterias podem armazenar energia em períodos estratégicos para fornecer às cargas internas em momentos de pico, evitando a compra de energia a preços elevados. Para casos onde o agregador deseja manter a estabilidade da rede, pode-se utilizar o armazenamento estacionários para este fim.

Já o armazenamento via veículos elétricos não é comum, mas já é previsto em alguns estudos realizados como em [7]. Neste caso, estudou-se a criação de VPPs que utilizam apenas veículos elétricos plugados em estações de recarga na Alemanha, onde seriam necessários cerca de 1.700 veículos para somar 5 MW de potência de despacho, o mínimo que a VPP deve ter para operar neste país como fonte no sistema de controle da rede da Alemanha. Diversas barreiras freiam o avanço das aplicações V2G, onde os veículos exportam energia para a rede, dentre elas o deterioramento mais veloz das baterias do veículo (dado o elevado número de ciclos por consequência de carga e descarga) e a perda de autonomia do veículo para o caso de o usuário ter de desconectá-lo repentinamente para locomoção. Por estes aspectos, o uso de baterias estacionárias como recurso de armazenamento são mais comuns na literatura.

Atualmente, o uso de armazenamento estacionário ainda não é economicamente viável na maioria dos casos em função dos altos custos para a produção de baterias, porém, a previsão de redução de custos pelo aumento da produção e melhorias tecnológicas, de cerca de US\$1.000,00 em 2007 para US\$400,00 em 2014 e menos de US\$300,00 em 2020 [8] [9] para baterias de ion-lítio, por exemplo, faz com que as soluções de VPPs já incluam este recurso em sua matriz de forma a antecipar o aumento no uso de armazenamento.

2.4: Consumidores Inteligentes

Na outra ponta do sistema elétrico, as cargas inteligentes assumem um papel tão importante quanto a geração na atuação interna da usina virtual: elas podem ser desligadas ou agendadas de acordo com o melhor cenário de operação para o consumidor, VPP e, por consequência, para as concessionárias.

A presença de inteligência embarcada nas cargas na unidade consumidora, seja ela industrial, comercial ou residencial, somada à instrumentação necessária para medição e atuação, constituem um pré-requisito básico para que estas mesmas unidades possam fazer parte da usina virtual. Sem esse conjunto de funcionalidades, os consumidores tornam-se cargas estáticas ou que se alteram puramente de acordo com a vontade do usuário, fazendo com que o perfil de carga perca a capacidade de previsão, dificultando a busca do cenário ótimo. A ausência de controle e automação embarcados pode ser tolerada em alguns casos, mas a consequência disso é uma carga sujeita a dois problemas: incapacidade de reagir as necessidades da VPP para o caso de ausência de sistemas de automação; ou total submissão às requisições externas, para o caso de ausência de um sistema de controle interno que leve em conta as vontades do usuário.

Uma das abordagens para controle de carga para o lado da demanda é o agendamento de cargas. Este agendamento é uma forma de se distribuir as cargas de uma unidade consumidora de acordo com as vontades do usuário e fatores externos como o preço da energia. Ao realizar a distribuição de cargas no tempo, o perfil de demanda futuro pode ser previsto e repassado à VPP, a qual poderá tomar ações de maneira otimizada, beneficiando ambos os lados da operação.

Os algoritmos de agendamento podem levar em consideração diversos fatores como preço da energia para vários momentos do dia, limites de horários para cada tipo de carga específica e até mesmo o custo de espera da carga para casos onde a paralização ou atraso de acionamento da carga traga prejuízo financeiro (principalmente para o caso industrial e comercial) ou diminua o conforto do usuário (no caso residencial). Um exemplo de agendamento é visto na Figura 3, em que fica claro seu papel em equalizar a demanda para fora do horário de pico, onde os custos da energia são maiores.

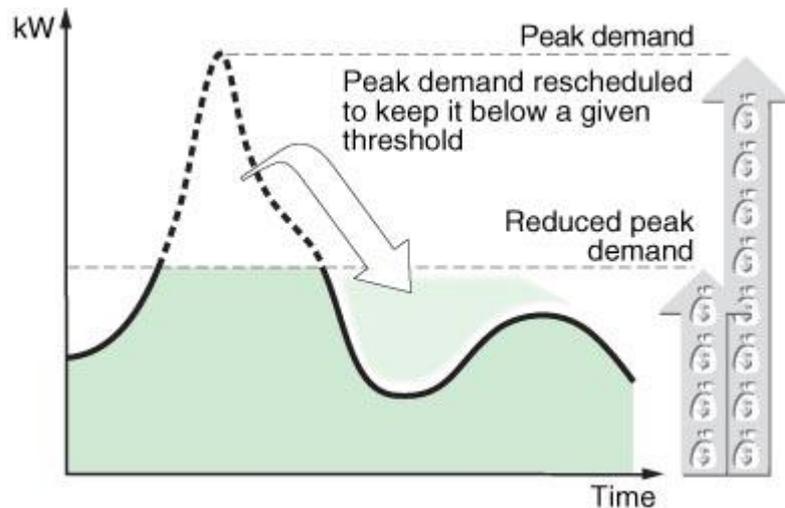


Figura 3 - Exemplo de operação de agendamento

Em um primeiro momento, o agendamento prevê a alocação das cargas em momentos de menor custo da energia (com base em restrições de funcionamento ditas pelo usuário) para que a unidade consumidora opere no menor custo possível. Esta agenda é repassada então para a VPP que pode então acionar suas unidades de geração e armazenamento para operar em seu custo ótimo também. Mais além, é possível também que a VPP deseje executar operações de serviços ancilares requisitados por uma operadora do sistema elétrico. Neste caso ela tem de planejar uma nova operação, que tende a ter custo maior do que a anterior, por conta disso, a diferença de custo, somada a um prêmio, é paga pelo agente que requisitou o serviço. Em efeito cascata, antes de aceitar a requisição, a VPP questiona também a possibilidade de seus consumidores se adequarem ao novo cenário e o custo para tal operação. Ao final do processo, o agregador retém parte do prêmio, e o restante é entregue ao consumidor.

Este tipo de operação de resposta a demanda é muito mais eficiente do que simples mudanças tarifárias durante o dia, já que não necessitam do julgamento humano para serem executadas no instante exato, já que os parâmetros do usuário já estão embarcados e o sistema realiza tudo automaticamente.

Vale ressaltar que os algoritmos de agendamento são executados localmente, de modo a retirar necessidade computacional do agregador, visto que o problema de otimização em uma única unidade consumidora não necessita, na maioria dos casos, de grande poder de processamento.

2.5: Finalidades de Uma VPP

Uma usina virtual, ao agregar diversos recursos energéticos em um só local, adquire a possibilidade de prover vários serviços que conferem flexibilidade e contribuem para uma melhor operação do sistema como um todo. A seguir serão discutidos brevemente algumas das funcionalidades conferidas às VPPs: o uso como provedor de informações; uso da VPP para fins técnicos e comerciais; e aplicações de resposta a demanda.

2.5.1: Infraestrutura de Medição Avançada

Um dos pontos fortes da implantação desta abordagem no sistema elétrico é a necessidade de uma variedade grande de pontos de medição e troca de informações que os *players* devem possuir para que sejam capazes de atuar em conjunto. Com o aumento considerável do nível de informação que a concessionária e a VPP adquirem com estas, o controle mais refinado da rede elétrica torna-se possível, melhorando a qualidade de serviço como um todo.

O uso da estrutura de medição avançada (do inglês *Advanced Metering Infrastructure*, AMI) apresenta, hoje, alguns obstáculos como o excesso de dados que deverá trafegar e ser processado para que seja de fato utilizado. Neste ponto, as usinas virtuais também adquirem um papel importante ao agregar diversos medidores, concentrando e processando parte dos dados, de forma que a concessionária polpa esforços e recursos para tratar deste problema. Por questões comerciais, a quantidade e qualidade da informação transmitida à concessionária pode também ser tratada como um serviço a ser prestado e pode ser incluído no modelo de negócios da usina virtual se pertinente.

A presença de concentradores de dados entre a distribuidora e os diversos medidores inteligentes já é prevista na expansão da infraestrutura de medição avançada, a única diferença para o caso das VPPs reside na adição das funcionalidades desta solução aos concentradores, sendo que neste caso, o concentrador pode não ser um ativo da concessionária.

Além da melhoria de serviços, a integração entre medidores inteligentes, que permitem não só a aferição do consumo a distância, mas também a recepção de sinais de preços variados, permitem que o preço da energia seja dinâmico, o que torna viável

operações de resposta à demanda dos mais diversos tipos, como será apresentado na seção a seguir.

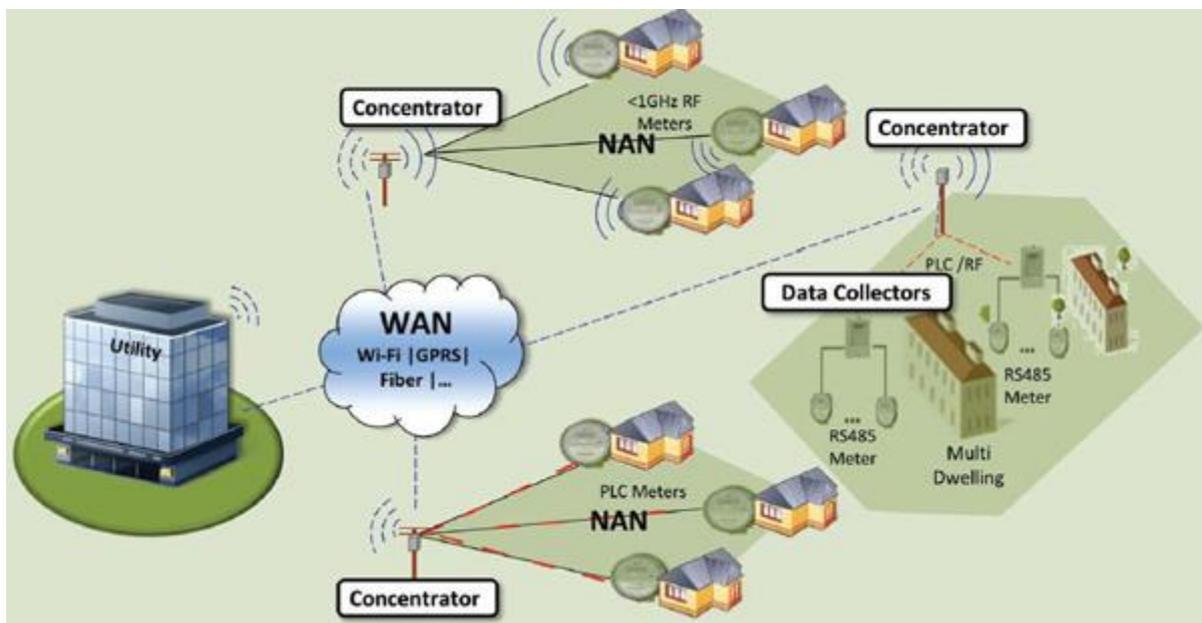


Figura 4 - Esquema prático da estrutura de medição avançada com concentradores

2.5.2: Controle da Demanda

Através do aumento da interoperabilidade proporcionada pela AMI e pelas redes inteligentes, operações mais eficientes de controle da demanda tornam-se viáveis e ganham importância no cenário energético, visto que os recursos de geração são limitados. Embora não sejam consideradas fontes, as cargas podem ser tratadas como DERs visto que na prática, o efeito para a rede elétrica da redução de uma quantidade de carga equivale a adição da mesma quantidade de geração.

No cenário nacional, já existem mecanismos para controle de demanda de forma passiva que é a adoção da tarifa branca, uma tarifa que muda conforme o horário do dia. A ANEEL define os horários de ponta para cada região e com base nisso e nos valores homologados para cobrança, a tarifa adquire valor variável durante o dia. A Figura 5 demonstra a aplicação deste tipo de tarifação, onde o horário de ponta é definido entre 19h e 21h, sendo que há também um horário intermediário com valor de tarifa alto, mas não como para o caso de ponta, bem como um valor baixo durante o restante do dia. Os valores para horário intermediário e ponta são superiores à tarifa convencional enquanto para horários fora da ponta, o custo é menor que a

tarifa concevional. Para o caso do Brasil, em finais de semana e feriados, o consumidor passa a utilizar apenas a tarifa de menor valor.

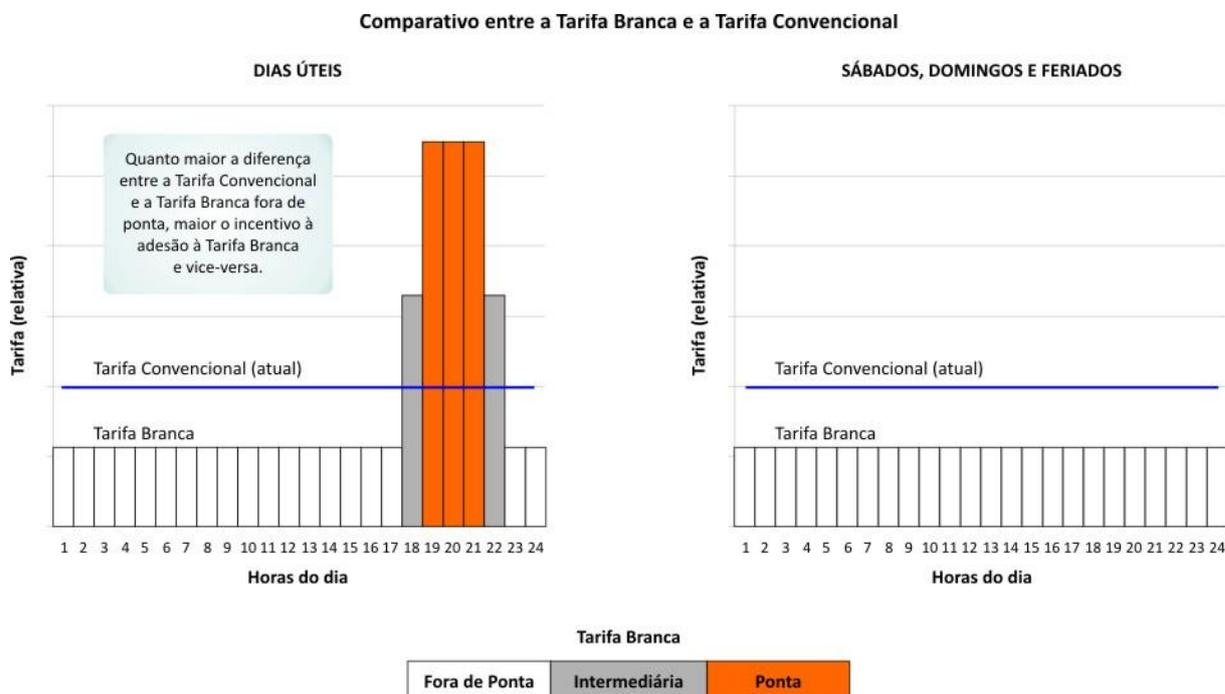


Figura 5 - Exemplificação da tarifa branca

Embora a tarifa branca seja um espelho melhor da curva de demanda em geral, os efeitos deste modelo não surtem grande efeitos ainda, em partes pela pequena diferença de valor da tarifa entre períodos de ponta e fora de ponta, que não torna a economia significativa para uma possível redução de conforto durante horários de pico, mas também pelo fato de que o uso da energia ainda depende exclusivamente da decisão humana no momento, que muitas vezes irá optar pelo conforto à economia de energia. Além disso, a adesão voluntária faz com que consumidores que não estão dispostos a mudarem hábitos de consumo para deslocar os horários de ponta não adotem este modelo, já que para estes casos, haveria um aumento considerável na fatura de energia.

Dado que modelos passivos como o da tarifa branca não trazem grandes efeitos no controle da demanda, outros modelos deste tipo de serviço acabam sendo mais atrativos. Dois, em especial, serão tratados nesta seção, são eles a tarifa dinâmica e o controle remoto de cargas, ou resposta automática à demanda. É importante ressaltar que para uma efetividade maior deste tipo de operação, inteligência embarcada nos consumidores é fundamental.

2.5.2.1: Tarifação Dinâmica

Para o caso da tarifação dinâmica, um agente de nível hierárquico superior ao consumidor, no caso a concessionária ou um agregador, transmitem preços diferentes ao consumidor ao longo do dia dependendo do custo da energia presente no mercado ao longo do dia. Quatro abordagens são as mais comuns neste modelo [10]:

- Horário de uso ou *Time Of Use* (TOU): ocorre uma divisão do dia em blocos de horários, com tarifas diferentes. É similar a tarifa branca.
- Tarifação em tempo real ou *Real Time Pricing* (RTP): o valor da energia varia a cada hora, ou intervalo de minutos, refletindo o custo real da energia no mercado.
- Tarifação do pico crítico ou *Critical Peak Pricing* (CPP): é similar ao TOU, mas ocorre apenas quando há de fato um instante de pico crítico na rede.
- Descontos de pico ou *Peak Time Rebates* (PTRs): neste caso, ocorre o inverso, são oferecidos descontos para a redução de energia durante o horário de pico. Esta abordagem permeia também a resposta automática à demanda.

Com a variação constante de preços, o valor cobrado ao consumidor acaba sendo mais justo por refletir as diversas variações reais que ocorrem durante o dia e permitem uma reeducação do consumo orientada a diminuir o PAR, o que traria um aumento considerável de eficiência e uma redução expressiva de custos ao sistema.

Como foi citado anteriormente, para uma maior efetividade deste modelo, o consumidor deve possuir inteligência embarcada em suas cargas de modo que estas possam responder automaticamente às variações de preço. Uma das formas de resposta automática ao preço reside no agendamento de cargas, que será tratado ao final do trabalho.

2.5.2.2: Resposta Automática à Demanda

Além da mudança de tarifa ao longo do dia, que tende a esperar uma reação do consumidor com relação aos custos da energia, um método ativo também existe para controle da demanda. Neste caso, dispositivos inteligentes presentes nas

unidades consumidoras são capazes de desconectar ou reduzir cargas próprias após receber um sinal.

De modo a não prejudicar a qualidade de serviço ao usuário, esta pequena unidade inteligente deve ser capaz de não só considerar o valor ofertado para a redução da demanda, mas também deve levar em conta parâmetros configurados pelo usuário de modo a preservar o conforto e o bom funcionamento local das cargas, já que algumas destas não podem ser interrompidas. Cabe ao sistema selecionar as cargas mais adequadas para descarte/redução de maneira ótima quanto a custo e conforto.

2.6: Tipos de Usinas Virtuais

2.6.1: Usina Virtual Técnica [10]

Uma usina virtual pode assumir caráter técnico quanto sua principal funcionalidade é ajudar a manter a rede elétrica dentro dos padrões de qualidade exigidos pela regulamentação local. Neste caso, os DERs encontram-se geograficamente próximos uns dos outros, afetando diretamente o sinal de potência de alimentadores locais.

Podem ser atribuídas às usinas virtuais técnicas as seguintes características:

- Aquisição de informações precisas das redes elétricas;
- Gestão de ativos locais;
- Despacho de fontes e cargas para manutenção da qualidade de energia [11];
- Mapeamento, análise e planejamento dos recursos de energia distribuídos;
- Alívio da carga dos alimentadores com conseqüente prolongamento da vida útil destes como é possível concluir com [12];

Usinas virtuais técnicas têm a tendência a ser operadas por distribuidoras para que ajudem a manter a qualidade de energia, mas podem surgir também como prestadoras de serviços de energia, independentes, e motivadas por fins comerciais.

2.6.2: Usina Virtual Comercial [10]

Por outro lado, um grande motivador do surgimento de usinas virtuais, principalmente em cenários turbulentos como é o caso atual do Brasil, é a operação destas sob a ótica comercial. Os altos preços da energia tornam atrativo o uso de fontes despacháveis como geradores a diesel, de forma que a agregação deste tipo de fonte pode viabilizar a operação de uma VPP como um todo.

Além disso, em função da variação do preço da energia durante do dia, uma VPP poderia comercializar seus ativos em momentos oportunos, de modo que, via gerenciamento de suas DERs, a energia fosse comprada fora de ponta e vendida em horário de pico, maximizando os lucros.

Um dos problemas na operação da VPP comercial reside na coordenação de suas múltiplas DERs e na forma como recompensar e distribuir o ganho entre elas, já que o número de players agregador pode facilmente passar das mil unidades, o que pode causar um aumento grande da complexidade dos algoritmos de decisão. Outro ponto tido como problemático em abordagens de VPPs e controle de demanda em geral é o deslocamento de horário de pico. Como os algoritmos de otimização para obtenção do menor custo de operação, vitais em usinas virtuais comerciais, pode levar ao simples deslocamento do horário de pico, ao invés de suavizar a curva de demanda, o que pode ser problemático caso tome escala.

2.7: Cases Mundiais de VPPs

Embora seja uma abordagem relativamente nova, as usinas virtuais já estão em operação em algumas regiões do globo, predominantemente na Alemanha. A seguir serão tratados dois casos de usinas virtuais já em operação.

2.7.1: SchwarmEnergie – LichBlick (Alemanha) [13]

Um exemplo importante de usina virtual já encontra-se em operação na Alemanha sob o nome de *Schwarm Energie*. Este sistema é operado pela empresa Licht Blick, uma provedora de serviços de energia alemã, o qual é responsável por despachar mais de mil unidades de geração de pequeno porte (entre 1,5 e 20 kW) que ajudam a energizar cerca de um milhão de consumidores da empresa.



Figura 6 – Elementos presentes no agregador da LichtBlick

2.7.2: RWE Virtual Power Plant (Alemanha) [14]

Outro caso importante de aplicação das VPPs está em operação na Alemanha pela empresa RWE em parceria com a Siemens. Neste caso, são agregadas diversas unidades de geração distribuída que individualmente não poderiam atuar na *Energy Exchange* (EEX, câmara de comercialização alemã). Ao unir todas as unidades sob um único agregador, toda a energia produzida é comercializada de forma única, o que provê valores financeiros maiores aos detentores das unidades de geração.

Além de permitir a comercialização de energia na EEX proporcionando ganhos financeiros, a presença desta usina virtual permite o fornecimento de energia em situações críticas ao despachar o conjunto de pequenas fontes administradas pelo seu sistema central.

Capítulo 3: Aspectos Regulatórios e de Mercado Relativos a VPPs

Antes de se estudar a situação regulatória que permitiria a atuação de VPPs no Brasil, é necessário entender como funciona o sistema tarifário do país e como são divididos os grupos consumidores e por qual motivos. Basicamente, os consumidores são divididos em dois grupos, os quais possuem subdivisões, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Grupos consumidores de energia no Brasil

Grupo A (tensão superior a 2,3 kV)	Grupo B (tensão abaixo de 2,3 kV)
A1 tensão \geq 230 kV	B1 - Residencial
A2 tensão entre 88 e 138 kV	B1 – Residencial de baixa renda
A3 tensão de 69 kV	B2 – Rural
A3a tensão entre 30 e 44 kV	B3 – Não residencial nem rural
A4 tensão entre 2,3 e 25 kV	B4 – Iluminação pública
AS com cabeamento subterrâneo	

Para os consumidores do grupo B, o formato de tarifação é compreendido apenas entre a tarifa convencional e a tarifa branca de energia, ambas regulamentadas pela ANEEL e ofertadas pelas concessionárias segundo a área de concessão.

Já os consumidores do grupo A, cuja tensão do ponto de acesso é superior a 2,3 kV, têm a origem da sua energia também compulsória, dependendo da concessionária responsável por sua alimentação, mas respeitam um modelo tarifário diferente, como consta na Tabela 2 no exemplo para a AES Eletropaulo. Nela é possível observar que alguns consumidores podem tomar parte da tarifa convencional caso não possuam tensão muito elevada no ponto de acesso (o que caracteriza pontos de demanda mais baixos) desde que seus contratos não sejam referentes a demandas superiores a 300 kW.

Além da tarifa convencional, consumidores do grupo A, para níveis maiores de potência podem aderir as tarifas horo-sazonal (THS) verde ou azul [15]. A THS verde é aplicável aos consumidores com ponto de acesso de tensão inferior a 69 kV e possui um custo fixo de demanda (em R\$/kW), sendo que o consumo também é tarifado (em R\$/kWh), mas com valores diferentes em períodos de ponta e fora de ponta, optam por estas tarifas grandes consumidores com capacidade de modular sua demanda conforme o horário de ponta.

Já a THS azul, tanto a demanda quanto o consumo são tarifados de forma diferente para o período de ponta e fora de ponta. Optam por esta tarifa aqueles consumidores com pouco poder de modulação da demanda. A THS azul é compulsória aos consumidores A3, A2 e A1.

Vale ressaltar, como dito anteriormente, que existem limites diferentes de demanda contratada para adesão em THS azul, verde ou tarifa convencional. Além da tarifação por demanda e consumo, outros itens como fator de potência podem influenciar na tarifa de energia, mas estes casos não serão tratados neste trabalho.

Tabela 2 - Modalidades tarifárias para consumidores do grupo A para o caso da AES Eletropaulo [16] [17]

Subgrupo tarifário	Modalidade Tarifária		
	Convencional	THS-AZUL	THS-VERDE
A1	IMPEDIDO	Compulsório para qualquer valor de demanda contratada	IMPEDIDO
A2			
A3			
A3a	Disponível para contratos inferiores a 300 kW	Disponível para contratos a partir de 30 kW	Disponível para contratos a partir de 30 kW
A4			
AS			

Apesar da existência destes diversos grupos tarifários, existe outra modalidade de consumidor que não está atrelado à distribuidora responsável à área de concessão na qual este está presente: o consumidor livre. O consumidor livre é aquele que pode comprar energia de qualquer fornecedor, desde que este seja agente da Câmara Comercializadora de Energia Elétrica (CCEE) [18] [19]. Como consumidor livre, a unidade tem poder de decisão sobre a energia que compra, tendo potencialmente maior economia e capacidade de previsão orçamentária, o que representa grandes ganhos para consumo muito elevado. Podem ser tornar consumidores livres aqueles que possuem demanda contratada acima de 3 MW e tensão no ponto de conexão

superior a 69 kV (o requisito de tensão se aplica apenas a instalações anteriores a 07/07/1995) ou demanda contratada acima de 0,5 MW, desde que, para este segundo caso, a origem da energia seja oriunda de fontes alternativas (solar, eólica, PCHs, biomassa, etc.).

Além do valor cobrado pela energia, o custo final desta ainda depende de outros valores como a TUSD (tarifa do uso do sistema de distribuição), que pode ser abatida para o caso dos consumidores livres especiais; encargos regionais como ICMS; presença de bandeira vermelha ou amarela; outros encargos, etc.

Como pode-se observar, o mercado de energia no Brasil é fortemente regulado e possui restrições de operação dependendo do nível de potência e tensão no ponto de acesso. Por consequência, novos modelos de operação e novas tecnologias encontram dificuldades de se inserirem no mercado nacional, visto que algumas abordagens podem nem ser permitidas de acordo com a regulação vigente, como é o caso da operação em modo ilhado de microrredes.

Visando combater os entraves da flexibilização do mercado de energia do país e estimular a inserção de novas fontes de energia e geração distribuída, inclusive, a ANEEL vêm lançando novas resoluções normativas que vão adequando pouco a pouco o cenário nacional frente ao que já ocorre fora do país. Duas destas normas serão abordadas neste trabalho por possuírem um grande vínculo com as DERs de pequeno porte (resolução 482/2012) e com os agregadores (resolução 654/2015).

3.1: Resolução Normativa 482/2012 [5]

A resolução normativa 482/2012 da ANEEL trata do sistema de compensação para pequenos consumidores que adotarem fontes de geração renovável em suas unidades cuja potência seja inferior a 100 kW (considerada microgeração) ou entre 100 kW e 1 MW (considerada minigeração). Os consumidores que optarem pela instalação deste tipo de fonte irão fazer parte do sistema de compensação, ou seja, a energia exportada não será paga ao consumidor, mas será considerada um empréstimo de energia que o consumidor dá a concessionária, com validade de 36 meses. Desta forma, o faturamento é dado pela diferença entre o que foi importado e o que foi exportado pela unidade consumidora, somados aos créditos de energia ainda válidos que a unidade possa ter e este resultado, caso negativo deverá ser saldado

pelo representante da unidade consumidora, e caso positivo será considerado crédito para uso no próximo ciclo tarifário.

Embora a publicação desta resolução não resulte em um amplo aumento da flexibilidade para os consumidores de energia no país, ela certamente é significativa pois a concessão da permissão para o fluxo bidirecional de energia é um dos primeiros passos para que este mercado se transforme e evolua para um cenário onde os players possuem maior liberdade para compra e venda de eletricidade, como já ocorreu em países da Europa, onde já é possível em alguns casos, por exemplo, que o consumidor escolha a sua fornecedora de energia elétrica [20].

3.2: Resolução Normativa 654/2015 [2]

Do outro lado da cadeia, a resolução 654 de 2015 (que apenas altera a resolução 570/2013) trata da representação de grandes consumidores por agentes de comercialização de energia, tratada como comercialização varejista de energia elétrica.

Segundo esta resolução, pode ser representante aqueles comercializadores ou geradores que seja integrante da CCEE que possuam um histórico mínimo de operação de ao menos doze meses, salvo pra casos onde a representação se dá a ele mesmo, ao grupo societário do qual possui ao menos 5 %, ou a um complexo industrial ou comercial em alusão a lei 9.074/1995. Adiante, pode ser representado o consumidor que se enquadra no ambiente de comercialização livre (ACL), detentores de concessão, autorização ou registro de geração com capacidade instalada inferior a 50 MW não comprometidos com contratos de comercialização em ambiente regulado (CCEAR), contrato de energia de reserva (CER) ou cotas, detentores de de concessão similar a disposta anteriormente mas com capacidade superior a 50 MW desde que optem pela representação tratada na resolução mediante condições especiais tratadas na resolução.

Na prática, pela liquidação financeira ser feita de forma unificada em nome do representante, a aprovação desta resolução permite que um representante ofereça serviços e fornecimento de energia aos seus representados de forma relativamente independente do mercado regulado, podendo cobrar pelos seus serviços da forma que for mais viável economicamente. Este representante pode ser considerado, em

partes como uma espécie de agregador como o descrito para o caso das VPPs. Sendo assim, esta resolução abre as portas para este tipo de comercialização de energia, desatrelada às concessionárias, a exemplo do que já ocorre fora do país.

3.3: VPPs e o cenário regulatório

Dado a regulação atual do mercado de energia no Brasil, exposta anteriormente, não é possível a operação de VPPs que utilizem DERs de baixa potência para compor uma matriz energética capaz de participar no ACL. No entanto, a regulamentação do serviço de comercializador varejista, somado ao aumento da flexibilidade dada aos pequenos consumidores a partir da permissão de micro e minigeração através do sistema de compensação, começam a mover o cenário nacional para a permissão da comercialização flexível de energia no país, e por consequência as usinas virtuais de energia.

Para que estas tornem-se viáveis do ponto de vista de regulação, seria necessário que unidades de geração e consumo da ordem de quilowatts pudessem ser representadas por um agente agregador que pode, ou não, fazer parte do ACL, dependendo do que for mais viável economicamente (sendo que esta opção tende a ser a mais interessante). Dada esta permissão, não seria uma tarefa difícil representar um somatório maior de 3 MW de demanda contratada para que delimitam a participação neste ambiente de comercialização, principalmente se forem agregados consumidores industriais e comerciais, o que causaria um rompimento fácil desta barreira.

Neste cenário de usina virtuais, caso permitidos pela legislação e regulação, há a tendência de que as concessionárias locais se tornem não mais fornecedoras de energia, mas apenas fornecedoras de serviços de distribuição de energia através de seus ativos como cabos e estrutura de distribuição e transmissão. Este cenário é interessante, dado que iria retirar destas o ônus da compra e venda de energia, que apresenta um risco, principalmente se tratando de contratação de energia em horário de ponta, deixando estes aspectos para ao agregador, que tende a ser uma empresa privada ou afiliada à alguma concessionária, a qual tem como foco apenas a compra e vende de energia de maneira ótima, sem se preocupar com custos de manutenção da rede por exemplo, tornando ambas as empresas em fornecedoras especializadas dos serviços que as cabe.

Além dos aspectos regulatórios, no entanto, outras questões se fazem vitais para tornar possível a inserção das usinas virtuais, inclusive para fazer valer o que é exigido pela regulação no sentido de qualidade de energia e contabilização desta para liquidação financeira. Um dos problemas cruciais reside na infraestrutura de telecomunicações que permita o fluxo intenso de informação necessário para as operações previstas, problema que será tratado no próximo capítulo.

Capítulo 4: Infraestrutura de Informação e Comunicação de VPPs

Uma das questões críticas para o funcionamento de usina virtuais reside nos requisitos de comunicação impostos pelo modelo de operação. A começar pelo meio físico de transmissão, o qual deve suportar o fluxo de dados a velocidade compatíveis com o necessário para a operação se interrupções da VPP, deve-se escolher um canal que seja confiável e tenha uma certa redundância, de modo a minimizar situações onde a VPP fica impotente por conta de falhas de comunicação.

Com relação ao protocolo, os dados devem possuir padrões que ofereçam todas as informações possíveis aos diversos players conforme pacotes de dados são trocados, ao passo que oferece confiabilidade e segurança para evitar problemas externos como monitoramento de padrão de consumo feito por via ilegal, ou até mesmo controle de fontes e cargas por terceiros.

4.1: Meios Físicos Para Comunicação

Em primeiro lugar, serão tratados os meios físicos de comunicação de uma VPP.

4.1.1: Cabeados

São os mais comuns para transmissão de dados, principalmente no meio industrial, e embora estejam perdendo espaço para redes sem fio, ainda constituem um braço importante da comunicação. A seguir serão tratados casos de comunicação com fio.

4.1.1.1: Power Line Communication (PLC)

O uso de PLC (*PowerLine Communication* – comunicação por cabos de energia) é um dos possíveis barramentos de comunicação em uma rede inteligente que já possui utilidade e já vem sendo utilizado para fins nesta área, principalmente em AMI. A transmissão de dados via cabos de energia conta com um espectro de

transmissão na faixa de 1 a 30 MHz e taxa de transmissão de dados na faixa de 1 a 3 Mbps, utilizando cabos da própria rede elétrica para transmissão.

Este tipo de transmissão apresenta a desvantagem de que os cabos feitos para transmitir energia não estarem preparados para acomodação de dados, podendo sofrer interferências na transmissão, o que leva a se pensar em estratégias de filtragem do sinal transmitido por ele [21]. Outra desvantagem reside no fato de que qualquer transformador interno ao sistema serve de barreira para transmissão de dados, pois o mesmo serve como barreira para altas frequências. Apesar disso, o fato de os cabos já estarem todos instalados é uma vantagem do sistema, além de haverem vários aparelhos de conversão já disponíveis.



Figura 7 – Rede PLC

4.1.1.2: Fibra Ótica

A fibra ótica, que utiliza do princípio de transmissão de informação por pulsos de luz é tida como uma das mais eficientes formas de transmissão de dados por longas distancias existentes na atualidade. Ele é composto por cabos de fibra ótica, conectores óticos, transdutores óticos e circuitos de modulação e demodulação.

Esta tecnologia, apresenta largura de banda, com frequências das casa de 10^{16} Hz, baixa atenuação por longas distâncias, equipamentos de peso e tamanho reduzidos, entre outros fatores. No entanto, os altos custos de implantação tornam inviável o uso para integração de todos elementos de uma usina virtual. Por outro lado,

a comunicação entre agregadores e os concentradores de dados (que coletam dados dos players locais) é uma candidata a receber integração via fibra ótica, principalmente devido ao grande fluxo de dados a altas velocidades que é um requisito neste caso.

4.1.2: Sem Fio

Apesar do fluxo de dados via cabo ser algo consolidado, cada vez mais tecnologias sem fio vêm tomando lugar, já que são mais práticas e podem inclusive representar economia financeira com cabos em alguns casos.

Por se tratarem de sistemas com ampla distribuição geográfica, as VPPs tendem a priorizar abordagens sem fio de modo a facilitar a implantação ao acabar com a necessidade de passagem de cabos e outros elementos. A seguir serão tratadas algumas das tecnologias sem fio candidatas a utilização em usinas virtuais.

4.1.2.1: Wi-Fi

A padronização IEEE 802.11 para redes sem fio é outra solução em comunicação que pode ser utilizada na implantação de redes inteligentes, oferecendo uma comunicação robusta e de alta velocidade para as aplicações necessárias. Possui velocidades que podem variar de 1 a 54Mbps, e um alcance de até cerca de 100 metros, além de uma frequência de banda de 2.4 e 5.8MHz.

Por já ser uma tecnologia consolidada, e por ser uma forma com total compatibilidade com padrão ethernet [22], a tecnologia comumente chamada de WiFi é uma das tecnologias mais cotadas para os serviços sem fio da rede, até mesmo pelo fato de a norma IEC 61850 (ver seção 6.2.1) propor o padrão ethernet para comunicação na rede inteligente.

Em usinas virtuais, a conexão por WiFi pode servir a vários propósitos, desde proteção e monitoramento até comando das unidades e comunicação com periféricos do sistema. Outro uso desta tecnologia neste contexto reside na oferta de redundância para o sistema de comunicação o que pode oferecer mais confiabilidade ao sistema.

Os problemas enfrentados pela rede LAN sem fio, no entanto existem, e se encontram principalmente na diminuição da velocidade de transmissão na presença de interferência eletromagnética pela presença de equipamentos de alta tensão, além

de não haver muitos equipamentos industriais com WiFi integrado, apesar da difusão da tecnologia no meio doméstico e comercial, o que poderia exigir gastos com dispositivos para transmissão.

4.1.2.2: ZigBee

Cotado como principal tecnologia para redes inteligentes residenciais pela *U.S. National Institute for Standards and Technology* [23], o padrão *ZigBee* para comunicação sem fio, desenvolvida pela *ZigBee Alliance*, é um dos padrões que se destacam entre as tendências para integração sem fio, seguindo o padrão 802.15

Este padrão utiliza banda de 2.4GHz, além da faixa de 868 a 915MHz, possui uma taxa de transmissão de até 250kbps e um alcance que varia de 10 a 100 metros [22]. Suporta também topologias de rede em árvore, estrela ou *mesh*. Além disso, o baixo custo de implantação e a ampla gama de produtos já compatíveis fazem do padrão *ZigBee* uma ótima alternativa para aplicações simples e até mesmo para sistemas de controle de carga, monitoramento em tempo real e suporte para medição avançada. Porém, este padrão, por não utilizar uma frequência licenciada, pode sofrer com influência de interferência de outros aparelhos que possam utilizar a mesma frequência de banda, além de ser pouco robusto com relação a ambientes com elevado nível de interferência. Outro desafio na implantação do padrão *ZigBee* reside no fato de possuir pouca memória, capacidade de processamento e suprimento limitado de energia interna, tudo isso devido ao seu tamanho reduzido.

Seu uso reside em casos de transmissão de dados para armazenamentos, sensoriamento e atuação. Em geral, serve para aplicações que trabalham com envio de pequenos pacotes de dados, com transmissões de baixa velocidade, pois possui otimização para este tipo de envio como se pode observar em [24]. Seu uso é focado no local de consumo, ou seja, para controle local de cargas e não tende a ser expandido para comunicação entre consumidores inteligentes e agregadores.



Figura 8 – Receptor ZigBee

4.1.2.3: RF MESH

É um tipo flexível de rede sem fio a qual consiste de um grupo de nós que propaga retransmissão de dados em uma área. A grande flexibilidade se dá pelo fato de ela ser capaz de praticar *self-healing*, ou seja, ao desaparecer um nó, outro pode assumir seu papel para retransmitir informações. É uma forte candidata para integração entre concentradores de dados e os players locais dado que a estrutura flexível permite a adição de múltiplos nós. No entanto, como a velocidade de dados é limitada, ela é preterida quando se trata de níveis hierárquicos superiores na estrutura de VPPs.

4.1.2.4: WiMAX

A tecnologia WiMAX (*Worldwideinter-operability for Microwave Access*) é outro padrão de comunicação sem fio que apresenta características que o tornam útil ao uso em redes inteligentes.

Esta tecnologia (a qual e parte do padrão IEEE 802.16), tida como parte da quarta geração de comunicação sem fio possui comunicação com taxa de transferência de dados que podem alcançar até 70Mbps, com alcance de 50 quilômetros. As frequências previstas na norma para a comunicação são as de 2.3, 2.5, 3.5 e 5.8GHz, sendo que as três primeiras são bandas licenciadas [22].

Os principais usos da tecnologia para redes inteligentes encontram-se em AMI (infraestrutura de medição avançada), como concentrador de informações; precificação em tempo real também para medição avançada; e na detecção de falhas da rede.

Na Austrália, já existe uma implantação de sistemas WiMAX para integração com medidores inteligentes pela empresa SP AusNet [23].

Embora o sistema proposto com esta tecnologia seja muito bom, em função da área de cobertura e taxa de transmissão de dados, ela possui alguns problemas, como o fato de as frequências de 2.3, 2.5 e 3.5GHz serem licenciadas, logo, para utilizá-las, é necessário envolvimento de terceiros, com pagamento de taxas. Além disso, a utilização destas frequências através de terceiros implica no compartilhamento da rede com a telefonia móvel, o que pode ser prejudicial para funções que demandem mais confiabilidade e velocidade. Por fim, é uma tecnologia mais própria para microrredes ambientadas em espaço amplo, com distância para comunicação da ordem de quilômetros.

O uso deste tipo de tecnologia em VPPs auxiliaria a leitura de informações fornecidas pelos múltiplos players distribuídos geograficamente, bem como seria um canal ideal para comandos dado que a taxa de transferência de dados oferecida pelo WiMAX é muito alta.

4.1.2.5: Telefonia Móvel

Consiste do uso da tecnologia 2G, 2.5G, 3G e 4G para transmissão dos dados de uma unidade para algum centralizador. Em alguns aspectos a tecnologia WiMAX também se enquadra nesta seção em função de ser uma tecnologia 4G, e caso seja utilizada em alguma frequência de banda já licenciada.

É uma tecnologia que trabalha com o espectro de 824-894MHz ou de 1.9GHz em geral, com taxa de transmissão de dados de cerca de 60 a 240kbps [22].

É de ampla utilização no monitoramento de dispositivos do sistema, como sensores e DERs. Necessita de modems para telefonia móvel, sendo que alguns deles possuem comunicação ethernet, o que possibilita também a transformação de dispositivos cabeados em dispositivos *wireless*, sendo que estes produtos já se encontram em grande disponibilidade no mercado por empresas como MOXA, Sixnet, Welotec e Sierrawireless. Seu uso para estas finalidades se justifica ainda mais para supervisão remota de sistemas que se encontram muito afastados do local de onde a supervisão é feita, desde que haja sinal de telefonia móvel. Também apresenta

vantagens por não apresentar custo de implantação e manutenção da rede, ao passo que, no entanto, depende de taxas oferecidas pelos proprietários da rede.

Dentre outras vantagens presentes para este sistema há o suporte presente para segurança de dados para o acesso remoto, ampla cobertura de sinal, instalação rápida dos equipamentos. Contra a tecnologia pesam a falta de robustez para funções com tempo mais crítico pela diminuição do desempenho em função do compartilhamento com outros usuários da telefonia móvel, bem como a possível instabilidade do sinal em situações adversas de clima [23], o que poderia ser crítico principalmente em situações onde serviços ancilares são requisitados para execução em um curto espaço de tempo.

4.2: Protocolos de Comunicação

Com relação aos protocolos de comunicação, não há hoje um padrão adotado, muito menos iniciativas para criar protocolos que se tornem o padrão da indústria das usinas virtuais. A princípio, o ideal é um protocolo de comunicação baseado e serviços, ou seja, requisições específicas implicam em retorno específico de informações ou execução específica de uma atividade. Como na arquitetura baseada em serviços, um player seria um *subscriber* de uma entidade hierarquicamente superior, e deve responder a requisições deste sempre que elas ocorrerem.

Possíveis candidatos, criados para outros propósitos, podem se estendidos e adaptados para o uso em VPPs. Vale ressaltar que protocolos como o Modbus não oferecem a complexidade necessária para a operação das VPPs, dados que a quantidade de dados necessária não cabe a modelos tão simples de estruturação de dados. Dois destes protocolos serão tratados nesta seção.

4.2.1: Open ADR [10]

O primeiro candidato, o openADR surgiu como uma iniciativa para popularizar serviços de resposta a demanda nos Estados Unidos. No modelo praticado pelo openADR, existem basicamente três players: a distribuidora, que gerencia as operações de reposta a demanda; os servidores de automação, que retransmitem as informações das concessionárias aos consumidores; e por fim os participantes, os quais podem optarem por fazer parte do programa de resposta a demanda.

Embora este protocolo já seja orientado para a operação de resposta a demanda de maneira distribuída, ele precisaria ser estendido para contemplar outras informações e serviços presentes no cenário de usinas virtuais. Além disso, pelas informações trafegarem via web, questões de segurança devem ser estudadas mais a fundo para evitar ataques maliciosos no futuro.

4.2.2: IEC 61850 [25]

Outro candidato, que é a norma IEC 61850, consiste de uma norma para comunicação em subestações a qual possui basicamente mecanismos de comunicações feitos para operação nestes ambientes e que tem sido estendido para operação em sistema com presença de geração distribuída.

Em primeiro lugar, a estruturação dos dados, padronizado pela norma, poderia facilitar na forma como as informações são construídas e mantidas no sistema. Aliando este padrão à comunicação por meio do protocolo MMS (*manufacturing message specification*), que requisita informações ou oferece comandos específicos atrelados ao tipo de equipamento ao qual essa requisição se dirige, pode oferecer um grande potencial de integração entre os diversos players do sistema.

O ponto positivo desta norma reside na padronização de dados, por outro lado, a alta complexidade para que os equipamentos estejam de acordo com todos os aspectos da norma pode ser um empecilho para a sua inserção, visto que é padronizado até mesmo o formato de configuração de cada equipamento. Outro benefício é a possibilidade de aplicação do protocolo por meio de diversos canais de comunicação, entre eles o ethernet.

4.3: O Problema da Segurança e Privacidade

Por fim, um dos problemas chave das usinas virtuais reside na presença perigo constante na proteção de sistemas que utilizam ampla troca de informações. Para o caso das VPPs, um player mal intencionado ou externo pode se aproveitar das informações ilegalmente de maneira a conseguir informações privilegiadas sobre um determinado grupo de pessoas, ou até mesmo ganhar acesso a consumidores e

unidades geradoras, ferindo preceitos de segurança e privacidade que devem ser conservados para que o modelo possa se inserir no mercado. Em escala maior, um ataque poderia proporcionar inclusive o desligamento de plantas industriais inscritas no programa de resposta a demanda, ou até mesmo causar danos a rede elétrica por conta de despacho incorreto de fontes e recursos distribuídos de energia.

Capítulo 5: Modelagem e implementação do Sistema de Agendamento de Cargas

O principal objetivo desta seção é demonstrar o processo de produção da ferramenta base para agendamento de cargas em consumidores residenciais, o qual poderá ser estendido para outros tipos de consumidores no futuro. A razão do foco nos consumidores residenciais se dá pelo fato de que o tipo de cargas que estes possuem têm comportamento semelhante a outros tipos de cargas encontrados em diversos outros players como indústrias ou no setor comercial, apenas em escala reduzida, de forma que a ferramenta pode ser estendida conforme é desenvolvida.

Neste capítulo será apresentada a modelagem utilizada para fundamentar a criação da ferramenta de controle da demanda baseada em preços e parâmetros do usuário. Cada modelo criado aqui foi embarcado na ferramenta de modo a possibilitar o gerenciamento da demanda pelo lado do consumidor. Sem seguida, será tratado o desenvolvimento da ferramenta de controle de demanda que utiliza os modelo em questão.

5.1: Modelagem das Cargas

Para a modelagem das cargas e formulação da base do problema de otimização foram utilizados modelos de cargas presentes em [26]. O modelo de carga que será utilizado em primeiro momento é composto por um conjunto de pontos no tempo para cada carga de cada usuário inscrito no sistema de usina virtual. Este modelo é dado pela seguinte equação matemática:

$$\sum_{k=\alpha_{n,a}}^{\beta_{n,a}} x_{n,a}^k = E_{n,a} \quad (1)$$

Onde $x_{n,a}^k$ representa a energia consumida de uma aplicação a de um usuário n em um instante k , $\alpha_{n,a}$ representa o tempo inicial e $\beta_{n,a}$ representa o tempo final de uso da carga a , e $E_{n,a}$ representa o total de energia gasto pela carga no período. O

período k pertence a K , que é um vetor de pontos no tempo para os quais deseja-se realizar o cálculo do gerenciamento energético.

Além da equação básica que rege a carga, existem restrições que o gerenciador deve levar em conta para alocar as cargas no tempo de forma a obter o menor custo possível. A princípio considera-se as seguintes restrições:

$$x_{n,a}^k = 0, \forall k \in K \setminus K_{n,a} \quad (2)$$

$$\gamma_{n,a}^{\min} \leq x_{n,a}^k \leq \gamma_{n,a}^{\max} \quad (3)$$

A primeira restrição se traduz que a energia gasta pela carga é igual a zero em todos instantes fora do intervalo da equação 1. Já a segunda restrição representa os valores mínimos e máximos de energia que a carga pode assumir durante os momentos no qual ela encontra-se ligada.

Somado a essas duas restrições, pode-se criar restrições para as variáveis de instante α e β , o que segregará as cargas do sistema em agendáveis e não-agendáveis. As cargas agendáveis são aquelas que o gerenciador pode deslocar no tempo para satisfazer alguma condição de menor custo (e.g. máquina de lavar roupas, máquina de lavar louça, sistemas de irrigação) enquanto que cargas não agendáveis são aquelas que não podem ser deslocadas (e.g. ar condicionado, o qual está atrelado ao desejo do usuário).

A seguir serão tratados os casos específicos onde o modelo acima descrito foi trabalhado para servir propósitos específicos de cada tipo de carga abordada no problema.

5.1.1: Cargas Estáticas

As cargas estáticas são aquelas que permanecem ligadas durante todo tempo em condições normais, onde não há comando de resposta automática à demanda por exemplo.

Para que esta carga seja permanente, as restrições foram tratadas da seguinte forma:

- α é igual ao primeiro passo de iteração;

- β é igual ao último passo de iteração;
- $x_{n,a}^k$ é igual a $\gamma_{n,a}^{max}$ para todo passo de iteração.

Estas restrições garantem que a potência da carga estática em questão seja a mesma para todos os passos de iteração para a operação de agendamento.

5.1.2: Cargas Estáticas Janeladas

As cargas estáticas janeladas são muito similares às estáticas, dado que permanecem ligadas durante todo o tempo em sua potência máxima, a diferença reside no fato de que esta possui período delimitados de atuação de forma que α e β são definidos a priori. Para todos os passos fora dos limites estipulados, a potência é zero.

5.1.3: Cargas Despacháveis

Estas são as cargas mais maleáveis do sistema modelado. Para estas cargas, o algoritmo de agendamento pode, dentro dos limites de tempo de operação e potência, espalhar o consumo da melhor maneira possível. No entanto, para que o modelo não opte sempre pela potência mínima, uma nova restrição deve ser criada quanto à quantidade de energia que a carga irá gastar no período de um dia, de forma que o programa distribua corretamente o consumo ao longo do dia.

Para a aplicação do modelo para este tipo de carga, as restrições são dadas da seguinte forma:

- $E_{n,a}$ é predeterminado.
- α é igual ao início do período onde a carga pode ser utilizada;
- β é igual ao final do período onde a carga pode ser utilizada;
- $x_{n,a}^k$ é menor que $\gamma_{n,a}^{max}$ para todo intervalo entre α e β ;
- $x_{n,a}^k$ é maior que $\gamma_{n,a}^{min}$ para todo intervalo entre α e β ;
- $x_{n,a}^k$ é igual a zero para todo período fora de α e β .

5.1.4: Cargas Despacháveis Com Restrição de Operação

Dentre as cargas despacháveis, existem algumas que não possuem flexibilidade como as cargas despacháveis convencionais e possuem restrições

quanto o tempo de operação ou a potência. Serão tratados dois casos para cargas despacháveis com restrições de operação: as discretas e as não interrompíveis.

5.1.4.1: Com Potência Discreta

As cargas despacháveis com potência discreta são aquelas que quando operam, deve estar obrigatoriamente na potência máxima, ou seja, podem apenas estar ligadas ou desligadas.

Para modelar este tipo de carga é utilizado um vetor auxiliar inteiro compreendido entre 0 e 1 para que sejam utilizados como tomada de decisão de forma que quando este está em 1, a potência é máxima, enquanto que para o estado zero, a potência é zero.

5.2: Funções de Otimização

5.2.1: Priorizando o Custo

O primeiro caso estudado é decorrente da obtenção do custo ótimo de operação da unidade consumidora. Por conta disso, a prioridade é diminuir o custo de operação com base na energia das cargas e no custo da energia repassada pelo agregador da VPP. Como a funcionalidade do gerenciador é minimizar os custos, para ele vale a seguinte equação:

$$\text{minimize } \sum_{k \in K} C_k * \left(\sum_{a \in A_n} x_{n,a}^k \right) \quad (4)$$

Na Equação 4, C_k é o custo da energia para cada instante de tempo e A_n representa o conjunto de cargas do usuário n . O resultado desta operação de minimização é uma matriz dos valores de consumo de energia de cada carga para cada instante de tempo que representa o menor custo do sistema. Como o gerenciador conhece as restrições de cada carga em particular, este pode enviar ao gerenciador superior (VPP) não somente sua curva de programação de carga, mas também as curvas de carga que representam o que é possível descartar, deslocar ou reagendar para que a VPP possa realizar operações de resposta a demanda conforme necessário. O custo deste tipo de operação pode ser calculado com base na diferença

de custo da operação otimizada versus a operação requisitada somada a um fator de interesse oferecido pela concessionária, por exemplo.

5.2.2: Priorizando a Redução do PAR [27]

A otimização que prioriza a redução da relação entre pico e média de energia trabalha de forma diferente e não leva em função o custo, mas busca reduzir o valor da potência de pico R , desde que esta seja maior que o somatório das potências de cada carga em cada iteração. A redução é, portanto, regida pelas equações:

$$\begin{aligned} & \text{minimize } R \mid \\ & \left(\sum_{a \in A_n} x_{n,a}^k \right) \leq R \quad \forall k \in K \end{aligned} \tag{5}$$

5.3: Outputs para Uso do Agregador

De forma que o agregador possa utilizar as informações calculadas pelos gerenciadores locais, estes precisam ser capazes de sintetizar todos os valores de potência por iteração em um único vetor. Desta forma, para cada iteração é feita a agregação do tipo:

$$\sum_{k=a}^A x_k \tag{6}$$

De forma que A , é o total de cargas da rede interna, a , representa a primeira carga e x_k é a potência de cada carga em questão. Com isso é possível montar o vetor que informa o agregador do agendamento das cargas.

5.4: Construção da Ferramenta

Para construir a ferramenta foi necessário escolher uma linguagem de programação para transcrição dos modelos. Para este caso, foi escolhida a linguagem Java, por diversos aspectos, entre eles: a vasta disponibilidade de bibliotecas; a proximidade entre linguagem de modelagem e o paradigma de orientação a objetos;

e a possibilidade da ferramenta ter sua versão final futura programada também em Java, o que pouparia esforços.

Além da programação da ferramenta de otimização, foi necessária a criação de um modelo de residência a ser interpretado pela ferramenta para execução do agendamento. Este modelo foi criado no excel em primeira versão. Se seguir será mostrado o desenvolvimento do modelo da residência e da ferramenta de otimização.

5.4.1: Planilha de Inputs

A planilha de inputs é o local onde são adicionadas as cargas de cada residência para que a ferramenta principal saiba quais as condições para criar o agendamento. Além das cargas de cada residência, a planilha contém vetores com exemplos de tarifa para modo convencional e tarifa branca para concessionárias como Celesc, Cemig e EDP Bandeirante.

5.4.1.1: Cargas

Como visto na seção de modelos, cada tipo de carga necessita de informações específicas para que a carga seja válida e possa desempenhar seu papel. Como o programa de agendamento trata o período total de agendamento como um dia, com discretização de 15 minutos, são necessárias decisões de energia para cada carga em cada uma das 96 iterações que correspondem ao período descrito. Sendo assim, os inputs não são tratados como potência, mas como energia, já que correspondem a um período de 15 minutos sob potência constante. De forma análoga, janelas para despacho não podem exceder 96, sendo esta a última iteração em questão.

O caso mais simples é o das cargas estáticas, para estes, a potência permanece constante e por conta disso, a energia consumida por iteração é sempre a mesma. A Figura 9 exemplifica uma carga estática.

name	camera1
energy/iteration	0,0005

Figura 9 - Dados para cargas estáticas

Já as cargas estáticas janeladas, permanece com potência constante durante uma janela de tempo dentro do horizonte de agendamento. Por conta disso, parâmetros alpha e beta (para início e término da janela, respectivamente), também

devem ser adicionados. Os valores de alpha e beta são relativos a iteração e não ao horário propriamente dito. Dentro da planilha há uma relação entre iteração e horário do dia.

name	lampRoom1
power/iteration	0,007
alpha	22
beta	28

Figura 10 - Dados para cargas estáticas janeladas

Outro tipo de carga, as despacháveis, são mais flexíveis e podem ser alocadas em qualquer momento da janela definida por alpha e beta, como no caso anterior. Para elas, a energia consumida é zero para todo momento fora do intervalo, sendo que dentro deste, ela assume valores máximos e mínimos de energia por iteração que o algoritmo de otimização deverá levar em conta para tomada de decisão. Além da janela e dos limites de energia por iteração, o somatório da energia dentro da janela escolhida deve ser igual ao consumo de energia previsto para o tipo de carga, que é inerente a cada tipo de carga.

name	EV1
min energy / iteration	0,01
max energy / iteration	1,5
daily energy	4
alpha	69
beta	95

Figura 11 - Dados para cargas despacháveis

Outro tipo de carga despachável são as cargas despacháveis discretas, ou seja, cuja potência é total ou zero, mesmo dentro da janela. Neste caso, deve-se fornecer apenas a janela e a energia nominal por iteração. Caso a energia diária não seja divisível pela quantidade de energia por iteração, o programa não encontrará solução pelo fato de a carga ser discreta.

name	clothes washer
energy / iteration	0,25
daily energy	1,5
alpha	71
beta	86

Figura 12 - Dados para cargas despacháveis discretas

5.4.1.2: Vetor de Peças

Outra referência necessária ao programa é o vetor de preços que será utilizado para cálculo do custo da operação diária, e que é levada em conta na decisão para o problema de otimização quando este utiliza a minimização do custo de operação.

Para o caso da tarifa convencional, um simples vetor com 96 posições com o valor em R\$/kWh é suficiente. No entanto, para o caso da tarifa branca, existem três horas do dia cuja tarifa assume valor de ponta, duas horas com valor intermediários e o restante possui tarifa para preço fora de ponta. Sendo assim, o vetor deve ser montado de acordo com o valor da energia de cada concessionária levando nem conta o horário de ponta desta.

Para compor o valor da tarifa, nestes casos, foram utilizados o custo de energia, somado a TUSD e ao valor do ICMS. Como os resultados esperados em primeiro momento remetem apenas a testes iniciais da ferramenta base, outros encargos não foram utilizados. Os valores para composição da tarifa foram todos para bandeira verde e podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3 - Tarifas utilizadas no teste da ferramenta base. Valores em R\$/kWh [28]

Tipo de tarifa	Celesc
Convencional	R\$ 0,4298
TB – fora de ponta	R\$ 0,2995
TB - intermediária	R\$ 0,4070
TB – hora de ponta	R\$ 0,6582

5.4.2: Agendamento de Cargas em Java

Nesta seção será descrita a implementação do problema de otimização em Java em conjunto com outros códigos necessários para importação de dados da planilha de inputs. Mesmo se tratando apenas da base do produto final a ser desenvolvido, as cargas e os modelos foram programados de forma a serem utilizados durante toda a implantação da solução final, de forma que esta base pode ser

expandida conforme seja necessário, tendo funcionalidades agregadas, por exemplo, ou se tornando uma ferramenta que calcula o melhor agendamento ciclicamente.

A ferramenta desenvolvida, até o estágio em questão, trata de criar um cenário ótimo de agendamento para um dia inteiro, dividido em intervalos de 24 horas, a iniciar pela meia noite na iteração 1 (ou 0 dentro do tratamento de vetores em Java), ela executa essa operação para o número de residências escolhido pelo usuário. Desta forma, o ciclo de vida do programa é dado pelo fluxograma dado pela Figura 13.

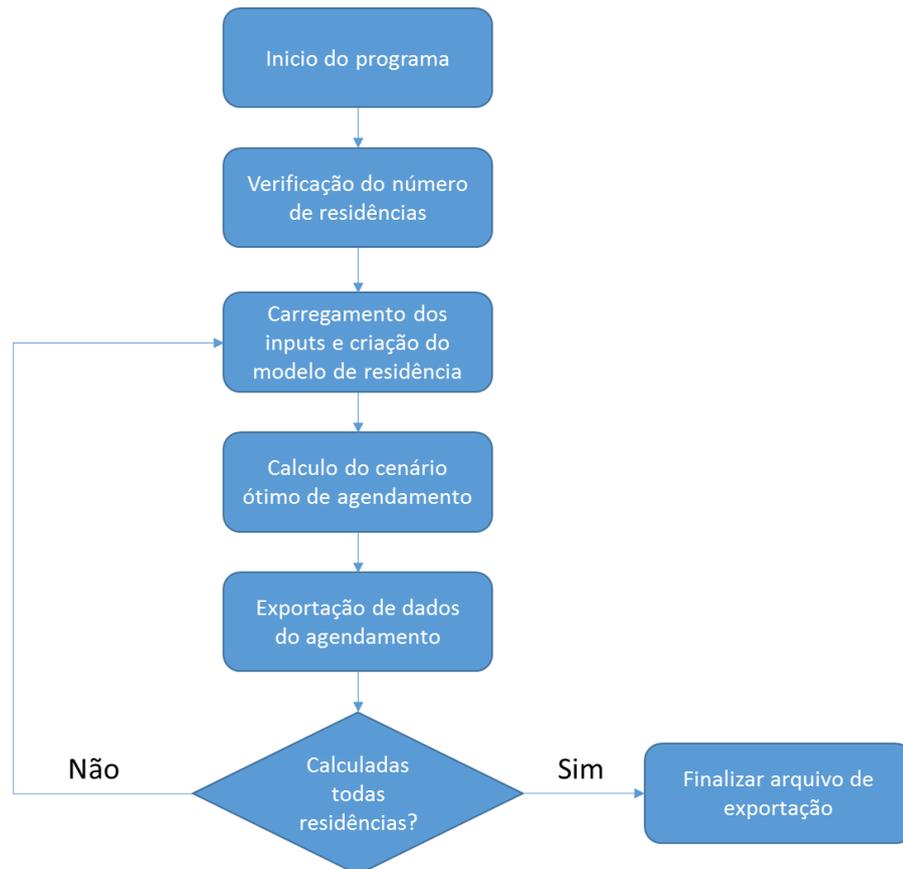


Figura 13 - Ciclo de vida do programa de otimização

5.4.2.1: Uso do OptimJ

Para o cálculo do cenário ótimo de operação, existem várias bibliotecas disponíveis que podem ser utilizadas neste tipo de problema, como o *solver* proprietário Gurobi, e os *solvers* de código aberto como o GLPK e o Ip_solve. A diferença de desempenho entre estes foge do escopo deste trabalho e não será tratado aqui, mas em primeiro momento optou-se excluir o Gurobi pelo fato deste não poder ser embarcado em uma solução final sem a adição de um custo elevado para aquisição de licença, que deve ser adquirida para cada dispositivo onde a biblioteca é

utilizada (e.g. para o caso da solução final ser embarcada em medidores inteligentes, cada medidor teria o custo da biblioteca adicionado a ele). Como o problema de otimização presente neste trabalho consiste de um problema relativamente simples de *mixed-integer linear program*, não se fez necessidade de buscar *solvers* além destes citados, visto que tanto o GLPK quanto o lp_solver são capazes de resolver este problema.

Como a linguagem adotada por cada *solver* é diferente, haveriam grandes dificuldades para migrar de um *solver* para outro para o caso onde sua troca fosse vista como necessária. Por conta disso, foi adotada uma solução que permite a programação do problema de otimização de uma só forma, independente do *solver* utilizado: a ferramenta Ateji OptimJ, de forma que caso deseje-se utilizar outro, é necessário alterar apenas a biblioteca de otimização utilizada pelo OptimJ.

Esta ferramenta estende a linguagem de programação Java, de forma que utiliza a orientação a objetos para definir o problema, em linguagem de alto nível, que facilita a implementação do problema. Além códigos escritos em OptimJ podem ser incorporados ou usar outros códigos em Java, também ajudando na simplificação do problema de programação. Por fim, a presença de um plugin que incorpora a ferramenta a IDE Eclipse selou a escolha pelo uso desta solução.

Um exemplo simples, retirado do próprio manual da ferramenta disponibilizado pela Ateji, pode ser visto na Figura 14, onde busca-se colorir um mapa com países vizinhos com no máximo quatro cores. Nele é visível que a estrutura do problema se assemelha muito a uma classe em Java. Em primeiro lugar, vê-se que o exemplo utiliza o lp_solve para resolver seu problema. Em segundo lugar, é setado um valor fixo e são declaradas as variáveis de decisão. Logo abaixo são declaradas restrições, que no caso se referem ao impedimento de cores iguais para países vizinhos. O método main se encarrega então de estanciar o modelo e dá a ordem para solução, imprimindo os resultados. Este exemplo não possui uma função de otimização, mas caso possuísse, esta ficaria abaixo das restrições na construção do problema.

```

package examples;

// a simple model for the map-coloring problem
public model SimpleColoring solver lpsolve
{
    // maximum number of colors
    int nbColors = 4;

    // decision variables hold the color of each country
    var int belgium in 1 .. nbColors;
    var int denmark in 1 .. nbColors;
    var int germany in 1 .. nbColors;

    // neighbouring countries must have a different color
    constraints {
        belgium != germany;
        germany != denmark;
    }

    // a main entry point to test our model
    public static void main(String[] args)
    {
        // instanciate the model
        SimpleColoring m = new SimpleColoring();

        // solve it
        m.extract();
        m.solve();

        // print solutions
        System.out.println("Belgium: " + m.value(m.belgium));
        System.out.println("Denmark: " + m.value(m.denmark));
        System.out.println("Germany: " + m.value(m.germany));
    }
}

```

First OptimJ program : a simple model for the map coloring problem.

Figura 14 - Exemplo de problema de otimização na ferramenta OptimJ [29]

5.4.2.2: Cargas

Para facilitar a implementação e para tornar a ferramenta expansível, foram criadas classes para cada tipo de carga existente nas residências, sendo elas os tipos de cargas demonstrados nas seções anteriores:

- Estáticas;
- Estáticas janeladas;
- Despacháveis;
- Despacháveis discretas;
- Despacháveis não interrompíveis.

Como todas estas classes possuem alguns elementos em comum, foi criada uma interface que exige que cada classe de cada tipo de carga possua ao menos um

nome, uma potência máxima e mínima de operação, bem como uma quantidade de energia que é utilizada no dia.

Para as cargas mais simples, a estática e a estática janelada, as classes simplesmente implementam a interface *Load*, tendo as potências máxima e mínima como iguais. A classe das cargas estáticas janeladas possui herança das classe das cargas estáticas, adicionando um único diferencial que é são os limites de tempo de operação.

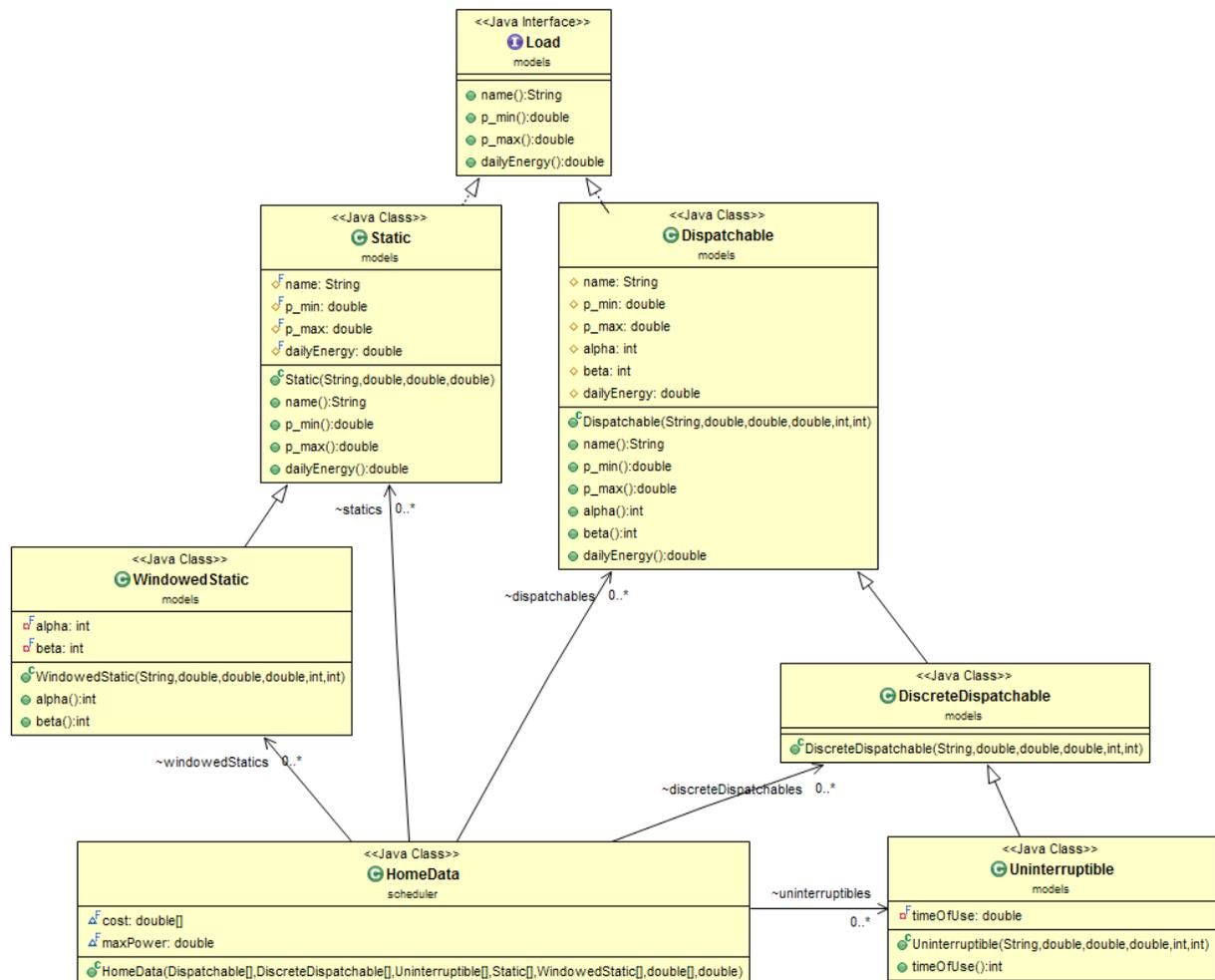


Figura 15 - Diagrama de classes para as cargas

Por outro lado, as cargas despacháveis implementam a interface *Load* já adicionando sua janela de tempo e permitindo diferença entre a potência mínima e a máxima para a operação. Apesar das classes para cargas discretas e para as cargas não interrompíveis não acrescentarem muitos atributos e métodos (somente a classe não interrompível possui uma variável referente ao tempo de uso a mais), a adoção de novas classes para estes tipos de cargas se faz importante dado que o problema

de otimização irá tratar cada classe como um tipo diferente de carga a ter restrições a elas aplicadas, o que será explicado mais adiante.

Além das cargas, há também uma classe chamada *HomeData* que nada mais é que uma reunião de diversas cargas diferentes, possuindo também uma potência máxima de entrada e um vetor de custos referente a energia, que estão relacionados a concessionária escolhida. Pelo diagrama da Figura 15, pode ser observado, além da relação entre as classes das cargas, que um objeto de residência pode possuir zero ou muitas instancias de um tipo de carga, ou seja, ou seja, o problema se tornou escalável, e independente do número de cargas em questão. Nesta mesma figura, observa-se que foi prevista uma classe para cargas não interrompíveis, ou seja, que não podem ser desligadas uma vez que iniciam a operação até que concluem o ciclo de uso, a qual deverá ser feita na continuação desse trabalho.

5.4.2.3: Problema de otimização

O primeiro ponto para definição do problema é a escolha de quais serão as variáveis de decisão e os parâmetros fixos. Neste tipo de problema, ficam fixos o vetor de custos ao longo do dia e o número de iterações em um dia. No caso da decisão, foram escolhidos vetores para a energia das cargas para cada iteração, salvo o caso das cargas discretas onde o vetor de decisão é inteiro entre 0 e 1 e é posteriormente multiplicado pela energia, e as cargas não interrompíveis, que seguem a mesma linha somada a três vetores auxiliares. Para o caso de otimização via redução da relação pico e média, há também uma variável única que deverá ser minimizada.

```
final double[] energyCost = data.cost;
int iterations = energyCost.length;

// decision variables
final var double[][Dispatchable] loadType1[Dispatchable] f : data.dispatchables[iterations];
final var int[][DiscreteDispatchable] loadType2[DiscreteDispatchable] f : data.discreteDispatchables[iterations] in 0 .. 1;
final var double[][Static] loadType3[Static] f : data.statics[iterations];
final var double[][WindowedStatic] loadType4[WindowedStatic] f : data.windowedStatics[iterations];
final var int[][Uninterruptible] loadType5[Uninterruptible] f : data.uninterruptibles[iterations] in 0 .. 1;
final var int[][Uninterruptible] type5aux1[Uninterruptible] f : data.uninterruptibles[iterations] in 0 .. 1;
final var int[][Uninterruptible] type5aux2[Uninterruptible] f : data.uninterruptibles[iterations] in 0 .. 1;
final var int[][Uninterruptible] type5aux3[Uninterruptible] f : data.uninterruptibles[iterations] in 0 .. 1;
final var double R;
```

Figura 16 - Variáveis de fixas e de decisão do problema

Como foi explicado anteriormente, aqui se faz entender o porquê de algumas classes de cargas, mesmo possuindo atributos similares, terem sido separados em classes diferentes: essa abordagem permite que o problema de otimização trate-as

de forma diferente, aplicando restrições específicas, e para o caso de não haver cargas do tipo, as restrições não são levadas em conta.

5.4.2.4: Programação das Restrições

Um dos pontos mais importantes do problema é a programação das restrições. Elas definem como deverá ser tomada a decisão com base nos modelos levantados na seção 5.1.:

A primeira restrição tratada se refere a carga estática. Neste caso, há uma única restrição que limita a energia para todas iterações igual ao que foi carregado para a carga em questão.

```
//static loads constraints
forall (int i : 0 .. (iterations-1)) {forall (Static L : data.statics){loadType3[L][i] == L.p_max();}}
```

Figura 17 – Restrição para as cargas estáticas

Para as cargas estáticas janeladas, três restrições são utilizadas, sendo duas para igualar a zero a energia gasta em uma iteração, e a outra para tornar a energia em uma iteração igual ao que foi atribuído a carga.

```
//windowed static loads constraints
forall(WindowedStatic L : data.windowedStatics) {
  forall (int i : 0 .. (L.alpha()-2)) {loadType4[L][i] == 0;}
  forall (int i : (L.alpha()-1) .. (L.beta()-1)) {loadType4[L][i] == L.p_max();}
  forall (int i : L.beta() .. (iterations - 1)) {loadType4[L][i] == 0;}
}
```

Figura 18 - Conjunto de restrições para as cargas estáticas janeladas

As cargas despacháveis, por sua vez, mantêm a flexibilidade de ter uma energia que varia entre um máximo e um mínimo dentro da janela escolhida, desde que o somatório da energia seja igual ao que foi atribuído ao tipo de carga ao final do dia. Na Figura 19 as cinco restrições para este tipo de carga pode ser vistas.

```
//dispatchable loads constraints
forall(Dispatchable L : data.dispatchables) {
  forall (int i : 0 .. (L.alpha()-2)) {loadType1[L][i] == 0;}
  forall (int i : (L.alpha()-1) .. (L.beta()-1)) {loadType1[L][i] >= L.p_min();}
  forall (int i : (L.alpha()-1) .. (L.beta()-1)) {loadType1[L][i] <= L.p_max();}
  forall (int i : L.beta() .. (iterations - 1)) {loadType1[L][i] == 0;}
  sum {int i : iterations} {loadType1[L][i]} == L.dailyEnergy();
}
```

Figura 19 - Conjunto de restrições para cargas despacháveis

As cargas discretas em muito se assemelham a modelagem da carga despachável, no entanto, por se tratar de um vetor inteiro que deve assumir valor zero ou um, a restrição impõe apenas que dentro da janela o valor deva ser maior ou igual a zero, ou, menor ou igual a um. Ao fim, para computar o total da energia no dia deve levar em conta o somatório do vetor preenchido, multiplicado pela energia gasta em uma iteração para o caso de a carga estar ligada, conforme pode ser visto na Figura 20.

```
//discrete dispatchable loads constraints
forall(DiscreteDispatchable L : data.discreteDispatchables) {
  forall (int i : 0 .. (L.alpha()-2)) {loadType2[L][i] == 0;}
  forall (int i : (L.alpha()-1) .. (L.beta()-1)) {loadType2[L][i] >= 0;}
  forall (int i : (L.alpha()-1) .. (L.beta()-1)) {loadType2[L][i] <= 1;}
  forall (int i : L.beta() .. (iterations - 1)) {loadType2[L][i] == 0;}
  sum {int i : iterations} {loadType2[L][i] * L.p_max()} == L.dailyEnergy();
}
```

Figura 20 - Conjunto de restrições para as cargas despacháveis estáticas

Além das restrições de cada carga, como uma residência ou consumidor possui um limite de entrada de potência em função da bitola do fio no ponto de conexão, uma última restrição trata de impedir que a soma da energia de cada iteração exceda o máximo aceitável para que não ocorra, no caso real, a abertura de algum disjuntor da unidade. A Figura 21 demonstra essa restrição que é composta do somatório da energia de cada carga, para cada iteração, a qual deve ser menor ou igual ao máximo valor de energia permitido para uma iteração.

```
//restriction for max power for each iteration
forall (int i : (iterations-1)) {(sum {Dispatchable D : data.dispatchables} {loadType1[D][i]}
+ sum {DiscreteDispatchable D : data.discreteDispatchables} {loadType2[D][i] * D.p_max()}
+ sum {Static D : data.statics} {loadType3[D][i]}
+ sum {WindowedStatic D : data.windowedStatics} {loadType4[D][i]}
+ sum {Uninterruptible D : data.uninterruptibles} {loadType5[D][i] * D.p_max()}) <= data.maxPower;}
```

Figura 21 - Restrição que rege o limite residencial de potência

Para completar o problema que deve ser resolvido pela ferramenta, é necessária uma função a ser minimizada. Para o caso da otimização para obtenção do menor custo, deve ser minimizado o custo total ao longo do dia, determinado pelo custo da energia na iteração multiplicado pela soma da energia de cada carga para a iteração em questão, implementada na Figura 22. Para teste de cenários onde não se deseja obter o menor custo, basta utilizar um vetor de custo com valores iguais para todas iterações, o que fará o algoritmo alocar as cargas o mais breve possível.

```

// objective function for cost reduction
minimize
sum {int i : iterations} {energyCost[i] * (sum {Dispatchable D : data.dispatchables} {loadType1[D][i]}
+ sum {DiscreteDispatchable D : data.discreteDispatchables} {loadType2[D][i] * D.p_max()})
+ sum {Static D : data.statics} {loadType3[D][i]}
+ sum {WindowedStatic D : data.windowedStatics} {loadType4[D][i]}
+ sum {Uninterruptible D : data.uninterruptibles} {loadType5[D][i] * D.p_max()});

```

Figura 22 - Função de otimização para custo mínimo

A segunda função de otimização utilizada busca reduzir a diferença entre a o pico de energia consumida em uma iteração e a média de energia consumida. Seguindo o desenvolvimento da seção 5.2.2:, foi criada uma restrição para que o valor de uma variável R seja maior ou igual o somatório da energia das cargas para cada iteração, e posteriormente esta mesma variável R foi sujeita a minimização, conforme mostram asse Figura 23 e Figura 24.

```

//Restriction for the value of R
forall (int i : (iterations-1)) {(sum {Dispatchable D : data.dispatchables} {loadType1[D][i]}
+ sum {DiscreteDispatchable D : data.discreteDispatchables} {loadType2[D][i] * D.p_max()})
+ sum {Static D : data.statics} {loadType3[D][i]}
+ sum {WindowedStatic D : data.windowedStatics} {loadType4[D][i]}
+ sum {Uninterruptible D : data.uninterruptibles} {loadType5[D][i] * D.p_max()}) <= R;}

```

Figura 23 - Restrição necessária para otimização do PAR

```

// objective function for PAR reduction
minimize R;

```

Figura 24 -Minimização da variável R, para otimização via PAR

Capítulo 6: Resultados dos Testes

Para a execução dos testes, foi necessário criar modelos de residência com uma combinação de eletrodomésticos plausíveis de existirem em uma residência comum. A combinação foi arbitrária e independente de estudos de perfil de carga, sendo que os eletrodomésticos tiveram seu consumo conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Tipos de cargas considerados nos testes

Tipo de carga	Consumo máximo por hora	Tipo considerado
Luminária	0,028 kWh	Estática janelada
Lâmpada (WC)	0,012 kWh	Estática janelada
Lavadora de louça	1,2 kWh	Despachável discreta
Secadora de roupas	1 kWh	Despachável discreta
Lavadora de roupas	0,6 kWh	Despachável discreta
Forno elétrico	2,4 kWh	Estática janelada
Fogão elétrico	1,5 kWh	Estática janelada
Veículo elétrico (nível 1)	1.5 kWh	Despachável
Ar condicionado (inverter)	1 kWh	Despachável
Chuveiro elétrico	6 kWh	Despachável discreta

As luminárias, forno e fogão elétricos foram consideradas estáticas janeladas pois são ligadas durante a presença de pessoas nos cômodos, ou coincidem com o momento de refeição as famílias.

O consumo total de uma residência conforme mostrados nos exemplos a seguir não demonstra a média de consumo residencial brasileira, dado que a grande maioria destas não possuem a quantidade de eletrodomésticos citados no trabalho, e muito menos utilizam todos os equipamentos todos os dias. No entanto, para demonstrar

melhor o funcionamento da ferramenta, foi considerado o pior caso de presença de cargas.

6.1: Comparação entre Otimização via Minimização de Custos, Redução da Relação Pico e Média.

Como teste inicial, foi feita uma comparação entre os dois formatos de otimização previstos, via redução do PAR e do custo. O cenário levou em conta um conjunto pequeno de cargas estáticas e estáticas janeladas, somadas a uma única carga discreta com ampla janela de ação, além de uma carga despachável extremamente flexível.

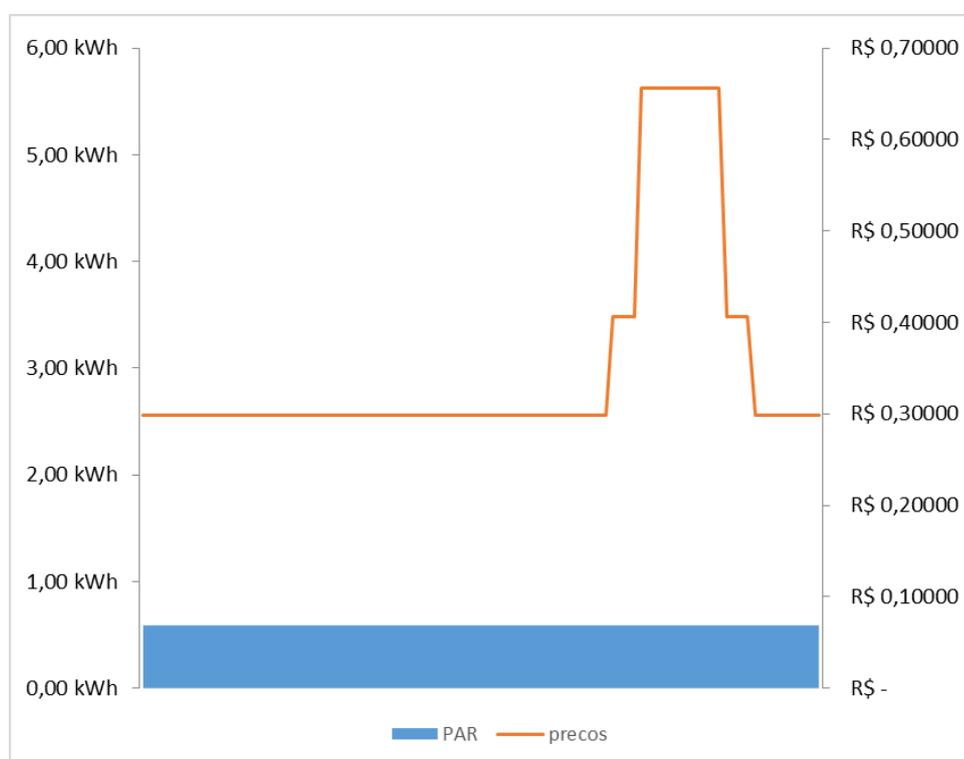


Figura 25 – Exemplo de otimização pela redução do PAR

Conforme pode ser visto nas Figuras Figura 25 e Figura 26, quando o algoritmo prioriza a redução entre pico e média, a carga flexível (tanto quanto a janela temporal quanto a potência máxima e mínima) preenchem as lacunas e o resultado é um perfil completamente dentro da média. Já para situações de minimização do custo, o algoritmo alocou todas as cargas flexíveis em um local de baixa tarifa, agrupadas o mais cedo possível, já que esta condição satisfaz as restrições impostas.

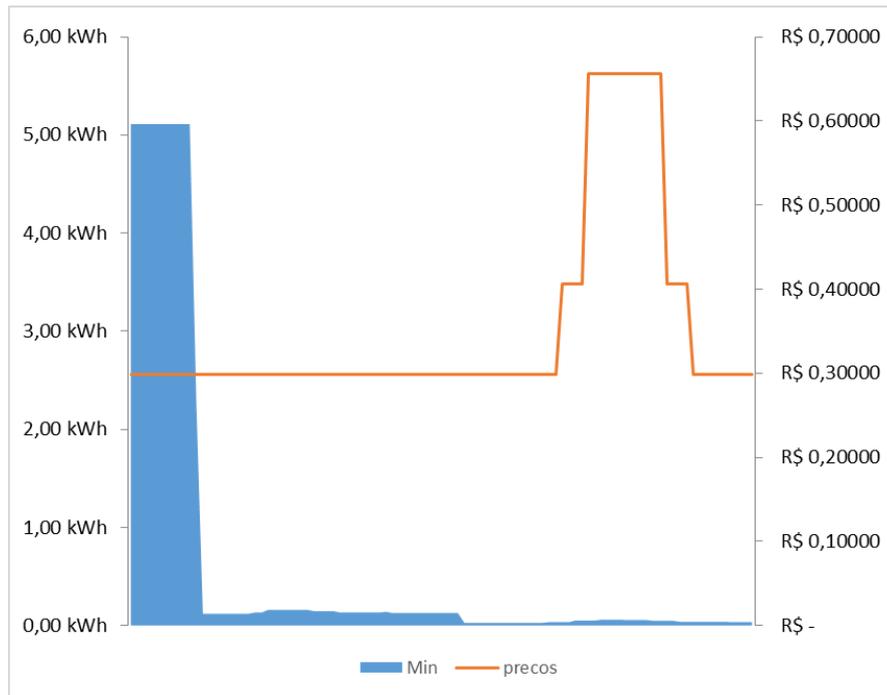


Figura 26 - Exemplo de otimização pela minimização do custo

Foi ainda testada uma combinação dos dois métodos, para redução do custo ao passo que busca também a redução da relação pico e média, o resultado, visto na Figura 27, mostra que foi obtida uma média constante, salvo no período de custo alto da energia, onde permaneceram ligadas apenas as cargas estáticas.

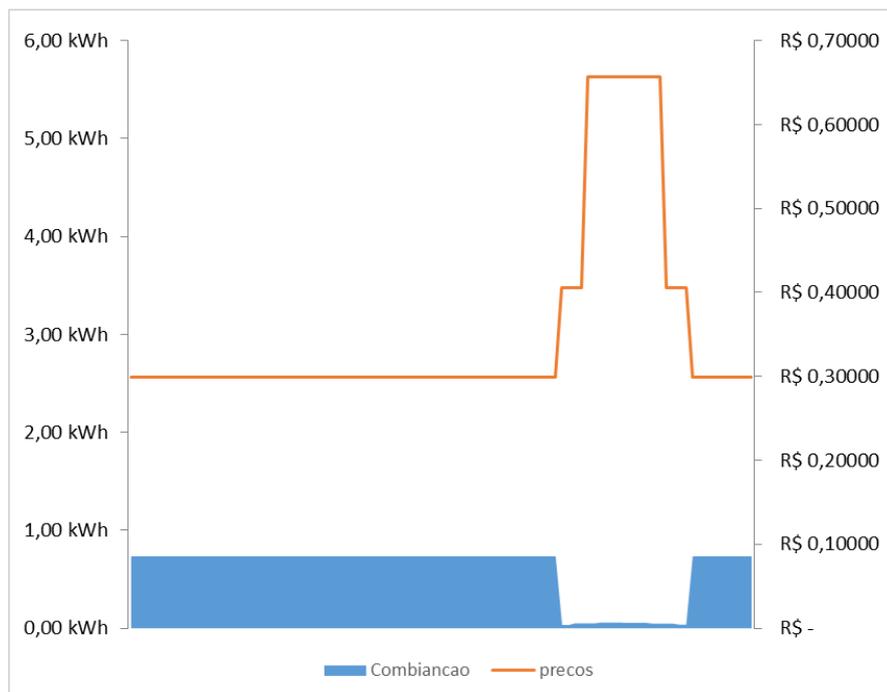


Figura 27 – Combinação das abordagens de otimização

6.2: Geração de Resultados para Oito Residências Diferentes

Para a realização dos testes de comparação, foram utilizadas oito residências, com as tarifas para a Celesc Distribuição S.A. Nestes cenários, todas as residências possuem uma base de cargas similar além de cargas de grande consumo como secadora de roupas e aparelhos de ar condicionado. Para tornar os resultados mais expressivos, foi considerado um dia onde todas as cargas foram acionadas. As características para as residências consideradas foram:

Tabela 5 - Tipos de residencias utilizadas para teste

Residencia	kwh/dia	perfil	Obs
1	43,93 kWh	Rígido, consumo em hora de ponta	Com veículo e chuveiro elétricos
2	43,93 kWh	Rígido, consumo fora de hora de ponta	Com veículo e chuveiro elétricos
3	43,93 kWh	Intermediário	Com veículo e chuveiro elétricos
4	31,67 kWh	Intermediário	Sem veículo e chuveiro elétricos
5	43,93 kWh	Ultra flexível	Com veículo e chuveiro elétricos
6	31,67 kWh	Ultra flexível	Sem veículo e chuveiro elétricos
7	31,67 kWh	Rígido, consumo em hora de ponta	Sem veículo e chuveiro elétricos
8	31,67 kWh	Rígido, consumo fora de hora de ponta	Sem veículo e chuveiro elétricos

Para a geração de resultados mais amplos, foram utilizadas diversas residências diferentes, com cargas similares àquelas citadas na Tabela 4, mas distribuídas de forma diferente, com restrições diferentes. Estas cargas são então

carregadas de maneira automática pela ferramenta e têm seus modos ótimos de operação calculados, emulando um cálculo distribuído do cenário ótimo de operação. Ao fim é gerado um arquivo .csv com o consumo de cada residência para cada iteração. A Figura 28 mostra a rotina automática para obtenção dos resultados a partir de planilhas individuais para as residências.

```
public static void main(String[] args) throws IOException{
    //load lpsolver
    com.ateji.optimj.lpsolverlib.LibraryLoader.load();

    //prepare the power output file
    FileWriter writer = new FileWriter("c:\\test.csv");

    //create residence models for N residences, for a specific utility, with a maximum household power
    final double[] vppPower = new double[96];
    HomeData[] residences = new HomeData[8];
    for (int i : residences.length){
        residences[i] = createResidence("residence"+Integer.toString(i+1)+".xls", "celesc", 1.5);
        ScheduleModel model1 = new ScheduleModel(residences[i]);

        System.out.println("<=====> CALCULATING BEST SCENARIO <=====>");
        model1.extract();
        if(model1.solve()){
            System.out.println("Solução encontrada");
            System.out.println("objective value " + model1.objValue());
            printModelPowerArray(model1, writer, residences[i]);
        }
        else{
            System.out.println("Solução não encontrada");
        }
        writer.append("\n");
        model1.dispose();
    }

    writer.flush();
    writer.close();
}
```

Figura 28 - Rotina utilizada para gerar resultados para oito residências

Os resultados gerados serão expostos nas seções seguintes

6.2.1: Simulação com Tarifa Convencional

Para a tarifa convencional, que não se altera ao longo do dia, foi utilizado a função de otimização via minimização do custo. No entanto, como o custo da energia não varia ao longo do dia, os resultados foram apenas agrupamentos das cargas conforme as restrições permitiram, como demonstram as Figuras Figura 29 e Figura 30.

Neste cenário, o custo diário para as residências sem chuveiro elétrico foi de R\$ 18,84, frente a um custo de R\$ 13,58 para residências sem este tipo de carga.

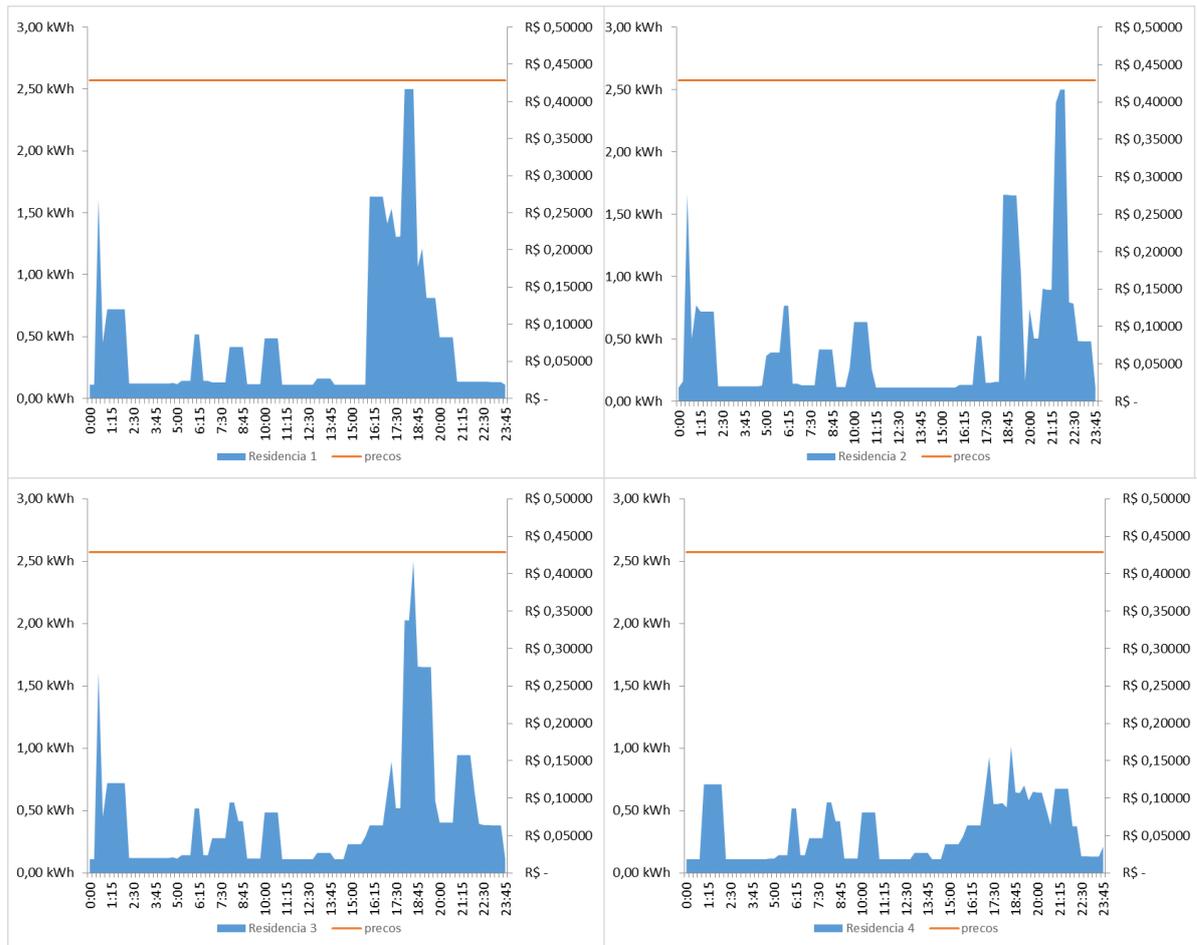


Figura 29 – Consumo das residências ao longo de um dia para os casos 1, 2, 3 e 4

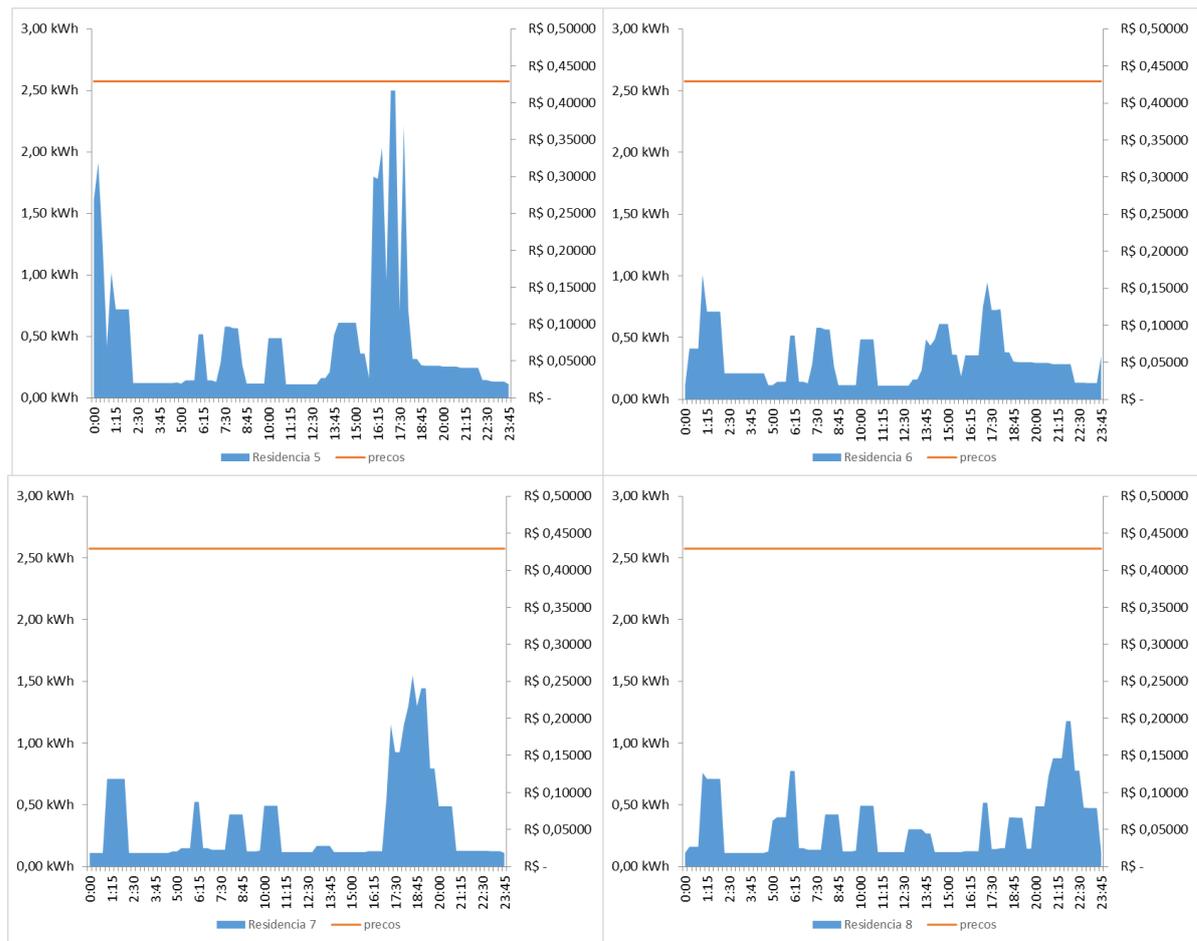


Figura 30 - Consumo das residências ao longo de um dia para os casos 5, 6, 7 e 8

6.2.2: Minimização de Custo

Em seguida, foi simulado um cenário para redução de custos com base na tarifa branca praticada pela Celesc Distribuição, conforme presente na Tabela 3. Em função do custo variante da energia ao longo do dia, o programa buscou retirar as cargas dos locais de maior custo conforme as restrições permitiram. O resultado disso foi uma redução de custos maior conforme aumenta a flexibilidade da residência em questão.

Para os casos 1 e 2, cuja carga era relativamente rígida, o algoritmo deslocou o que pôde, mas manteve grande parte da carga em torno do período de pico ou fora dele, conforme perfil da carga em questão. O mesmo é válido para os casos 5 e 8, também rígidos.

Já para os casos 3, 4, 5 e 6, cuja flexibilidade é maior, o algoritmo foi capaz de realocar as cargas para momentos de menor custo, de modo a reduzir o custo geral da operação diária, presente na Tabela 6. Ao comparar cargas similares, o custo

diminui em função do aumento da flexibilidade, vide a comparação do custo diário para as cargas 1, 3 e 5. Residências cujo hábito já confere o uso de energia fora do horário de pico, os custos foram ainda menores do que aqueles com o uso da ferramenta, no entanto, caso ocorra uma variação do custo, a ausência de flexibilidade pode acarretar em aumento do custo futuro.

Tabela 6 – custo diário de operação

RESIDENCIA	1	2	3	4	5	6	7	8
CONSUMO	43,93 kWh	43,93 kWh	43,93 kWh	31,67 kWh	43,93 kWh	31,67 kWh	31,67 kWh	31,67 kWh
CUSTO	R\$ 19,43	R\$ 14,54	R\$ 15,04	R\$ 11,56	R\$ 14,74	R\$ 10,90	R\$ 13,31	R\$ 10,87

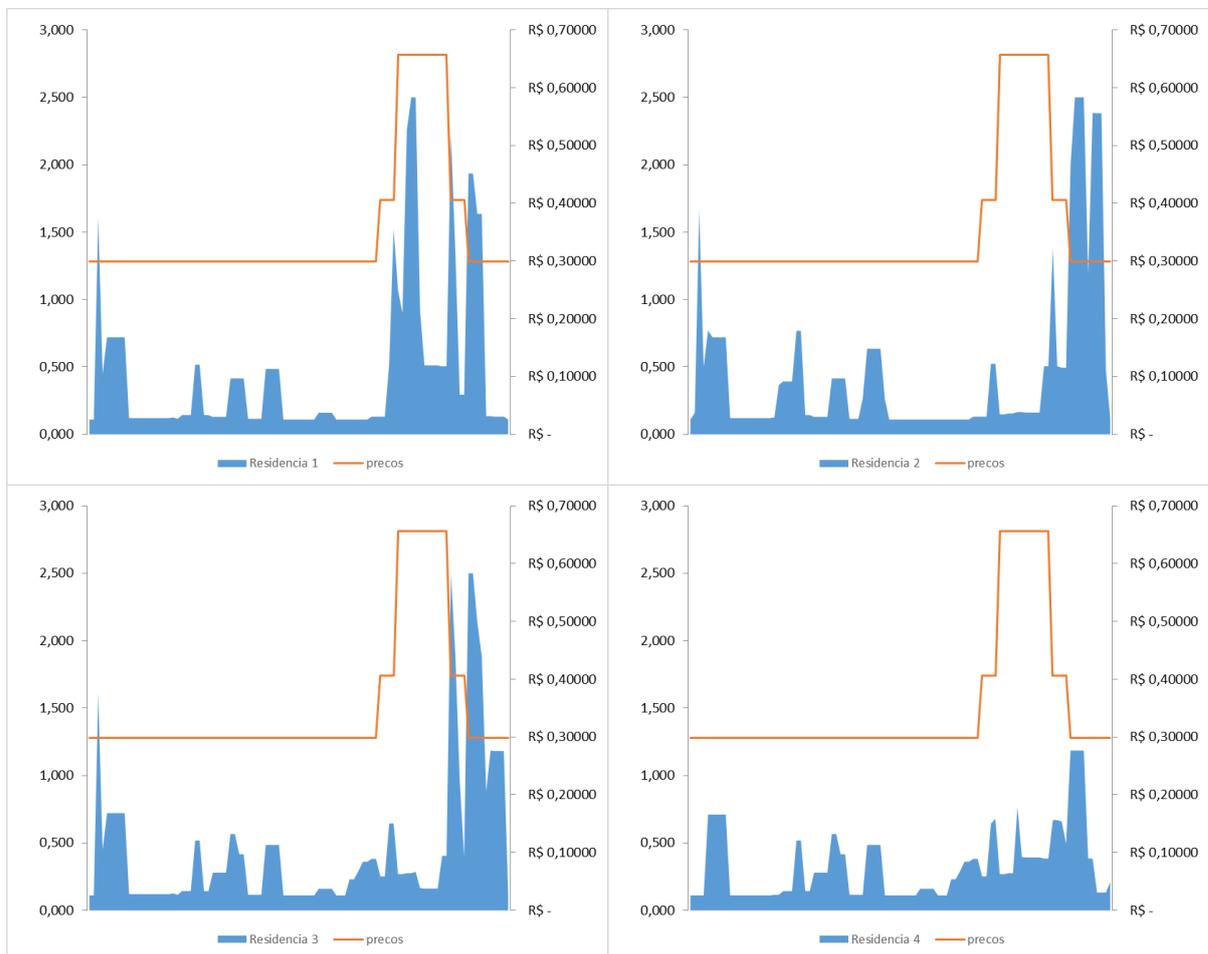


Figura 31 - Consumo das residências ao longo de um dia para os casos 1, 2, 3, 4

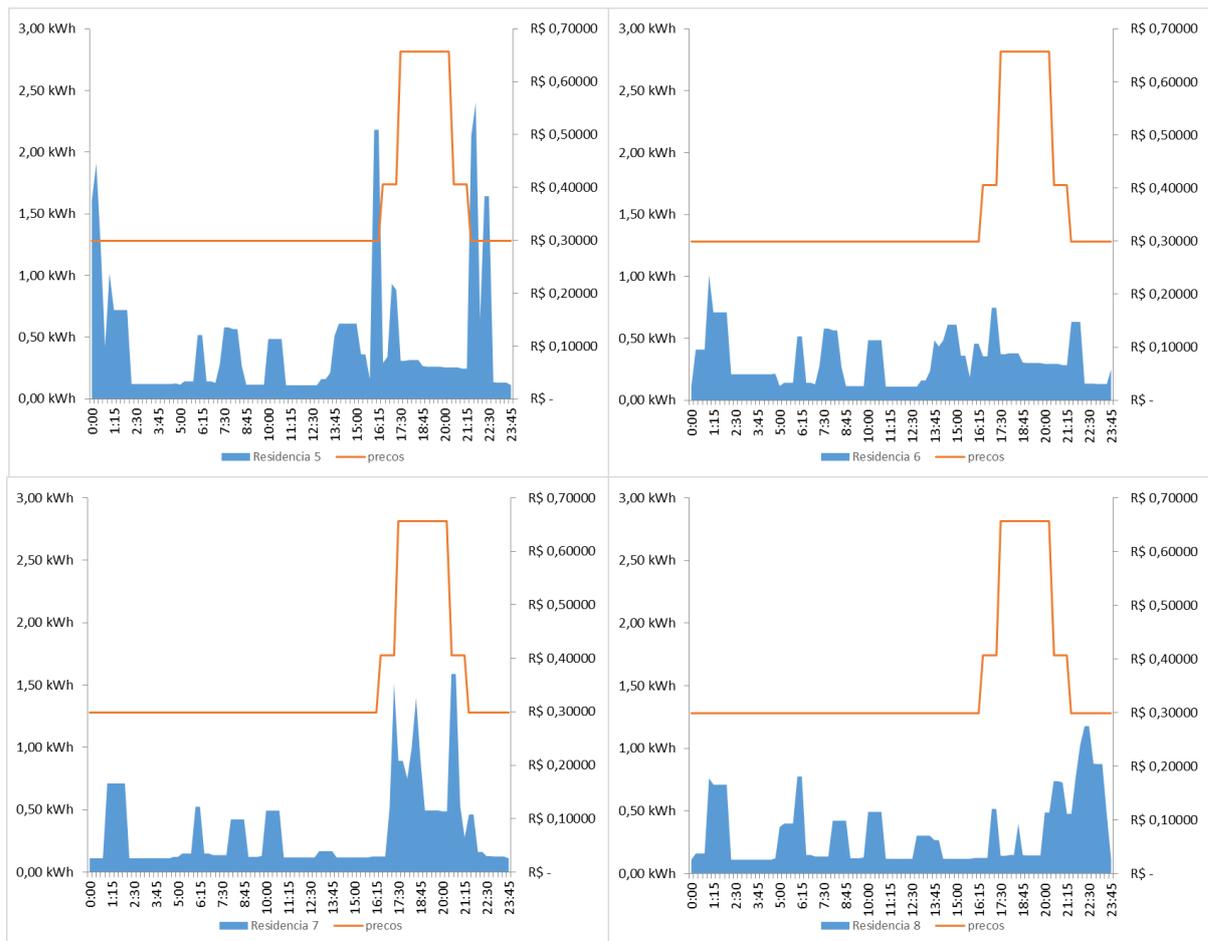


Figura 32 - Consumo das residências ao longo de um dia para os casos 5, 6, 7 e 8

É importante salientar, que com o aumento da flexibilidade tende a haver uma diminuição do conforto esperado. A razão por trás disso é muito simples: uma família deverá deixar de utilizar determinado equipamento em troca da economia de energia, e isso pode significar redução do ar condicionado em temperaturas elevadas, por exemplo. Para casos comerciais, pode haver ainda a redução da produtividade dos colaboradores para uma redução do condicionamento de ar por exemplo, ou seja, os ganhos com o corte de energia podem ser suprimidos pela perda na produção.

Outra conclusão importante tirada deste exemplo é a presença de grandes picos de energia. Em partes estes picos podem ser causados por cargas de grande potência, como chuveiros elétricos. Por outro lado, um algoritmo que leve em conta apenas o custo, não se preocupa com a estabilidade da rede e os efeitos da introdução de outros picos no custo da energia. Isso se agravaria para o caso onde muitos consumidores optassem por este tipo de agendamento, o que poderia introduzir um novo horário de pico ao sistema, prejudicando o mesmo a médio prazo. Como solução

para este problema, custos que evoluem com o aumento do consumo instantâneo, ou uma abordagem que reduza a relação entre pico e média podem ser utilizadas. O efeito dessa introdução de novos picos é visível entre o caso 2 para ambos, tarifa convencional e tarifa branca. Para o caso da tarifa branca, o caso dois possui dois picos que beiram os 2,5 kWh, enquanto que para a tarifa convencional há apenas um pico desta magnitude, o que na prática é pior ao sistema.

6.2.3: Minimização do PAR

A segunda abordagem utilizada considerou a minimização da diferença entre pico de consumo e o consumo médio da residência.

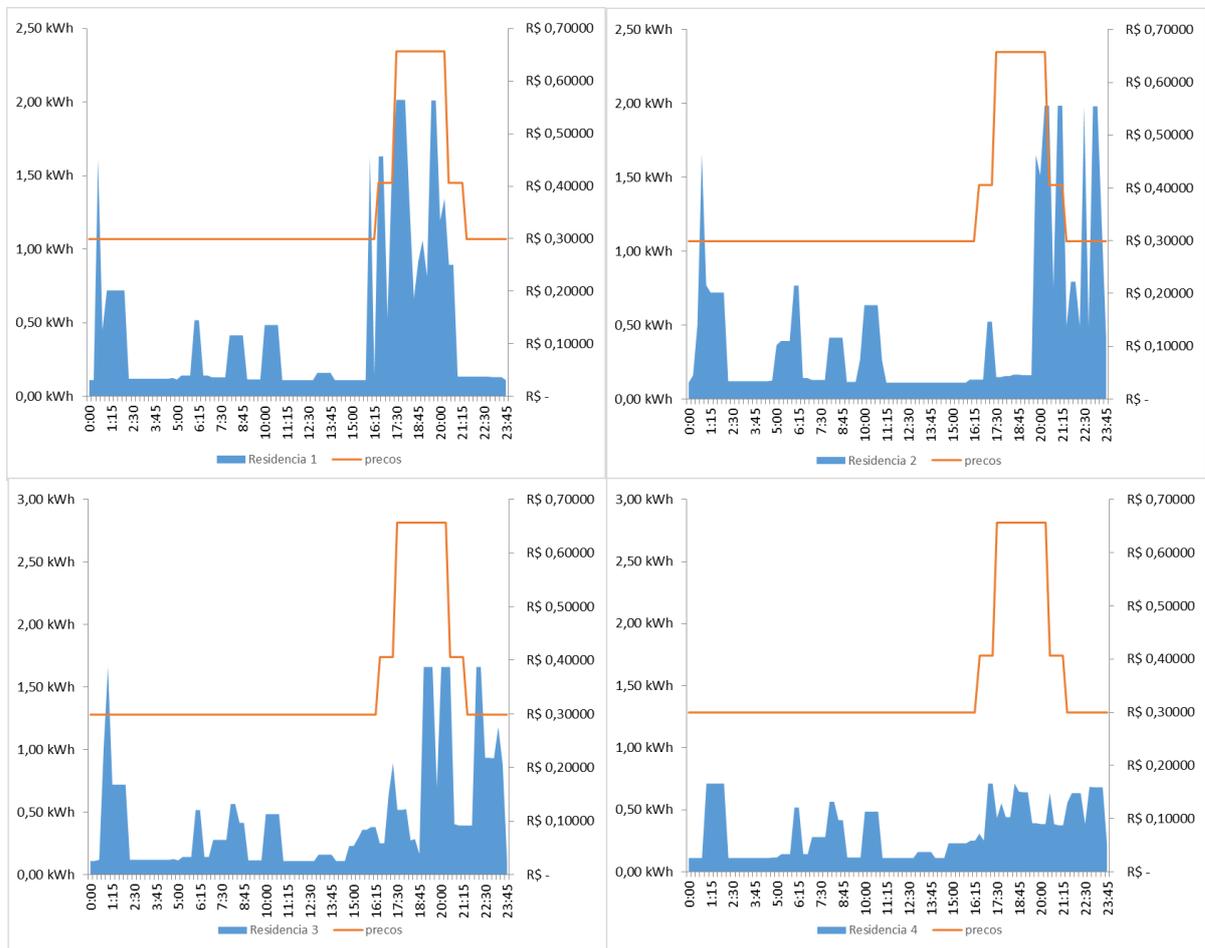


Figura 33 - Consumo das residências ao longo de um dia para os casos 1, 2, 3 e 4

Ao utilizar este outro método de otimização, evita-se que ocorram grande picos de consumo ao longo do dia. Isso é claramente visível nos gráficos com perfil de consumo das Figuras Figura 33 e Figura 34. Frente ao obtido para os outros tipos de otimização, cujos picos atingiram 2 kWh. Com a otimização pela redução do PAR,

salvo os casos rígidos, os picos dos outros casos não ultrapassaram 1,67 kWh, uma redução de cerca de 19 %. A Figura 35 demonstra a redução do PAR em %. Para os casos das cargas 4, 6, 7 e 8, a redução é mais expressiva em função da ausência de chuveiro elétrico que introduz grandes picos, o que faz com que mesmo uma pequena flexibilidade seja suficiente para reduzir significativamente o pico máximo exigido.

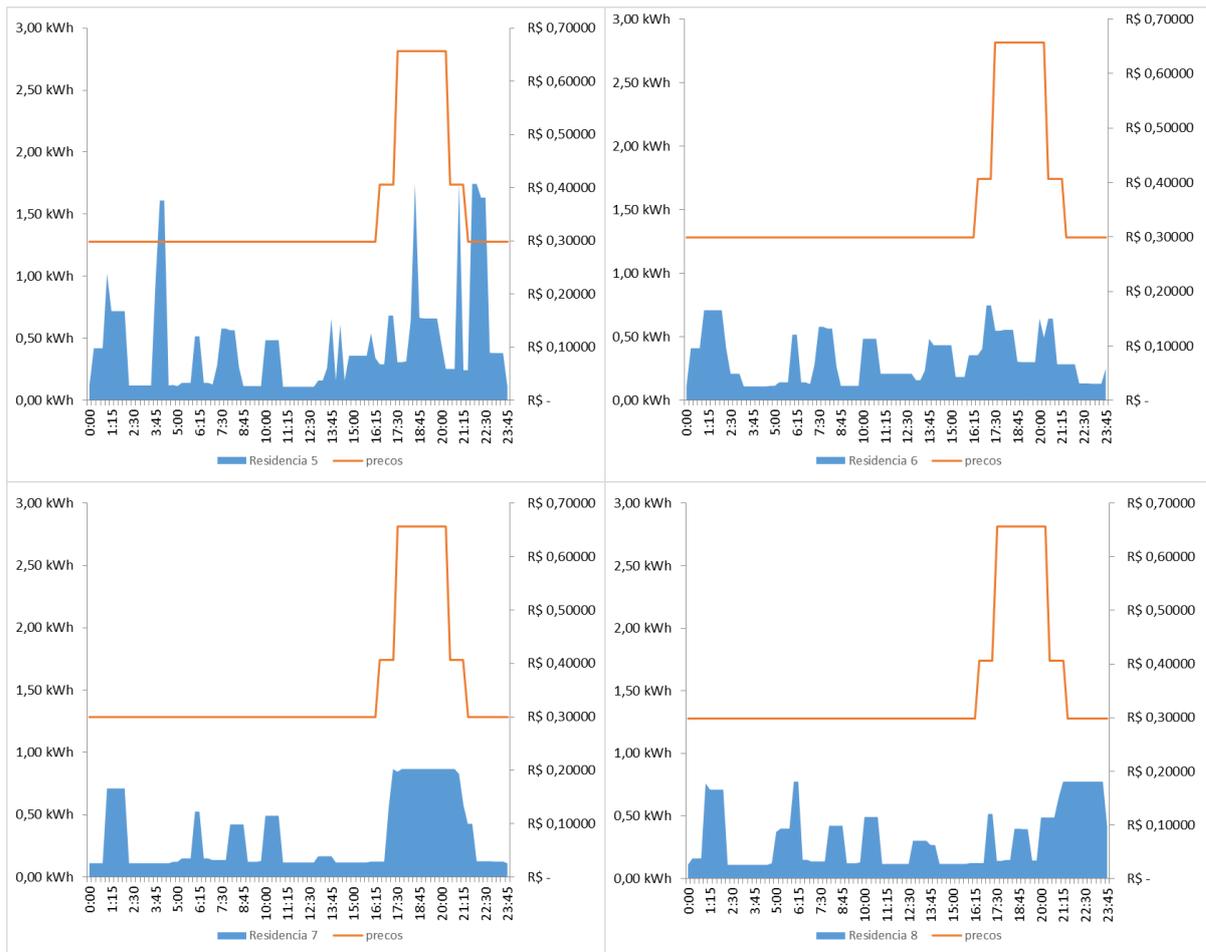


Figura 34 - Consumo das residências ao longo de um dia para os casos 5, 6, 7 e 8

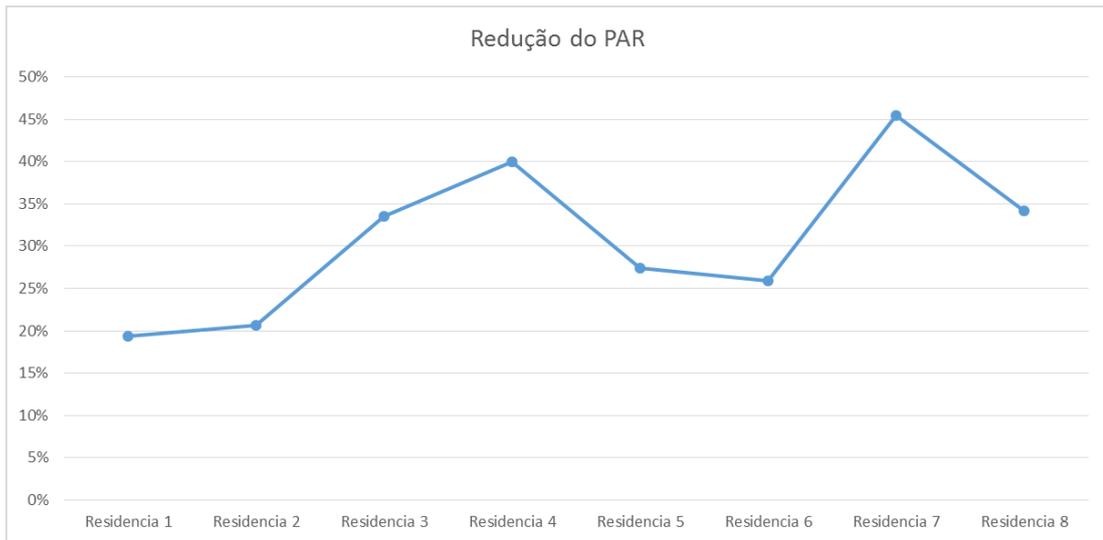


Figura 35 – redução da relação pico e média de consumo em % com relação a abordagem por minimização do custo

Uma última comparação foi feita para o uso da tarifa convencional ou a tarifa branca para o caso de redução do consumo de pico. Como pode ser observado na Figura 36, a tarifa convencional é mais rentável apenas para o caso onde o consumo é rígido dentro do horário de ponta, se mostrando menor para os outros cenários.

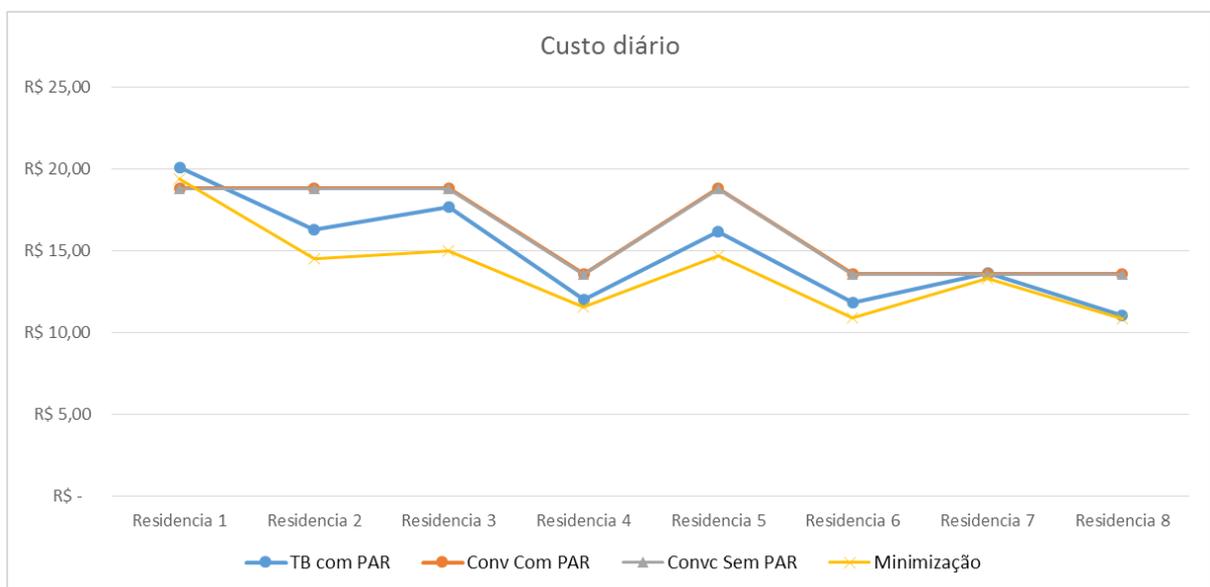


Figura 36 – Comparação de custos para as abordagens com PAR e minimização de custo para ambas tarifas

Capítulo 7: Conclusões, Perspectivas e Discussões

A partir dos estudos e desenvolvimento executados durante as atividades que culminaram na produção deste trabalho, foi possível a ambientação em um novo tema que vem ganhando força no mercado de energia, que são as usinas virtuais de energia, tema que representa uma quebra de paradigmas quanto ao sistema vigente hoje na qual os pequenos consumidores estão atrelados as distribuidoras de energia elétrica.

Não só com relação à regulação, mas também à com respeito a aspectos técnico , o estabelecimento de usinas virtuais encontra dificuldades. A começar pela infraestrutura de comunicação necessária para viabilizar o grande fluxo de dados que permitem a operação de VPPs. De forma análoga, a não existência de protocolos para este fim específico, somado aos problemas de segurança que podem ser introduzidos fazem com que a inserção das usinas virtuais seja mais lenta que o esperado. Vencer estas barreiras será fundamental.

Com relação a ferramenta de gerenciamento energético, é visível que estas podem impactar no custo de operação diário de uma residência ao se abordar diferentes tipos de otimização. No entanto, o funcionamento deste tipo de ferramenta pode trazer consequências como a introdução de novos picos de demanda em horários onde o custo da energia tende a ser menor. Este tipo de problema aponta para que novas soluções sejam criadas levando-se em conta a estabilidade da rede e do sistema como um todo, como ocorre com a abordagem de redução do PAR, onde a prioridade é aproximar o pico de demanda da média geral de consumo, o que reduz o custo da energia de maneira geral, do ponto de vista do sistema elétrico nacional.

Apesar de impactar no custo diário de operação, tais ferramentas, em conjunto com um sistema tarifário diferenciado, ainda não são suficientes para se tornarem atrativos ao consumidor residencial final, visto de redução da casa de centavos ainda não são expressivas, principalmente se for considerado o fato de que residências com capacidade de possuir inteligência embarcada devem pertencer, via de regra, a famílias com alto poder aquisitivo, para os quais a troca de conforto por pouco retorno financeiro não significa muito. Para desenvolvimentos futuros, sugere-se abordar o gerenciamento de cargas de estabelecimentos comerciais e industriais, os quais

observam mais atentamente as questões financeiras e possuem maior poder financeiro para a adoção de soluções de automação.

Do ponto de vista institucional, durante o desenvolvimento destas atividades, foi possível a submissão de propostas de venda de soluções de usinas virtuais, em âmbito de projeto de P&D, onde os conhecimentos adquiridos com este trabalho serviram como base para a formulação destas propostas. Em paralelo, o desenvolvimento de uma ferramenta de gerenciamento energético para residências foi iniciado como ponto de partida para a criação de uma ferramenta final, embarcada em um pequeno controlador, o qual deverá compor uma possível solução final para o caso de firmamento de contratos.

Para o futuro, as perspectivas apontam para o desenvolvimento de novos modelos de negócios baseados no que se espera de mudanças com relação aos aspectos regulatórios em vigor, de modo a abrir o mercado de energia, permitindo aos consumidores participarem de maneira ativa no mercado de energia ao serem representados por agregadores, ao mesmo tempo que serão capazes de consumir energia de forma ótima oferecendo inclusive, serviços ancilares a rede de distribuição.

Referências

- [1] L. Toma, B. Otomega, C. Bulac e I. Tristiu, “Coordination of Distributed Generators Through the Virtual Power Plant Concept,” 2012.
- [2] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, “RESOLUÇÃO NORMATIVA N°654 de 2015,” 2015.
- [3] F. CERTI, “Usina Distrital,” 2015. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=YCXipRhqrEY>. [Acesso em 14 07 2015].
- [4] IEEE, “Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems - IEEE 1547,” 2003.
- [5] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, “RESOLUÇÃO NORMATIVA N°482, DE 17 DE ABRIL DE 2012,” 2012.
- [6] ANEEL, “Perdas de energia,” ANEEL, [Online]. Available: <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=801>. [Acesso em 2015 07 15].
- [7] B. Jansen, O. Sundström e D. Gantenbein, “Architecture and Communication of an Electric Vehicle Virtual Power Plant,” 2010.
- [8] J. Jenkins, “Cost of Batteries for Electric Vehicles Falling More Rapidly than Projected,” The EnergyCollective, [Online]. Available: <http://www.theenergycollective.com/jessejenkins/2215181/cost-batteries-electric-vehicles-falling-more-rapidly-projected>. [Acesso em 2015 07 15].
- [9] C. Technica, “EV Battery Costs Already ‘Probably’ Cheaper Than 2020 Projections,” Clean Technica, [Online]. Available: <http://cleantechnica.com/2015/03/26/ev-battery-costs-already-probably-cheaper-than-2020-projections/>. [Acesso em 2015 07 15].
- [10] T. K. V. Hernández, “Uma proposta de integração da geração distribuída, por meio das usinas virtuais, ao sistema elétrico do estado de São paulo,” São Paulo, 2015.
- [11] S. Koopmann, S. Nicolaib, e A. Schnettlera, “Multifunctional Operation of a Virtual Power Plant in an Active Distribution Grid: Modeling Approaches and First Test Experiences from the SmartRegion Pellworm Project,” *5th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, October 2014.
- [12] P. H. R. P. Gama, E. M. Flores, G. Peres A., N. J. Guaraldo, E. Vicentini e C. Matsumoto, “Desenvolvimento de critérios e modelos para avaliação técnica, econômica

e comercial da geração distribuída visando a geração virtual de energia,” *CITENEL 2011*, 2011.

- [13] LichtBlick, “Schwarm Energie - Schwarmdirigent,” LichtBlick, [Online]. Available: <https://www.lichtblick.de/privatkunden/schwarm-energie/schwarmdirigent>. [Acesso em 14 07 2015].
- [14] RWE, “RWE - Virtual Power Plant,” [Online]. Available: <http://www.rwe.com/web/cms/en/237450/rwe/innovation/projects-technologies/energy-application/distributed-generation/virtual-power-plant/>. [Acesso em 15 07 2015].
- [15] “Consumidores do Grupo A (Tensão de Fornecimento > 2,3 kV),” CEMIRIM, [Online]. Available: <http://cemirim.com.br/consumidores-do-grupo-a-tensao-de-fornecimento-23-kv/>. [Acesso em 10 07 2015].
- [16] “ Sistema de tarifação de energia,” AES Eletropaulo, [Online]. Available: <https://www.aeseletropaulo.com.br/poder-publico/prazos-e-tarifas/conteudo/sistema-de-tarifacao-de-energia><https://www.aeseletropaulo.com.br/poder-publico/prazos-e-tarifas/conteudo/sistema-de-tarifacao-de-energia>. [Acesso em 10 07 2015].
- [17] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, “Resolução 499/2012,” 2012.
- [18] “Quem pode ser consumidor livre,” ABRACEEL, [Online]. Available: http://www.abraceel.com.br/zpublisher/secoes/consumidor_livre.asp. [Acesso em 10 07 2015].
- [19] “Como ser um consumidor livre,” COMERC, [Online]. Available: <http://www.comerc.com.br/consumidorlivre.asp>. [Acesso em 10 07 2015].
- [20] C. Morris, “German Energy Freedom,” [Online]. Available: http://us.boell.org/sites/default/files/morris_germanenergyfreedom.pdf. [Acesso em 01 07 2015].
- [21] Y. Yan, Y. Qian, H. Sharif e D. Tipper, “A Survey on Smart Grid Communication Infrastructures: Motivations, Requirements and Challenges,” *Communications Surveys & Tutorials*, pp. 1-16, 2012.
- [22] P. P. Parikh, M. G. Kanabar e T. S. Sidhu, “Opportunities and Challenges of Wireless Communication Technologies for Smart Grid Applications,” *Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-7, julho 2010.
- [23] V. C. Güngör, D. Sahin, T. Kocak, S. Ergüt, C. Buccella, C. Cecati e G. P. Hancke, “Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, pp. 529-539, Novembro 2011.

- [24] G. Stanculescu, H. Farhangi, A. Palizban e N. Stanchev, "Communication Technologies for BCIT Smart Microgrid," *Innovative Smart Grid technologies (ISGT)*, pp. 1-7, Janeiro 2012.
- [25] D. G. Makohin, "Relatório de estágio obrigatório: Integração e Automação de Microrredes Elétricas," 2013.
- [26] A. Mohsenian-Rad e A. Leon-Garcia, "Optimal residential load control with price prediction in Real-time electricity pricing environments," *IEEE Transactions on Smart Grid*, setembro 2010.
- [27] E. Hossain, Z. Han e H. Vincent Poor, *Smart Grid Communications and Networking*, Cambridge, 2013.
- [28] Celesc Distribuição S.A., "Tarifa de energia," [Online]. Available: <http://novoportalecelesc.com.br/portal/index.php/duvidas-mais-frequentes/1140-tarifa>. [Acesso em 29 06 2015].
- [29] Ateji, "The OptimJ manual Version 1.3.14," [Online]. Available: <http://www.ateji.com/vpAvt/OptimJ%20manual%20v1.3.14.pdf>. [Acesso em 10 07 2015].