



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

LUIS CARLOS SANCHEZ

**PROPOSTA DE UM NOVO MODELO MATEMÁTICO PARA
GERENCIAMENTO ÓTIMO DE ENERGIA ELÉTRICA PELO LADO DO CONSUMIDOR**

Ilha Solteira
2017

LUIS CARLOS SANCHEZ

**PROPOSTA DE UM NOVO MODELO MATEMÁTICO PARA
GERENCIAMENTO ÓTIMO DE ENERGIA ELÉTRICA PELO LADO DO CONSUMIDOR**

Dissertação apresentada à
Faculdade de Engenharia - UNESP
– Campus de Ilha Solteira, como
requisito para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Elétrica.
Área de Conhecimento: Automação.

Prof. Dr. Fábio Bertequini Leão
Orientador

Ilha Solteira
2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S211p Sanchez, Luis Carlos.
Proposta de um novo modelo matemático para gerenciamento ótimo de energia elétrica pelo lado do consumidor / Luis Carlos Sanchez. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2017
88 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. Área de conhecimento: Automação, 2017

Orientador: Fábio Bertequini Leão
Inclui bibliografia

1. Gerenciamento ótimo da demanda. 2. Tarifas de energia elétrica.
3. Smart grid.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

ATESTADO DE APROVAÇÃO - DEFESA

Atestamos que **LUÍS CARLOS SANCHEZ**, RA nº: 161863-6, RG nº 11.025.833, expedido pela SSP/SP, defendeu, no dia 14/07/2017, a dissertação intitulada **Proposta de um novo modelo matemático para gerenciamento ótimo de energia elétrica pelo lado do consumidor**, junto ao Programa de Pós Graduação em ENGENHARIA ELÉTRICA, Curso de Mestrado Acadêmico, tendo sido 'APROVADO'.

Atestamos ainda que a obtenção do título dependerá de homologação pelo Órgão Colegiado competente.

Ilha Solteira, 14 de julho de 2017

Márcia Regina Nagamachi Chaves
Supervisor Técnico de Seção - STPG

A Deus e a todos os amigos espirituais, por me acompanharem e tornarem esta passagem cheia de motivações, desafios, conquistas e realizações.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus por me iluminar e me guiar em mais uma trajetória.

A toda minha família que mesmo a distância sofreram e se alegraram em cada etapa, em cada banca examinadora. Em especial, minha mãe Alexandrina Nascimento Sanchez, meu pai Maximinino Sanchez e meu querido filho Matheus Rondelli Sanchez, por tornarem minha caminhada menos árdua.

Sou Imensamente grato ao meu orientador Prof. Dr. Fábio Bertequini Leão, pela sua paciência, por todos os ensinamentos, pela oportunidade e pela confiança, me proporcionando a oportunidade de trabalhar com uma equipe maravilhosa, e, assim, estar concluindo este trabalho.

A todos os Professores do departamento de Engenharia Elétrica da UNESP, Campus de Ilha Solteira que lecionaram durante esse tempo de curso, em especial ao Professor Júlio Borges de Souza e Luiz Carlos Origa, pela especial atenção que sempre me direcionaram. Gostaria de agradecer em particular à Prof^a. Mariangela Bovolatto, por toda ajuda e toda dedicação, por me receber em sua sala inúmeras vezes.

A toda família Lapsee, uma equipe acolhedora e sempre disposta a ajudar. Em especial ao Leonardo Henrique.

Aos colegas de trabalho, que souberam suportar minha ausência, e que por diversas vezes tiveram que assumir minhas responsabilidades no serviço em sinal de apoio às minhas expectativas. A todos os voluntários que participaram dessa pesquisa respondendo aos questionários, pois sem eles não se cobriria de êxito essa pesquisa.

Ao meu amor, esposa querida, Caroline Meireles Fanfoni, agora grávida, que sempre esteve do meu lado, me auxiliando e me dando sua força, carinho, companheirismo e luz, ainda, por me acompanhar em todas as jornadas.

A todos que ajudaram direta ou indiretamente para a construção desta dissertação.

Muito obrigado!

“Aos outros, eu dou o direito de ser como são.
A mim, dou o dever de ser cada dia melhor.”
Chico Xavier.

RESUMO

No contexto de gestão e conservação de energia elétrica, ferramentas de apoio ao consumidor para gerenciar sua demanda são fundamentais para a otimização do uso dos recursos energéticos de modo a minimizar os custos com energia elétrica e ao mesmo tempo garantir o conforto do consumidor, considerando que este consumidor esteja inserido em um ambiente de Gerenciamento pelo Lado da Demanda (GLD). Assim, este trabalho propõe um novo modelo matemático de programação linear inteira mista (PLIM) para resolver o problema de gerenciamento ótimo de energia elétrica pelo lado do consumidor. O modelo matemático é baseado na minimização do custo da energia elétrica e maximização do conforto do consumidor, levando em conta a minimização da diferença entre o consumo habitual e o consumo ótimo, e a minimização da potência absorvida da rede. O modelo é implementado em linguagem de programação AMPL e resolvido utilizando o solver CPLEX. A metodologia é aplicada para gerenciar um conjunto de cargas típicas residenciais e os resultados mostram sua eficiência e potencial para gerenciar de forma ótima a demanda do consumidor, considerando a tarifa de energia elétrica com preço variável, geração distribuída, armazenamento de energia em banco de baterias e veículos elétricos.

Palavras chaves – Gerenciamento ótimo da demanda. Tarifas de energia elétrica. Smart grid.

ABSTRACT

In the context of the management and conservation of electric energy, consumer support tools to manage their demand are fundamental for optimizing the use of energy resources in order to minimize energy costs and at the same time guarantee consumer comfort, considering that the consumer is inserted in a Demand Response (DR) environment. Thus, this work proposes a new mathematical model of mixed integer linear programming (MILP) to solve the problem of optimal management of electrical energy by the consumer side. The mathematical model is based on minimizing the cost of electrical energy, maximizing consumer comfort, taking into account the minimization of the difference between habitual consumption and optimal consumption, and minimizing the power consumed by the network. The model is implemented in AMPL programming language and solved using the CPLEX solver. The methodology is applied to manage a set of typical residential loads and the results show its efficiency and potential to optimally manage the consumer demand, considering the price of electricity with variable price, distributed generation, storage of energy in bank of batteries and electric vehicles.

Key words – Optimum demand management. Electric power tariff. Smart grid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Curva Diária de consumo.	25
Figura 2- Unidade consumidora de energia elétrica com painel fotovoltaico, banco de baterias e carregamento de veículo elétrico.	36
Figura 3- Comparação da QCA e QCO, equipamento. 01.....	47
Figura 4- Comparação da QCA e QCO, equipamento 02.....	48
Figura 5- Comparação da QCA e QCO, equipamento 03.....	49
Figura 6- Comparação da QCA e QCO, equipamento 04.....	50
Figura 7- Comparação da QCA e QCO, equipamento. 05.....	51
Figura 8- Comparação da QCA e QCO, equipamento 06.....	52
Figura 9- Comparação da QCA e QCO, equipamento 07.....	53
Figura 10- Comparação da QCA e QCO, equipamento 08.....	54
Figura 11- Comparação da QCA e QCO, equipamento 09.....	55
Figura 12- Comparação da QCA e QCO, equipamento 10.....	56
Figura 13- Comparação da QCA e QCO, equipamento 11.....	57
Figura 14- Perfil de consumo QCA.....	58
Figura 15- Perfil de consumo QCO.	59
Figura 16- Perfil de consumo QCA total em relação ao perfil de consumo QCO total.	60
Figura 17- Estado de carregamento da bateria.....	61
Figura 18- Potência armazenada fornecida pelo painel fotovoltaico.	62
Figura 19- Potência armazenada fornecida pela rede.	62
Figura 20- Potência injetada pelo banco de baterias.	63
Figura 21- Incidência solar no painel fotovoltaico.	64
Figura 22- Potência gerada pelo painel fotovoltaico.	65
Figura 23- Potência fotovoltaica util.	65
Figura 24- Balanço de potência total.	67
Figura 25- Perfil de consumo habitual x consumo ótimo (teste 01).....	71
Figura 26- Perfil de consumo habitual x consumo ótimo (teste 02).....	72
Figura 27- Perfil de consumo habitual x consumo ótimo (teste 03).....	74
Figura 28- Perfil de consumo habitual x consumo ótimo (teste 04).....	76
Figura 29- Perfil de consumo habitual x consumo ótimo (teste 05).....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Tratativas do Smart Grid em diversos lugares do mundo.	21
Tabela 2- Tabela de Equipamentos.	44
Tabela 3- Preço de energia por intervalo de tempo.	45
Tabela 4- Dados de consumo reais (teste).	68
Tabela 5- Preço de energia tarifa branca.	69
Tabela 6- Potência e uso habitual das cargas para o consumidor teste 01.	70
Tabela 7- Potência e uso habitual das cargas para o consumidor teste 02.	72
Tabela 8- Potência e uso habitual das cargas para o consumidor teste 03.	73
Tabela 9- Potência e uso habitual das cargas para o consumidor teste 04.	75
Tabela 10- Potência e uso habitual das cargas para o consumidor teste 05.	77
Tabela 11- Análise econômica considerando o painel fotovoltaico.	80
Tabela 12- Cálculo de consumo de energia absorvida da rede.	81
Tabela 13- Cálculo VPL e TIR.	82

LISTA DE SÍMBOLOS

$p_t^{abs_rede}$	Potência absorvida da rede elétrica no instante (t) (kW)
P_t^{FVa}	Potência fotovoltaica armazenada no instante (t) (kW);
P_t^{FVu}	Potência fotovoltaica útil no instante (t) (kW)
p_t^{util}	Potência fotovoltaica útil no instante (t) (kW)
P_t^{FR}	Potência fornecida pela rede ao banco de baterias no instante (t) (kW)
P_t^{INJ}	Potência injetada pelo banco de baterias no instante (t) (kW)
E^{VE}	Energia armazenada na bateria do veículo elétrico (kWh)
Ωt	Conjunto de faixas de tempo
Ωe	Conjunto de equipamentos (uso final);
$k1, k2$ e $k3$	Pesos de ponderação
δ_t^E	Tarifa de energia no horário t (R\$/kWh)
$\varepsilon_{e,t}^o$	Energia total ótima (kWh)
$\varepsilon_{e,t}^h$	Consumo de energia total habitual (kWh)
P_e	Prioridade do funcionamento do equipamento. $P_e=1$ significa que o equipamento (e) é prioritário enquanto $P_e=0$ não prioritário
QCA	Quadro de consumo habitual de energia
h	Valor da faixa de tempo
$x_{e,t}$	Principal variável de decisão
h_e^u	Horas de utilização por uso final
$hp_{e,t}$	Horas prioritárias na utilização dos equipamentos
p_e^{med}	Potência média do equipamento (e)
β	Variável inteira
$m_{e,t}$	Variável que representa o produto de $x_{e,t}$ e $n_{e,t}$
$n_{e,t}$	Quantidade de minutos em que o usuário utiliza o equipamento na faixa de tempo (t)
M	Constante de linearização
\underline{N}_e	Limite mínimo de minutos (funcionamento do equipamento)
\overline{N}_e	Limite máximo de minutos (funcionamento do equipamento)
P^{INST}	Potência instalada do banco de baterias (kW).
P_t^{ABS}	Potência absorvida pelo banco de baterias (kW)
\underline{P}^i	Limite mínimo da potência de injeção (kW)
ω_t^i	Variável binária que caracteriza a injeção de potência. Igual a 1 significa que o banco de baterias está injetando potência no instante t , e se igual a 0 não está injetando potência no instante t
\overline{P}^i	Limite máximo da potência de injeção (kW)
\underline{P}^a	Limite mínimo da potência de absorção (kW)
ω_t^a	Variável binária que caracteriza a absorção de potência. Se igual a 1 significa que o banco de baterias está absorvendo potência no instante t , e se igual a 0 não está absorvendo potência no instante t .
\overline{P}^a	Limite máximo da potência de absorção (kW)

E_t^B	Estado de energia do banco de baterias no instante t (kWh)
E^{BO}	Estado inicial de energia do banco de baterias no instante t (kWh)
\underline{E}	Limite mínimo da energia armazenada (kWh)
\overline{E}	Limite máximo da energia armazenada (kWh)
$\Delta\tau_{e,t}^{VE}$	Variável que representa o produto de τ_t^{VE} e $x_{e,t}$
τ_t^{VE}	Tempo de carregamento do veículo elétrico dentro da faixa de tempo t (horas)
t_e^E	Parâmetro que caracteriza se o equipamento é um veículo elétrico. Se igual a 1 o equipamento e é um veículo elétrico, caso igual a 0 o equipamento não é um veículo elétrico
$\underline{\tau}$	Horário Inicial de acionamento do equipamento e dentro da faixa de tempo t (horas)
$\overline{\tau}$	Horário final de acionamento do equipamento e dentro da faixa de tempo t .
SOC	Estado da carga inicial da bateria do veículo elétrico
K^{MAX}	Carga máxima da bateria do veículo elétrico (capacidade de armazenamento da bateria).
A_{fv}	Área Fotovoltaica (m ²)
E^{sl}	Incidência solar por faixa de tempo(kWh/m ²)
P_t^{FVp}	Potência fotovoltaica no instante t (kW)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	19
2 GERENCIAMENTO PELO LADO DA DEMANDA NO CONTEXTO DE SMART GRID	20
2.1 CONCEITO DE SMART GRID	20
2.2 TARIFICAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, ELASTICIDADE-PREÇO	22
2.2.1 Segmentação tarifária	22
2.2.2 Importância do <i>Smart Meter</i>	24
2.2.3 Tarificação como fator incentivador	25
2.2.4 Gerenciamento pelo lado da demanda	26
2.2.5 Adesão obrigatória à resposta de demanda	28
2.2.6 Resposta de demanda – geração distribuída	29
2.2.7 Programas de resposta de demanda	30
2.2.8 Programa de resposta de demanda sob a perspectiva do consumidor	32
3 MODELO MATEMÁTICO	36
4 TESTES E RESULTADOS	43
4.1 ESTUDO DE CASO 1: SIMULAÇÕES PARA VALIDAÇÃO DO MODELO DESENVOLVIDO	43
4.2 ESTUDO DE CASO 2: SIMULAÇÕES COM DADOS DE CONSUMIDORES REAIS	67
4.2.1 Análise econômica considerando instalação de painel fotovoltaico no consumidor teste 5	80
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	83
REFERÊNCIAS	85
ANEXO – Questionário da pesquisa de campo	89

1 INTRODUÇÃO

O GLD tem se mostrado eficiente para a minimização do uso de energia fornecida pelas concessionárias, e esse fator tem resultado em benefícios econômicos e, principalmente, no incentivo de fontes renováveis de energia, (BOLLEN, 2011).

O grande fluxo de dados proporcionado pela implantação do *Smart Grid* poderá se constituir num fator incentivador para a implementação do GLD em larga escala.

Dessa forma, se espera incorporação das diversas possibilidades que envolvem o setor elétrico no Brasil, dentre elas cabe citar a inserção de novas fontes alternativas na geração de energia; a minimização das perdas não técnicas, que drenam recursos das concessionárias; um controle mais efetivo das ocorrências ao longo da rede de distribuição, com instalações de sensores que possibilitem a detecção de anomalias na rede de distribuição em tempo real; a automação da medição, que possibilita a troca de informações e comunicação bidirecional entre concessionária e cliente, com a possibilidade de leituras e cortes remotos; o faturamento por gestão de medição, entre outras funções agregadas.

Portanto, é no conceito de *Smart Grid* que, fundamentalmente, reside um dos aspectos mais importantes a ser considerado em função das mudanças pretendidas para o setor nos próximos anos, que é a participação ativa do consumidor.

Com o gerenciamento pelo lado da demanda e a implantação de diversas alternativas o consumidor poderá sinalizar com mudanças de hábitos na forma de consumir energia.

Com a perspectiva da larga automação do sistema de energia elétrica, a resposta à demanda no setor elétrico ganha cada vez mais espaço nas empresas de energia.

Vale ressaltar que a energia elétrica é uma *commodity*¹ e, assim, está sujeita a variações de preço conforme a oferta e a demanda. No Brasil a quase totalidade da energia elétrica faturada para os consumidores residenciais tem como

¹ *Commodity* – Do inglês, são mercadorias produzidas em larga escala, com preço sujeito a oferta e procura.

parâmetros a política tarifária de forma constante, modalidade essa que não proporciona incentivos na mudança de hábitos de consumo.

Com aumento da troca de informações proporcionada pela implantação do *Smart Grid*, permite que o consumidor, que esteja interessado em diminuir sua conta de energia, seja inserido numa dinâmica de mercado, em que tarifas diferenciadas ao longo do dia poderão levar o usuário a economizar ao consumir a mesma quantidade de energia em horários nos quais o custo de geração e transmissão e, conseqüentemente, as tarifas sejam menores.

Através da Resolução 414/2010 a ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, visando à implantação de redes inteligentes no país, criou uma nova modalidade tarifária, a bandeira branca, que sinaliza com incentivos ao consumo de energia nos horários onde o sistema é menos utilizado. O objetivo é de melhorar o carregamento do sistema, assim, estratificou a tarifa de energia por horário do dia em três períodos, o horário de ponta, o horário fora de ponta e o intermediário, detalhados a seguir.

- Ponta: período de três horas consecutivas por dia, com exceção de sábados, domingos e feriados;
- Intermediário: formado pela hora imediatamente anterior e pela hora imediatamente posterior ao horário de ponta;
- Fora de ponta: formado pelas demais horas do dia, bem como, sábados, domingos e feriados.

No Brasil, quando se trata de demanda, faz-se necessária a observação de que as cargas são intensivas, isto é, não há armazenamento da sobra de energia elétrica não consumida nos horários fora de ponta para atender os horários de ponta, portanto, mudanças de hábitos dos consumidores poderão resultar no alívio da demanda de carga nos horários críticos.

Então, um dos métodos que se mostra eficiente para deslocar as cargas de intervalos de tempo passa pelo domínio das tarifas de energia elétrica, que no Brasil, em particular, possui características diferenciadas se comparadas com outros países que já avançaram no projeto "*Smart Grid*" e grande parte das ações que por lá foram adotadas, por aqui se mostram inviáveis.

Para a implementação de GLD de forma adequada, principalmente, quando adotada a forma indireta de controle, é necessário que o consumidor tenha ferramentas ao seu dispor que lhe proporcione uma visão ampla dos benefícios a serem alcançados.

Porém, o consumidor de energia elétrica, ao optar por mudar seus hábitos de consumo em determinados horários por uma maior economia, deverá ser informado que essa economia poderá ser fator de diminuição de seu conforto, ou na mudança de hábitos de consumo.

Para uma maior efetividade no controle da demanda no lado do consumidor, serão necessárias práticas que viabilizem a implantação do GLD para esses usuários.

Os vários estudos direcionados ao GLD afirmam que para sua implementação é necessária a modernização e aumento na capacidade da infraestrutura do setor elétrico já existente (LOGENTHIRAN, 2012).

Em termos práticos, o conceito e a tecnologia relacionados à implementação da *Smart Grid* proporcionarão ao consumidor uma participação ativa na gestão do uso da energia consumida, com a automação integrada do sistema e a comunicação bidirecional entre a concessionária e o consumidor. Em especial pode-se citar o uso de medidores inteligentes com capacidade de comunicação remota bidirecional (TOLEDO, 2012). Neste caso, ferramentas adequadas para o controle e gerenciamento ótimo de cargas serão de grande valia para o consumidor e para as empresas distribuidoras de energia.

Por outro lado, a inserção de geração distribuída em sistemas de distribuição, em nível de média e baixa tensão é uma realidade e assume cada vez mais o papel de coadjuvante na melhoria da eficiência energética em nível de rede e consumidor.

Dessa forma, a implantação de GD e até mesmo o armazenamento dessa energia em bancos de baterias para ser consumida em horários propícios pode constituir-se em uma estratégia de grande potencial para reduzir o valor da conta de energia, aumentar a eficiência energética e manter o conforto do consumidor em níveis aceitáveis. Para essa ação são necessárias ferramentas de suporte a tomada de decisão para o consumidor.

A quase totalidade dos consumidores de baixa tensão não realiza o gerenciamento de consumo por não possuírem ferramentas eficientes para monitorar e operar as cargas, o que pode desestimular o consumidor a participar ativamente em programas de GLD, Carati (2014).

Baseado no exposto acima é necessário desenvolver ferramentas para servir de suporte na tomada de decisão do consumidor que inserido em um programa de GLD possa gerenciar de forma ótima seu consumo de energia, reduzindo sua

fatura e ao mesmo tempo mantendo seu conforto em níveis adequados. Por outro lado, o efeito da tomada de decisão de consumo do consumidor baseado em um gerenciamento ótimo, irá refletir positivamente com o GLD adotado pela concessionária.

Neste sentido, este trabalho tem o objetivo de propor um novo modelo matemático de programação linear inteira mista (PLIM) para o gerenciamento ótimo de energia pelo lado do consumidor levando em conta a minimização da potência absorvida, através do deslocamento dos horários de funcionamento dos equipamentos de uso final que compõem a residência que sejam eleitos pelo consumidor como não prioritários para a conservação de seu conforto e manutenção dos equipamentos nos horários habituais daqueles que julgar prioritário, com a possibilidade de armazenamento de energia por bancos de baterias.

O trabalho, também, analisa as metodologias de tarifação propostas para obtenção dos resultados no deslocamento da demanda sob as perspectivas do consumidor considerando que este está inserido em um programa de GLD indireto. Analisa a ocorrência das possíveis variáveis com seu engajamento ao processo de gerenciamento ótimo de energia pelo consumidor residencial, de maneira a manter seu conforto em relação à mudança de hábitos no uso da energia elétrica de forma a obter o máximo ganho com a elasticidade tarifária.

Assim, são realizadas simulações objetivando validar o modelo matemático proposto através da otimização do uso da energia em um consumidor residencial teste. O modelo matemático proposto é então empregado para o gerenciamento ótimo de energia de consumidores reais cujos dados de carga e consumo são obtidos através de questionário. Na coleta dos dados os consumidores são estimulados a responder questionamentos sobre seus hábitos de consumo de energia elétrica e quais seriam os equipamentos de usos finais que poderiam ter seus horários habituais deslocados para outros horários sem comprometer seus confortos, determinando assim quais cargas poderiam ser controláveis e quais seriam não controláveis e eleitas como cargas prioritárias de vários tipos e potências.

1.1 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Além do presente capítulo, que mostrou um breve contexto do trabalho, principais objetivos e justificativas o texto foi segmentado em mais quatro capítulos.

No segundo capítulo é apresentado o desenvolvimento teórico sobre a pesquisa, com a definição do conceito de *Smart Grid* associado à noção de uma avançada estrutura de medição e política tarifária para promover o gerenciamento pelo lado da demanda.

O terceiro capítulo está centrado na formulação do modelo matemático proposto.

No quarto capítulo são apresentados os resultados e discussões, obtidos nas simulações a partir dos dois estudos de casos.

Finalizando o quinto capítulo apresentam-se respectivamente as conclusões e sugestões de trabalhos futuros, referencias bibliográficas, além de um apêndice que contém o questionário que se constituiu em instrumento e mecanismo aplicado ao estudo de caso 2.

2 GERENCIAMENTO PELO LADO DA DEMANDA NO CONTEXTO DE SMART GRID

O consumo de energia elétrica no Brasil tem crescido na medida em que acompanha o crescimento da economia, bem como, da qualidade de vida do brasileiro.

A expansão do setor de eletroeletrônicos e eletrodomésticos que se encontram presentes nas residências e somados ao crescimento da população vem causando, ano após ano, significativo aumento na demanda de consumo de energia residencial, proporcionando um maior consumo per capita de energia elétrica.

Assim, surge a necessidade de desenvolver alternativas de gestão e planejamento que respeite o desenvolvimento sustentável em confronto com as incertezas e complexidade do setor.

Nesse sentido, há pelo menos duas ferramentas para otimizar a relação dos serviços energéticos, o Gerenciamento pelo Lado da Demanda e o sistema mais automatizado e inteligente com a utilização de tecnologias de informação, denominado “*Smart Grid*”.

2.1 CONCEITO DE SMART GRID

McDaniel e McLaughlin (2009) definem o *Smart Grid* como uma rede de computadores e de infraestruturas elétricas que monitoram e gerenciam o uso da energia.

Já Rahimi e Ipakchi (2010) afirmam que o conceito do *Smart Grid* ainda inclui a ênfase na proteção do meio-ambiente, com a inclusão de fontes geradoras renováveis (eólica, solar, etc.) e a necessidade de potencializar as escolhas feitas pelo consumidor final. Não há uma perfeita concordância dos especialistas quando se trata de conceito de redes elétricas inteligentes, o conceito passa por diferentes entendimentos de acordo com quem a define. Alguns especialistas focam o conceito na cadeia de fornecimento de energia, a melhoria de canais de interações e serviços ao consumidor. Passando pelas necessidades da sustentabilidade (redução de perdas, poluentes, custos operacionais) e com a ótica (financeiro, ambiental, social, econômica etc.) de seu autor.

Dessa forma, o Departamento de Energia dos Estados Unidos (U.S. Department of Energy), foi abrangente quando afirma que a *Smart Grid* não é uma coisa, mais uma visão a ser completada, e que deve ser construída de acordo com as necessidades do mercado onde será implementada, aproveitando todas as perspectivas do mercado, entre elas, tecnológicas, ambiental, socioeconômicas, e política-regulatória, independentemente do conceito adotado, (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2009).

Para se avançar no conceito, algumas considerações devem ser tratadas, como a modernização da infraestrutura, instalação de cadeias digitais, como softwares, participação ativa do consumidor no processo e capacidade de processamento de dados, essência das redes inteligentes.

As tratativas adotadas pelos diversos países se comportam de maneira diferente, cada um visa minimizar os impactos causados a sua sociedade de forma localizada, porém, é certo que a *Smart Grid* surge como uma solução eficiente para o atendimento das demandas elétricas de toda a sociedade.

Na Tabela 1 é mostrada uma visão geral de como os países envolvidos com a implantação da tecnologia Smart Grid priorizam as diversas tratativas em torno do assunto em ordem decrescente de prioridade.

Tabela 1- Tratativas do Smart Grid em diversos lugares do mundo.

Brasil	União Europeia	E.U.A	Japão
Perdas: Redução de perdas não técnicas	Energia Limpa: Inserção de fontes renováveis	Economia: Criação de empregos e aumento da competitividade	Energia Limpa: Inserção de fontes renováveis e redução de emissões
Confiabilidade: Melhoria da continuidade	Segurança: Integração do mercado europeu	Operacionais: Redução de custos operacionais e gestão de Ativos	Comunidades Digitais: Carros elétricos, GD e armazenamento, e compartilhamento de infraestrutura.
Segurança: Eficiência energética e crescimento sustentável	Liberalização: Competição e novos serviços	Segurança: Eficiência Energética e geração distribuída	Economia: Exportação de tecnologia e ampliação de mercado
Operacionais: Redução de custos operacionais e Gestão de ativos	Operacionais: Redução de custos operacionais e gestão de Ativos	Confiabilidade: Eficiência energética e integração de veículos elétricos à rede	Confiabilidade: Gerenciamento de desastres naturais e interligação do sistema

Fonte: Duarte (2013).

2.2 TARIFAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, ELASTICIDADE-PREÇO

Através da resolução normativa 414/2010 a ANEEL iniciou a reestruturação tarifária dos consumidores de energia elétrica que foi dividido em dois grupos de consumidores baseado na tensão de atendimento para o grupo “A” e nas classes tarifárias para o grupo “B” em relação à tensão de fornecimento:

→ consumidores do grupo “A” (alta tensão), ligados a tensões iguais ou superiores a 2,3 kV e se subdividem em 4 subgrupos:

- A.1: consumidores ligados a tensão de 230kV ou mais;
- A.2: consumidores ligados a tensão de 88Kv a 138kV;
- A.3: consumidores ligados a tensão de 69 kV e
- A.4: consumidores ligados a tensão de 2,3 a 25 kV.
- A.S: atendimento em tensão inferior a 2,3 kV (sistema subterrâneo).

→ consumidores do grupo “B” (baixa tensão), ligados a tensões inferiores a 2,3 kV e se subdividem em 4 subgrupos:

- B.1: Residencial e residencial de baixa renda;
- B.2: Rural, cooperativa de eletrificação rural e serviço público de integração;
- B.3: demais classes;
- B.4: Iluminação pública.

Essa separação é motivada pela diferença de custo envolvida no atendimento de cada agrupamento tarifário, bem como, as características de uso do sistema por classe de consumidor. Alguns subgrupos são definidos por condições específicas, como o caso do subgrupo “AS” ou, ainda, devido a subsídios tarifários, como o caso da subclasse residencial de baixa renda.

Assim, a metodologia usada para cálculo de tarifa de fornecimento de energia elétrica passou a abrangência de cada tipo de unidade consumidora, classificada pelo nível de tensão, atendida sua finalidade.

2.2.1 Segmentação tarifária

A tarifa de energia elétrica no Brasil é segmentada em duas classes:

- TUSD – que é tarifação de uso do sistema de distribuição;
- TE – que é a tarifação pela energia utilizada.

Os consumidores atendidos pela baixa tensão possuem a tarifa cobrada em função do consumo de energia elétrica do período, englobado a compra de energia e encargos incidentes.

A formação tarifária de energia elétrica tem se deparado com duas características básicas do sistema que devem ser consideradas para melhorar a demanda no setor.

- A primeira é a demanda diária de consumo de forma sazonal, sobrecarregando o sistema em determinados horários do dia.
- A segunda se relaciona com a incapacidade do setor em armazenar eletricidade em quantidades suficientes para o atendimento da demanda em momentos que o sistema estiver sobrecarregado.

Com a NT 311/2011 a ANEEL reestruturou a forma de tarifação para atender a implementação das redes inteligentes no Brasil, sinalizando para uma estrutura em duas modalidades tarifárias:

- Modalidade Tarifária Convencional: monômnia, com um preço de consumo de energia em R\$/kWh, sem levar em consideração o horário, e atualmente utilizada.
- Modalidade Tarifária Branca: instituída pela Resolução Normativa ANEEL 414/2010, composta pela modalidade monômnia, com três tipos de preços de consumo de energia em R\$/kWh, de acordo com os postos tarifários e a curva diária de consumo, classificada, em fora de ponta, intermediária e de ponta sendo a última classificação o horário típico em que o sistema está sobrecarregado.

Com a aplicação da modalidade tarifaria branca, considerando a diferenciação no consumo de energia de acordo com os horários do dia, as tarifas a serem aplicadas aos consumidores do grupo de baixa tensão são calculadas sob a forma binômnia com uma componente de potência e outra de consumo de energia e serão fixadas após a conversão para a forma monômnia equivalente.

De acordo com a nota técnica ANEEL 311/2011 os fatores utilizados para a construção das relações entre os postos da TUSD para o horário de ponta, intermediário e fora de ponta para a tarifa branca são apresentadas nas equações a seguir:

$$\frac{TUSD_{ponta}}{TUSD_{foraponta}} = 5$$

(1)

$$\frac{TUSD_{intermediário}}{TUSD_{foraponta}} = 3$$

(2)

A tarifa TUSD fora de ponta é obtida de acordo com a equação a seguir:

$$TUSD_{foraponta} = TUSD_{convencional} \times Kz \quad (3)$$

Onde: Kz é a relação entre tarifas fora de ponta e a convencional, esse fator é baseado no comportamento do consumidor, sendo obtido para cada distribuidora.

A aplicação de técnicas de GLD para promover o deslocamento de cargas do horário de ponta para o horário fora de ponta passa pela necessidade de uma adequação no sistema tarifário e a variação de modalidades pode ser um dos passos para melhoria da eficiência energética do sistema de distribuição e a modernização do sistema elétrico de potência se tornando mais eficiente através de recursos provenientes das redes de informações sob o conceito das redes inteligentes (ABDULAZIZ E TAQQALI, 2010).

2.2.2 Importância do *Smart Meter*

A elasticidade-preço do mercado de energia tem como seu maior coadjuvante a utilização do medidor eletrônico.

Haney et al. (2009) argumenta que a medição eletrônica é vista cada vez mais como uma ferramenta para se fomentar a resposta à demanda no mercado de eletricidade, ainda, que o medidor eletrônico facilite a aplicação de novas estruturas de preços e diminui a assimetria de informação no mercado.

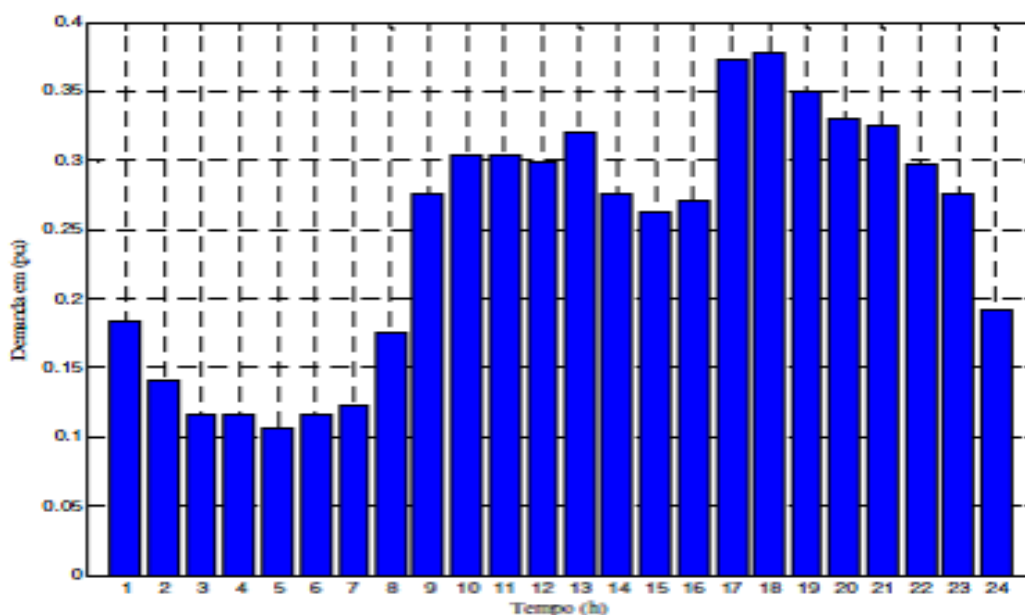
Darby (2006) avaliou que um medidor eletrônico proporciona ao consumidor dois tipos de *feedbacks*: um direto, através de alguma interface de *display*, e um indireto, através da conta de energia. Assim, chega a conclusão que o *feedback* direto é mais efetivo que o indireto e que *displays* amigáveis deveriam ser parte das especificações dos medidores eletrônicos, buscando melhorar o nível de *feedback* direto.

A forma como ele é desenvolvido e conectado ao consumidor final é, portanto, um dos aspectos chaves para o aumento da elasticidade do mercado de energia e consequente sucesso de um programa de resposta à demanda.

Espera-se que com a diversificação proporcionada pelo *Smart Meter*, tanto relacionada com a troca de informações bidirecionais, como na forma de faturamento, se considerado no contexto do sistema energético brasileiro, haverá mudanças nos hábitos dos consumidores, fazendo com que haja deslocamento do consumo dos horários em que o sistema estiver carregado para os horários fora de ponta, melhorando o fator de carga, tornando a curva mais plana possível.

Na Figura 1 é demonstrado o comportamento típico da curva de carga do sistema de distribuição de energia no Brasil, durante os horários do dia, apontando que o sistema tem o maior carregamento entre às 17:00 e 21:00 horas do dia.

Figura 1- Curva Diária de consumo.



Fonte: Osório (2013).

2.2.3 Tarifação como fator incentivador

A ANEEL ao regular a implantação de redes inteligentes no Brasil permitiu ao consumidor optar pela modalidade tarifária (convencional ou branca), objetivando que o próprio consumidor migre gradativamente para o sistema regulado pelo deslocamento temporal de consumo, movendo seu consumo dos habituais horários de pico para horários alternativos fora de pico.

Porém, não pode ser descartada a necessidade de um efetivo controle sobre a mudança pretendida, que se destinam a estimular o deslocamento temporal no consumo de eletricidade.

Segundo Faria (2011) as novas oportunidades de mercado criadas pela implantação de redes automatizadas incluem a participação dos consumidores, que influenciados pelos incentivos nos preços da energia, mudam a temporização, o nível da demanda espontânea ou a totalidade do consumo de eletricidade. Esses incentivos são os meios utilizados inerentes ao GLD indireto, com alta do preço da energia quando o sistema tem sua confiabilidade prejudicada e com baixa de preços quando o sistema não apresenta comprometimento em seu carregamento.

A ANEEL concluiu discussões em torno de cálculos tarifários para os consumidores de baixa tensão, em novembro de 2011, através da audiência pública 120/2010, que culminou no aprimoramento e mudanças nos procedimentos de cálculos, provocando avanços inquestionáveis em matéria de cálculo tarifário para os consumidores do grupo “B”, com a criação de tarifas horárias (bandeira branca), baseada no conceito TOU.

A ideia é o controle indireto da carga pelas distribuidoras, caracterizando um GLD indireto, visando à redução da demanda nos horários de pico. Por outro lado oferecer incentivos para os clientes que priorizem seus consumos em horários em que a tarifa se comporte de forma mais barata, através da possibilidade de economia em suas faturas de energia elétrica.

2.2.4 Gerenciamento pelo lado da demanda

Quando se fala em contenção da demanda de qualquer bem, basta que se eleve o preço dessa mercadoria a patamares razoáveis para que o consumidor restrinja seu uso, em se desejar um aumento na demanda basta flexibilizar os preços tornando-os mais acessíveis.

Para o consumo de energia elétrica as práticas não se mostram diferentes. Se o valor da tarifa se eleva o comportamento do consumidor sinaliza por uma economia; se o valor da tarifa é reduzido, a tendência do consumidor é aumentar o uso da energia com a utilização de aparelhos que lhe proporcione maior conforto.

Com a implantação da tecnologia *Smart Grid* e a intenção da mudança na curva de demanda, ao aplicar um sensível aumento dos preços tarifários nos horários em que o sistema estiver sobrecarregado poderá fazer com que o consumidor migre para horários em que esses preços são mais baixos, ou até mesmo provocar uma retração no consumo.

O uso de uma tarifa dinâmica permite que os consumidores se adaptem, em tempo real, à nova modalidade. Para isso as empresas de distribuição de energia podem atuar na tarifa para modificar a curva de carga, tornando-a mais plana possível (OLIVEIRA, 2014).

Medidores inteligentes fazem papel fundamental na adoção de tarifas diferenciadas por hora do dia, pois permitem que o próprio consumidor decida o período de consumo e promova o controle orçamentário da unidade consumidora, pois os medidores inteligentes têm a capacidade de apresentar, visualmente, o nível de consumo instantâneo e o valor da tarifa em um dado momento.

Com este conceito e com a implementação de tarifas dinâmicas durante horas do dia, poderá se obter uma readaptação do consumidor, de forma que a mudança do consumo para horários em que a demanda se comporte de maneira mais flexível preencherá os vales existentes na curva de carga na maior parte do dia.

Tradicionalmente, isso é feito em um contexto de gestão de carga durante os períodos de alta demanda, essencialmente com o objetivo de diminuir os horários de pico.

Para Faria (2011), essas novas oportunidades criadas pelo mercado da energia elétrica têm sido aproveitadas pelas empresas do setor. Sem perder de vista que essas oportunidades necessitam da adesão dos consumidores, pois, com elas é que os resultados aparecem e com a possibilidade de serem implantadas através de definição de preço final, de curto ou em longo prazo, a depender do contexto e da capacidade de mercado ou através de contratos bilaterais.

Para o êxito do programa, é necessário que se encontre a melhor forma de calcular o melhor preço das tarifas para energia elétrica e trabalhar com múltiplas tarifas, de forma que se atinjam os objetivos desejados e que tragam benefícios para os consumidores e para as concessionárias.

Segundo Oliveira (2014), com o objetivo de atingir as metas de deslocamento da curva de carga as empresas distribuidoras de energia devem atuar em dois passos:

a) Calcular o preço ótimo da tarifa de energia que induzirá o consumidor ou cliente a alterar seus hábitos de consumo na direção desejada;

b) Informar ao cliente o valor da tarifa calculada para que o mesmo tome a decisão de aumentar, diminuir ou manter o consumo.

Gestão de demanda tem em seu conceito mais elementar na categorização de suas ações, para que atinja um objetivo pré-estabelecido e desejado. No caso específico da energia elétrica, seu foco se volta para o gerenciamento de carga, com aplicações de tarifas diferenciadas, uso racional e consciente de energia, substituição de sistemas convencionais de geração e entrega por geração alternativa e controle eficiente na persecução de metas pré-estabelecidas.

Segundo Gellings (1986) a gestão pelo lado da demanda compreende planejamento, implementação e monitoramento de atividades com relação ao uso de energia elétrica pelo consumidor como forma de atingir os objetivos desejados na curva de carga.

O sucesso de um programa de gestão passa pelos interesses dos consumidores e das concessionárias, e tem que primar pelo equilíbrio das necessidades de um e do outro.

A gestão de demanda trabalha com dados informativos da quantidade a ser consumida a cada nível de preço, e são 5 os fatores que podem influenciar diretamente a curva de demanda: preço, renda, preço de produtos correlacionados, gasto, e expectativa. O preço é fator motivador quando se objetiva a mudança de hábitos de consumo, porém a principal questão que poderá influenciar negativamente a demanda está relacionada com a renda dos consumidores, pois de acordo com seu poder econômico é que se classifica o nível de resistência às mudanças de hábitos.

2.2.5 Adesão obrigatória à resposta de demanda

Em determinadas classes sociais fica difícil a mudança de hábito no consumo pelo simples incentivo na redução ou aumento dos preços tarifários em determinados horários, seja nos horários de ponta ou fora de ponta.

A perda do conforto devido a mudança de hábitos de consumo do consumidor poderá requerer outros atrativos e formas de conscientização para o sucesso completo da implementação da resposta de demanda, dentre os atrativos pode-se destacar: confiabilidade, eficiência, segurança e questões ambientais.

Em pesquisa encomendada pela ANEEL, entre junho e agosto de 2013, com mais de 2300 clientes do Grupo “B”, sobre o faturamento e temas afins tendo em conta a implantação da tarifa branca no Brasil e a implantação de redes inteligentes, que tratam a tarifação de forma horossazonal, observou-se que, na

baixa tensão, cerca de 75% dos clientes optaram pela tarifa branca, e que 25% dos clientes não quiseram ou não conseguiram mudar seus hábitos (GT MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2013).

Entende-se que os 25% dos clientes que resistiram a mudanças é pelo seu perfil socioeconômico, sendo que não se interessaram pelos incentivos propostos.

Vale ressaltar que essa faixa de consumidores resistentes pode estar na sua maioria entre aqueles que apresentam maior consumo per capita.

Apesar de a ANEEL estar sinalizando para que a escolha pelo consumidor prevaleça no momento de optar pela modalidade de tarifa que melhor lhe convenha (branca ou convencional), assim como vem tratando a grande parte dos programas de resposta de demanda pelo mundo, faz-se necessária a implantação de programas com resposta obrigatória, o que faria com que o sistema ganhasse benefícios em sua gestão, Faria (2011).

Os programas de resposta obrigatória deveriam ser implantados, principalmente, para maiores clientes, pois a tecnologia *Smart Grid* possibilita essas novas oportunidades na gestão pelo lado da demanda.

Neste sentido, agregadas aos medidores inteligentes, novas ferramentas deverão ser disponibilizadas aos consumidores que possibilitem a visualização da tarifa praticada no posto tarifário corrente e indicadores que permitam gerenciar a execução de operações de seus equipamentos com eficiência, de forma que possam obter o máximo de economia em sua fatura de energia elétrica mantendo seu conforto habitual no uso da energia elétrica.

2.2.6 Resposta de demanda – geração distribuída

Outra questão a ser abordada, que impacta diretamente a formação do processo tarifário é que com essa tecnologia poderá estar surgindo a possibilidade do crescimento de várias fontes de energia alternativas ou Geração Distribuída (GD), geradas em pequenas escalas.

Através da resolução 482/2012 a ANEEL regulamentou as condições gerais para acesso do consumidor à geração distribuída de energia elétrica e definiu o sistema de compensação de energia elétrica ativa injetada pela unidade consumidora na rede.

Assim, quando o consumidor injeta energia elétrica na rede recebe um bônus que é traduzido ao consumidor em créditos de energia elétrica, de acordo

com a quantidade de energia injetada na rede que terá validade por 36 meses para ser compensada em faturas futuras de energia ativa fornecida pela concessionária para a mesma unidade consumidora, ou em outra unidade pertencente ao mesmo titular, previamente cadastrado.

2.2.7 Programas de resposta de demanda

A taxa elasticidade-preço é medida usando como análise a boa evolução da economia ou do serviço e poderá ser aferida por programa de resposta de demanda (PRD).

O gerenciamento da demanda consiste de programas que visam alterar o padrão de consumo de energia elétrica dos consumidores e agem nos estímulos a modificar a potência com desvios de cargas dos horários de ponta para os horários fora de ponta. Essa mudança no perfil de consumo diminuirá sensivelmente a necessidade de investimentos em ativos pela geração, transmissão e distribuição de energia elétrica (BAHARLOUEI; HASHEMI, 2013).

A alternativa mais utilizada em programas de resposta de demanda é a adoção de incentivos tarifários para modificar o padrão de demanda dos consumidores. Existem diversas maneiras de implementar programas de resposta à demanda via estrutura tarifária.

Para Faria (2011), um programa de resposta de demanda se divide em dois grandes grupos:

1- Aquele que se relaciona com a mudança de hábitos do consumidor, em variação à resposta pelo preço pago, e nele está incluído o Time-of-use (TOU); o Real Time Pricing (RTP) e o Critical-Peak-Pricing (CPP), com destaque ao grupo CPP haja vista que este grupo é eleito pelos autores como o mais importante.

1º. Real-time pricing (RTP), na precificação em tempo real, os consumidores devem pagar preços que, em determinado período, reflitam as condições de oferta e demanda do sistema, representando uma sinalização econômica precisa para o mercado. Já USDE (2006) define a RTP como uma taxa na qual o preço da eletricidade tipicamente flutua a cada hora, refletindo as mudanças no preço do atacado, podendo os clientes serem notificados com um dia ou uma hora de antecedência. Segundo Souza e Ramos (2010), neste tipo de tarifação os consumidores são incentivados durante o tempo todo a alterar sua demanda de energia, contribuindo para o equilíbrio do

mercado, o aumento da segurança do sistema e a diminuição dos picos. No entanto, como ressaltado por Lafferty et al. (2001), os consumidores são avessos aos riscos. A modalidade RTP deveria, portanto, vir acompanhada de mecanismos de mitigação de variações excessivas do preço no curto período de tempo.

2º. Time-of-Use (TOU), esta modalidade de precificação envolve a definição de preços diferenciados por períodos de tempo pré-definidos: sejam horas do dia, dias da semana ou períodos do ano. Este mecanismo também busca definir sinais econômicos do custo da energia, mas em um nível de discretização bem menor do que a RTP, o que pode fazer com que os preços não reflitam a condição momentânea da oferta e da demanda.

3º. Critical Peak Pricing (CPP): o CPP é uma modalidade que envolve um mix dos programas TOU e RTP. Esta modalidade acrescenta uma taxa extra a uma tarifa do tipo TOU em períodos críticos de pico do sistema, notificadas em curtíssimo prazo pela distribuidora, segundo Borenstein (2005). Nesse tipo de programa há uma limitação de alguns poucos dias críticos durante o ano.

2-Grupo que permite aos consumidores o pagamento de taxas fixas ou variáveis com incentivos por tempo de uso, conhecida como Incentive-based demand response. Este tipo de resposta de demanda permite que as concessionárias penalizem os consumidores por quebra de contrato ou quando a demanda contratada, em horários predefinidos, é extrapolada.

Segundo (FARIA, 2011), o grupo 2 está subdividido em 6 programas:

- a) Direct Load Control (DLC): programa que permite o desligamento remoto dos equipamentos pelas concessionárias e são comumente implantados em residências e pequenos comércios.
- b) Interruptible/curtailable Service (ICS): este programa se baseia na opção de redução das tarifas no varejo, com incentivos que podem ser através de desconto na tarifa, que poderá incidir diretamente na fatura ou ser acumulado em carta de crédito. Isso ocorre quando os clientes aderem ao programa para reduzir a demanda nos momentos em que o sistema estiver carregado, geralmente é oferecido às grandes indústrias.
- c) Demand Bidding/Buyback (DBB): neste programa os consumidores que se sujeitarem à redução de capacidade de carga, poderão oferecê-las em modalidade de licitação, preferencialmente adequada a grandes

consumidores.

- d) Emergency Demand Responce (EDR): é o hibridismo de DLC e ICS, e o alvo deste programa é o atendimento do setor em períodos que as reservas se mostrarem insuficientes.
- e) Capacity Market (CM): neste programa os consumidores são incentivados a cumprirem metas de redução e oferecem a carga reduzida ao sistema caso a oferta da empresa de distribuição esteja a baixo do mercado.
- f) Ancillary Services Market (ASM): este programa é similar ao DBB, ao passo que neste mercado a oferta se realiza para auxiliar o serviço de mercado no momento em que estiver carregado, e o serviço poderá ser pago por reserva ou por provisão de energia separadamente.

Elasticidade-preço está diretamente relacionado com a sensibilidade da demanda em relação ao preço praticado. A relação entre preço e a procura tem sido alvo de vários programas de Resposta de Demanda (RD), (FARIA, 2011).

Neste sentido a adoção de valores específicos para cada região se mostra factível, porém, a linearidade das variáveis se mostra mais fácil, apesar de não representar o comportamento de todas as classes de consumidores (SANTOS, 2008).

Segundo Boccuzzi (2012), a adoção de tarifas que sinalizem aos clientes os diferentes custos de fornecimento é sem dúvida um grande avanço, mas nos países e regiões onde foram implantadas, normalmente são feitas avaliações e estudos de elasticidade, preço e resposta à demanda. Estas respostas a preços variam de região para região em razão de hábitos culturais, renda, temperatura média, e uma série de fatores. Dada a grande densidade existente entre as regiões do Brasil, seria interessante rever estes patamares fixos na relação entre os horários de ponta, intermediário e fora de ponta.

2.2.8 Programa de resposta de demanda sob a perspectiva do consumidor

Para Duarte et al. (2013), o avanço do conceito de *Smart Grid* traz consigo a aplicação integrada de uma série de funcionalidades avançadas no sistema de distribuição. Estas funcionalidades impactam tanto nos processos de gestão do sistema de distribuição como nos procedimentos de planejamento, operação e engenharia, além de permitirem ao consumidor maior gerência sobre seu consumo de energia, podendo estes inclusive ocupar o papel de produtores.

Diante de um cenário com diversos agentes, com alternância de papéis e com intensa interação entre si, somado às funcionalidades sistêmicas e de rede propiciadas pelos avanços tecnológicos crescentes, é fundamental a análise de todos os aspectos sob a ótica de todos os agentes envolvidos.

Dessa forma, há a possibilidade de se estabelecer políticas ótimas de implantação das funcionalidades de Redes Inteligentes, buscando a maximização do benefício social propiciado por este.

Cabe ressaltar que os interesses dos diversos agentes na evolução do sistema elétrico nem sempre são coincidentes, havendo a necessidade de definição dos caminhos apropriados tendo em vista a garantia de prestação adequada do serviço de distribuição de energia ao consumidor.

Os novos desenvolvimentos tecnológicos e as novas possibilidades viabilizadas pelos consumidores, assim como, a garantia da atratividade do setor e a sustentabilidade econômica das empresas responsáveis pela prestação deste serviço, também, deverão estar presentes na implantação da tecnologia.

Segundo Duarte (2011), ao longo do ano de 2011 foi desenvolvido projeto de P&D estratégico da ANEEL sobre Redes Elétricas Inteligentes, que visou nortear um Plano Nacional para a migração tecnológica do setor elétrico brasileiro do estágio atual para a adoção plena do conceito de Rede Inteligente em todo o país. Todo estudo que envolve a definição de um “*roadmap*” deve responder quatro questões fundamentais de forma a otimizar custos e benefícios advindos das implantações desejadas:

- 1- Onde estamos? (Diagnóstico)
- 2- Onde queremos chegar? (Alvo)
- 3- Como chegar?
- 4- Quando chegar?

Os parâmetros de onde estar; como chegar e quando chegar estão na forma de agir consciente e responsável do consumidor e implica na mobilização, integração e transferência de uma zona em que se encontra, que poderá ser compreendida como de conforto, para uma outra zona, até então desconhecida, que poderá não ser tão confortável, porém, com a finalidade razoável de obtenção de resultado.

Para que essa mudança aconteça o consumidor requer ou uma melhoria no seu estado atual ou um bem-estar maior do que aquele que já possui, pois desses requisitos dependem as ações de mudança.

Para a adesão do consumidor ao projeto *Smart Grid*, faz-se necessária divulgação das políticas de forma correta, inserindo no contexto quais serão os benefícios alcançados com a mudança de hábitos no sentido do deslocamento horário no uso da energia elétrica.

Os benefícios alcançados pelo consumidor devem ser atraentes no sentido de que a diminuição no conforto de agora se traduza em benefícios futuros sinalizados por uma sensível economia na conta de energia.

Por outro lado, em caso de mudança de hábitos conforme proposta na implantação do projeto de *Smart Grid*, em se tratando da faixa de baixa tensão, é preciso partir da premissa que haverá necessidade de manter fatores importantes que permitam ao consumidor essas mudanças, mas, também, a conservação de determinadas funções que possibilitem o mínimo conforto em seu ambiente, principalmente, nos momentos considerados horários de ponta.

Para que essas mudanças realmente sejam contempladas com êxito, faz-se necessário uma informação correta e com parâmetros que proporcione ao consumidor uma visão clara de quais os objetivos deverá perseguir e qual caminho a percorrer para atingir metas com a implantação de redes inteligentes no Brasil.

O que se nota com relação às pesquisas da elasticidade e modulação tarifária no projeto *Smart Grid*, é que os estudiosos têm direcionado seus estudos no sentido de viabilizar os modelos tarifários, exclusivamente, do ponto de vista das permissionárias, fato que poderá comprometer a adesão massiva do consumidor ao programa, caso estes não tenham visão clara dos incentivos que o projeto proporciona.

Neste sentido é que se vislumbra uma análise adequada através de modelo matemático, para que o consumidor se oriente na decisão de mudar seus hábitos em relação ao consumo de energia elétrica, de forma que possa obter ganhos na sua fatura sem comprometer, demasiadamente, seu bem-estar.

Modelos matemáticos podem ajudar na solução de problemas complexos, principalmente, quando se quer tomar decisão, e mais ainda quando esta decisão influencia diretamente o conforto do consumidor.

Então, destaca-se a necessidade de uma orientação básica ao consumidor, no sentido de tomada da melhor decisão. Essa orientação poderá vir com a utilização de modelos matemáticos.

Com os elementos quantitativos, o consumidor poderá alimentar seu processo decisório, optando pela melhor forma de consumir energia, levando em consideração os intervalos de horários que melhor lhe satisfaz.

O modelo deve determinar o valor ótimo de uma função linear ou não-linear, que considere de forma mais próxima da realidade possível, as restrições e variáveis que venham a influenciar a decisão do consumidor no deslocamento de seu consumo.

Frossard (2009) propõe um roteiro preliminar que poderá ser seguido e que ajudará no raciocínio:

- Quais as variáveis de decisão? Esta é a pergunta do problema.
- Qual o objetivo? Expressão que calcula o objetivo.
- Quais as restrições? Expressam as igualdades ou as desigualdades.

Modelos matemáticos simplificados poderão fazer o papel de bem orientar o usuário no deslocamento horário de suas cargas, com sensíveis economias na fatura de energia elétrica, gerenciando a própria demanda, sem perder o conforto e o bem-estar e obter uma sensível economia na fatura, além de contribuir com a remodelagem da curva de carga diária do sistema.

Assim, técnicas de gerenciamento pelo lado da demanda se mostram ideais para medir as reais e diversas maneiras de uso de energia elétrica sob as perspectivas do consumidor na implantação do projeto *Smart Grid* no Brasil, com possibilidade para o deslocamento da curva de carga e bem orientar o consumidor, que necessita saber quais as vantagens lhe favorecerão com a adesão ao projeto, principalmente, em relação à tarifação.

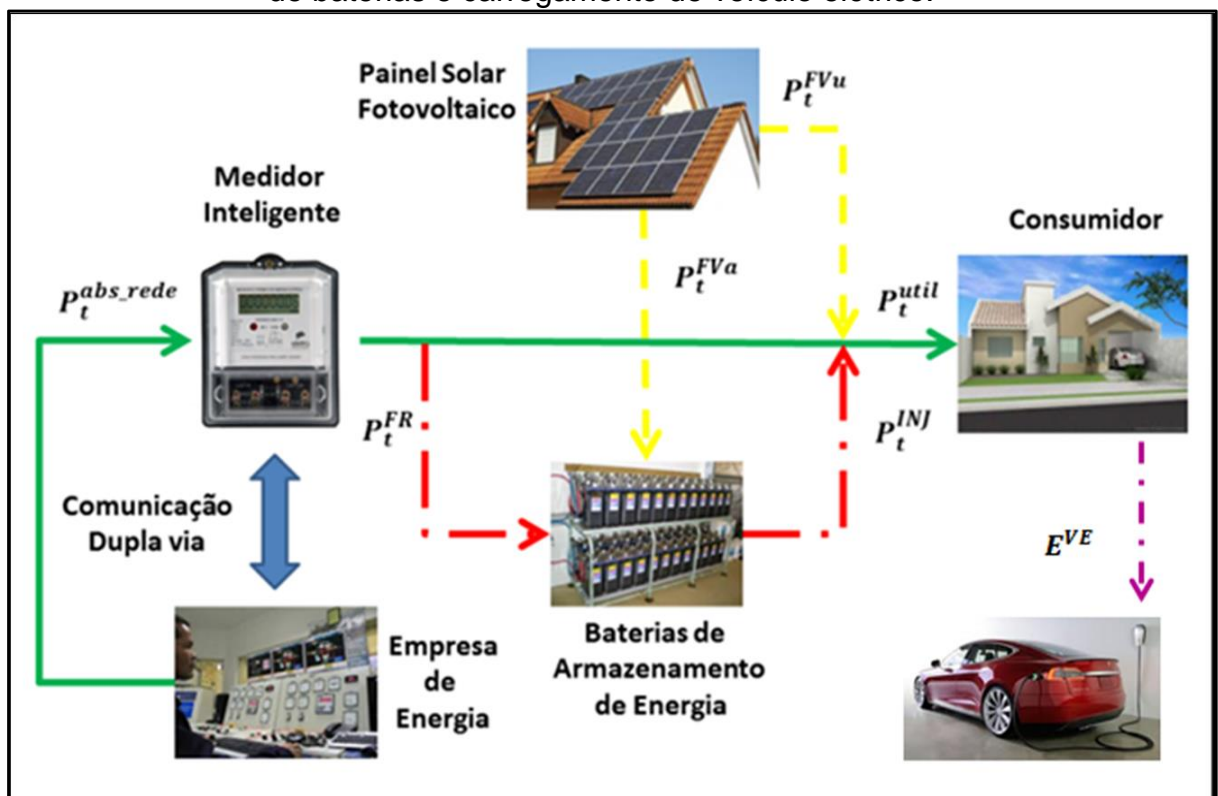
Baseado no exposto acima é necessário desenvolver ferramentas para servir de suporte na tomada de decisão do consumidor, baseada na implementação de um programa de GLD utilizando-se de modelos matemáticos.

3 MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático proposto para otimização do problema, inicialmente levou em consideração um consumidor com perfil de uso de equipamentos com a possibilidade de geração de energia distribuída (GD) e armazenamento por baterias, ainda, com especial atenção a condição futura dos sistemas de distribuição, que é ter veículos elétricos conectados a rede.

A Figura 02 ilustra um esquemático dos fluxos de potência em uma unidade consumidora de energia elétrica composta por sistema de geração de energia fotovoltaica e banco de baterias para armazenamento. O modelo matemático proposto permite a integração dessas alternativas de tal forma que a energia gerada pelo painel fotovoltaico durante o dia pode ser utilizada pelo consumidor ou esta sendo armazenada no banco de baterias, ao mesmo tempo em que se utiliza da potência fornecida da rede para suprir a demanda.

Figura 2- Unidade consumidora de energia elétrica com painel fotovoltaico, banco de baterias e carregamento de veículo elétrico.



Fonte: Elaboração do autor.

Na formulação do modelo matemático para o problema, são consideradas a potência absorvida da rede de distribuição e a energia produzida pelo painel

fotovoltaico como a potência total de entrada do consumidor sendo parte desta potência fornecida ao banco de baterias e o restante a potência efetivamente utilizada pela unidade consumidora.

O modelo prioriza o armazenamento da energia no banco de baterias durante o dia, nos intervalos horários em que o preço da energia está baixo, e estabelece a injeção de potência nos intervalos horários em que o valor tarifário estiver em patamares elevados, ou seja, nos horários considerados de pico. Dessa forma se busca manter o conforto do usuário em patamares próximos do desejado ou habitual. O modelo matemático proposto visa, ainda, à otimização no uso de energia elétrica, levando em consideração a possibilidade do deslocamento de equipamentos elétricos com cargas controláveis ao longo do período do dia, ou seja, aqueles eleitos pelo consumidor como não prioritários e que, portanto, podem ser deslocados seus horários de funcionamento.

Nota-se que esses são objetivos conflitantes, ou seja, priorizar o conforto significa manter horários de funcionamento habituais do consumidor sem considerar o valor da tarifa de energia naqueles horários sendo conflitante com a escolha de ligar os equipamentos em horários de menor tarifa e não considerar o consumo habitual do consumidor.

A função objetivo do problema é apresentada na equação (04).

$$\begin{aligned} \min: F = & k_1 \cdot \sum_{\substack{\forall e \in \Omega_e \\ P_e = 1}} \sum_{\forall t \in \Omega_t} \delta_t^E \cdot \varepsilon_{e,t}^o + k_2 \cdot \sum_{\substack{\forall e \in \Omega_e \\ P_e = 0}} \sum_{\substack{\forall t \in \Omega_t \\ QCA,t=1}} \delta_t^E (\varepsilon_{e,t}^h - \varepsilon_{e,t}^o) \\ & + k_3 \cdot \sum_{\forall t \in \Omega_t} \delta_t^E \cdot P_t^{abs_rede} \cdot h \end{aligned} \quad (4)$$

Na Função objetivo (4) do modelo matemático desenvolvido para a resolução do problema de gerenciamento ótimo pelo lado do consumidor é minimizado o custo da energia fornecido pela rede elétrica, assim, promove o deslocamento do uso dos dispositivos não prioritários dos períodos de tempo (t) em que são habitualmente usados para períodos em que o custo da energia está mais barato, ao mesmo tempo em que conserva o funcionamento dos equipamentos prioritário dentro dos horários habituais de consumo, permitindo manter o máximo de conforto ao consumidor. Para que isso ocorra o consumidor deve eleger os equipamentos (e) que julgar prioritários, ou seja, aqueles equipamentos que possuem horários restritos de funcionamento e que o modelo não poderá deslocar

para outros horários. Por outro lado se não for restringido os horários de funcionamento o modelo irá buscar os melhores horários para o funcionamento das cargas não prioritárias, dessa forma, deslocando de forma coerente o funcionamento desses dispositivos para o horário de funcionamento mais conveniente, sendo períodos de tempo (t) em que o valor da tarifa se apresentar com valores reduzidos. Portanto, fica a cargo do consumidor selecionar os equipamentos que julgar prioritários ou não prioritários, de acordo com a opção de maior conforto, sendo os horários de utilização dos equipamentos prioritários restritos em horários habituais do consumidor ou maior economia na energia faturada deixando o modelo otimizar os deslocamentos dos equipamentos de modo a reduzir a potência absorvida da rede de distribuição.

Nas equações (5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12) são apresentadas as primeiras restrições do modelo como segue:

$$\sum_{\substack{\forall t \in \Omega_t \\ hp_{e,t}=1}} x_{e,t} = h_e^u; \quad \forall e \in \Omega_e \quad (5)$$

$$\sum_{\forall e \in \Omega_e} x_{e,t} \cdot P_e^{med} \leq \beta \cdot \text{Max}_{\forall t \in \Omega_t} \left\{ \sum_{\forall e \in \Omega_e} P_e^{med} \cdot QCA_{e,t} \right\}; \quad \forall t \in \Omega_t \quad (6)$$

$$\varepsilon_{e,t}^0 = \left(\frac{P_e^{med}}{60} \right) \cdot m_{e,t}; \quad \forall e \in \Omega_e, \forall t \in \Omega_t \quad t_e^E = 0 \quad (7)$$

$$0 \leq -m_{e,t} + n_{e,t}; \quad \forall e \in \Omega_e, \forall t \in \Omega_t \quad (8)$$

$$-m_{e,t} + n_{e,t} \leq M \cdot (1 - x_{e,t}); \quad \forall e \in \Omega_e, \forall t \in \Omega_t \quad (9)$$

$$0 \leq m_{e,t}; \quad \forall e \in \Omega_e, \forall t \in \Omega_t \quad (10)$$

$$m_{e,t} \leq M \cdot x_{e,t}; \quad \forall e \in \Omega_e, \forall t \in \Omega_t \quad (11)$$

$$\underline{N}_e \leq n_{e,t} \leq \bar{N}_e; \quad \forall e \in \Omega_e, \forall t \in \Omega_t \quad (12)$$

Sendo que $x_{e,t}$ é o número de equipamentos utilizados na residência que funcionam no horário t que ao continuar a consumir energia dentro do horário habitual é responsável por manter os níveis de conforto dentro dos limites

parametrizados pelo usuário ($P_e=1$). $\varepsilon_{e,t}^o$ representa o consumo ótimo de energia a partir de dispositivos eleitos como não prioritários e que sofreram deslocamentos ($P_e=0$). $m_{e,t}$ representa o produto de $x_{e,t}$ e $n_{e,t}$ este representa o número de minutos em que o equipamento irá funcionar dentro do horário t , que são delimitados por dois parâmetros para formar o domínio factível \underline{N} que não pode ser negativo e \bar{N} não pode ser maior que 60 minutos.

Na restrição (5) reforça-se a utilização dos dispositivos de usos-finais no período t com $hp_{e,t} = 1$, as restrições (6-7) estão relacionadas aos usos-finais não prioritários.

Como a variável $m_{e,t}$ é composta por produtos binária e contínua, respectivamente, se obtém um produto de natureza não linear, dessa forma, adiciona-se um conjunto de restrições lineares equivalentes conforme pode ser observado nas restrições (8-12), obtendo-se a linearização desse produto, baseado no método Big-M (KASANA; KUMAR, 2004).

A energia armazenada no banco de baterias possui componente preferencialmente da energia gerada pelo painel fotovoltaico com potência (P_t^{FVa}) e, em segundo plano, componente fornecida pela rede (P_t^{FR}). Assim, nos períodos do dia em que a energia fotovoltaica esta sendo produzida a potência é direcionada para atender a potência utilizada, bem como, à energia armazenada. Então, para atender o armazenamento de energia no banco de baterias o modelo matemático busca fazer com que o banco de baterias absorva parte da energia fotovoltaica produzida e, em caráter suplementar, a energia da rede nos horários fora de pico, otimizando custos com o aproveitamento da potência gerada e residualmente com a energia advinda da rede em momentos em que a tarifa esteja mais barata. Também, o modelo injeta a potência armazenada nos horários de pico, otimizando o conforto do usuário.

Dessa forma, com a potência armazenada, o consumidor poderá manter hábitos de consumo através de potência injetada nos horários de pico, período, esse em que a tarifa possui valor elevado. Assim adicionam-se as restrições 13, 14, 15, 16, 17, 18 e 19 ao problema:

$$P_t^{abs_rede} + P_t^{INJ} + P_t^{FVu} = P_t^{util} + P_t^{FR} ; \forall t \in \Omega_t \quad (13)$$

$$0 \leq P_t^{abs_rede} ; \forall t \in \Omega_t \quad (14)$$

$$P_t^{ABS} = P_t^{FVa} + P_t^{FR} ; \forall t \in \Omega_t \quad (15)$$

$$P_t^{FVp} = P_t^{FVu} + P_t^{FVa} ; \forall t \in \Omega_t \quad (16)$$

$$0 \leq P_t^{FVu} ; \forall t \in \Omega_t \quad (17)$$

$$0 \leq P_t^{FVa} ; \forall t \in \Omega_t \quad (18)$$

$$P_t^{UTIL} = \frac{1}{h} \cdot \sum_{\forall e \in \Omega_e} \varepsilon_{e,t}^0 ; \forall t \in \Omega_t \quad (19)$$

Nas equações 13 a 19 são ilustrados os estágios que caracterizam o balanço de potência, onde a $P_t^{abs.rede} + P_t^{INJ} + P_t^{FVu}$ satisfaz $P_t^{util} + P_t^{FR}$, observado que a potência absorvida da rede é delimitada pela restrição $0 \leq P_t^{abs.rede}$ pois não pode ser negativa, a potência absorvida pelo banco de baterias é satisfeita por P_t^{FVa} e P_t^{FR} , bem como, a potência fotovoltaica produzida pela equação P_t^{FVu} e P_t^{FVa} , em que a potência produzida não pode ser menor que o produto de P_t^{FVu} e P_t^{FVa} .

Ainda, visando atender a potência instalada pelo banco de baterias (P^{INST}) e prolongar a vida útil desses equipamentos, optou-se por inserir restrições que visam controlar seu carregamento, limitando-se o máximo de absorção de potência (\bar{P}^a) e injeção (\bar{P}^i), bem como, limite mínimo de absorção de potência (\underline{P}^a) e injeção (\underline{P}^i), delimitando sua máxima carga através da restrição (\bar{E}) e mínima pela restrição (\underline{E}). Assim adicionam-se as seguintes restrições através das equações 20 a 28.

$$P_t^{UTIL} \leq P^{INST} ; \forall t \in \Omega_t \quad (20)$$

$$\underline{P}^i \cdot \omega_t^i \leq P_t^{INJ} ; \forall t \in \Omega_t \quad (21)$$

$$P_t^{INJ} \leq \bar{P}^i \cdot \omega_t^i ; \forall t \in \Omega_t \quad (22)$$

$$\underline{P}^a \cdot \omega_t^a \leq P_t^{FR} ; \forall t \in \Omega_t \quad (23)$$

$$P_t^{FR} \leq \bar{P}^a \cdot \omega_t^a ; \forall t \in \Omega_t \quad (24)$$

$$\omega_t^i + \omega_t^a = 1 ; \forall t \in \Omega_t \quad (25)$$

$$E_t^B = E^{B0} ; \forall t \in \Omega_t / t = 1 \quad (26)$$

$$E_t^B = E_{t-1}^B + P_t^{ABS} \cdot h - P_t^{INJ} \cdot h ; \forall t \in \Omega_t / t > 1 \quad (27)$$

$$\underline{E} \leq E_t^B \leq \bar{E} ; \forall t \in \Omega_t \quad (28)$$

Nota-se que a restrição 25 impõe que o somatório de ω_t^i e ω_t^a seja igual a 1, garantindo, assim, que o banco de baterias em $t=1$ esteja em modo de operação armazenando ou injetando potência.

O estado do banco de baterias solares é inicializado na restrição 26 em $t=1$, assim como, o estado de carga ou descarga para os períodos $t > 1$ é estabelecido na restrição 27.

Quando considerado o carregamento da bateria de veículo elétrico, adotam-se parâmetros específicos, delimitando o horário de início e término do carregamento. Deste modo, quando o consumidor solicitar o carregamento para o veículo elétrico, receberá essa autorização para esse dispositivo dentro da faixa de tempo (t) em horas previamente determinada pelo consumidor, delimitado pelo horário inicial de acionamento do equipamento e horário final de acionamento do equipamento.

Para obter a delimitação quanto ao horário previamente programado para conexão do veículo elétrico o parâmetro (t_e^E) deverá ser igual a “1”, que significa que o veículo elétrico será conectado ao sistema pelo modelo matemático no intervalo de tempo restrito definido para o carregamento do veículo elétrico baseado nas restrições específicas para este tipo de equipamento conforme as equações 29 a 36. Por outro lado quando atribuído o valor “0” ao mesmo parâmetro, significa que não se trata de um veículo elétrico. Ainda assim caso o equipamento seja prioritário, não sendo um veículo elétrico, sua conexão fica restrita a determinado horário escolhido pelo usuário.

$$\varepsilon_{e,t}^O = P_e^{Med} \cdot \Delta\tau_{e,t}^{VE}; \forall_{e \in \Omega_e} / t_e^E = 1 \quad (29)$$

$$0 \leq -\Delta\tau_{e,t}^{VE} + \tau_t^{VE}; \forall_{e \in \Omega_e} / t_e^E = 1 \quad (30)$$

$$-\Delta\tau_{e,t}^{VE} + \tau_t^{VE} \leq M \cdot (1 - x_{e,t}); \forall_{e \in \Omega_e} / t_e^E = 1 \quad (31)$$

$$0 \leq \Delta\tau_{e,t}^{VE}; \forall_{e \in \Omega_e} / t_e^E = 1 \quad (32)$$

$$\Delta\tau_{e,t}^{VE} \leq M \cdot x_{e,t}; \forall_{e \in \Omega_e} / t_e^E = 1 \quad (33)$$

$$\underline{\tau} \leq \tau_t^{VE} \leq \bar{\tau}; \forall_t \quad (34)$$

$$E^{VE} = SOC + \sum_{\substack{Ve \in \Omega_e \\ t_e^E = 1}} \sum_{\forall t \in \Omega_t} \varepsilon_{e,t}^O; \quad (35)$$

$$0 \leq E^{VE} \leq 0,95 \cdot K^{Max}; \quad (36)$$

A variável $\Delta\tau_{e,t}^{VE}$ representa o produto das variáveis τ_t^{VE} e $x_{e,t}$ que caracteriza o carregamento do veículo elétrico, que recebe autorização para carregamento dentro da faixa de tempo t delimitado por horário inicial de carregamento $\underline{\tau}$ e final $\bar{\tau}$, através da restrição demonstrada na equação 35. Assim, caso não haja nenhum impeditivo, a faixa de horário de carregamento da bateria fica restrito a determinado horário, por exemplo, das 0:00 horas até às 06:00 horas do dia, dessa forma o modelo irá autorizar o carregamento somente para a faixa horária adotada.

Para a geração fotovoltaica, levaram-se em consideração os parâmetros área da planta fotovoltaica e a incidência solar durante o dia, tendo em vista que a potência fotovoltaica produzida é proporcional a irradiação solar incidente e que varia durante o período, aumentando nas primeiras horas do dia até atingir seu nível máximo, voltando ao nível mais baixo ao entardecer. Assim o modelo ficou sujeito a restrição dada pela equação 37:

$$\frac{A_{fv} * E^{sl}}{24} = P_t^{FVp} \quad (37)$$

4 TESTES E RESULTADOS

O modelo proposto foi implementado na plataforma AMPL (FOURER, 2003) e resolvido através do solver CPLEX (ILOG, 2008). Nas seções seguintes são apresentados os resultados para dois casos de simulação, sendo no primeiro empregado dados fictícios para validar o método de otimização proposto enquanto o segundo caso são utilizados dados reais de consumo.

Muitos benefícios são de difíceis quantificações, e não poderão estar inseridos em uma modelagem matemática para melhor orientar o consumidor no momento de decidir qual a melhor forma de consumir energia, como é o exemplo da diminuição da interrupção no fornecimento e a satisfação por estar consumindo uma energia de melhor qualidade, porém, ao se deparar com informações que lhe permita uma visão clara na gestão de consumo lhe possibilitará a adesão dos consumidores ao programa

Após ter validado o modelo, para testar a eficácia da técnica de gerenciamento ótimo de energia pelo lado do consumidor, optou-se por simulações em consumidores reais, cada um com suas próprias características de consumo e quantidade de dispositivos diversos.

Para a simulação em consumidores reais foi adotado o sistema de pesquisa *in loco* e para a obtenção dos dados junto a esses consumidores foi elaborado questionário de forma estimulada, ou seja, o questionário a ser respondido foi composto da relação de equipamentos disponíveis na residência dos pesquisados de forma a facilitar suas lembranças para as respostas ao definir quais aparelhos possuíam na residência, bem como, horários e intervalos de uso.

4.1 ESTUDO DE CASO 1: SIMULAÇÕES PARA VALIDAÇÃO DO MODELO DESENVOLVIDO

Inicialmente, para realização dos testes e validação do modelo matemático, é definido um quadro de uso de equipamentos gerais denominado Quadro de Uso Habitual (QCA) com os dispositivos utilizados pelo consumidor no dia a dia, tempo de uso e períodos do dia em que são utilizados conforme apresentado na Tabela 2. Como dados de entrada do modelo são considerados as potências médias (P_e^{med}) e horas de uso (h_e^u) dos equipamentos, observado o funcionamento mínimo para cada intervalo de tempo (N_e). Também são definidos parte dos equipamentos como

não prioritários e parte como prioritários P_e . Essa eleição deve ser analisada a partir do conforto desejado pelo consumidor. Ainda, o consumidor poderá fazer escolhas dos intervalos de tempo para carregamento da bateria do veículo elétrico. Para que determinado equipamento seja tratado como veículo elétrico pelo modelo deve-se atribuir ao parâmetro $t_e^E = 1$ para o equipamento considerado (equipamento 11 da Tabela 2).

Tabela 2- Tabela de Equipamentos.

N°	P_e^{med} (kW)	h_e^u (h)	P_e	N_e	t_e^E
1	2.0	2	0	15	0
2	5.0	5	0	20	0
3	3.2	3	1	15	0
4	1.5	5	1	15	0
5	1.5	5	1	20	0
6	1.5	5	0	15	0
7	1.5	2	0	12	0
8	1.2	3	0	13	0
9	1.3	4	1	14	0
10	5.0	5	0	15	0
11	4.0	4	1	0	1

Fonte: Elaboração do autor.

A partir dos dados constantes na Tabela 2 realizaram-se testes com o modelo matemático de modo a verificar se o mesmo produziria soluções adequadas considerando o deslocamento das cargas dos equipamentos eleitos como não prioritários. Desta forma espera-se que as cargas não prioritárias tenham seus deslocamentos dos horários habituais de uso pelo consumidor para horários em que as tarifas estão com valores reduzidos. A ideia é que o modelo minimize o valor da conta de energia elétrica deslocando as cargas não prioritárias e buscando a minimização de absorção de potência da rede através da minimização do primeiro e terceiro termos da equação 04, preserve as cargas dentro dos horários habituais dos equipamentos eleitos como prioritários conforme as restrições do problema e mantenha o conforto do consumidor através da minimização entre a solução ótima e o QCA (segundo termo da equação 04).

No caso do veículo elétrico além de ser considerado um dispositivo de uso prioritário seu perfil ótimo possui uma característica bastante peculiar, visto que possui parâmetros que só autorizam seu carregamento no período previamente definido.

A Tabela 3 apresenta os valores parâmetros utilizados para a tarifa de energia elétrica (δ_t^E) para as faixas horárias diárias classificadas como: fora de ponta que compreende os períodos das 00h até as 17:00h e das 22:00 até as 24h; intermediária entre as 17:00h e as 18:00h, ainda, entre 21:00h e 22:00h e horário de ponta que vai das 18:00h as 21:00h.

Tabela 3- Preço de energia por intervalo de tempo.

Faixa Horária	Valor da Tarifa	Faixa Horária	Valor da Tarifa
00h-01h	R\$ 0.22419	12h-13h	R\$ 0.22419
01h-02h	R\$ 0.22419	13h-14h	R\$ 0.22419
02h-03h	R\$ 0.22419	14h-15h	R\$ 0.22419
03h-04h	R\$ 0.22419	15h-16h	R\$ 0.22419
04h-05h	R\$ 0.22419	16h-17h	R\$ 0.22419
05h-06h	R\$ 0.22419	17h-18h	R\$ 0.32629
06h-07h	R\$ 0.22419	18h-19h	R\$ 0.51792
07h-08h	R\$ 0.22419	19h-20h	R\$ 0.51792
08h-09h	R\$ 0.22419	20h-21h	R\$ 0.51792
09h-10h	R\$ 0.22419	21h-22h	R\$ 0.32629
10h-11h	R\$ 0.22419	22h-23h	R\$ 0.22419
11h-12h	R\$ 0.22419	23h-24h	R\$ 0.22419

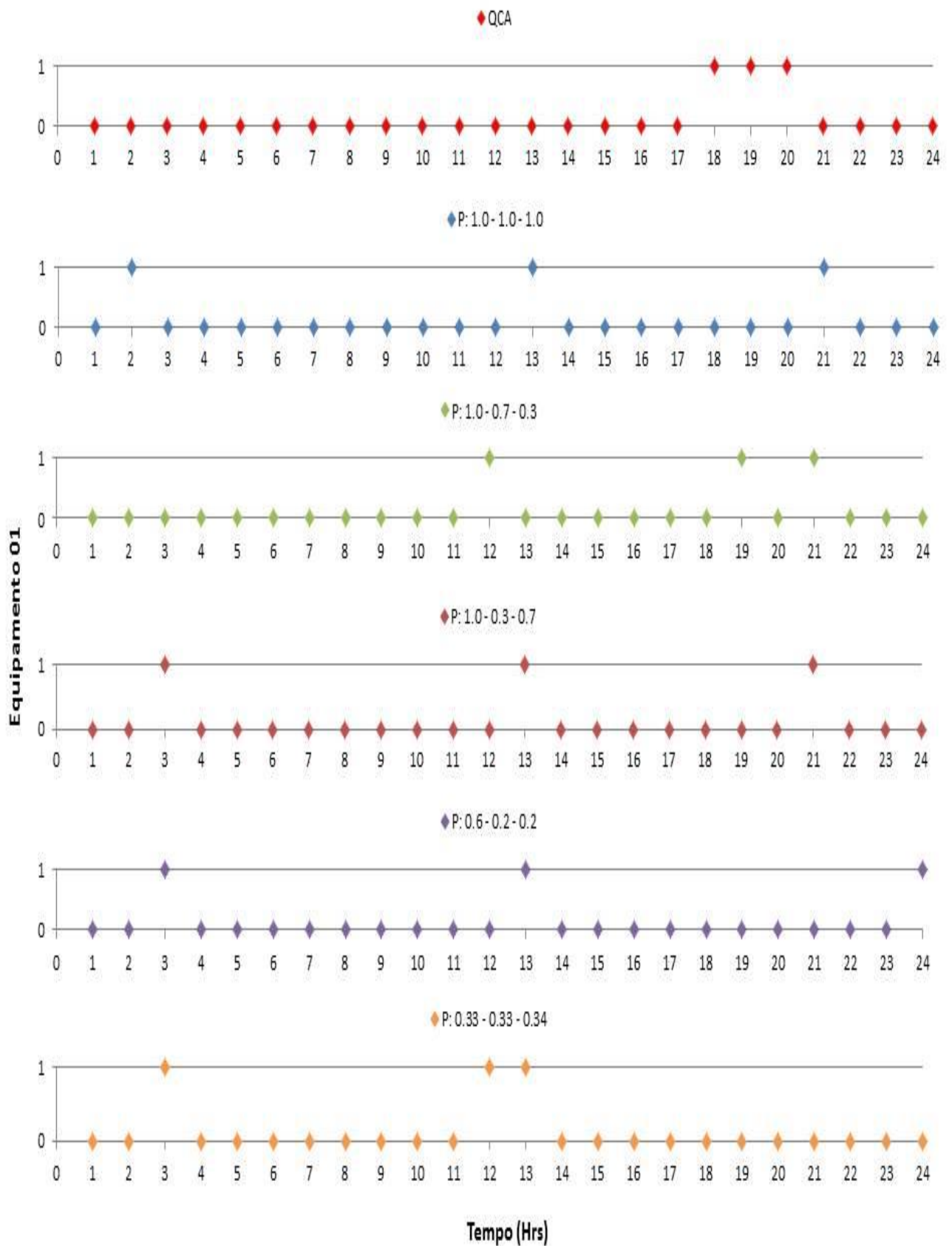
Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica- ANEEL (2013).

Outra análise que foi executada para validação do modelo, foi com a inserção de pesos ($k1$, $k2$ e $k3$) na função objetivo, de forma que se aplicou pesos nos 3 termos da função objetivo para realizar uma análise do ponto de vista de prioridade da solução. Desta forma quando se atribui peso maior a determinado termo, maior será a parcela deste termo na função objetivo e, portanto, maior prioridade no processo de otimização este termo terá. Logo, do ponto de vista da otimização pelo modelo, considerando a função objetivo, os termos com maior peso de ponderação terão maiores prioridades.

Portanto, se o peso é maior para o 2º termo da função objetivo a solução ótima tende a ser mais próxima do consumo habitual.

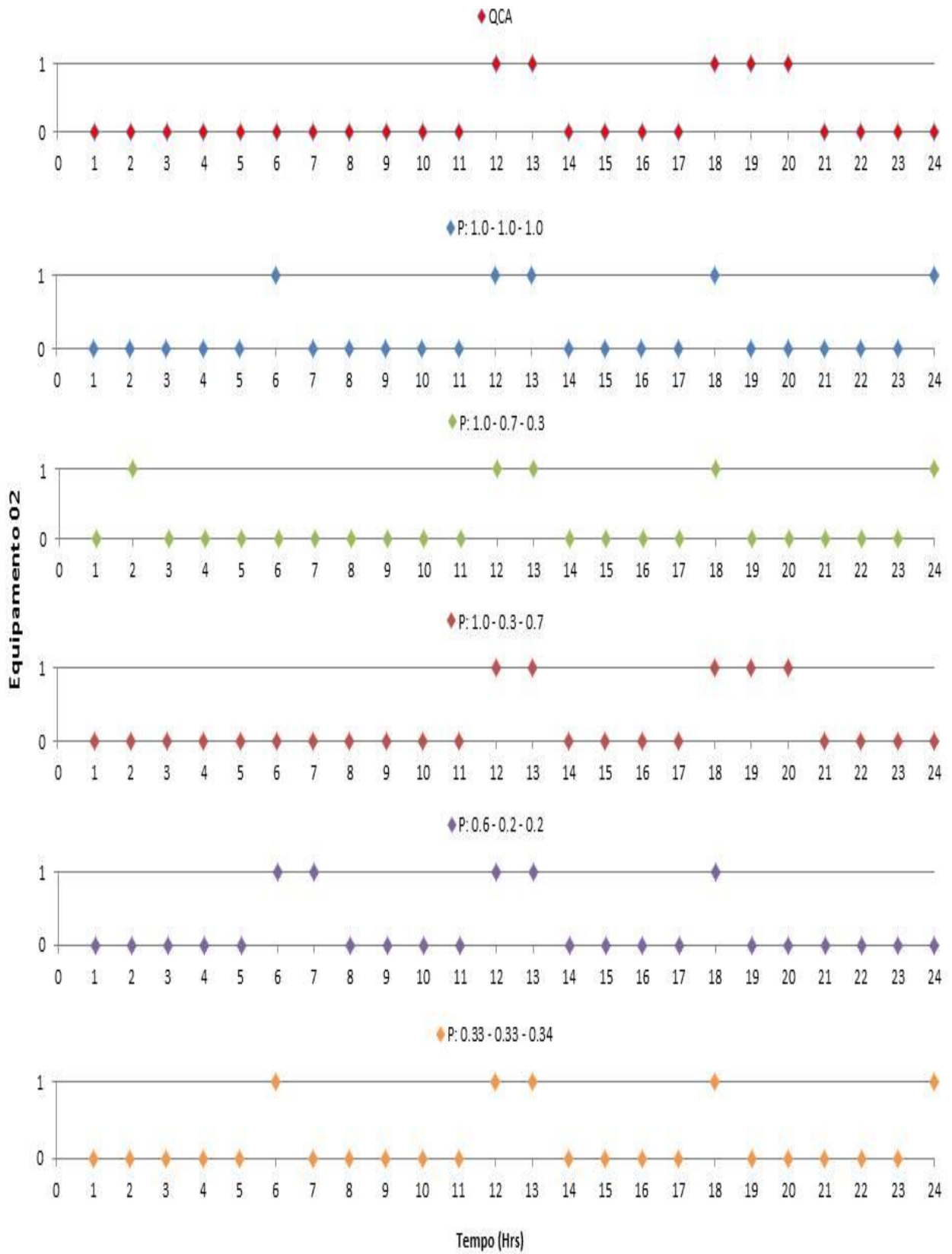
Porém, os pesos de ponderação aplicados à função objetivo impactam na característica de cada equipamento, podendo variar em relação às potências desses equipamentos. Equipamentos com maiores potências são preferencialmente deslocados, assim demonstrados nas figuras 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 e 13.

Figura 3- Comparação da QCA e QCO, equipamento. 01.



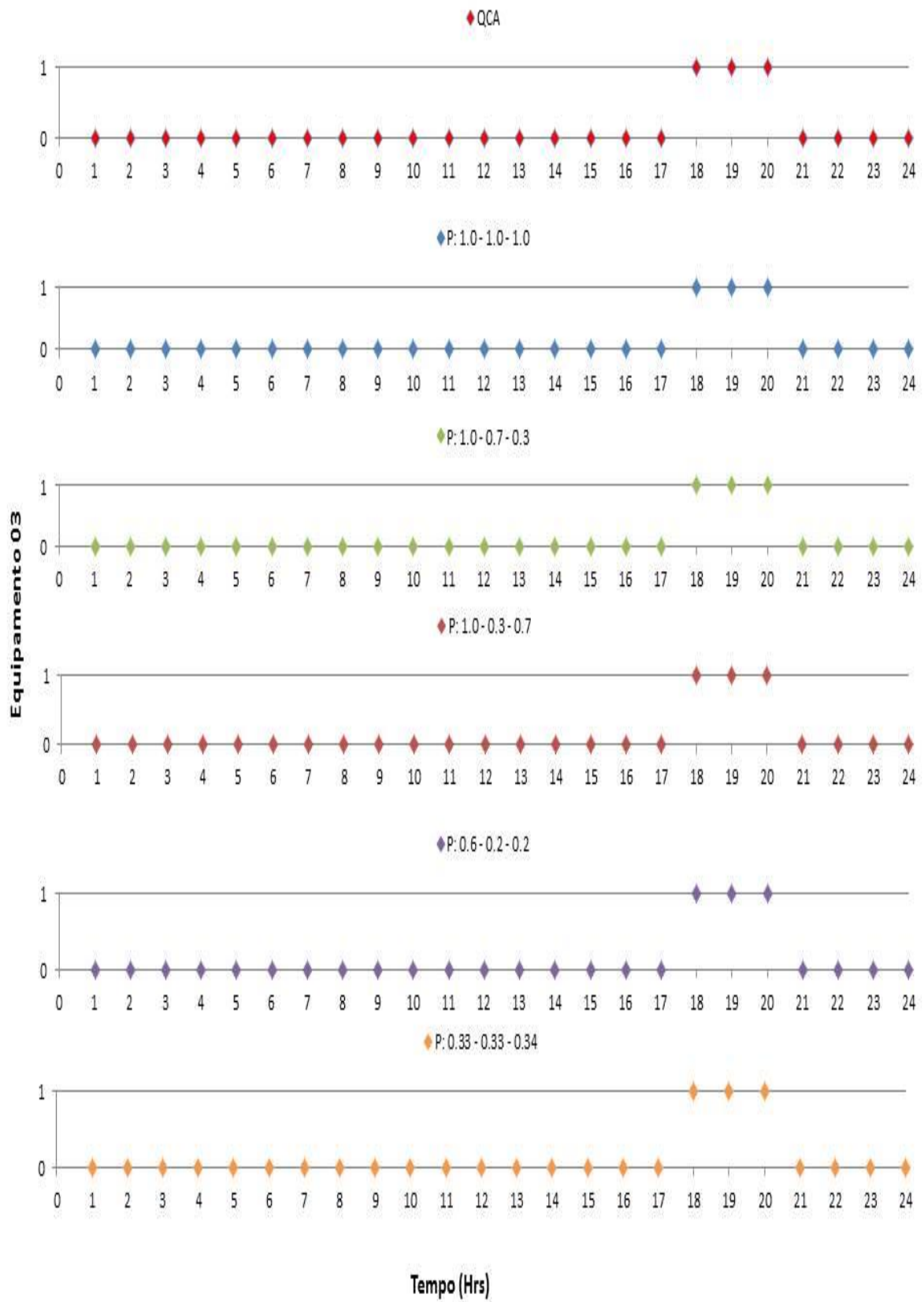
Fonte: Elaboração do autor

Figura 4- Comparação da QCA e QCO, equipamento 02.



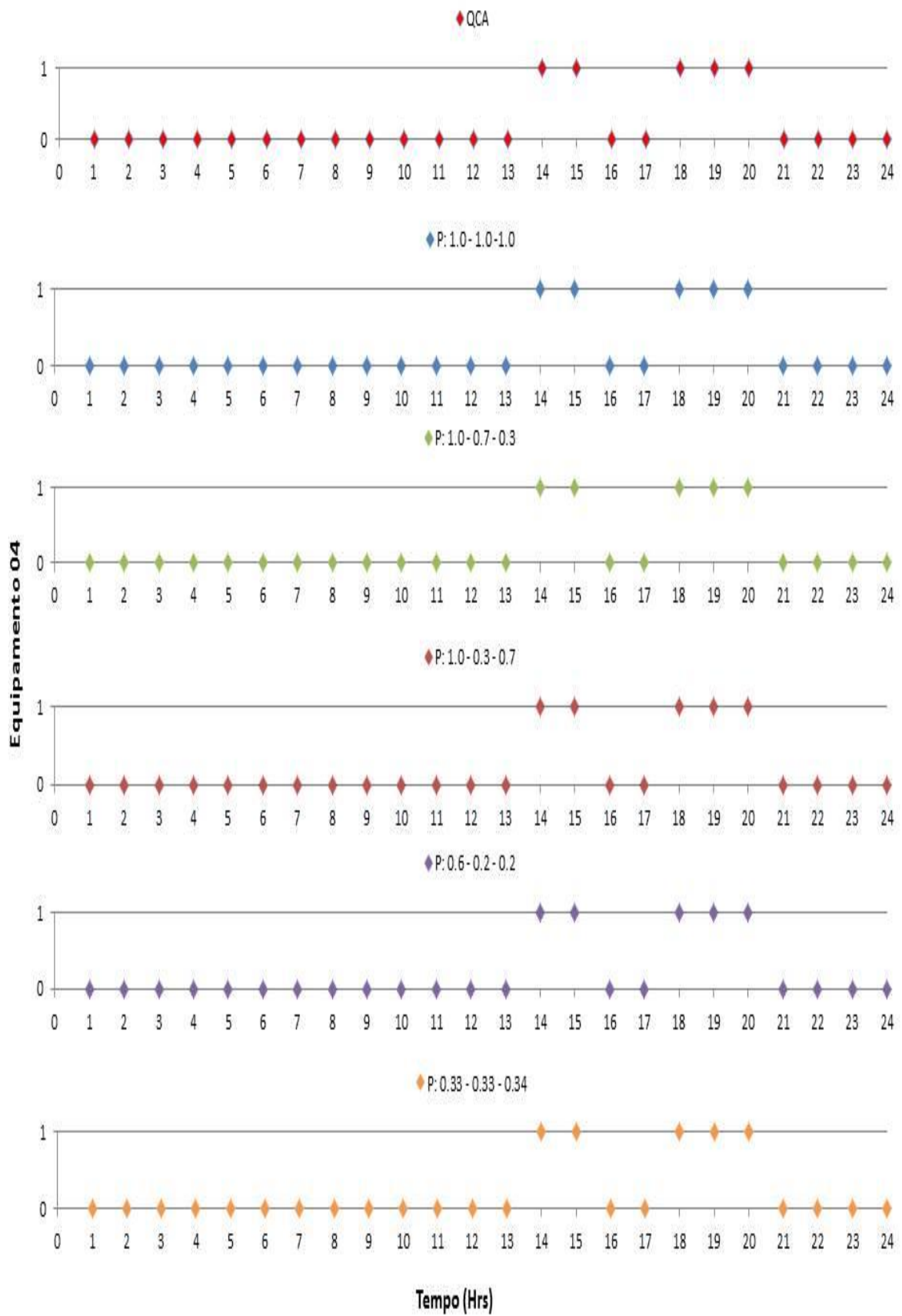
Fonte: Elaboração do autor

Figura 5- Comparação da QCA e QCO, equipamento 03.



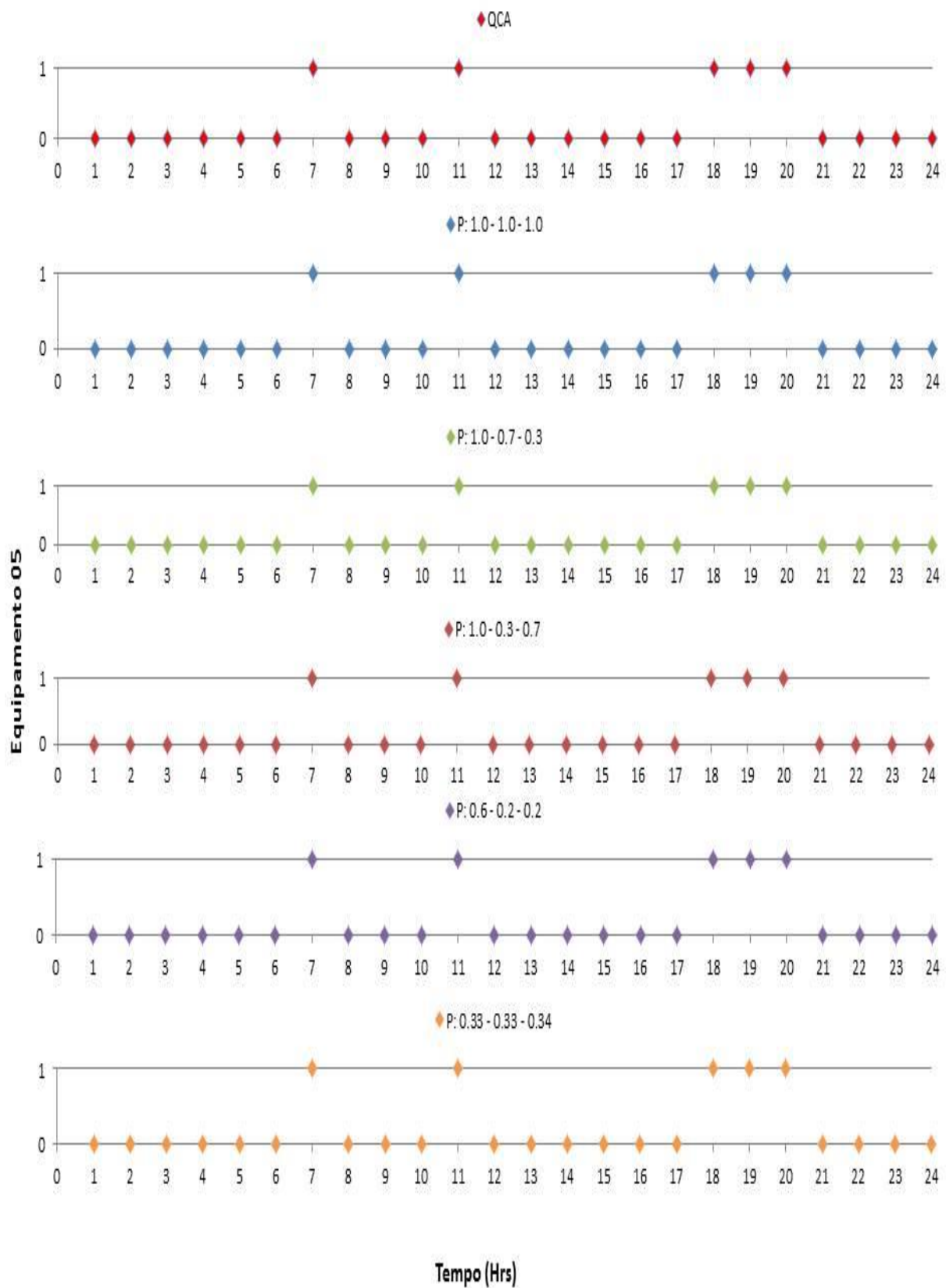
Fonte: Elaboração do autor

Figura 6- Comparação da QCA e QCO, equipamento 04.



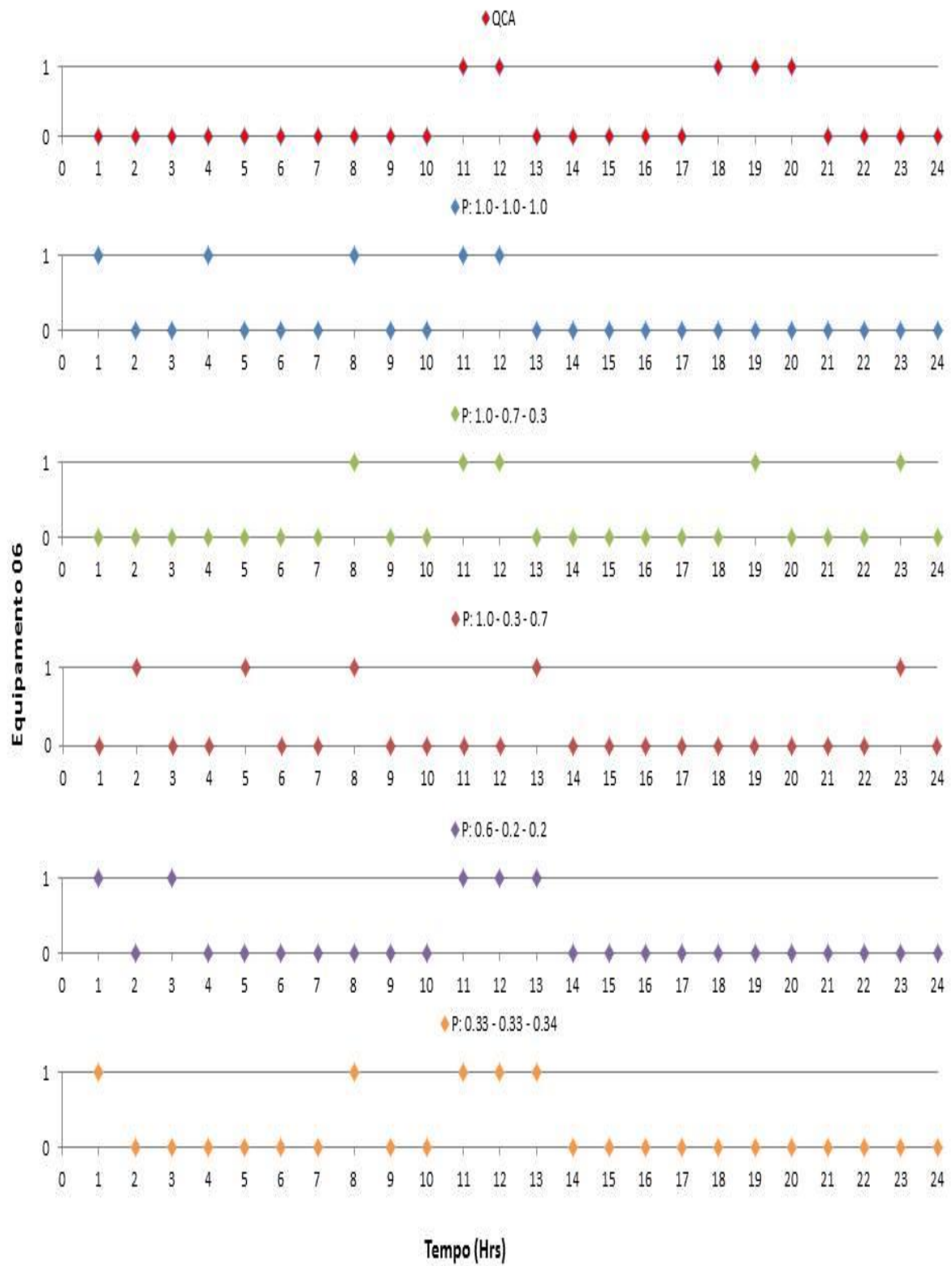
Fonte: Elaboração do autor

Figura 7- Comparação da QCA e QCO, equipamento. 05.



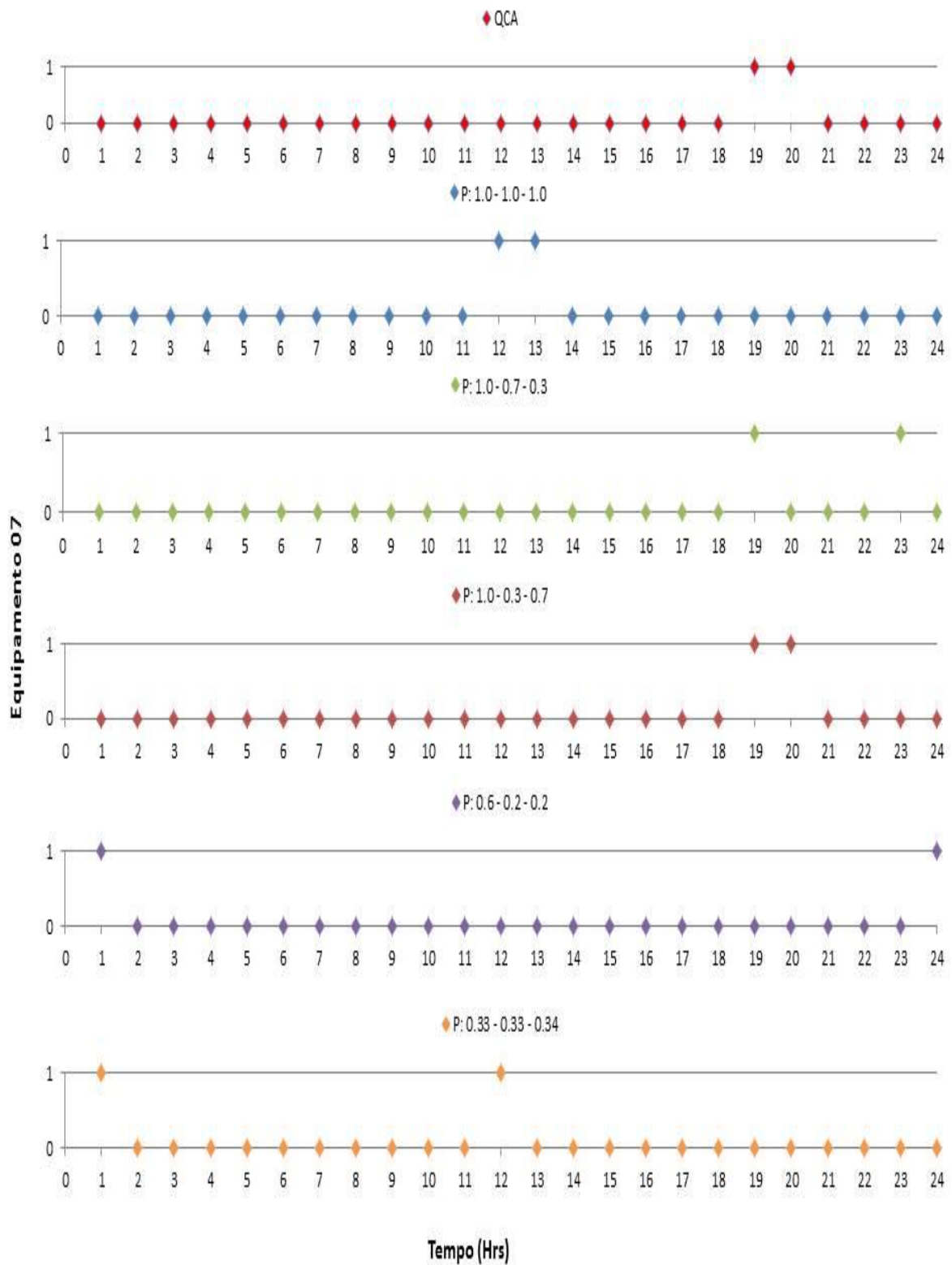
Fonte: Elaboração do autor

Figura 8- Comparação da QCA e QCO, equipamento 06.



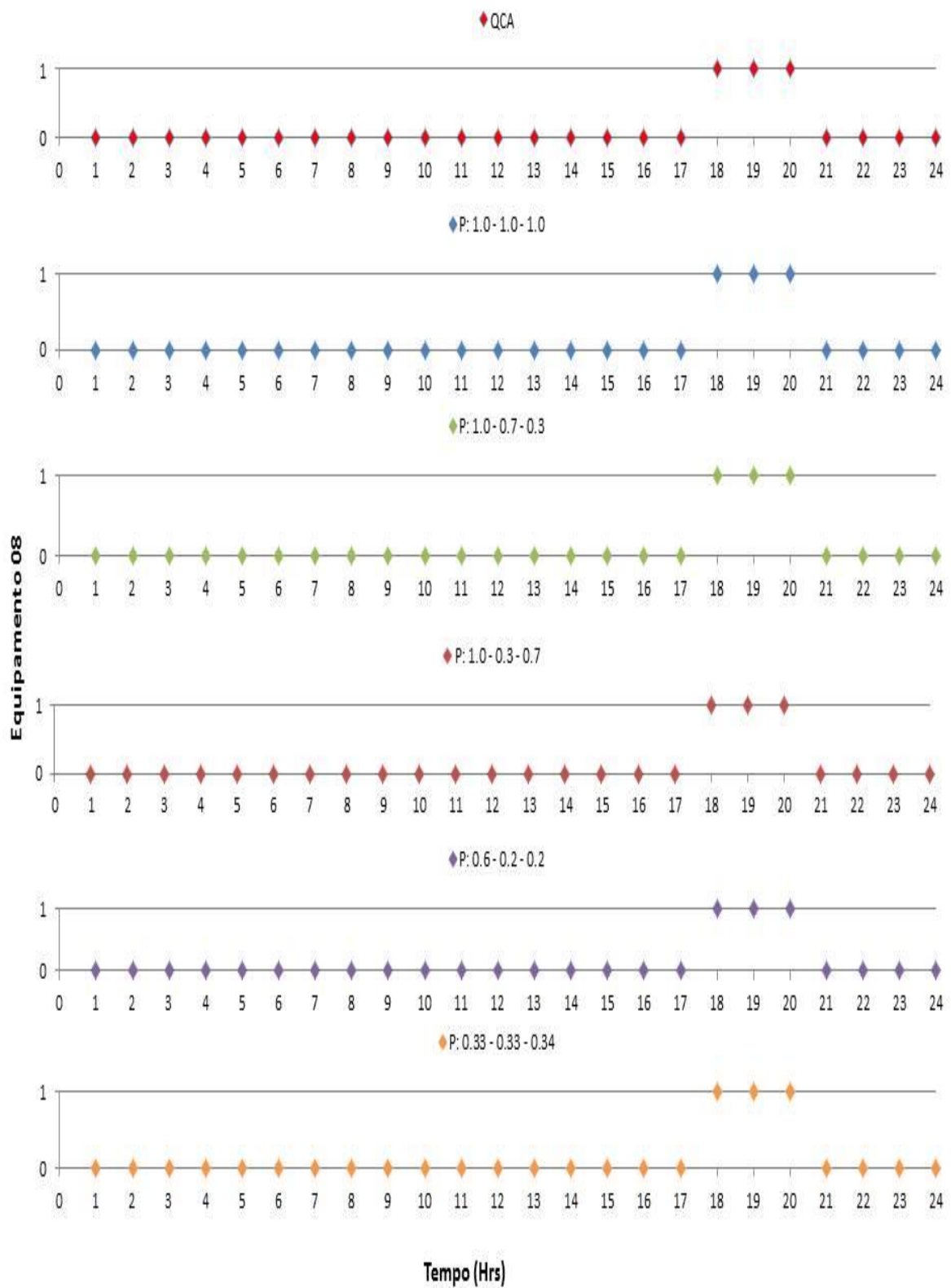
Fonte: Elaboração do autor

Figura 9- Comparação da QCA e QCO, equipamento 07.



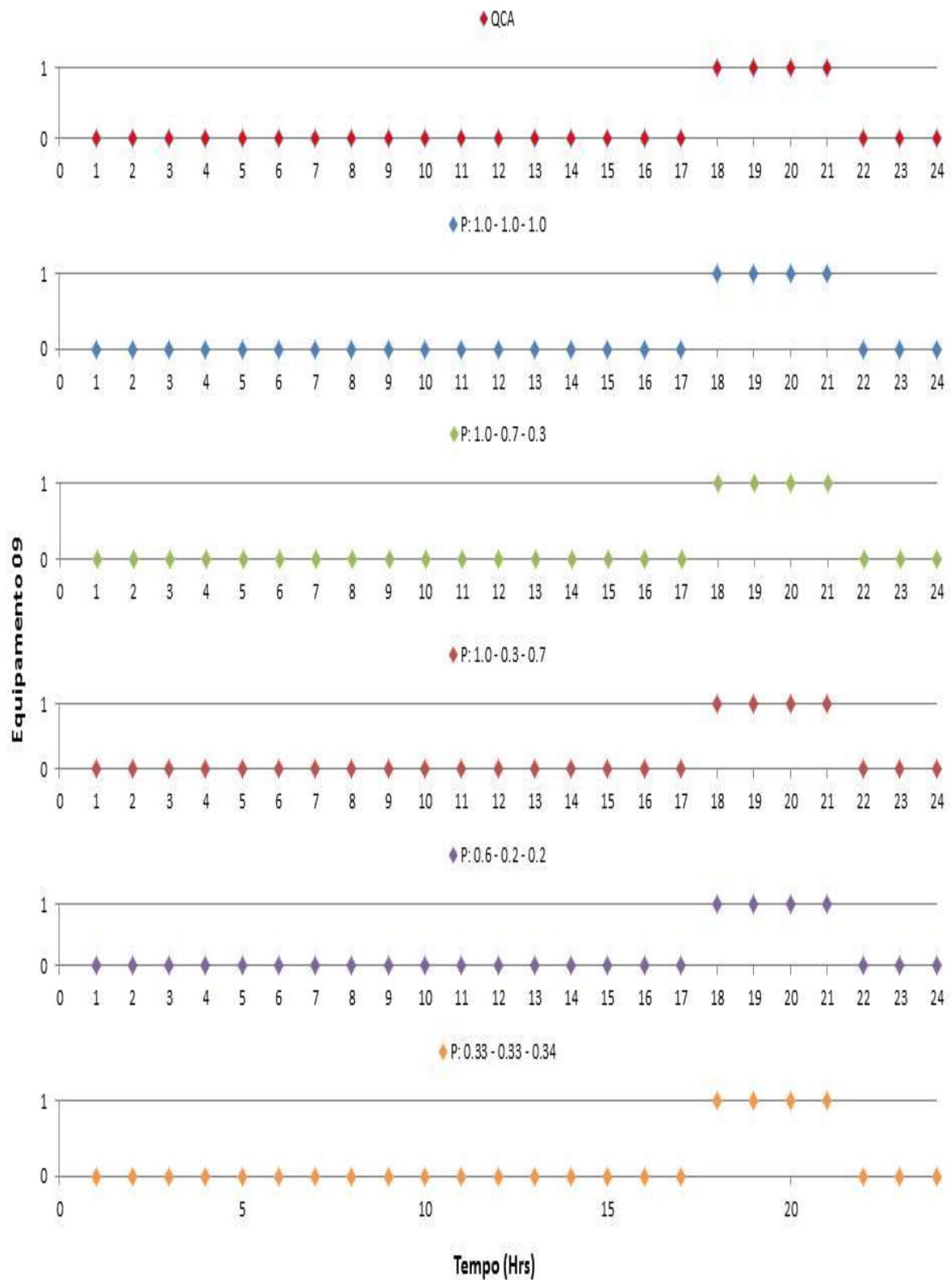
Fonte: Elaboração do autor

Figura 10- Comparação da QCA e QCO, equipamento 08.



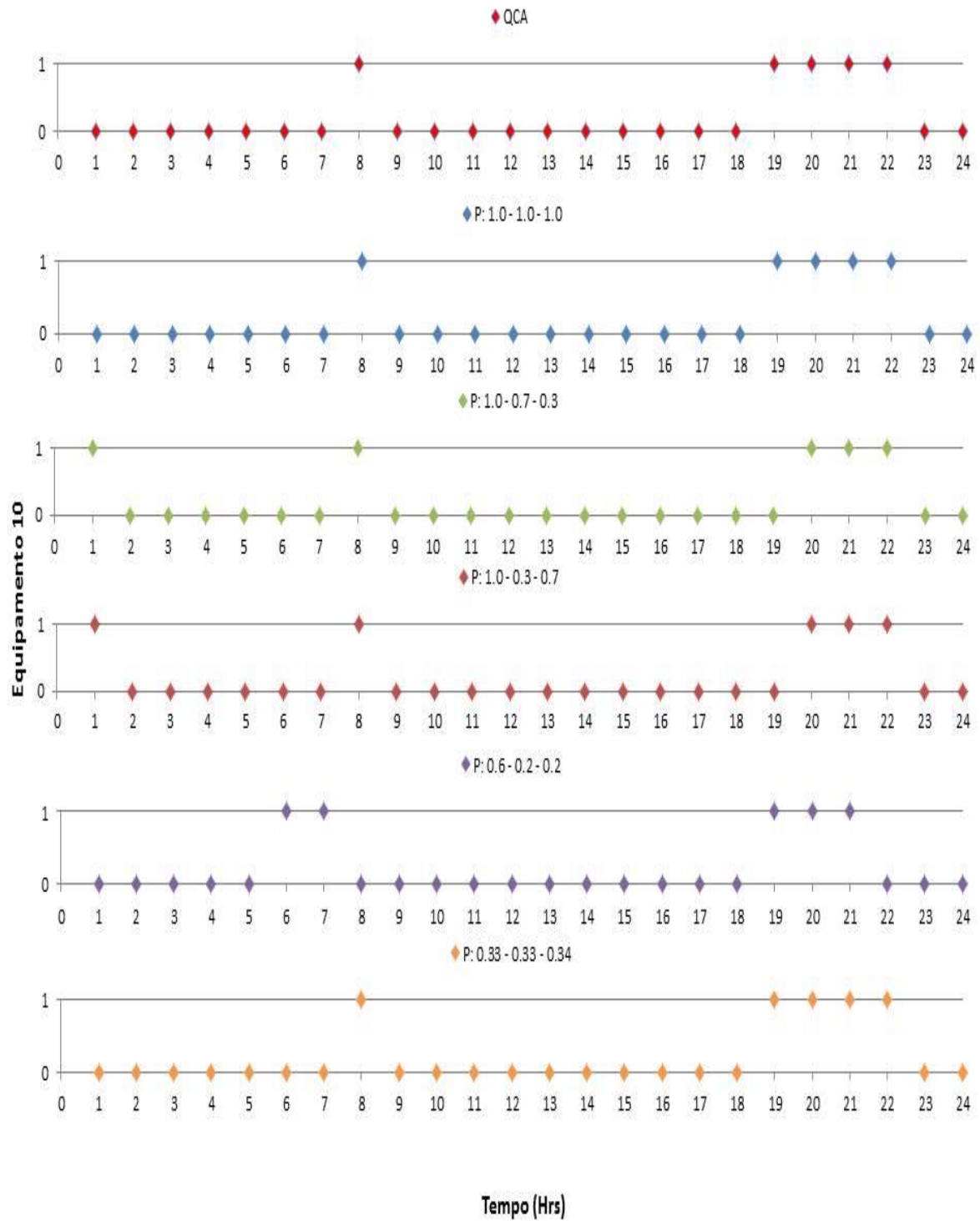
Fonte: Elaboração do auto .

Figura 11- Comparação da QCA e QCO, equipamento 09.



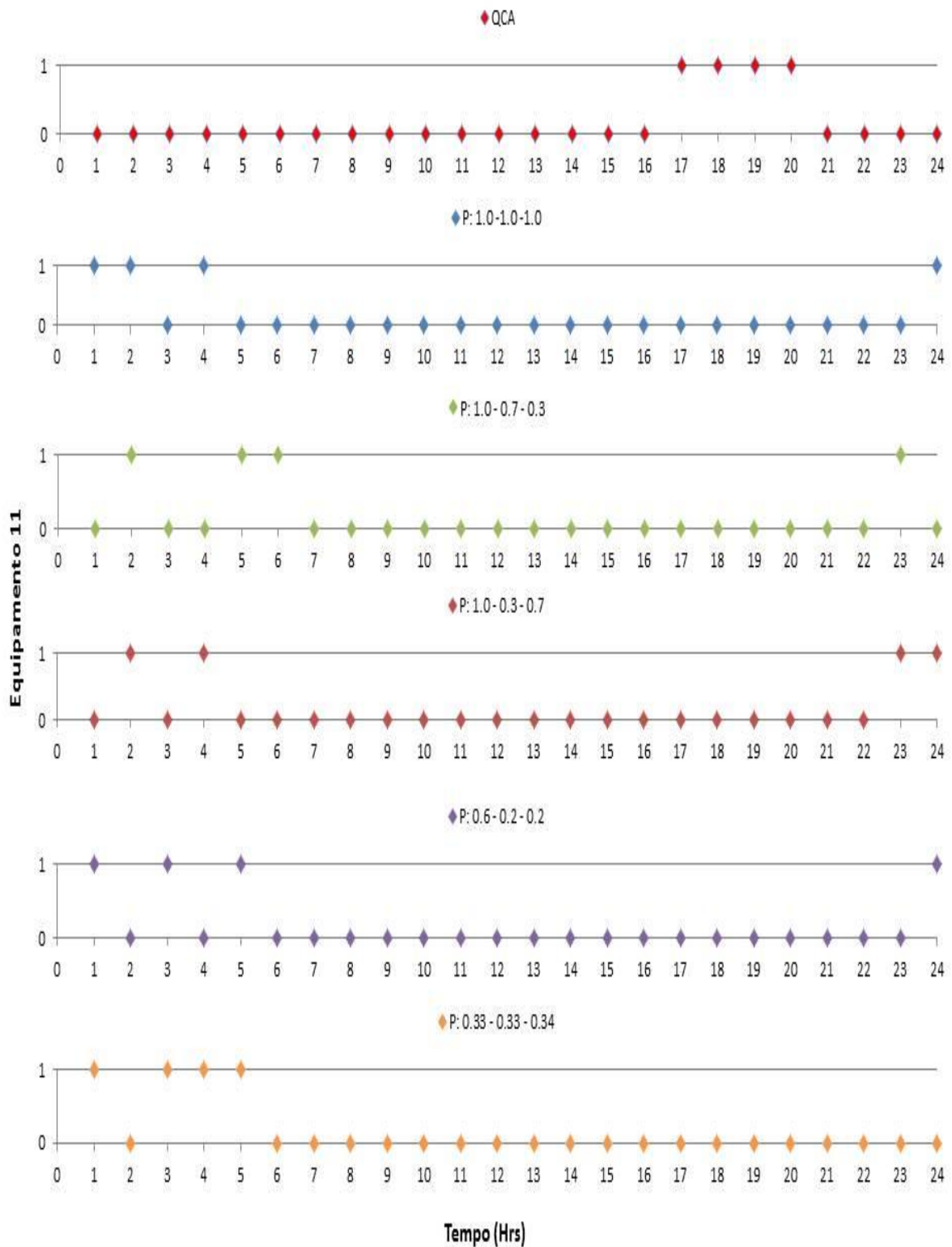
Fonte: Elaboração do autor

Figura 12- Comparação da QCA e QCO, equipamento 10.



Fonte: Elaboração do autor

Figura 13- Comparação da QCA e QCO, equipamento 11.



Fonte: Elaboração do autor

Observa-se que para os equipamentos que foram classificados como prioritários com ($P_e=1$) não houve deslocamento de horários para seus usos permanecendo com seu perfil de consumo ótimo dentro dos mesmos horários. Por

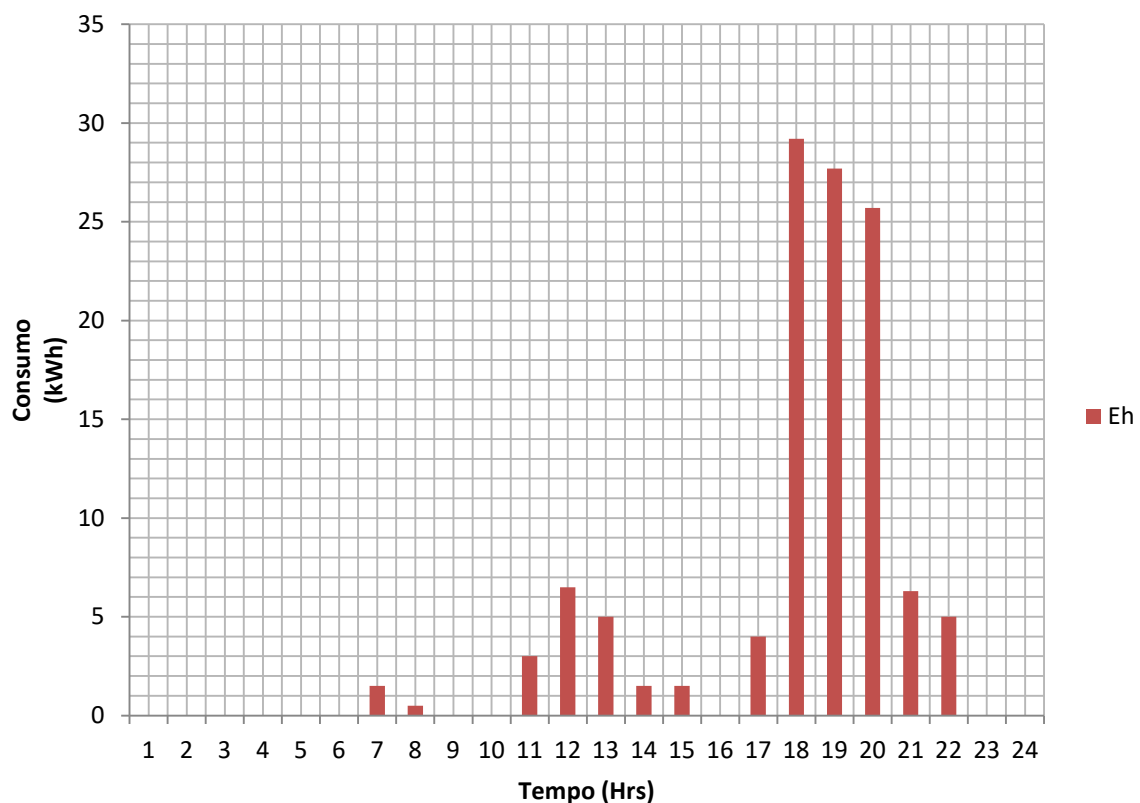
outro lado, os equipamentos classificados com não prioritários ($P_e=0$) foram deslocados para outros períodos, considerados horários fora de ponta.

Para o caso do veículo elétrico, analisando os perfis ótimos de consumo mostrados na Figura 13, o carregamento que habitualmente era realizado entre as 17:00 e 20:00 horas, foi deslocado para períodos a partir das 22:00 horas até as 6:00 horas do dia seguinte.

Nas Figuras 14 e 15 são ilustrados os quadros de consumo habitual e ótimo (solução do modelo) para o consumidor em análise. Verifica-se comparando as figuras o deslocamento das cargas não prioritárias do horário de pico entre as 18:00 e 20:00 hrs de forma a obter o consumo ótimo da energia elétrica conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 14- Perfil de consumo QCA.

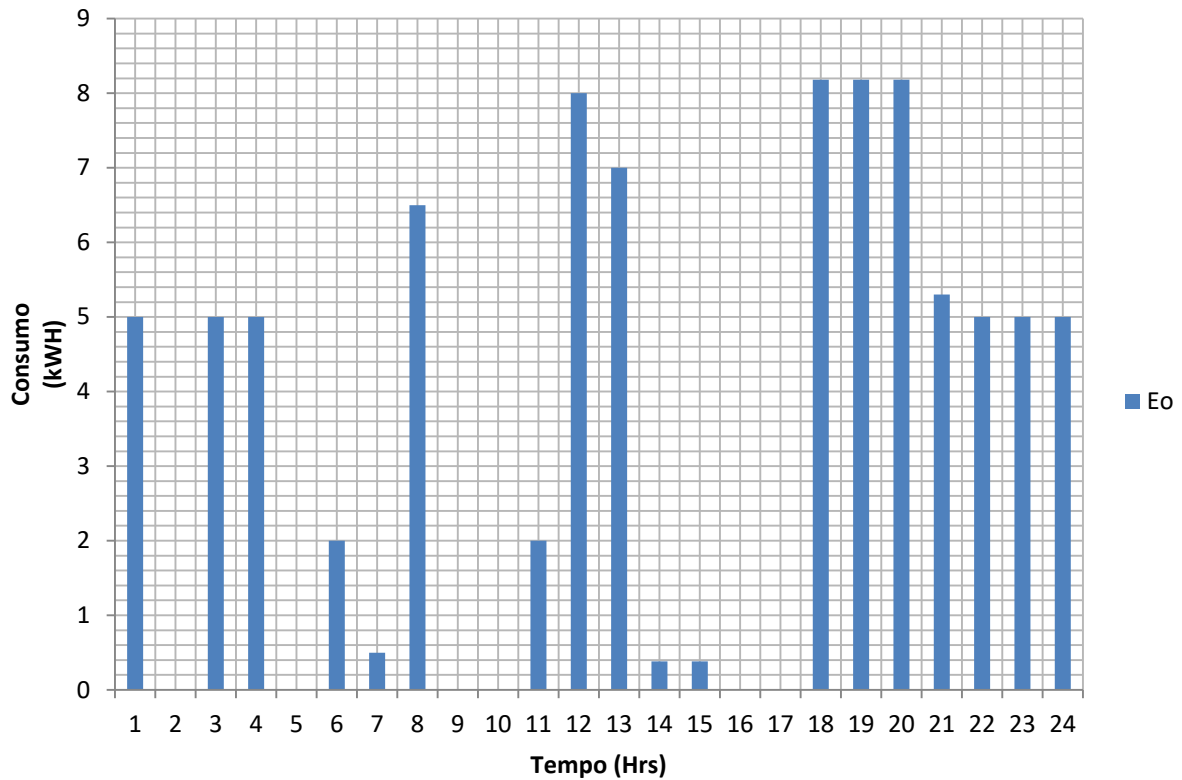
Quadro de Consumo de Energia Habitual



Fonte: Elaboração do autor

Figura 15- Perfil de consumo QCO.

Quadro de Consumo de Energia Ótima

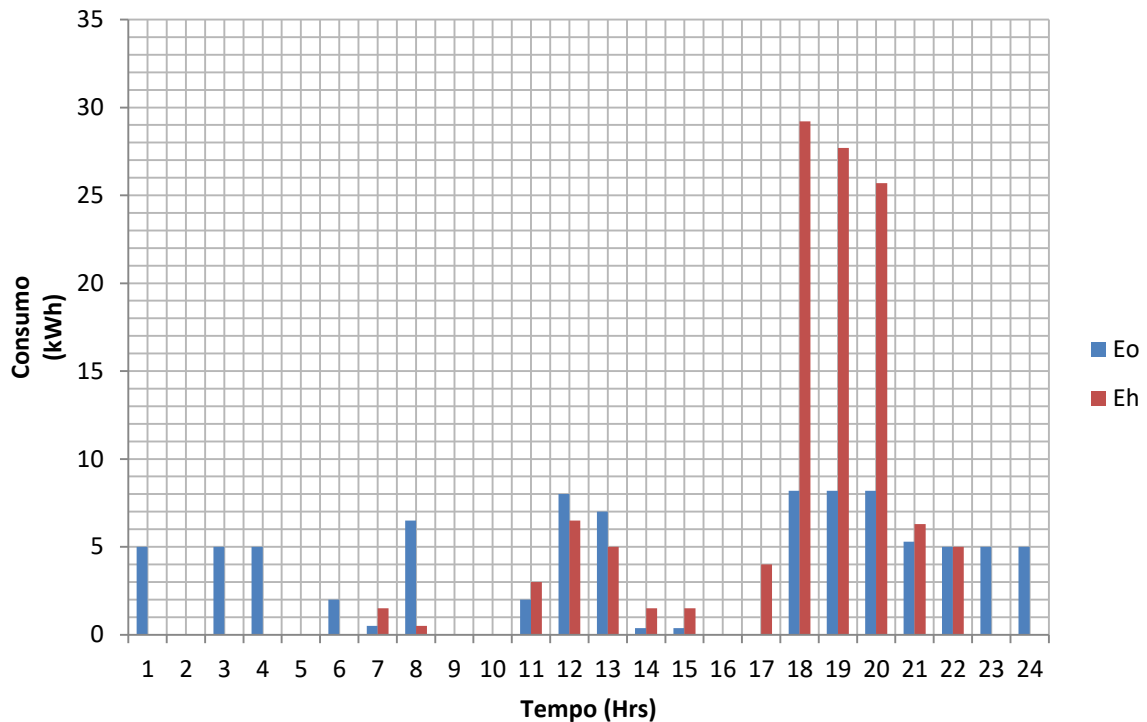


Fonte: Elaboração do autor

Pela figura (16) com a aplicação do método os resultados são expressivos, além de resultar em uma economia para o consumidor com o deslocamento do consumo para os horários em que a energia esta mais barata, houve uma grande contribuição para o sistema com diminuição do pico da demanda.

Figura 16- Perfil de consumo QCA total em relação ao perfil de consumo QCO total.

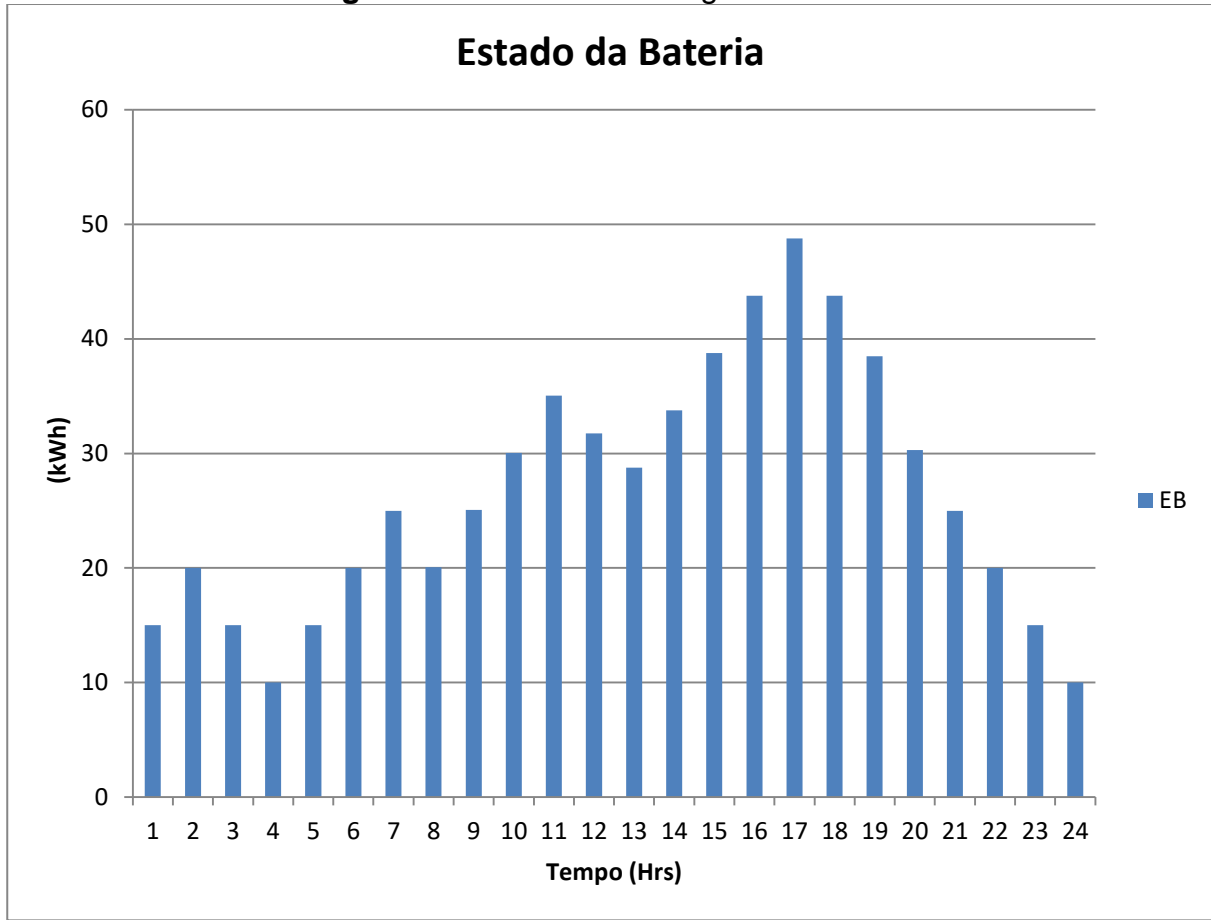
Quadro de Consumo de Energia Habitual x Energia Ótima



Fonte: Elaboração do autor

Observando o gráfico da Figura (16), verifica-se que com a implementação do modelo em um ambiente de tarifação variável a curva de carga que apresentava a demanda máxima no período compreendido de pico, passou a ter uma curva mais acentuada e plana.

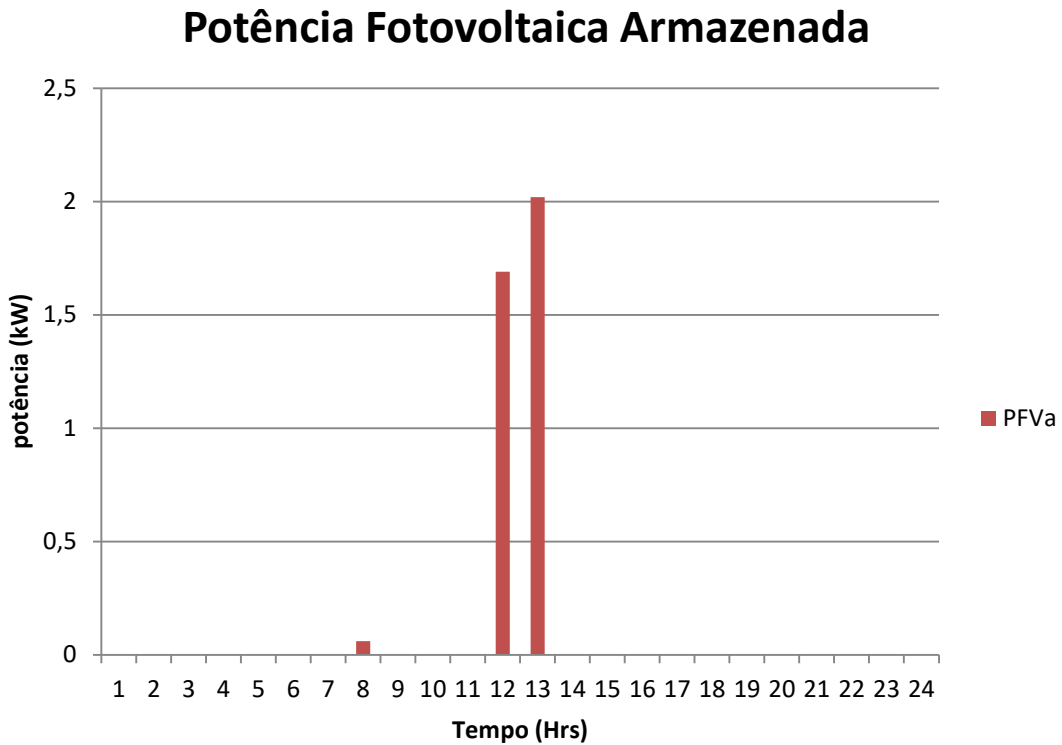
Nota-se que comportamento de armazenamento está presente das 0:00 horas até o carregamento total às 17:00 horas do dia, momento em que a bateria está com carregamento pleno, iniciando a partir daí, somente, a injeção de potência para atender a demanda no horário de pico se estendendo até as 24:00 horas, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17- Estado de carregamento da bateria.

Fonte: Elaboração do autor

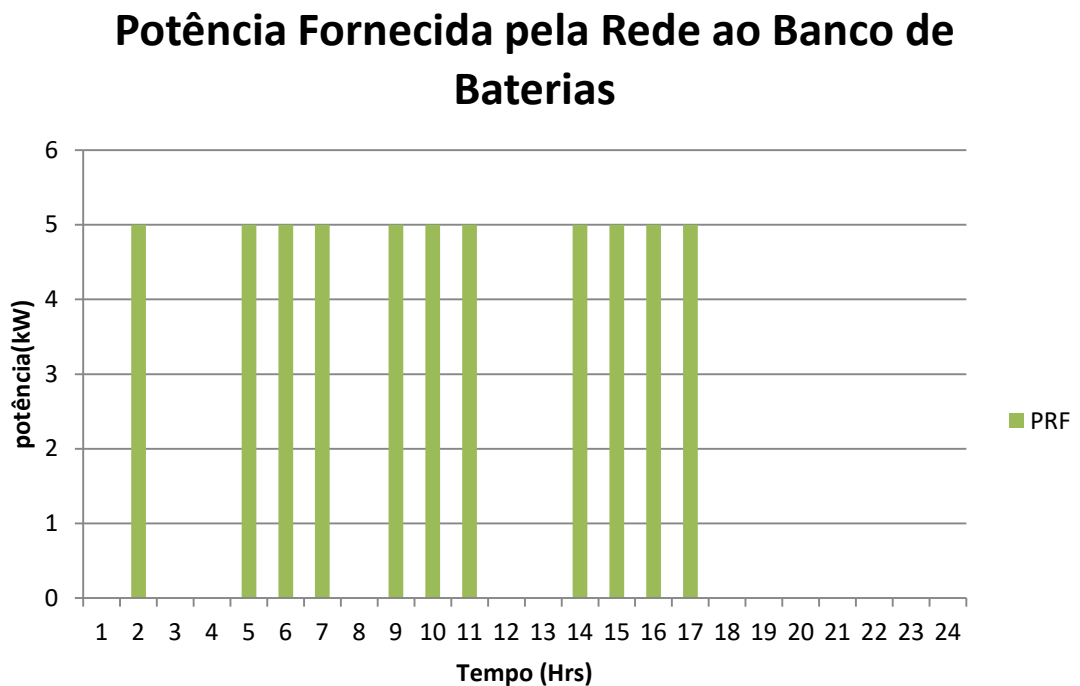
A partir das Figuras 18 e 19, verifica-se a contribuição do sistema fotovoltaico e da rede, respectivamente, para o carregamento da bateria durante o período do dia. Na Figura 21 é ilustrado o comportamento da potência injetada pela bateria sendo a potência injetada máxima as 20:00 horas.

Figura 18- Potência armazenada fornecida pelo painel fotovoltaico.

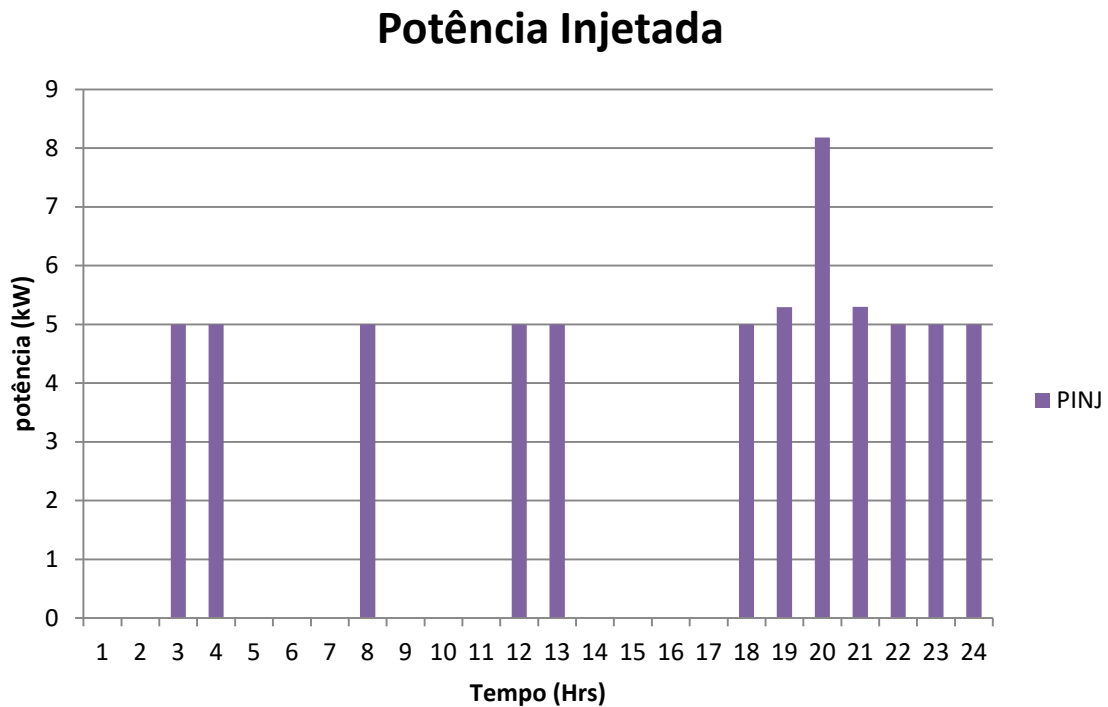


Fonte: Elaboração do autor

Figura 19- Potência armazenada fornecida pela rede.



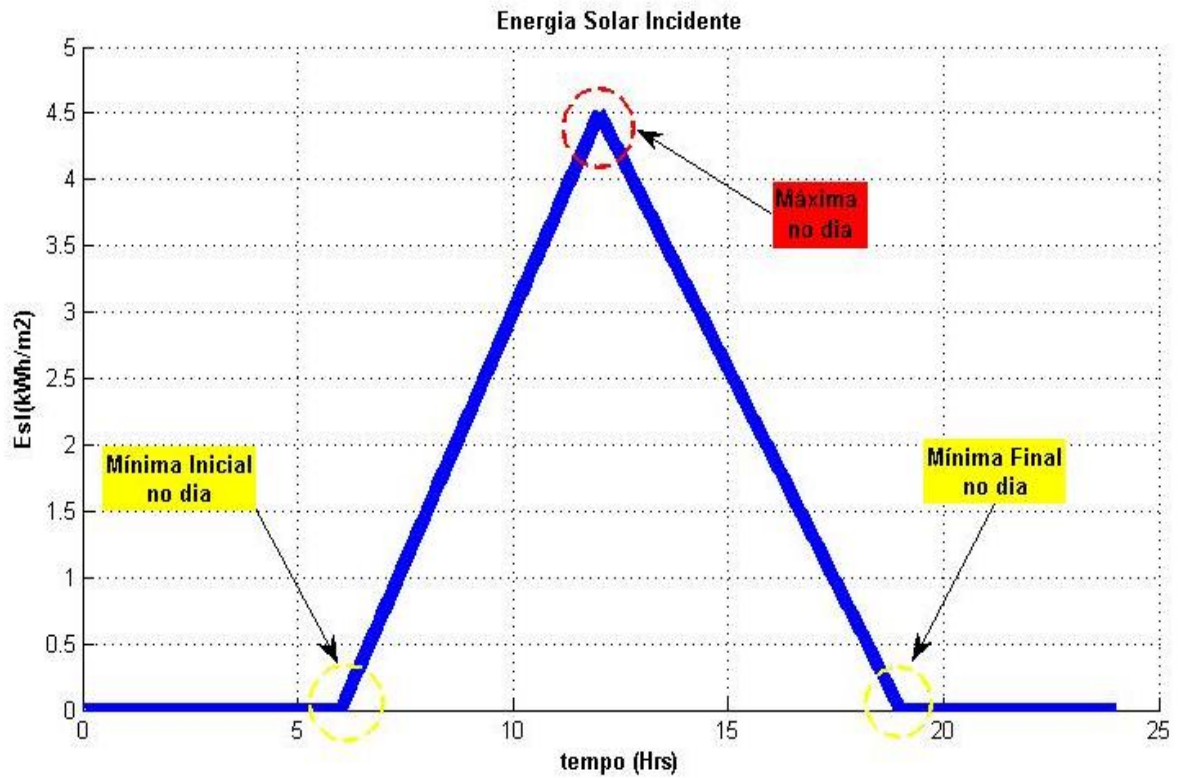
Fonte: Elaboração do autor

Figura 20- Potência injetada pelo banco de baterias.

Fonte: Elaboração do autor

A energia armazenada no banco de baterias é absorvida da rede ou do sistema fotovoltaico, e, prioritariamente, injetada nos momentos considerados de pico, períodos em que as tarifas estão em patamares de preços elevados. Porém se em determinado momento o consumo de energia estiver demasiadamente elevado, mesmo que em horário fora de pico, a bateria deve contribuir com injeção de potência de modo a manter a minimização do custo da energia. Pode-se observar este fato a exemplo do carregamento do veículo elétrico que recebe energia vinda do banco de baterias mesmo fora do horário de pico por ser um equipamento de potência elevada.

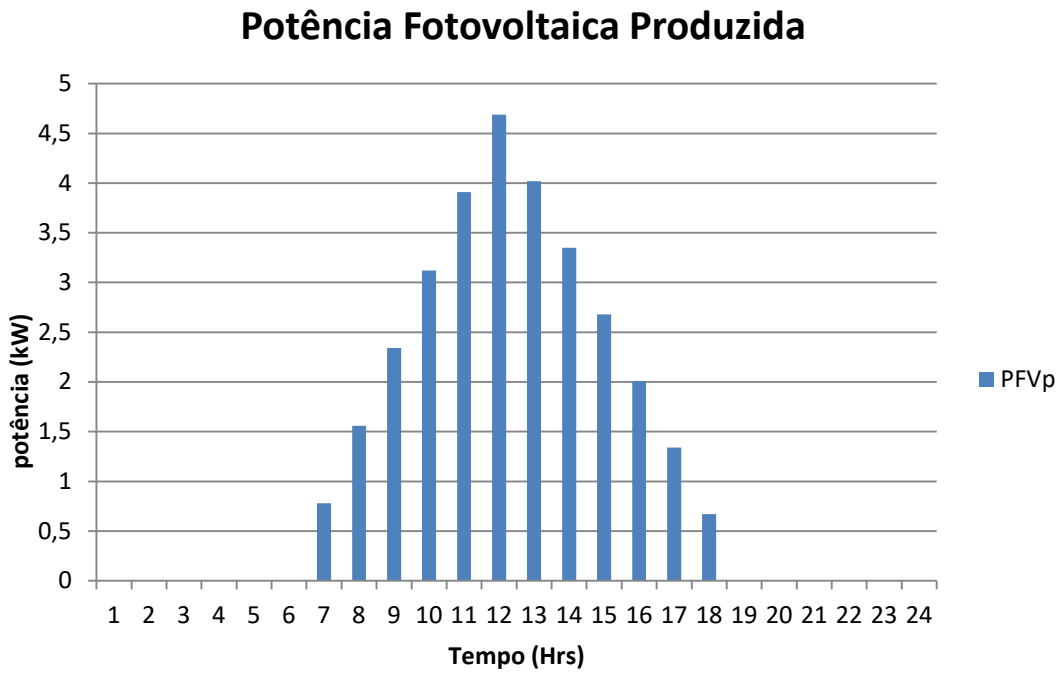
Para a geração fotovoltaica é considerado um painel de produção fotovoltaica com área de 25 m², observada a variação solar ocorrida ao longo do dia como ilustrado na Figura (21).

Figura 21- Incidência solar no painel fotovoltaico.

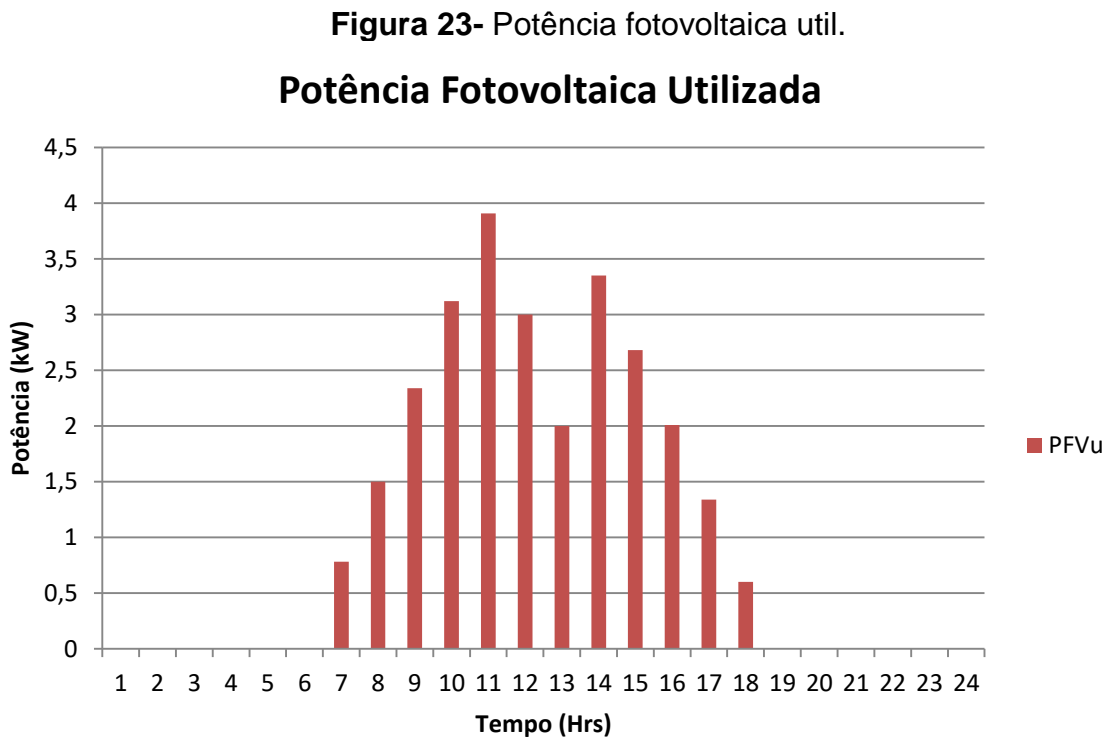
Fonte: Elaboração do autor

A potência gerada pelo painel fotovoltaico durante o dia com presença de radiação solar, são mostradas na figura 22. Nota-se que a energia fotovoltaica produzida atinge seu máximo valor produzido às 12 horas, entrando em declive até atingir seu valor mínimo às 18:horas.

Figura 22- Potência gerada pelo painel fotovoltaico.



Conforme ilustrado na Figura 23 verifica-se a quantidade de potência destinada à utilização pelo consumidor.



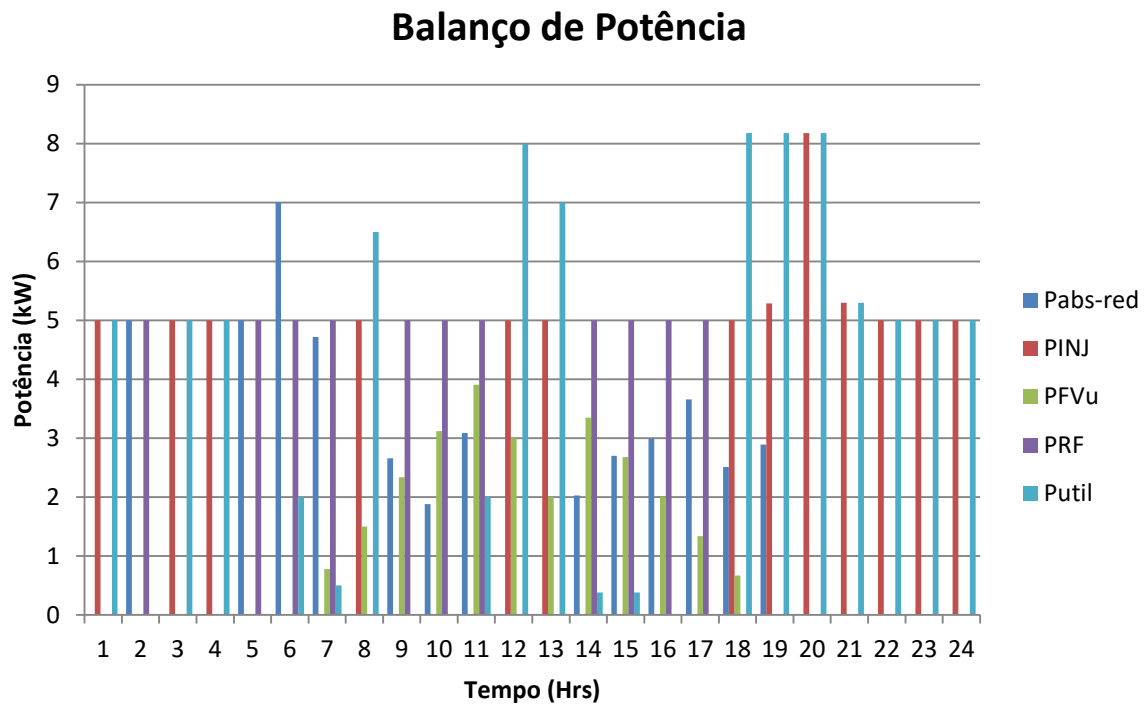
Complementando o ciclo de produção fotovoltaica a Figura 23 demonstra a energia gerada e utilizada, onde se observa que a energia produzida pelo painel se destina, preferencialmente, a ser utilizada em tempo real, otimizando o consumo de forma a reduzir custo tarifário.

Os resultados da simulação mostraram que, com o modelo proposto, foi possível uma sensível redução da potência fornecida pela rede nos horários em que as tarifas se comportavam com valores elevados.

Observa-se que além de proporcionar uma sensível economia para o consumidor, com a possibilidade de diversas alternativas no consumo de energia elétrica, a exemplo do deslocamento de dispositivos controláveis e não prioritários, com a possibilidade da geração de energia pelo consumidor por fontes alternativas e o armazenamento por baterias, o modelo busca a preservação do conforto do usuário com a utilização da energia armazenada.

Isto porque, a partir da solução do modelo é possível que o consumidor adéque seu consumo utilizando-se nos horários de tarifas mais elevadas da energia armazenada nos horários de tarifas reduzidas como demonstrado na Figura 24. Desta forma isso possibilita ao consumidor deslocar a menor quantidade possível de equipamentos para fora dos horários habituais, sendo estes equipamentos não prioritários.

Vale ressaltar que após o deslocamento o valor da conta de energia, também apresentou números expressivos. O gasto diário com a conta de energia na situação sem otimização é de R\$ 32,87 e com a aplicação do método proposto é reduzido para R\$ 29,08 se considerado apenas o deslocamento dos dispositivos. Quando considerado o emprego de banco de baterias o valor fica em R\$ 23,80.

Figura 24- Balanço de potência total.

Fonte: Elaboração do autor

4.2 ESTUDO DE CASO 2: SIMULAÇÕES COM DADOS DE CONSUMIDORES REAIS

Para testar a eficiência e robustez do modelo de otimização proposto para o gerenciamento ótimo de energia pelo lado do consumidor, realizou-se simulações com dados coletados de consumidores reais com suas próprias características de consumo, quantidade e tipos de equipamentos.. Esses consumidores são clientes de duas distribuidoras, Energisa – Distribuidora de Energia S/A e Elektro – Eletricidade e Serviços S/A.

Para coleta dos dados é adotado o sistema de pesquisa *in loco* onde é entregue para cada consumidor um questionário de forma estimulada, podendo ser visualizado no anexo. Quando da entrega do questionário aos consumidores eram esclarecidos os motivos da coleta dos dados e como seriam usados e, em uma breve entrevista eram questionados aos participantes quais seriam seus equipamentos prioritários, aqueles que caso seus usos fossem deslocados dos horários habitualmente utilizados para outros horários lhes causariam um grande desconforto.

Foram selecionados 5 questionários/consumidores em um universo de 29 consumidores pesquisados sendo a escolha dos consumidores feita considerando os consumidores que melhor representam as faixas de consumo em kWh mês. Na Tabela 4 são apresentados os consumos de energia por mês para cada consumidor selecionado em suas respectivas faixas de consumo.

Tabela 4- Dados de consumo reais (teste).

Nº Ordem/Distribuidora	Faixa de Consumo	Consumo Total
1- Energisa	0 a 100 kWh mês	74 kWh mês
2- Energisa	101 a 200 kWh mês	132 kWh mês
3- Elektro	202 a 300 kWh mês	293 kWh mês
4- Elektro	301 a 500 kWh mês	408 kWh mês
5- Energisa	Acima de 501 kWh mês	584 kWh mês

Fonte: Elaboração do autor

Para a simulação dos testes em consumidores com consumos reais foram adotados parâmetros para cada consumidor, considerando que todas as cargas estivessem ligadas em um dia típico. Os equipamentos e respectivos horários de funcionamento são adotados baseados nos dados dos questionários fornecidos pelos consumidores.

Para a simulação dos testes em consumidores reais levou-se em consideração apenas a energia absorvida da rede, ou seja, sem que estivessem equipados por planta de energia fotovoltaica ou banco de baterias e foram adotados os seguintes pesos para função objetivo: $K1= 1$; $k2= 1$ e $K3= 1$.

A Tabela 5 apresenta os parâmetros utilizados para o custo tarifário (δ_t^E).

Tabela 5- Preço de energia tarifa branca.

Faixa Horária	Valor da Tarifa	Faixa Horária	Valor da Tarifa
00h-01h	R\$ 0.25618	12h-13h	R\$ 0.25618
01h-02h	R\$ 0.25618	13h-14h	R\$ 0.25618
02h-03h	R\$ 0.25618	14h-15h	R\$ 0.25618
03h-04h	R\$ 0.25618	15h-16h	R\$ 0.25618
04h-05h	R\$ 0.25618	16h-17h	R\$ 0.25618
05h-06h	R\$ 0.25618	17h-18h	R\$ 0.40987
06h-07h	R\$ 0.25618	18h-19h	R\$ 0.65234
07h-08h	R\$ 0.25618	19h-20h	R\$ 0.65234
08h-09h	R\$ 0.25618	20h-21h	R\$ 0.65234
09h-10h	R\$ 0.25618	21h-22h	R\$ 0.40987
10h-11h	R\$ 0.25618	22h-23h	R\$ 0.25618
11h-12h	R\$ 0.25618	23h-24h	R\$ 0.25618

Fonte: ANEEL (2013).

O primeiro teste leva em consideração uma residência de baixa renda, com consumo residencial de até 100 kWh mês. Apesar da ANEEL ter sinalizado por não incluir esta faixa de consumidor para opção da adoção da tarifa branca, entende-se que essa sinalização da ANEEL pode ser mudada futuramente e por isso é interessante que o método seja aplicado aos consumidores desta faixa.

O consumidor selecionado para o teste 01 possui reduzido número de equipamentos e consumo de energia na residência. Na Tabela 6 são apresentados os equipamentos disponíveis desse consumidor e suas respectivas características.

O consumidor selecionado possui as seguintes características: duas pessoas habitam a residência sendo 2 adultos e a empresa fornecedora de energia é a Energisa – Distribuidora de Energia S/A. O consumo mensal de energia elétrica é 74 kWh mês.

Tabela 6- Potência e uso habitual das cargas para o consumidor teste 01.

Equipamento	Quant.	P_e^{med} (W)	Qual horário utilizado Ex.: às 10h, 18h, 20h	Tempo de uso Ex.: 15 min.
Aparelho de som	1	150	18:00hs	02:00hs
Batedeira	1	90	19:00hs	10m
Ferro elétrico	1	1000	18:00hs	40m
Geladeira simples**	1	180	Constante	24:00hs
Lâmpadas fluorescentes	6	40	18:30hs	06:00hs
Liquidificador	1	30	11:00hs	10m
Multiprocessador	1	30	19:00hs	5m
Prancha de cabelo	1	750	19:00hs	10m
Secador de cabelo	1	1000	19:00hs	15m
Tanquinho de lavar roupa	1	600	20:00hs	01:30hs
Televisor*	1	200	100hs	05:00hs
Chuveiro elétrico*	1	4500	18:00hs	15m

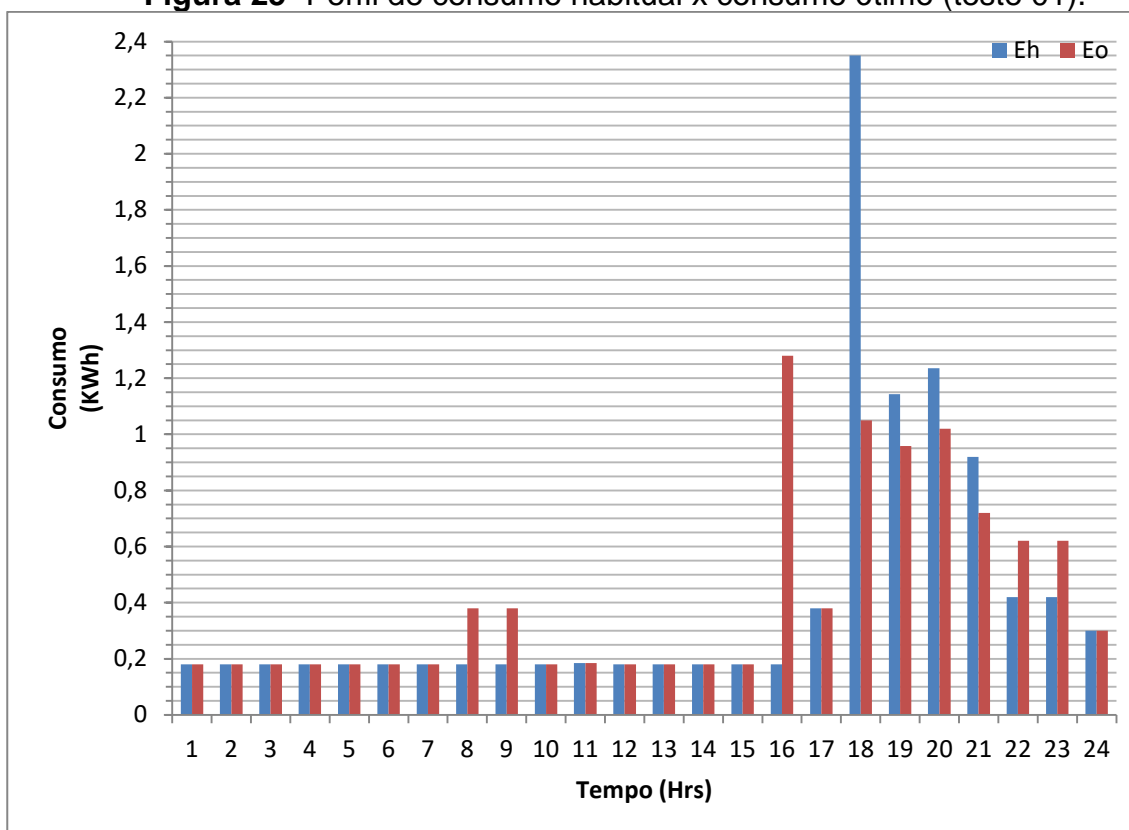
*Equip. não prioritário

**Equip de uso contínuo

Fonte: Elaboração do autor

Quando realizado o teste para esse consumidor, observou-se que houve deslocamento de horários no uso dos equipamentos, porém, todo o deslocamento ficou bem próximo ao habitual, a solução esta ligada com a baixa carga para os consumidores dessa faixa de consumo.

Para consumidores com baixo consumo de energia, existem sérias dificuldades e restrições na aplicação da modalidade branca, ligadas à presença de uma certa “inelasticidade” na mudança de hábitos de consumo.

Figura 25- Perfil de consumo habitual x consumo ótimo (teste 01).

Fonte: Elaboração do autor

Observa-se pela Tabela 6 que esse consumidor possui 12 tipos diferentes de equipamentos, sendo que um equipamento é classificado como de uso constante, representado na tabela pelo símbolo (**), dois eleitos como não prioritários representados pelo símbolo (*) e, portanto, sofreram deslocamento nos horários de uso e nove eleitos como prioritários que permaneceram com suas cargas nos horários habituais.

O gasto diário com a conta de energia consumida pelo consumidor teste 01 é de R\$ 1,07 e com a aplicação do método proposto é reduzido para R\$ 1,02, que resulta em percentual de economia de 4,46%.

O segundo teste leva em consideração uma residência com consumo entre 101 kWh e 200 kWh. O consumidor selecionado para essa faixa de consumo possui as seguintes características: duas pessoas habitam a residência sendo um adulto e uma criança e a empresa fornecedora de energia é a Energisa – Distribuidora de Energia S/A. O consumo mensal de energia elétrica é 132 kWh mês.

O consumidor selecionado para o teste 02 possui característica muito semelhante ao consumidor teste 01, isso em relação às cargas da residência. Na

Tabela 7 são mostrados os equipamentos disponíveis nesse consumidor e suas respectivas características.

Tabela 7- Potência e uso habitual das cargas para o consumidor teste 02.

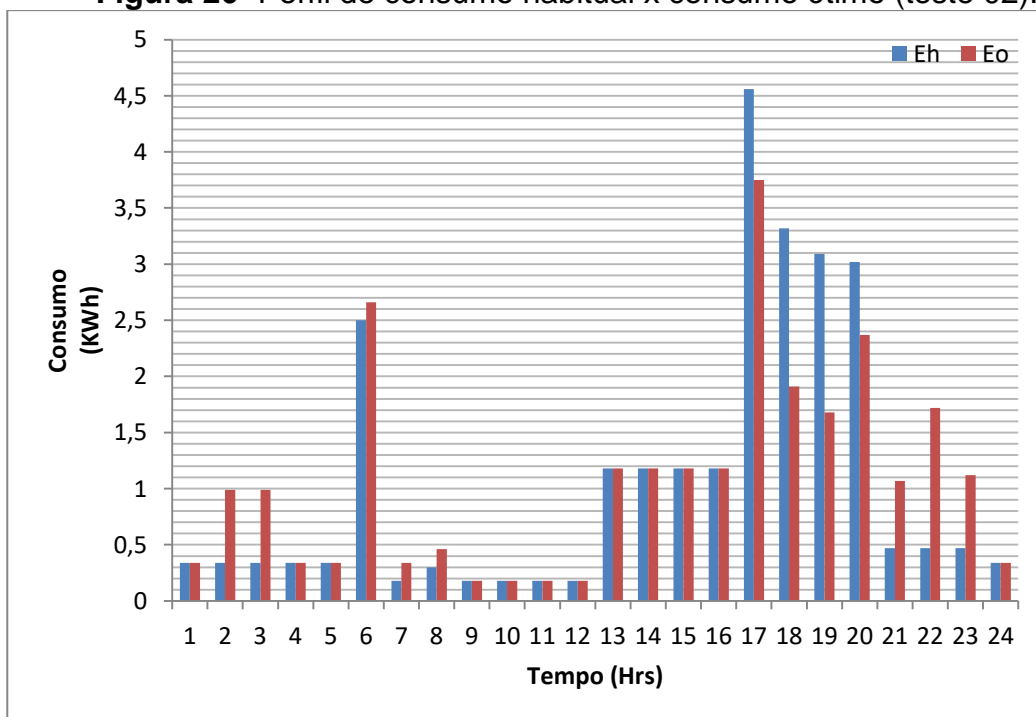
Equipamento	Quant.	P_e^{med} (W)	Qual horário utilizado Ex.: às 10h, 18h, 20h	Tempo de uso Ex.: 15 min.
Chuveiro	1	4500	06:00hs e 17:00hs	30m
Condicionador de ar (9.000Btus)	1	1300	17:00hs	04hs
Ferro elétrico	1	1000	13:00hs	04:00hs
Forno de micro-ondas	1	1500	8:00hs e 18:00hs	05:00m
Geladeira simples**	1	180	Constante	24:00hs
Lâmpadas fluorescentes	9	15	18:00hs	06:00hs
Liquidificador	1	30	6:00hs e 20:00hs	15m
Máquina de lavar roupa*	1	650	17:00hs	04:00hs
Secador de cabelo	1	1000	18:00hs	10m
Televisor*	3	200	18:00hs	03:00hs
Ventilador*	4	40	17:00hs	13:00hs
Videogame	1	20	17:00hs	02:00hs

*Equip. não prioritário
**Equip de uso contínuo

Fonte: Elaboração do autor

A exemplo do primeiro teste, a solução para o teste 02 também conservou a energia habitual bem próxima da ótima, mantendo o conforto do consumidor.

Figura 26- Perfil de consumo habitual x consumo ótimo (teste 02).



Fonte: Elaboração do autor

Observa-se pela Tabela 7 que esse consumidor possui 12 tipos diferentes de equipamentos, sendo que um equipamento é classificado como de uso constante, representado na tabela pelo símbolo (**), três eleitos como não prioritários representados pelo símbolo (*) e, portanto, sofreram deslocamento nos horários de uso e oito eleitos como prioritários que permaneceram com suas cargas nos horários habituais.

O gasto diário com a conta de energia consumida pelo consumidor teste 02 é de R\$ 2,09 e com a aplicação do método proposto é reduzido para R\$ 2,02, que resulta em percentual de economia de 3,34%.

O terceiro teste leva em consideração uma residência com consumo entre 201 kWh e 300 kWh. O consumidor selecionado para essa faixa de consumo possui as seguintes características: três pessoas habitam a residência sendo dois adultos e uma criança e a empresa fornecedora de energia é a Elektro – Eletricidade e Serviços S/A. O consumo mensal de energia elétrica é 293 kWh mês. A Tabela 8 mostra os equipamentos disponíveis nesse consumidor e suas respectivas características.

Tabela 8- Potência e uso habitual das cargas para o consumidor teste 03.

Equipamento	Quant.	P_e^{med} (W)	Qual horário utilizado Ex.: às 10h, 18h, 20h	Tempo de uso Ex.: 15 min.
Aspirador de pó	1	750	16:00 hs	20m
Batedeira*	1	90	14:00 hs	5m
Bebedouro de água**	1	200	Constante	24hs
Computador*	1	250	19:00 hs	05hs
Condicionador de ar (7.000Btus)*	1	900	21:00 hs	07hs
Espremedor de frutas	1	30	12:00hs	10m
Geladeira duplex**	1	300	Constante	24hs
Lâmpadas Led's*	9	12	18:00hs	06hs
Liquidificador	1	30	11:00hs	5m
Máquina de lavar roupa	1	650	17:00hs	03hs
Multiprocessador	1	30	11:00hs	10m
Prancha de cabelo	1	1000	18:00hs	20m
Secador de cabelo	1	1000	18:00hs	10m
Televisor*	2	200	21:00hs	2hs
Ventilador*	4	40	21hs	10hs
Chuveiro*	1	4500	18:00hs	30m

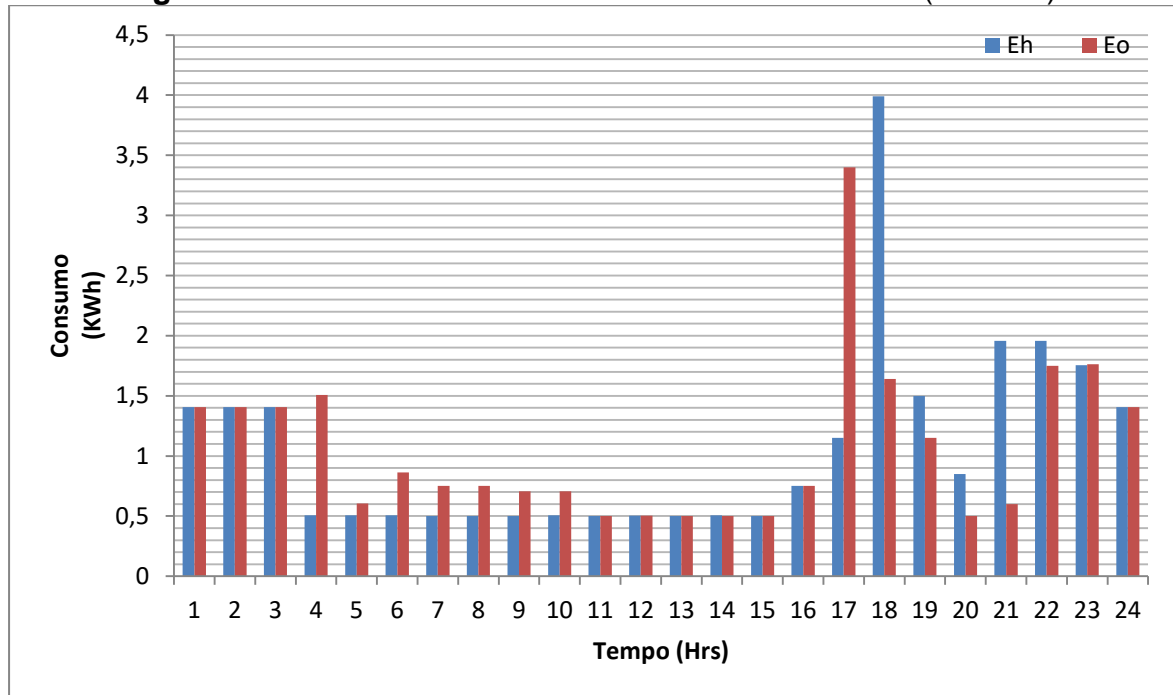
*Equip. não prioritário

**Equip de uso contínuo

Fonte: Elaboração do autor

No teste 03 já houve um maior deslocamento de equipamentos para horários diferentes dos habituais, quando comparado com os testes 01 e 02.

Figura 27- Perfil de consumo habitual x consumo ótimo (teste 03).



Fonte: Elaboração do autor

Observa-se pela Tabela 8 que esse consumidor possui 16 tipos diferentes de equipamentos, sendo que dois equipamentos são classificados como de uso constante, representado na tabela pelo símbolo (**), seis eleitos como não prioritários representados pelo símbolo (*) e, portanto, sofreram deslocamento nos horários de uso e oito eleitos como prioritários que permaneceram com suas cargas nos horários habituais.

O gasto diário com a conta de energia do consumidor teste 03 é de R\$ 3,33 e com a aplicação do método proposto é reduzido para R\$ 2,81, que resulta em percentual de economia de 15,6%.

Neste caso observa-se que o consumidor optou por obter uma economia maior com a eleição de um número maior de equipamentos não prioritários, mesmo assim conservou o conforto do usuário através da manutenção do funcionamento dos equipamentos eleitos como prioritários, ainda, fazendo com que os equipamentos não prioritários fossem deslocados para horários bem próximos do habitual.

O quarto teste leva em consideração uma residência com consumo entre 301 kWh e 500 kWh. O consumidor selecionado para essa faixa de consumo,

possuí as seguintes características: quatro pessoas habitam a residência sendo três adultos e uma criança e a empresa fornecedora de energia é a Elektro – Eletricidade e Serviços S/A. O consumo mensal de energia elétrica é 408 kWh mês. A tabela 9 mostra os equipamentos do consumidor suas respectivas características.

Tabela 9- Potência e uso habitual das cargas para o consumidor teste 04.

Equipamento	Quant.	P_e^{med} (W)	Qual horário utilizado Ex.: às 10h, 18h, 20h	Tempo de uso Ex.: 15 min.
Aspirador de pó	01	750	15:00hs	01hs
Aparelho de som*	01	150	08:00hs e 20:00hs	03hs
Batedeira	01	90	10:00hs	30m
Bebedouro de água**	01	200	Constante	24hs
Bomba de lavar/ pressão	01	730	13:00hs	01hs
Bomba de piscina	01	730	18:00hs	01hs
Computador*	01	120	9:00hs	12hs
Condicionador de ar (12.000Btus)	02	1600	17:00hs	12hs
Chuveiro elétrico	03	4500	18:00hs	50m
Espremedor de frutas	01	30	11:00hs e 19:00hs	20m
Ferro elétrico	01	1000	18:00hs	03hs
Fogão elétrico 4 bocas	01	800	10:30hs e 18:30hs	4hs
Forno elétrico grande	01	1500	10:00hs e 18:30hs	4hs
Forno de micro-ondas *	01	1500	08:00hs e 19:00hs	40m
Freezer horizontal**	01	400	Constante	24hs
Geladeira duplex**	01	300	Constante	24hs
Grill	01	300	11:00hs e 19:00hs	02hs
Lâmpadas fluorescentes	08	40	18:00hs	05hs
Lâmpadas Led's	03	12	18:00hs	05hs
Liquidificador	01	30	19:00hs	30m
Máquina de lavar louça*	01	1500	12:00hs e 20:00hs	04hs
Máquina de lavar roupa*	01	650	16:00hs	04hs
Multiprocessador	01	30	11:00hs e 19:00hs	20m
Panela de arroz	01	75	11:00hs e 19:00hs	01hs
Prancha de cabelo	01	750	20:00hs	30m
Secador de cabelo	01	1000	20:00hs	20ms
Televisor	02	200	18:00hs	07hs
Umidificador	01	150	20:00hs	11hs
Ventilador	03	40	17:00hs	10h
Maquina de solda elétrica	01	9700	08:00hs	04hs
Esmeril	01	2200	08:00hs	04hs

*Equip. não prioritário

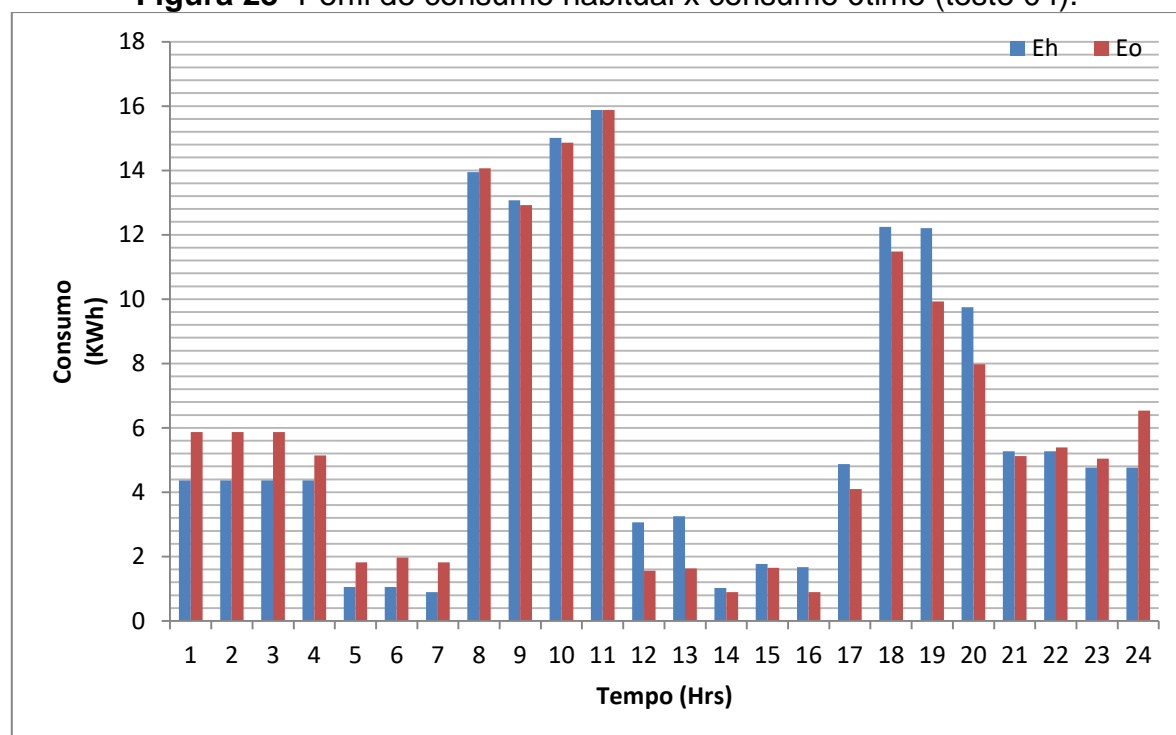
**Equip de uso contínuo

Fonte: Elaboração do autor

O Teste 04 teve o consumo de energia habitual bem próximo do ótimo. Esse resultado se deu pela resistência do consumidor em mudar seus hábitos de

consumo e portanto definindo poucos equipamentos como não prioritários, tendo em vista que no momento de eleger as cargas não prioritárias, aquelas que poderiam sofrer deslocamento o consumidor foi recalcitrante em relação a sua mudança de hábito de consumo.

Figura 28- Perfil de consumo habitual x consumo ótimo (teste 04).



Fonte: Elaboração do autor.

Observa-se pela Tabela 9 que esse consumidor possui 32 tipos diferentes de equipamentos, sendo que três equipamentos são classificados como de uso constante, representado na tabela pelo símbolo (**), cinco eleitos como não prioritários representados pelo símbolo (*) e, portanto, sofreram deslocamento nos horários de uso e vinte e quatro eleitos como prioritários que permaneceram com suas cargas nos horários habituais.

O gasto diário com a conta de energia consumida pelo consumidor teste 04 é de R\$ 7,30 e com a aplicação do método proposto é reduzido para R\$ 7,18, que resulta em percentual de economia de 1,64%.

O quinto teste leva em consideração uma residência com consumo acima de 501 kWh. O consumidor selecionado para essa faixa de consumo possuiu as seguintes características: três pessoas habitam a residência sendo dois adultos e uma criança e a empresa fornecedora de energia é a Elektro – Eletricidade e

Serviços S/A. O consumo mensal de energia elétrica é 584 kWh mês. A Tabela 10 mostra os equipamentos do consumidor e suas respectivas características.

Tabela 10- Potência e uso habitual das cargas para o consumidor teste 05.

Equipamento	Quant.	P_e^{med} (W)	Qual horário utilizado Ex.: às 10h, 18h, 20h	Tempo de uso Ex.: 15 min.
Aparelho de som*	1	150	19:00hs	02hs
Batedeira	1	90	13:00hs	20m
Bebedouro de água**	1	200	Constante	24:hs
Bomba de lavar/ pressão	1	730	15:00hs	01:h
Bomba de poço semi-artesiano	1	730	20:00hs	03:00hs
Bomba de piscina	1	730	8:00hs	01:00h
Cafeteira elétrica	1	150	7:00hs	30m
Churrasqueira elétrica*	1	1500	10:00hs e 18:00hs	03:00hs
Computador*	2	120	18:00hs	04:00hs
Condicionador de ar (9.000Btus)*	1	1300	22:00hs	08:00hs
Condicionador de ar (12.000Btus)*	2	1600	22:00hs	08:00hs
Condicionador de ar (18.000Btus)*	1	2600	18:00hs	08:00hs
Conjunto de som – Mini system	1	150	21:00hs	03:00hs
Cortador de grama	1	620	13:00hs	02:00hs
Espremedor de frutas*	1	30	11:00hs e 20:00hs	20m
Exaustor*	1	280	10:00hs e 17:00hs	04:00hs
Ferro elétrico	1	1000	15:00hs	02:00hs
Fogão elétrico 4 bocas	1	800	10:00hs e 17:00hs	04:00hs
Forno elétrico grande*	1	1500	10:00hs e 17:00hs	02:00hs
Forno de micro-ondas	1	1500	10:00hs e 17:00hs	30m
Freezer horizontal**	1	400	Constante	24:00hs
Freezer vertical**	1	450	Constante	24:00hs
Geladeira duplex**	1	300	Constante	24:00hs
Grill*	1	15	11:00hs e 18:00hs	02:00hs
Lâmpadas incandescentes**	4	100	18:00hs	10:00hs
Lâmpadas fluorescentes**	17	40	18:00hs	04:00hs
Liquidificador	1	30	11:00hs e 19:00hs	30m
Máquina de lavar louça*	1	1500	13:00hs e 19:00hs	02:00hs
Máquina de lavar roupa*	1	650	14:00hs	03:00hs
Multiprocessador	1	75	11:00hs	20m
Prancha de cabelo	1	750	19:00hs	30m
Secador de cabelo	1	1000	19:00hs	25m
Secadora de roupas	1	1100	16:00hs	30m
Televisor	4	200	18:00hs	04:00hs
Umidificador	2	150	22:00hs	08:00hs
Videogame	1	20	19:00hs	04:00hs
Chuveiro elétrico*	4	4500	17:00hs	1:20h
Carregador de celulares*	5	5	20:00hs	5:00hs

*Equip. não prioritário

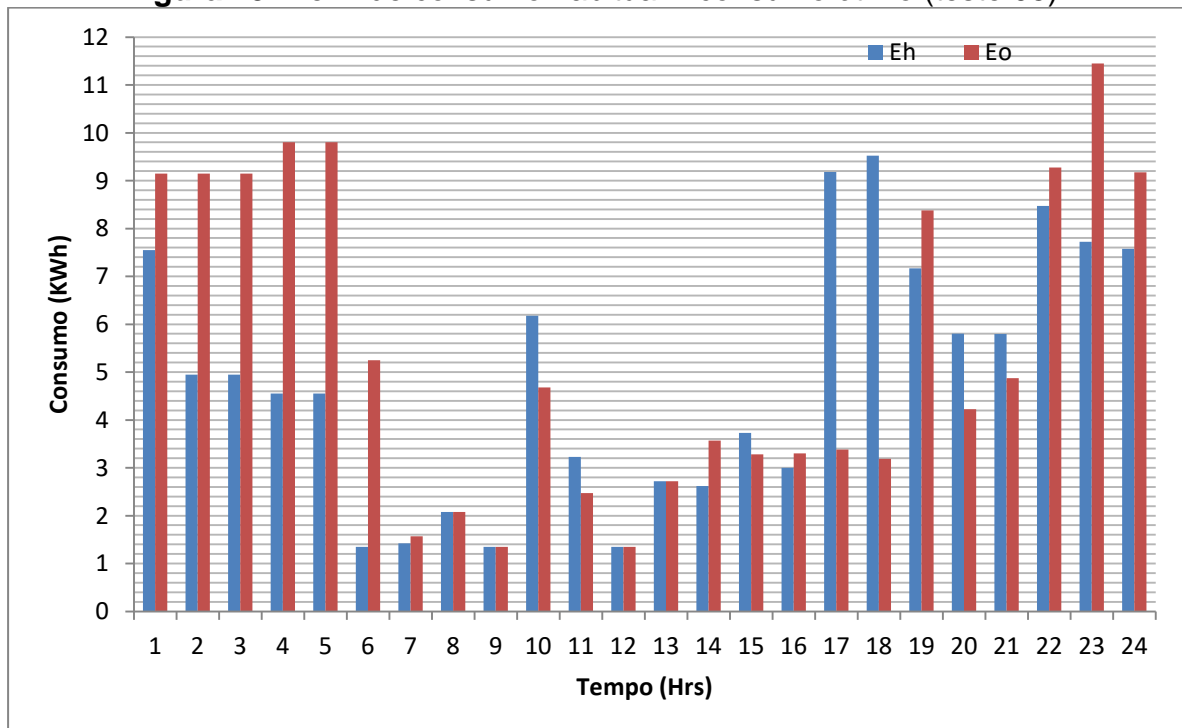
**Equip de uso contínuo

Fonte: Elaboração do autor

Em análise ao teste cinco pode-se verificar que quando aplicado o método, o mesmo se comporta de forma adequada e robusta visto que houve deslocamento dos horários de uso daqueles equipamentos eleitos pelo consumidor como não prioritários, porém, durante a pesquisa, quando indagado ao consumidor pesquisado quais seriam os equipamentos que o mesmo considerava como não prioritários sinalizou por eleger os equipamentos de uso geral.

Todavia, nesses consumidores poderão ser aplicadas técnicas que venham satisfazer os objetivos e tornar a curva de carga do sistema mais plana, como é o caso de convencimento pelos benefícios ao meio ambiente, que poderá resultar em instalação de planta fotovoltaica e até mesmo armazenamento em banco de baterias.

Figura 29- Perfil de consumo habitual x consumo ótimo (teste 05).



Fonte: Elaboração do autor

Observa-se pela Tabela 10 que esse consumidor possui 38 tipos diferentes de equipamentos, sendo que seis equipamentos são classificados como de uso constante, representado na tabela pelo símbolo (**), treze eleitos como não prioritários representados pelo símbolo (*) e, portanto, sofreram deslocamento nos horários de uso e vinte eleitos como prioritários que permaneceram com suas cargas nos horários habituais.

O gasto diário com a conta de energia do consumidor teste 05 é de R\$ 10,89 e com a aplicação do método proposto é reduzido para R\$ 9,70, que resulta em percentual de economia de 10,9%.

Os resultados das simulações mostram que em todos os casos foi possível promover os deslocamentos dos horários de uso de cargas não prioritárias com possibilidades de reduzir o valor das contas de energia dos consumidores, porém, nota-se que o resultado mais expressivo em relação ao deslocamento das cargas dos dispositivos eleitos pelo consumidor como não prioritários ocorreu no consumidor teste 5 ante a maior elasticidade no deslocamento das cargas para esses aparelhos, entretanto, o maior percentual de economia foi encontrado no consumidor teste 3.

As soluções do modelo para os casos de estudo mostram que o modelo é capaz de otimizar o consumo de energia realizando o deslocamento do uso dos equipamentos não prioritários para horários fora de pico nos horários em que as tarifas estão com valores reduzidos. Para os testes em consumidores reais não foram simuladas situações em que os mesmos pudessem estar equipados com baterias ou geração fotovoltaica.

Ainda assim o modelo manteve o conforto do consumidor, ou seja, deslocar os horários de consumo para horários próximos dos habituais dos consumidores. Ao mesmo tempo conservou, em horários habituais, os equipamentos tidos como prioritários, mantendo, assim, o conforto do consumidor.

O método de otimização proposto para o gerenciamento ótimo de energia, também foi capaz de lidar, de maneira satisfatória, com as características do problema, tais como grande número de equipamentos para controle e diferentes tipos de equipamentos.

Com os testes iniciais, como os apresentados nas Figuras 03 a 13, foi possível comprovar a eficiência do modelo no deslocamento das cargas. Assim a mudança nos horários de uso dos dispositivos eleitos como não prioritários pelo consumidor poderá resultar em uma curva mais plana para o sistema, além de proporcionar uma economia na conta do consumidor, sem afetar, de forma demasiada, seu conforto.

O modelo se comporta adequadamente para qualquer consumidor que venha adotar uma estrutura tarifária com preço da tarifa variável para o faturamento da energia. Também, o modelo apresenta flexibilidade apresentando soluções adequadas mesmo que a unidade consumidora não esteja equipada com planta de

energia de fonte alternativa (GD) ou não possua um banco de baterias para armazenamento de energia.

4.2.1 Análise econômica considerando instalação de painel fotovoltaico no consumidor teste 5

Para uma melhor análise e verificar o custo-benefício da implantação de um painel fotovoltaico com a finalidade de atender consumidores com consumo acima de 501 kWh, realizou-se uma pesquisa orçamentária junto a fornecedores de equipamentos fotovoltaicos para a implantação de um sistema de geração fotovoltaica e análise econômica.

Para a análise econômica é considerado um período de retorno simples para o investimento, que é a relação obtida entre o investimento feito inicialmente, levando em consideração o custo de manutenção do equipamento ao longo de sua vida útil e a economia proporcionada pela implantação do projeto na fatura de energia. Também é calculado o VPL – Valor Presente Líquido para o investimento proposto, e a TIR - Taxa Interna de Retorno, considerando uma TMA - Taxa mínima de atratividade de 12% ao ano, adotando fluxo de caixa obtido pela contribuição da geração fotovoltaica na fatura de energia elétrica e o custo de manutenção do equipamento ao longo do tempo de sua vida útil.

Para atender a demanda do consumidor considerando o teste cinco seria necessário uma planta com 37,97 m² de extensão que resulta em 17 placas fotovoltaica de 260 Watts, com potência instalada de 4,5 kWp, que custaria em média R\$ 22.200,00 a um custo de manutenção de R\$ 6.000,00 para todo o período (VIVAGREEN, 2017). Na Tabela 11 são apresentados os custos de investimento e o preço da energia considerando a implantação do sistema fotovoltaico e armazenamento em banco de baterias.

Tabela 11- Análise econômica considerando o painel fotovoltaico.

Custo de Implantação Sistema de Energia Solar Fotovoltaico de 4,5 kWp	
Investimento	R\$ 22.200,00
Manutenção em 25 anos	R\$ 6.000,00
Custo Total	R\$ 28.200,00
Cálculo: Custo total (Investimento+manutenção) dividido pela energia gerada é igual ao preço da energia:	
28.200 / 175.000	R\$ 0,16 R\$/kWh
Custo de Amortização Mensal	
584 kWh * R\$ 0,16	R\$ 93,44 (custo mês)

Fonte: Elaboração do autor

Na Tabela 12 é apresentado o cálculo do consumo da energia produzida em caso de absorção da rede elétrica.

Tabela 12- Cálculo de consumo de energia absorvida da rede.

Item	Quantidade	TE R\$	TU R\$	Valor total
Consumo	584	0,19069	0,21185	235,08
Adic. B. Verm.	584	0,3000		17,52
Subtotal				252,60
PIS	0,51%			1,78
COFINS	2,37%			8,30
ICMS	25,00%			87,56
Total				350,24

Fonte: Elaboração do autor

Cálculo de custo e benefício na implantação do painel fotovoltaico diante da simulação ocorrida para consumidor acima de 501 kW/h: R\$ 350,24 – R\$ 93,44 = R\$ 256,80 (Economia/mês) R\$ 28.200,00 / R\$ 256,80 = 109,8 meses (tempo aproximado de retorno do investimento)

Dessa forma o retorno do investimento estaria estimado para 9 anos e 1 mês (aproximadamente), se levado em consideração que a vida útil para o equipamento é de 25 anos.

Para uma melhor análise do custo-benefício da implantação do painel fotovoltaico para o consumidor, são apresentados na Tabela 13 os cálculos para o VPL e a TIR.

Para os cálculos foram usados os dados de investimento conforme Tabela 11 com índice TMA 12%, taxa legal permitida pelo Código Civil Brasileiro como remuneração de capital.

A Tabela 13 mostra o resultado do VPL e TIR para o Investimento.

Tabela 13- Cálculo VPL e TIR. (Continua)
CÁLCULO DE VPL E TIR PARA ANÁLISE DE VIABILIDADE DE
PAINEL FOTOVOLTAICO

Ano	Investimento do projeto Fluxo de Caixa: (+) Entrada de Capital (R\$) (-) Saída (R\$)
1	Investimento R\$ 22.200,00
2	FCO (R\$ 4.202,88-R\$ 240,00)
3	FCO (R\$ 4.202,88-R\$ 240,00)
4	FCO (R\$ 4.202,88-R\$ 240,00)
5	FCO (R\$ 4.202,88-R\$ 240,00)
6	FCO (R\$ 4.202,88-R\$ 240,00)
7	FCO (R\$ 4.202,88-R\$ 240,00)
8	FCO (R\$ 4.202,88-R\$ 240,00)
9	FCO (R\$ 4.202,88-R\$ 240,00)
10	FCO (R\$ 4.202,88-R\$ 240,00)
11	FCO (R\$ 4.202,88-R\$ 240,00)
12	FCO (R\$ 4.202,88-R\$ 240,00)
13	FCO (R\$ 4.202,88-R\$ 240,00)
14	FCO (R\$ 4.202,88-R\$ 240,00)
15	FCO (R\$ 4.202,88-R\$ 240,00)
16	FCO (R\$ 4.202,88-R\$ 240,00)
17	FCO (R\$ 4.202,88-R\$ 240,00)
18	FCO (R\$ 4.202,88-R\$ 240,00)
19	FCO (R\$ 4.202,88-R\$ 240,00)
20	FCO (R\$ 4.202,88-R\$ 240,00)
21	FCO (R\$ 4.202,88-R\$ 240,00)
22	FCO (R\$ 4.202,88-R\$ 240,00)
23	FCO (R\$ 4.202,88-R\$ 240,00)
24	FCO (R\$ 4.202,88-R\$ 240,00)
25	FCO (R\$ 4.202,88-R\$ 240,00)

VPL = R\$ 8.881,42 e TIR= 18%

Fonte: Elaboração do autor.

Considerando um período de vida útil de um sistema fotovoltaico como sendo estimado em 25 anos os resultados demonstram que o projeto se torna viável, haja vista apresentar VPL com saldo positivo no ano 25, quando expira a vida útil do equipamento fotovoltaico, de R\$ 8.881,42 e TIR de 18% frente a uma TMA de 12% ao ano.

Vale observar que para os cálculos do VPL e da TIR não foi considerado o custo de implantação de baterias para armazenamento de energia, haja vista que para esse cálculo demandaria um aprofundamento da economia que esse equipamento poderia resultar na conta de energia faturada frente ao custo investido para implantação do banco de baterias e vida útil desses equipamentos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho é proposto um modelo de programação linear inteira mista (PLIM) para o gerenciamento ótimo de energia elétrica pelo lado do consumidor considerando a tarifação variável no tempo. O objetivo do modelo matemático proposto é a minimização do custo de energia elétrica mantendo ao mesmo tempo o conforto do consumidor através da minimização da diferença entre o consumo habitual e o ótimo.

O modelo desenvolvido mostrou-se eficiente e robusto no auxílio ao consumidor que pretenda aderir ao ambiente de tarifação variável, a exemplo da tarifa branca, proporcionando a esse consumidor uma ferramenta para o gerenciamento ótimo do consumo de energia. O modelo matemático atende, também, ao consumidor que, não estando disposto abrir mão de seu conforto, com o deslocamento de dispositivos controláveis, queira se utilizar de alternativas como geração distribuída e armazenamento de sua própria energia.

O modelo proposto quando testado no primeiro estudo de caso aponta para uma redução diária de 11,57% no gasto com energia elétrica para o consumidor se considerado o deslocamento dos horários de uso dos dispositivos, e quando implementado banco de baterias os resultados se mostram ainda mais expressivos com a redução de 27,62% em relação ao consumo sem a otimização.

Na prática, quando realizado teste em consumidores com cargas reais, optou-se por conhecer a curva de carga desses consumidores, como se todos os dispositivos estivessem ligados em um dia típico de uso, possibilitando assim otimizar o consumo de energia promovendo os deslocamentos dos equipamentos desses consumidores de acordo com sua escolha de prioridades.

Vale fazer uma síntese do comportamento do consumidor pesquisado em particular para o teste quatro. Para este caso, e devido sua resistência para mudança de hábitos, ocorreu uma discreta mudança na curva de carga se comparada às energias habitual e ótima. Entretanto, é possível observar que o deslocamento do consumo dos horários em que a energia estava com tarifas elevadas para horários em que a tarifa está com valores reduzidos, assim como, se bem selecionados os equipamentos de uso prioritários e de forma adequada, não deve haver grandes alterações no conforto do consumidor que optar pela tarifação branca.

Os seguintes temas podem ser sugeridos como trabalhos futuros:

- Extensão do modelo apresentado neste trabalho para aplicação em um conjunto considerável de consumidores comerciais e industriais com perfis de consumo diferenciados a fim de avaliar o impacto da Tarifa Branca, implantação de geração distribuída e armazenamento de energia por banco de baterias.

- Reaplicação da metodologia de elasticidade-preço da demanda analisado pelo lado do consumidor para simulação de impactos financeiros provocados por outras fontes de microgeração.

REFERÊNCIAS

ALBADI, M; El-Saadany, E. A summary of demand response in electricity markets. **Electric Power Systems Research**, Waterloo, v. 78, n. 11, p. 1989 – 1996, 2008.

ABDULAZIZ, N.; TAQQALI, W. M. Smart grid and demand response technology. In: IEEE INTERNATIONAL ENERGY CONFERENCE, 2010, Manama, **Conference...** Manama: IEEE, 2010. p. 1244 – 1252.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA- ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília: [s.n.], 2008 - Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf>. Acessado em: 2 abr 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA- ANEEL. **Audiência pública 120/2010**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2011. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicações/audiência/dslistaResultado.cfm?attanoaud=2010&attldeAud=541&attanoFasAud2011&id_area13>. Acessado em: 12 abr 2015

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA- ANEEL. **Nota técnica n. 311/2011 – SER – SRD/ANEEL**. Brasília: [s.n.], 2011. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/nrem_2011464.pdf>. Acessado em: 11 abr 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA- ANEEL. Resolução normativa n. 414, estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica de forma atualizada e consolidada. Brasil 9 de set de 2010.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA- ANEEL. Resolução normativa n. 482, estabelece condições gerais para acesso a microgerações e minerações distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica dá outras providencias. Brasil, 17 de fevereiro de 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA- ANEEL. Resolução homologatória 1.505, homologa os resultados da revisão tarifária extraordinária das concessionárias de distribuição de energia elétrica, fixa as tarifas de energia. Brasil, 05 de abril de 2013, Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2013/004/resultado/reh2013150>>. Acessado em: 15 jan 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA- ANEEL. Resolução homologatória 1.858, homologa os resultados da revisão tarifária extraordinária das concessionárias de distribuição de energia elétrica, fixa as tarifas de energia. Brasil, 27 de fevereiro de 2015, Disponível em: <www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2015/007/resultado/reh20151858.pdf>. Acessado em: 10 abr 2016.

BAHARLOUEI, Z; HASHEMI, M. **Demand side management challenges in smart grid**: a review, Smart Grid Conference –SGC. Tehran: IEEE, 2013. p. 96-101.

BOCUZZI, C. V. Tecnologia de smart grid no Brasil: avanços regulatórios e institucionais. In: FORUM LATINO-AMERICANO DE SMART GRID, 5., 2012, São Paulo. **Fórum...** São Paulo: [s.n.], 2012.

BOLLEN, M. H. J. **The smart grid: adapting the power system to new challenges** Synthesis lectures on power electronics. Eskilstuna: SwedenM&C, 2011. 180 p.

CARATI, E. G. et al. Controlador de demanda e emulador de um consumidor residencial de energia elétrica: uma abordagem para melhoria da eficiência em smart grid. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 20., 2014, Belo Horizonte. **Congresso...** Belo Horizonte: [s.n.], 2014. p. 3712-3719.

DARBY, S. **The effectiveness of feedback on energy consumption: a review for DEFRA of the literature on metering, billing and direct displays.** Washington: [s.n.], 2006. p. 486.

DUARTE, D. P. Brazilian smart grid roadmap na innovative methodology for proposition end evolution of smart grid functionalities for highly heterogeneous distribution networks. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 19., 2013, São Paulo. **Congresso...** São Paulo: [s.n.], 2013. p.811 – 823.

ELEKTRO. **Simulador de consumo de tarifas.** São Paulo: [s.n.], 2016. Disponível em: <<https://simulador.elektro.com.br/index/simulacao>>. Acessado em: 20 abr. 2017.

FALCÃO, D. M. Smart grid e microrredes: o futuro já é presente. In: SIMPÓSIO DE AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – SIMPASE, 8., 2009, Rio de Janeiro. **Simpósio...** Rio de Janeiro: [s.n.], 2009. p. 73-81.

FARIA P.; VALE, Z. Demand response in electrical energy supply: an optimal real time pricing Approach. **Energy**, Rondebosch, v. 36, p. 5374-5384, 2011. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/energy>. Acesso em: 17 jun 2011.

FOURER, R.; GAY, D. M.; KERNIGHAN, B. W. **AMPL: a modeling language for mathematical programming.** 2. ed. Pacific Grove: Brooks/Cole-Thomson Learning, 2003. 153 p.

FROSSARD, A. C. P. Programação linear: Maximização de Lucro e Minimização de Custos. **Revista Científica da Faculdade Lourenço Filho**, Brasília, DF, v. 6, n. 1, p. 65 - 71, 2009.

GELLINGS, C. W. et al. Integrating Demand-Side Management into utility planning. **IEEE**, Palo Alto, v. 1, n. 3, p. 81-87, 1986.

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

HANEY, A. B.; JAMASB, T.; POLLITT, M. G. **Smart metering and electricity demand: technology, economics and international experience.** Cambridge: University of Cambridge, 2009. 217 p.

ILOG. **CPLEX optimization subroutine library guide and reference, version 11.0.** Incline Village: ILOG, 2008.

KASANA, H. S.; KUMAR, K. D. **Introductory operations research.** New York: Springer Berlin Heidelberg, 2004. 605 p.

LIGHT. **Smart grid.** Rio de Janeiro: Light, 2014. Disponível em: < <http://smartgridlight.com.br/conceitos-smart-grid/> >. Acesso em: 14 set 2014.

LOGENTHIRAN, T. et al. Demand side management in smart grid using heuristic optimization. **IEEE Transactions on Smart Grid**, New York, v. 3, n. 3, p. 1244-1252, 2012.

MCDANIEL, P.; MCLAUGHLIN, S. Security and privacy challenges in the smart grid. **Security & Privacy, IEEE**, New York, v. 7, n. 3, 7p. 5–77, 2009.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA- MME. **Relatório grupo de trabalho smart grid.** Brasília, DF: [s.n.], 2013. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/acoes/Energia/Relatxrio_GT_Smart_Grid_Portaria_440-2010.pdf>. Acesso em: 15 set 2014.

OLIVEIRA, E. J.; et al. Modelo de cálculo de tarifas dinâmicas em redes inteligentes. In; CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 20., 2014, Belo Horizonte. **Congresso...** Belo Horizonte: [s.n.], 2014. p. 254-261.

RAHIMI, F.; IPAKCHI, A. Demand response as a market resource under the smart grid paradigm. **Smart Grid, IEEE Transactions on**, Minneapolis, v. 1, n. 1, p. 82 –88, 2010.

SANTOS, P.E.S. **Tarifa de distribuição para unidades consumidoras e micro geradores considerando a elasticidade:** preço das cargas. 2008. 162 f. Tese (Doutorado)- Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2008.

SOUZA, Z.; RAMOS, D. **A importância da reação da demanda na formação dos preços de curto prazo em mercados de energia elétrica.** 2010. 121 f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo- USP, São Paulo, 2010.

TOLEDO, F. **Desenvolvendo as redes elétricas inteligente.** Rio de Janeiro: Brasport, 2012. 287 p.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **The modern grid:** a vision for the Smart Grid. Texas: [s.n.], 2009. v. 2. Disponível em: < <http://www.netl.doe.gov/smartgrid/referenceshelf/whitpapers>>. Acessado em: 15 maio 2017.

USDE. **Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them.** Texas: Department of Energy, 2006. 122 p.

VIDAL, A. R; BATISTA L. S. Otimização e evolutiva do gerenciamento pelo lado da demanda em smart grid. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 20., 2014, Belo Horizonte. **Congresso...** Belo Horizonte: [s.n.], 2014. p. 3267 – 3274.

VIEIRA, J. G.; GRANATO, S. **Medição inteligente e smart grid news**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2013. Disponível em: <<http://www.smartgridnews.com.br>> . Acesso em: 15 maio 2017.

ZHENG L.; CAI L. Reliable wireless communication networks for demand response control. **IEEE**, New York, v. 4, n.1, p. 133-140.

ANEXO – Questionário da pesquisa de campo



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus de Ilha Solteira

Prezado(a,s) Senhores(a,s), Gostaria de poder contar com sua colaboração para desenvolver a atividade a seguir. Os dados serão usados no desenvolvimento de uma pesquisa na área de consumo de Energia Elétrica. Será necessária a sua identificação apenas no cabeçalho. Caso tenha dúvidas solicite meu auxílio. Certamente, a sua contribuição será de grande valia. O formulário deverá ser preenchido e devolvido em 10 dias. Desde já agradeço, Luis Carlos Sanchez, mestrando da Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia Elétrica, Campus de Ilha Solteira, sob a orientação do Prof. Dr. Fábio Berthequini Leão.

FORMULÁRIO PARTE I - IDENTIFICAÇÃO			
Nome:			
End.:		Cidade/UF:	
e-mail:		Telefone:	
Quantas pessoas moram na residência:			
Nº adultos:	Nº adolescentes:	Nº crianças:	
Qual a empresa fornecedora de energia:			
Histórico de consumo de energia elétrica dos três últimos meses, em KWh?			
Mês 1:	Mês 2:	Mês 3:	
Obs.: caso prefira poderá fornecer cópia da última fatura de energia da residência.			

FORMULÁRIO PARTE II – LEVANTAMENTO			
Equipamento	Quantidade aparelhos	Qual horário utilizado Ex.: às 10h, 18h, 20h	Tempo de uso Ex.: 15 min.
Aquecedor de água por acumulação			
Aquecedor de água por passagem			
Aquecedor de ambiente			
Aspirador de pó			
Aparelho de som			
Batedeira			
Bebedouro de água			
Bomba de lavar/ pressão			
Bomba de poço semi-artesiano			
Bomba de piscina			
Cafeteira elétrica			
Centrífuga de roupa			
Churrasqueira elétrica			
Computador			
Condicionador de ar (7.000Btus)			
Condicionador de ar (9.000Btus)			
Condicionador de ar (10.000Btus)			
Condicionador de ar (12.000Btus)			
Condicionador de ar (18.000Btus)			
Conjunto de som – Mini system			
Cortador de grama			
Ebulidor			
Espremedor de frutas			
Exaustor			
DVD player			
Ferro elétrico			
Fogão elétrico 2 bocas			
Fogão elétrico 4 bocas			

Forno elétrico pequeno			
Forno elétrico grande			
Forno de micro-ondas			
Freezer horizontal			
Freezer vertical			
Geladeira simples			
Geladeira duplex			
Grill			
Lâmpadas incandescentes			
Lâmpadas fluorescentes			
Lâmpadas Led's			
Liquidificador			
Máquina de lavar louça			
Máquina de lavar roupa			
Multiprocessador			
Panela de arroz			
Prancha de cabelo			
Secador de cabelo			
Secadora de roupas			
Tanquinho de lavar roupa			
Televisor			
Torneira elétrica			
Torradeira			
Umidificador			
Ventilador			
Vídeo game			
Outros 1:			
Outros 2:			
Outros 3:			

TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE ESCLARECIDO

Declaro que estou informado de que este questionário se refere à pesquisa elaborada pelo Mestrando Luis Carlos Sanchez, para preparo de sua Dissertação e Defesa na conclusão do curso Mestrado junto à UNESP - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, *Campus* de Ilha Solteira, Departamento de Engenharia Elétrica, pelo que estou datando e assinando este Termo de autorização, inclusive para a publicação dos resultados deste seu trabalho.

Data / /

.....

Assinatura