



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE**  
**TELEINFORMÁTICA**

**PAULO DE TARSO FACÓ BEZERRA FILHO**

**PROPOSIÇÃO DE UM CONTROLADOR DE CARGAS INTELIGENTE**  
**CONSIDERANDO CUSTO ENERGÉTICO E CONFORTO BASEADO EM**  
**PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA**

**FORTALEZA**

**2016**

PAULO DE TARSO FACÓ BEZERRA FILHO

PROPOSIÇÃO DE UM CONTROLADOR DE CARGAS INTELIGENTE  
CONSIDERANDO CUSTO ENERGÉTICO E CONFORTO BASEADO EM  
PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia de Teleinformática. Área de Concentração: Sinais e Sistemas

Orientador: Prof. Dr. Giovanni Cordeiro Barroso

Co-Orientador: Prof. Dr. Bruno de Athayde Prata

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

B469p Bezerra Filho, Paulo de Tarso Facó.  
Proposição de um controlador de cargas inteligente considerando custo energético e conforto baseado em programação linear inteira / Paulo de Tarso Facó Bezerra Filho. – 2016.  
92 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática, Fortaleza, 2016.

Orientação: Prof. Dr. Giovanni Cordeiro Barroso.

Coorientação: Prof. Dr. Bruno de Athayde Prata.

1. Otimização combinatória. 2. Eficiência energética. 3. Redes inteligentes. I. Título.

CDD 621.38

---

PAULO DE TARSO FACÓ BEZERRA FILHO

PROPOSIÇÃO DE UM CONTROLADOR DE CARGAS INTELIGENTE  
CONSIDERANDO CUSTO ENERGÉTICO E CONFORTO BASEADO EM  
PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia de Teleinformática. Área de Concentração: Sinais e Sistemas

Aprovada em: 20 de Julho de 2016

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Giovanni Cordeiro  
Barroso (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Bruno de Athayde  
Prata (Co-Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. George André Pereira The  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Amauri Oliveira  
Universidade Federal da Bahia (UFBA)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores Prof. Dr. Giovanni Cordeiro Barroso e Prof. Dr. Bruno de Athayde Prata por toda confiança em mim depositada, pelos conselhos inestimáveis, pela amizade e imensurável compreensão nos momentos difíceis de elaboração desta dissertação.

Agradeço ao Prof. Me. Pedro Urbano por seu apoio, competência, e determinante participação no grupo de estudos que proporcionou os alicerces para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu amigo Prof. Me. Marcelo Sousa agradeço imensamente por todo o apoio e incentivo recebido antes e durante os anos de mestrado.

Aos colegas e funcionários do programa de pós-graduação em Engenharia de Teleinformática da Universidade Federal do Ceará agradeço pelo apoio sempre presente e trabalho prestativo.

À minha namorada Luiza Pontes, que sempre esteve ao meu lado durante momentos cruciais de elaboração desta dissertação, agradeço de forma especial pelo carinho e paciência durante todo o tempo que estive dedicado às atividades do mestrado.

“Il semble que la perfection soit atteinte non quand il n’y a plus rien à ajouter, mais quand il n’y a plus rien à retrancher.“ (Parece-me que a perfeição é atingida não quando não há mais nada a acrescentar, mas quando não há nada para subtrair.)”

(Antoine de Saint-Exupéry, L’Avion)

## RESUMO

Eficiência energética é um assunto de vital importância no âmbito nacional e internacional. Espera-se que nos próximos anos residências e indústrias tornem-se consumidores inteligentes, utilizando a rede de energia elétrica de forma mais eficiente, amenizando as necessidades de investimento na expansão da rede elétrica. Um controlador de cargas inteligente pode ser utilizado em residências para alcançar economia energética, movendo o horário de início das cargas para momentos de menor consumo da rede, com tarifas reduzidas. Um efeito negativo ainda não estudado é o impacto no conforto dos consumidores deste tipo de controlador. Neste trabalho os problemas de eficiência energética e conforto dos consumidores são descritos como problemas de otimização utilizando programação linear inteira. É mostrado através de simulações computacionais que é possível obter altos níveis de economia energética sem causar grandes impactos no nível de conforto dos usuários, ao fazer o controlador otimizar uma combinação das duas funções objetivo.

**Palavras-chave:** Otimização Combinatória. Eficiência Energética. Redes Inteligentes.

## ABSTRACT

Energy efficiency is a vital subject for the world. In the years to come it is expected that residences and industries will become smart consumers and the grid will be used more efficiently, easing the investment needs in the expansion of power grid. A smart home controller can help the residential consumers to achieve economic savings by moving the start of each load to times of low tariff. A negative effect not yet studied is the impact on the customer comfort of such controller. In this master thesis the comfort problem will be mathematically described as a integer programming optimization problem and it will be demonstrated by computer simulations that it is possible to achieve high levels of economic saving without a great impact on the user comfort level by making the controller optimize a combination of both objective functions.

**Keywords:** Combinatorial Optimization. Energy Efficiency. Smart Grids.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Comparação entre Tarifa Branca e Tarifa Convencional. . . . .	18
Figura 2 – Região viável de um problema de PL. . . . .	22
Figura 3 – Fluxo do algoritmo <i>Simplex</i> . . . . .	24
Figura 4 – Exemplo de caminho feito pelo algoritmo <i>Simplex</i> pelos vértices da região viável. . . . .	25
Figura 5 – Exemplo de árvore de solução. . . . .	26
Figura 6 – Alocação das cargas para a Simulação 1.1. . . . .	40
Figura 7 – Alocação das cargas para a Simulação 1.2. . . . .	41
Figura 8 – Alocação das cargas para a Simulação 1.3. . . . .	41
Figura 9 – Alocação das cargas para a Simulação 1.4. . . . .	42
Figura 10 – Alocação das cargas para a Simulação 2.1. . . . .	44
Figura 11 – Alocação das cargas para a Simulação 2.2. . . . .	45
Figura 12 – Alocação das cargas para a Simulação 2.3. . . . .	45
Figura 13 – Alocação das cargas para a Simulação 2.4. . . . .	46
Figura 14 – Alocação das cargas para a Simulação 3.1. . . . .	48
Figura 15 – Alocação das cargas para a Simulação 3.2. . . . .	49
Figura 16 – Alocação das cargas para a Simulação 3.3. . . . .	49
Figura 17 – Alocação das cargas para a Simulação 3.4. . . . .	50
Figura 18 – Alocação das cargas para a Simulação 4.1. . . . .	52
Figura 19 – Alocação das cargas para a Simulação 4.2. . . . .	53
Figura 20 – Alocação das cargas para a Simulação 4.3. . . . .	53
Figura 21 – Alocação das cargas para a Simulação 4.4. . . . .	54
Figura 22 – Alocação das cargas para a Simulação 5.1. . . . .	57
Figura 23 – Alocação das cargas para a Simulação 5.2. . . . .	58
Figura 24 – Alocação das cargas para a Simulação 5.3. . . . .	58
Figura 25 – Alocação das cargas para a Simulação 5.4. . . . .	59
Figura 26 – arquitetura do sistema proposto. . . . .	66
Figura 27 – microgeração solar com armazenamento e inversor OFF GRID. . . . .	67
Figura 28 – aerogerador ligado a um inversor tipo GRID TIE. . . . .	67
Figura 29 – diagrama do sistema hidráulico para aquecimento de água. . . . .	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valor da função-objetivo nos vértices da região viável . . . . .	23
Tabela 2 – Lista de Símbolos. . . . .	32
Tabela 3 – Lista de Parâmetros Introduzidos para Combinação Linear de Funções- Objetivo. . . . .	36
Tabela 4 – Características das cargas do artigo de Di Giorgio e Pimpinella (2013). . . . .	39
Tabela 5 – Parâmetros do usuários referentes às cargas do artigo de Di Giorgio e Pimpinella (2013). . . . .	39
Tabela 6 – Resultados das Simulações do Cenário 1. . . . .	40
Tabela 7 – Horário de Início das Cargas do Cenário 1. . . . .	40
Tabela 8 – Resultados das Simulações do Cenário 2. . . . .	44
Tabela 9 – Horário de Início das Cargas do Cenário 2. . . . .	44
Tabela 10 – Resultados das Simulações do Cenário 3. . . . .	48
Tabela 11 – Horário de Início das Cargas do Cenário 3. . . . .	48
Tabela 12 – Resultados das Simulações do Cenário 4. . . . .	52
Tabela 13 – Horário de Início das Cargas do Cenário 4. . . . .	52
Tabela 14 – Características das cargas levantadas. . . . .	55
Tabela 15 – Parâmetros do usuários referentes às cargas reais. . . . .	56
Tabela 16 – Resultados do Cenário 5. . . . .	56
Tabela 17 – Horário de Início das Cargas do Cenário 5. . . . .	57

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO . . . . .	12
1.1	Apresentação . . . . .	12
1.2	Motivação . . . . .	13
1.3	Objetivos . . . . .	14
1.4	Publicação . . . . .	15
1.5	Organização . . . . .	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E TRABALHOS RELACIONADOS . . . . .	17
2.1	Fundamentação Teórica . . . . .	17
2.1.1	<i>Tarifação de Energia Elétrica</i> . . . . .	17
2.1.2	<i>Programação Linear Inteira</i> . . . . .	19
2.2	Trabalhos Relacionados . . . . .	26
2.3	Oportunidades de Pesquisa . . . . .	28
3	METODOLOGIA . . . . .	30
3.1	Organização da Pesquisa . . . . .	30
3.2	Modelo Matemático do Controlador de Di Giorgio e Pimpinella . . . . .	30
3.3	Nível Global de Conforto . . . . .	32
3.4	Conforto como Função-Objetivo . . . . .	34
3.5	Combinação Linear de Funções-Objetivo . . . . .	35
3.6	Modelo Completo do Controlador Proposto . . . . .	36
4	ESTUDO DE CASO . . . . .	38
4.1	Cenários de Di Giorgio e Pimpinella (2013) . . . . .	38
4.1.1	<i>Cenário 1 - Tarifa Única</i> . . . . .	39
4.1.2	<i>Cenário 2 - Tarifa Dupla</i> . . . . .	43
4.1.3	<i>Cenário 3 - Tarifa Dupla e DSM com Desconto Tarifário</i> . . . . .	47
4.1.4	<i>Cenário 4 - Tarifa Dupla e DSM com Redução do Pico</i> . . . . .	51
4.2	Novo Cenário . . . . .	55
4.2.1	<i>Levantamento de Cargas</i> . . . . .	55
4.2.2	<i>Cenário 5 - Tarifa Branca</i> . . . . .	55
5	CONCLUSÕES . . . . .	60

5.1	Direcionamento para Pesquisas Futuras . . . . .	62
	REFERÊNCIAS . . . . .	64
	APÊNDICES . . . . .	66
	APÊNDICE A – PROPOSTA DE ARQUITETURA DA SO- LUÇÃO . . . . .	66
	APÊNDICE B – SCRIPTS MATLAB . . . . .	69
	APÊNDICE C – ARTIGO SBAI 2015 . . . . .	85

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Apresentação

Durante os últimos anos o conceito de inteligência se tornou uma característica básica dos sistemas de automação residenciais. Neste contexto, inteligência significa que sistemas de diferentes fabricantes devem trabalhar de forma integrada, com foco em garantir ao usuário segurança e simplicidade na implementação das soluções adotadas. Neste sentido uma residência automatizada não será inteligente caso a interoperabilidade entre sistemas não seja atendida, pois é crítico que os diferentes dispositivos em uma residência possam interagir de forma integrada, como medidores inteligentes, *textitsmart* plugs e controladores de carga.

Uma maneira de se aproveitar a inteligência em sistemas de automação residenciais é utilizar modelos de otimização para minimizar os custos energéticos associados à execução do conjunto de cargas do ambiente. Uma maneira de reduzir o consumo de energia elétrica sem alterar a quantidade de cargas a serem acionadas é obtido ao deslocar o início de execução das cargas para horários em que a rede elétrica está ociosa, com tarifas reduzidas.

A determinação do momento de acionamento das cargas realizada pelo controlador pode ir contra os interesses do consumidor, ao alterar o período em que cargas que proporcionam conforto ao usuário são acionadas. As propostas encontradas na literatura não fazem distinção quanto ao nível de conforto entre as cargas que devem ser acionadas. A solução encontrada, embora ótima do ponto de vista de economia energética, pode comprometer de forma desproporcional o nível de conforto observado pelo usuário.

Um controlador de cargas que leve em consideração o bem-estar dos consumidores pode encontrar soluções em que a relação *custo-benefício* é mais apazível para os usuários. A otimização dos custos energéticos é alcançada por meio do deslocamento do início de execução das cargas para horários com tarifa reduzida, enquanto o conforto do usuário é obtido pela minimização do desvio do início do acionamento das cargas, em relação aos seus horários ideais de início. Portanto, os dois objetivos são conflitantes, sendo necessário realizar estudos sobre a consideração destes dois critérios de forma simultânea.

Nesta Dissertação é proposto um controlador de cargas inteligente modelado como um problema de otimização utilizando programação linear inteira que é capaz de

contemplar o custo energético, o conforto dos usuários ou uma combinação dos dois.

## 1.2 Motivação

O consumo de energia é um dos principais indicadores do desenvolvimento econômico e do nível de qualidade de vida de qualquer sociedade. Ele reflete tanto o ritmo de atividade dos setores industrial, comercial e de serviços, quanto a capacidade da população de adquirir bens e serviços tecnologicamente mais avançados, como automóveis, eletrodomésticos e eletroeletrônicos. (ANEEL, 2008)

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2016), o consumo de eletricidade no Brasil deve crescer na média de 4,3% ao ano no período de 2016-2020. Totalizando um aumento de mais de 23% no período.

Frente à realidade de aumento do consumo de energia elétrica e com perspectiva de baixo crescimento econômico para os próximos anos, há dificuldades de investimentos por parte do governo na expansão da geração de energia elétrica. É importante que sejam encontradas alternativas para que o Brasil não sofra uma nova crise energética, que comprometeria ainda mais seu crescimento econômico e traria impactos na qualidade de vida da população.

Diversas alternativas estão sendo propostas afim de minimizar os custos associados ao aumento do consumo de energia elétrica no Brasil, como por exemplo: geração distribuída de energia elétrica, utilização de redes inteligentes para a redução das perdas com furtos, alteração da legislação e aumento da eficiência do uso da energia elétrica.

Está previsto para os próximos meses a entrada em vigor da chamada tarifa branca residencial (ANEEL, 2016). Esta nova legislação trará para os consumidores residenciais uma realidade já existente para outros tipos de clientes: os preços cobrados pelo consumo de energia elétrica serão diferenciados para faixas de horário distintas durante o dia.

Essa legislação tem como principal objetivo fazer o consumo de energia elétrica ser mais uniforme ao longo do dia, ao oferecer tarifas reduzidas em horários de ociosidade da rede elétrica, aumentando a capacidade de atendimento da rede já existente sem a necessidade de novos investimentos, uma vez que a rede elétrica é limitada pelo consumo de pico.

As redes inteligentes de energia elétrica (*Smart Grids*) estão em constante

evolução e começam a ser implantadas no Brasil. Grandes concessionárias de energia elétrica tem projetos pilotos de *Smart Grid* em andamento, como por exemplo Coelce (Redes Inteligentes Brasil, 2016), Eletrobrás (ELETROBRAS, 2015) e AES Eletropaulo (EXAME, 2014). A promessa das *Smart Grid* é prover inteligência à rede de energia elétrica criando mecanismos para aumentar o controle sobre a rede, a eficiência na distribuição, a facilidade na obtenção de informação e a diminuição dos furtos no sistema elétrico.

Com foco no aumento da eficiência do uso de energia elétrica e se aproveitando dos conceitos de *Smart Grids*, pode-se imaginar um controlador de cargas integrado à rede inteligente de energia e que seja capaz de alocar as cargas dos clientes para momentos de tarifa reduzida como uma estratégia de diminuição do consumo de energia elétrica nos momentos de pico. Com as perspectivas tecnológicas do setor espera-se que este tipo de controlador tenha aplicabilidade em um futuro próximo.

É importante, também, pensar sobre o impacto na experiência dos usuários deste tipo de controlador. Os efeitos desta estratégia de aumento da eficiência da rede são diretamente relacionados com a adoção do controlador pelos clientes. As vantagens oferecidas aos usuários do controlador são ganhos econômicos obtidos por acionar cargas em períodos de tarifa reduzida. A desvantagem deste tipo de controlador, para os usuários, é a insatisfação que pode ser gerada devido ao deslocamento do momento de execução de cargas que comprometam o conforto dos mesmos para períodos diferentes daqueles escolhidos inicialmente. Se não for tratada, esta desvantagem pode comprometer a utilização do controlador pelos usuários e diminuir a abrangência dos impactos sobre a eficiência energética do mesmo.

Uma estratégia de otimização do consumo de energia elétrica associado à execução de um conjunto cargas que leve em consideração, também, o conforto dos usuários é vital para que a adoção, e portanto os efeitos na eficiência da rede, de tal controlador sejam satisfatórios.

### 1.3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é a proposição de um modelo matemático para um controlador de cargas que seja utilizado para a otimização dos custos energéticos associadas à execução de um conjunto de cargas em uma residência levando em consideração o nível de conforto de cada uma das cargas, como definido pelo usuário.

Para atingir o objetivo geral proposto, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- Realizar estudo sobre os trabalhos relacionados, levantando o estado da arte sobre as estratégias de otimização do consumo energético em ambientes residenciais e o conforto dos usuários.
- Propor o modelo matemático de um controlador que apresente melhorias em relação aos modelos apresentados nos trabalhos relacionados.
- Validar o modelo proposto, por meio de simulações utilizando as ferramentas computacionais, com cenários próximos ao do real para a realidade brasileira.
- Realizar análises comparativas do controlador proposto frente aos modelos estudados.
- Propor uma arquitetura para que o controlador possa ser implementado na prática.

#### 1.4 Publicação

O trabalho descrito nesta dissertação foi publicado e apresentado no seguinte evento:

- Outubro de 2015, XII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, Rio Grande do Norte, com o título "A Smart Home Controller Using an Integer Programming Approach for the Optimization of Consumer Economic Saving and Comfort".

O artigo pode ser encontrado nos apêndices desta dissertação.

#### 1.5 Organização

Os demais capítulos desta dissertação estão estruturados como segue.

No segundo Capítulo é apresentada a fundamentação teórica necessária para o entendimento deste trabalho. É apresentado um estudo sobre os trabalhos relacionados, descrevendo suas contribuições e oportunidades de melhorias. Ao final do Capítulo é apresentada uma lista das lacunas e oportunidades de pesquisa encontradas a partir do estudo realizado.

No terceiro Capítulo o método utilizado para a elaboração deste trabalho é descrito. É detalhado como a pesquisa foi organizada e realizada. O modelo matemático proposto para representar o controlador é apresentado e discutido.

No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos através de diversas simulações computacionais realizadas sobre diferentes cenários de aplicação do modelo

proposto para o controlador. Os resultados apresentados são analisados e discutidos.

No quinto Capítulo são apresentados o sumário do problema estudado e da pesquisa realizada. São apresentadas as conclusões sobre as implicações dos resultados obtidos e das contribuições deste trabalho. O Capítulo termina com direcionamentos para pesquisas futuras.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E TRABALHOS RELACIONADOS

### 2.1 Fundamentação Teórica

#### 2.1.1 *Tarifação de Energia Elétrica*

No Brasil, a unidade consumidora de energia elétrica é classificada em dois grupos: A e B. O grupo A (alta tensão) é composto por unidades consumidoras que recebem energia em tensão igual ou superior a 2,3 kilovolts (kV) ou são atendidas a partir de sistema subterrâneo de distribuição em tensão secundária, caracterizado pela tarifa binômia (aplicada ao consumo e à demanda faturável). No grupo A, subdividido em seis subgrupos, geralmente se enquadram indústrias e estabelecimentos comerciais de médio ou grande porte. (ANEEL, 2016).

O grupo B (baixa tensão) é caracterizado por unidades consumidoras atendidas em tensão inferior a 2,3 kV, com tarifa monômia (aplicável apenas ao consumo). Está subdividido em quatro subgrupos. O consumidor do tipo B1 é o residencial. O consumidor rural é chamado de B2, enquanto estabelecimentos comerciais ou industriais de pequeno porte, como por exemplo uma pastelaria ou uma marcenaria, são classificados como B3. A iluminação pública é enquadrada no subgrupo B4 (ANEEL, 2016).

O consumo de energia elétrica é medido em kWh (kilo Watts hora) para energia ativa e kvarh (kilo volt-ampere reativo) para energia reativa. Usuários residenciais, rurais, comerciais e industriais de pequeno porte são sempre tarifados baseado no seu consumo de energia elétrica, enquanto consumidores de médio e grande porte podem ser taxados pela demanda.

A demanda de energia elétrica é medida em kW (kilo Watts) para demanda ativa e kvar (kilo volt-ampere reativo) para demanda reativa. Trata-se da média da potência em um certo intervalo de tempo. No Brasil a demanda é medida em intervalos de 15 minutos (ANEEL, 2010). Neste modelo de tarifação o cliente contrata uma demanda mensal e é taxado de acordo com a maior demanda medida no seu período de faturamento, chamada de demanda máxima. Quando a demanda máxima medida for menor ou igual à contratada o cliente paga pelo valor contratado. Quando a demanda máxima for superior à demanda contratada o cliente paga o valor contratado acrescido de multa. Na prática, taxar um cliente pela demanda significa taxá-lo pelo seu consumo de pico, isto é, a máxima

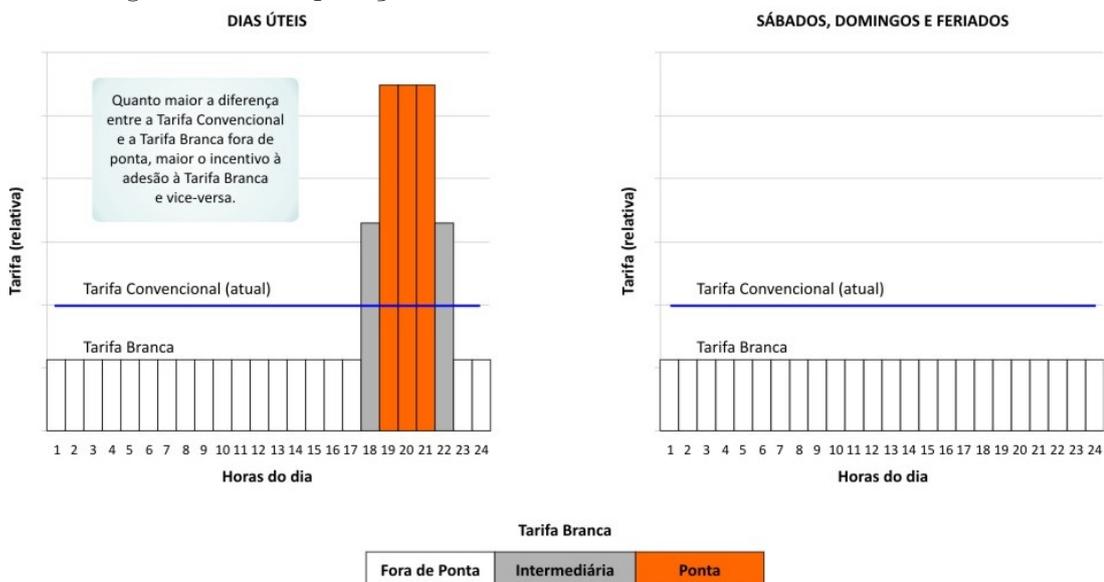
potência exigida por ele da rede, durante seu período de faturamento.

Outra forma de tarifar clientes do grupo A é por meio do consumo de energia reativa. Em geral clientes pagam excedentes reativos quando seu fator de potência cai abaixo de um limiar estabelecido. Por isso há a preocupação em realizar a correção do fator de potência em indústrias e outros grandes consumidores.

Os consumidores residenciais são tarifados apenas pelo seu consumo de energia elétrica, não havendo, até o momento, diferença nas tarifas ao longo do dia. Desta forma, não há vantagem financeira para um usuário residencial acionar cargas em momentos distintos do dia.

Com o propósito de incentivar os usuários residenciais a diminuir o consumo durante os horários de pico de utilização da rede elétrica, está prevista a entrada em vigor da chamada Tarifa Branca (ANEEL, 2016), que determina três postos tarifários distintos durante dias úteis para clientes residenciais, a saber: horário de fora-ponta, horário intermediário e horário ponta. Os postos tarifários ponta e intermediário apresentam tarifação superior à tarifa convencional, enquanto o horário de fora-ponta apresenta tarifação inferior. Na Figura 1 é apresentada comparação entre as tarifas convencional e branca.

Figura 1 – Comparação entre Tarifa Branca e Tarifa Convencional.



Fonte: (ANEEL, 2016)

Com a entrada em vigor da tarifa branca o usuário residencial poderá se aproveitar dos momentos de tarifa reduzida para obter ganhos financeiros, desde que adote

uma estratégia adequada de acionamento de suas cargas.

O objetivo principal de um sistema de energia elétrica é garantir que a demanda por eletricidade possa ser atendida a qualquer momento, com requisitos mínimos de qualidade, confiabilidade, economia e segurança (CEMIG, 2016).

Com o crescimento da demanda por eletricidade, é necessário que ações sejam tomadas para garantir o atendimento à mesma. Do ponto de vista da oferta de energia elétrica é possível investir no aumento da geração de eletricidade com a construção de novas usinas. Outra forma de garantir o atendimento às necessidades de eletricidade é realizar o chamado *Demand Side Management* (DSM), que consiste nos usuários da energia elétrica realizar ações afim de equilibrar a demanda, principalmente em momentos de pico.

O DSM sugere, entre outras ações, a redução das cargas durante os picos de utilização de energia elétrica, a movimentação de cargas existentes dos horários de pico para os horários fora de pico e tarifas com possibilidade de flexibilidade no controle de equipamentos de consumidores.

O DSM pode se beneficiar de um controlador de cargas que possa se comunicar através de redes de comunicação com a concessionária, permitindo que os conceitos de tarifa de pico e fora de pico possam sofrer alterações contínuas, ou que tarifas promocionais sejam aplicadas em tempo-real.

### **2.1.2 Programação Linear Inteira**

Programação linear (PL) é uma ferramenta para solucionar problemas de otimização (WINSTON, 2003). Em 1947, George Dantzing desenvolveu um método eficiente, o algoritmo *Simplex*, para solucionar problemas de programação linear. Desde então a PL tem sido utilizada para resolver problemas de otimização em indústrias diversas como financeira, petrolífera, logística e energética (WINSTON, 2003).

A aplicação de PL para a solução de problemas de otimização implica primeiro em expressar o problema na forma de um modelo matemático padrão. Os componentes deste modelo estão definidos a seguir.

#### **Definição 2.1:** *Função-Objetivo*

Uma ou mais funções do modelo que deseja-se otimizar, isto é, encontrar seus valores máximos ou mínimos. Estas funções devem ser descritas matematicamente como equações lineares.

**Definição 2.2:** *Variável de Decisão*

São as variáveis do problema que estão sob controle e influenciam a performance do sistema. Os algoritmos de PL determinam os valores das variáveis de decisão que otimizam a função-objetivo.

**Definição 2.3:** *Restrição*

Na maioria das situações apenas certos valores das variáveis de decisão são válidos como solução do problema. As limitações impostas sobre os valores das variáveis de decisão são chamadas *restrições*. As restrições são descritas matematicamente como equações ou inequações lineares.

A par dos parâmetros do modelo de otimização todo problema de programação linear pode ainda ser classificado a partir das seguintes características.

- Modelos Estáticos e Dinâmicos

Em modelos estáticos, a escolha dos valores das variáveis de decisão pode ser realizada em uma única iteração, enquanto que em modelos dinâmicos não. O controlador descrito nesta dissertação é classificado como um modelo dinâmico.

- Modelos Lineares e Não-Lineares

Se a equação que descreve a função-objetivo e as inequações que descrevem as restrições do problema forem todas lineares o modelo será linear. Apenas modelos lineares podem ser solucionados com a utilização de PL. O controlador descrito nesta dissertação é classificado como um modelo linear.

- Modelos Inteiros e Não-Inteiros

Nos modelos inteiros os valores das variáveis de decisão são limitados ao conjunto dos números inteiros, enquanto em modelos não-inteiros as variáveis de decisão podem assumir qualquer valor real. Problemas inteiros são muito mais difíceis de resolver (WINSTON, 2003). Quando as variáveis de decisão só podem assumir os valores zero e um o modelo pode ser classificado como binário, que é um caso especial do modelo inteiro. O controlador descrito nessa dissertação é classificado como um modelo binário.

- Modelos Determinísticos e Estocásticos

Se para qualquer valor das variáveis de decisão for possível determinar com exatidão o valor da função objetivo e se a solução atende ou não às restrições o modelo é

chamado determinístico, caso contrário o modelo é dito estocástico. O controlador descrito nesta dissertação é classificado como determinístico.

A solução de um problema de otimização utilizando PL busca encontrar os valores das variáveis de decisão que otimizam (maximizam ou minimizam) a função-objetivo dentre o conjunto de valores que satisfazem às restrições existentes, tendo a função objetivo e as restrições apenas relações lineares.

Matematicamente um problema de PL deve ser descrito como segue.

$$\text{maximize ou minimize } f(x) \tag{2.1}$$

sujeito a

$$r_1(x) \leq a_1 \tag{2.2}$$

...

$$r_n(x) \leq a_n \tag{2.3}$$

em que  $x$  representa o vetor de variáveis de decisão,  $f(x)$  é a função-objetivo e  $r_n(x)$  é a  $n$ -ésima restrição.

Para achar a solução que otimiza a função-objetivo é necessário primeiro encontrar a região viável do problema, isto é, o conjunto de pontos que atendem às restrições do problema e são candidatos à solução. Esta região é obtida a partir do conjunto de restrições do problema.

Como exemplo, suponha o seguinte problema de PL.

$$\max f(x) = 2x_1 + 3x_2 \tag{2.4}$$

sujeito a

$$x_1 \leq 4 \tag{2.5}$$

$$2x_2 \leq 12 \tag{2.6}$$

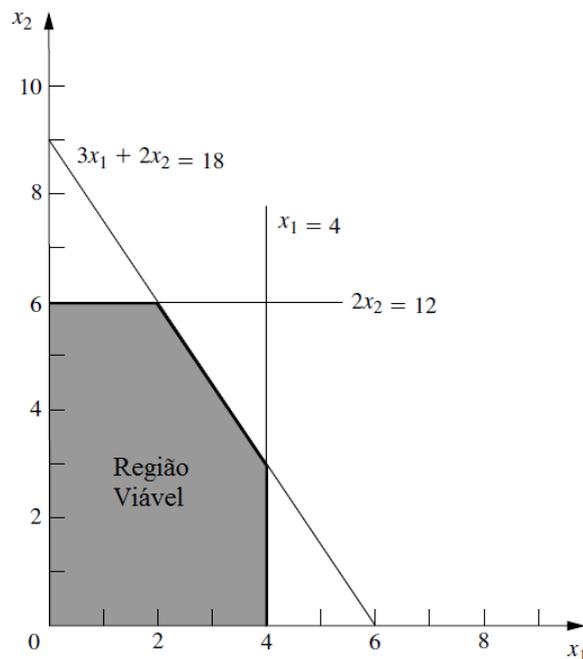
$$3x_1 + 2x_2 \leq 18 \tag{2.7}$$

$$x_1 \geq 0 \tag{2.8}$$

$$x_2 \geq 0 \tag{2.9}$$

Podemos traçar, a partir de cada inequação de restrição, uma reta que delimita os valores das variáveis de decisão àqueles que atendem as restrições. A área resultante do conjunto de retas é chamada de região viável. Na Figura 2 é apresentada a região viável para as restrições descritas anteriormente.

Figura 2 – Região viável de um problema de PL.



Fonte: (WINSTON, 2003)

Segundo a teoria da PL os pontos de máximo e mínimo, quando existentes, ficam localizados em pelo menos um dos vértices da região viável (HILLIER; LIEBERMAN,

2001). Os pontos que devem ser verificados para obtenção da solução ótima são, portanto, os vértices da região viável.

Deve-se observar que no caso em que as curvas de nível da função-objetivo sejam paralelas a uma das restrições do problema, tem-se a ocorrência de um número infinito de soluções ótimas. Já nos casos onde a região viável não for uma região fechada, o problema é dito ilimitado, pois não haverá limites para o valor da sua solução ótima. Quando a região viável não existir, isto é, as retas do conjunto de restrições do problema não formarem uma região, o problema não apresenta solução viável.

Tabela 1 – Valor da função-objetivo nos vértices da região viável

Coordenadas $(x_1, x_2)$	Valor da Função-Objetivo
(0,0)	0
(0,6)	18
(2,6)	22
(4,3)	17
(4,0)	8

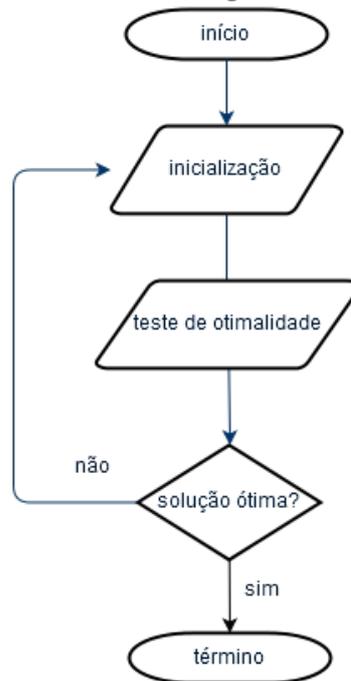
Na Tabela 1, são apresentados os valores da função-objetivo para cada vértice da região viável. Os valores das variáveis de decisão  $x_1$  e  $x_2$  que maximizam a função-objetivo são, portanto, 2 e 6 respectivamente. Já os valores que minimizam a função-objetivo são 0 e 0.

Conforme aumenta-se a quantidade de variáveis de decisão e de restrições do problema, cresce o número de vértices da região viável, aumentando a complexidade do problema de interesse.

É impraticável encontrar a solução ótima para problemas complexos sem a utilização de uma ferramenta computacional. Neste âmbito o *software ILOG CPLEX Optimization Studio* da IBM é referência na área de programação linear e inteira. O *software* encontra a solução ótima utilizando o algoritmo *Simplex* em conjunto com o método *Branch and Bound*.

O algoritmo *Simplex* é um procedimento iterativo algébrico que se utiliza de conceitos geométricos para encontrar a solução ótima para problemas de programação linear (HILLIER; LIEBERMAN, 2001). O procedimento consiste em três etapas: inicialização, teste de otimalidade e iteração. Na Figura 3, é apresentado o fluxograma do *Simplex*.

A etapa de inicialização consiste em escolher o próximo vértice da região viável a ser testado. Uma escolha comum para a primeira iteração é a origem (todas as variáveis

Figura 3 – Fluxo do algoritmo *Simplex*

Fonte: O autor.

de decisão são zero), quando esta encontra-se na região viável, pela simplicidade no cálculo da solução (HILLIER; LIEBERMAN, 2001). Nas demais iterações do algoritmo *sempre* é escolhido um vértice adjacente ao anterior (HILLIER; LIEBERMAN, 2001).

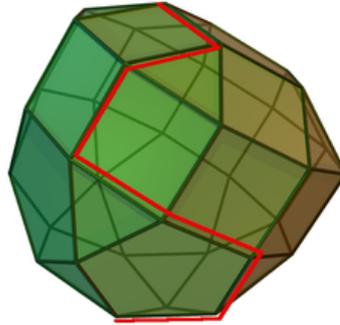
O teste de otimalidade consiste em verificar se o vértice atual apresenta solução ótima. Isto é feito analisando-se os vértices vizinhos. Se mover-se em direção a algum vértice adjacente não melhorar a solução significa que o vértice atual apresenta solução ótima (HILLIER; LIEBERMAN, 2001). Quando dois ou mais vértices apresentam melhorias na solução em relação ao vértice atual, deve-se ser escolhido, para a próxima iteração o vértice que apresentar o maior aumento na taxa de melhoria da solução.

A etapa de iteração consiste em realizar novamente as etapas de inicialização e de teste de otimalidade descartando-se o vértice utilizado na iteração anterior.

De forma resumida, o algoritmo simplex escolhe um vértice de partida e analisa se seus vértices adjacentes produzem soluções melhores. Em caso positivo, ele caminha para o vértice adjacente que resulta no maior aumento da melhoria da solução, repetindo este procedimento até que a solução ótima seja encontrada. Na Figura 4, é apresentado um exemplo de caminho percorrido pelo algoritmo *Simplex* na busca da solução ótima.

Para problemas de programação linear inteiros as soluções ótimas não estarão, necessariamente, nos vértices da região viável, pois os valores das variáveis de decisão

Figura 4 – Exemplo de caminho feito pelo algoritmo *Simplex* pelos vértices da região viável.



Fonte: (WIKIMEDIA, 2014)

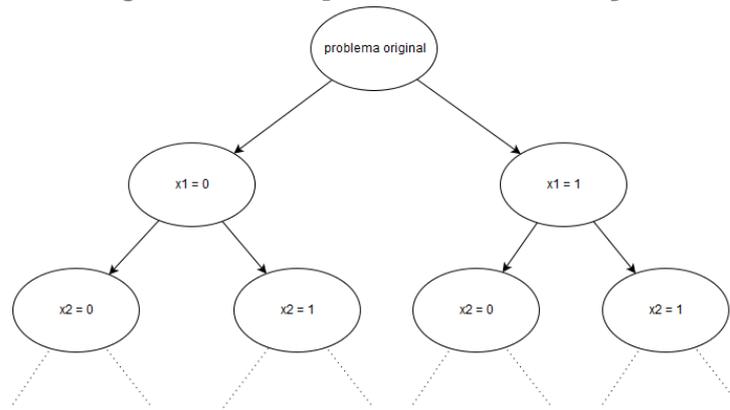
não serão obrigatoriamente inteiros nos vértices. Portanto o algoritmo *Simplex* não pode ser utilizado diretamente para solucionar problemas de programação linear inteira. O *Branch-and-Bound* é o mais popular método para solução de problemas de programação inteira e é dividido nas etapas de *branching*, *bounding* e *fathoming* (HILLIER; LIEBERMAN, 2001)

A etapa de *branching* utiliza o conceito de dividir para conquistar, transformando o problema original em um conjunto de subproblemas menores que são mais simples de resolver. Para problemas de PL com variáveis de decisão binárias, por exemplo, o problema pode ser sempre dividido em dois subproblemas mais simples, ao fixar o valor de uma das variáveis de decisão para zero e para um em cada subproblema. Os subproblemas resultantes podem então ser resolvidos diretamente, se forem simples o suficiente, ou podem ser novamente divididos em problemas mais simples ao se fixar os valores de uma outra variável de decisão. Este processo resulta na criação de uma árvore de soluções. Na Figura 5 é apresentado um exemplo de árvore de solução gerada ao se fixar os valores das variáveis de decisão em um problema de programação binário.

Durante o *bounding* obtém-se um limite para a melhor solução viável de cada subproblema. A forma padrão de se obter este limite é relaxando o problema, isto é, desconsiderando uma ou mais das restrições que tornam complexa a obtenção da solução. Em problemas de programação inteira normalmente se relaxam as restrições que definem as variáveis como inteiras, isto é, o problema passa a ter variáveis de decisão reais. A partir deste ponto pode-se utilizar o algoritmo *Simplex* para obtenção do limite ótimo do subproblema.

A etapa de *fathoming* consiste em aplicar três testes sobre o subproblema afim

Figura 5 – Exemplo de árvore de solução.



Fonte: O autor

de descartá-lo ou definí-lo como a solução ótima corrente.

Teste 1: Se não houver solução viável, este subproblema deve ser descartado.

Teste 2: Se o limite de ótimo encontrado for inferior ao limite ótimo atual, este subproblema deve ser descartado.

Teste 3: Se a solução encontrada apresenta variáveis de decisão inteiras e seu valor for melhor que a solução ótima corrente, a solução encontrada deve ser definida como a solução ótima atual.

As etapas do método *Branch-and-Bound* continuam a ser executadas até que não hajam mais subproblemas para serem analisados. Neste momento a solução ótima corrente é definida como a solução do problema geral. Se não forem obtidas soluções significa que o problema não é realizável, isto é, não há solução que atenda ao conjunto de restrições impostas.

## 2.2 Trabalhos Relacionados

Novos métodos de redução do consumo de energia elétrica tem sido elaborados nas mais diversas áreas. Vários pesquisadores tem relatado propostas de tecnologias para automação residencial, como *Smart Home (SH) Systems* (VAINIO *et al.*, 2008; FITZPATRICK; SMITH, 2009; CARREIRO, 2011; CORNO; RAZZAK, 2012; GIORGIO; PIMPINELLA, 2013; GELLINGS; SAMOTYJ, 2013; PANNA *et al.*, 2013).

A aplicação do conceito de redes inteligentes, que são referenciadas como *Smart Grids*, entre outras ferramentas, tem utilizado ações inteligentes integradas entre produtores, distribuidores e clientes, através de sistemas de controle e comunicação

com redes bidirecionais, portanto garantindo, de uma maneira inteligente e sustentável, fornecimento seguro e acessível de energia elétrica. (MOMOH, 2008; PASAND *et al.*, 2009; HEYDT, 2010; JACKSON, 2010; BEZERRA *et al.*, 2013). Baseado no conceito de *Smart Grids* foi proposta a aplicação de automação residencial (SUH; KOY, 2008; HAN; LIM, 2010; SON; KO, 2008; KOFLER *et al.*, 2012; LI *et al.*, 2012; HERNANDEZ *et al.*, 2013).

Soluções com foco no aperfeiçoamento do uso eficiente de energia elétrica tem sido propostas por vários autores (CHOI; SHIN, 2005; FITZPATRICK; SMITH, 2009; BEGOVIC, 2013; GELLINGS; SAMOTYJ, 2013; PANNA *et al.*, 2013; FIGUEIREDO *et al.*, 2014).

Di Giorgio e Pimpinella (2013), em particular, apresentaram um *Smart Home Controller* (SHC). O SHC proposto foi modelado como um problema de otimização inteira que minimiza o consumo de energia elétrica residencial para um determinado conjunto de cargas.

O SHC leva em consideração as tarifas correntes e o consumo médio das cargas que se deseja planejar. Utiliza-se uma restrição do consumo de pico para evitar sobrecargas na rede. O modelo geral do trabalho apresentado leva em consideração cargas planejáveis, que são aquelas que o SHC pode mover seu horário de execução livremente, cargas controláveis, que possuem controle do tipo *on/off* e cargas monitoráveis, que são estimadas estatisticamente com a ajuda de um medidor inteligente de energia elétrica.

O SHC não leva em consideração o conforto das cargas e não é capaz de minimizar o consumo de pico do conjunto de cargas, isto é, a demanda máxima, que seria a função-objetivo de uma aplicação industrial. Embora a restrição de consumo de pico possa ser utilizada para garantir que não haverá sobrecarga no sistema, evitando multas por consumo acima da demanda contratada. O consumo de energia reativa e, portanto, os efeitos das cargas no fator de potência, também não foi levado em consideração.

O modelo foi testado por meio de simulações computacionais que demonstraram a eficiência do mesmo em minimizar o consumo residencial de energia elétrica. Ao todo foram apresentadas quatro simulações que descreviam situações de tarifa constante, tarifas diferenciadas ao longo do dia e situações de descontos gerados em tempo real por meio de controle do lado da demanda.

Embora a literatura sobre a perspectiva de aplicação do conceito de *Smart Home Controller* (SHC) em automação residencial para o controle de cargas com o objetivo de

reduzir ou otimizar o consumo de energia elétrica seja vasta, as proposições sobre métodos que considerem os interesses do consumidor, até onde temos conhecimento, são limitadas.

### 2.3 Oportunidades de Pesquisa

A partir da análise feita sobre a literatura chegou-se à seguinte lista de oportunidades de pesquisa.

- Otimização do Conforto dos Usuários

De acordo com a revisão bibliográfica, nenhum trabalho levou em consideração o conforto dos usuários para definir suas estratégias de aumento de eficiência da rede elétrica. Trata-se de um assunto importante para a aplicabilidade dos métodos, sendo portanto uma clara oportunidade de pesquisa.

- Estratégia de Otimização Multi-Objetivo

Uma estratégia de aumento da eficiência da rede de energia elétrica que leve em conta múltiplos objetivos, como por exemplo, conforto do usuário e custos de eletricidade, até onde temos conhecimento, ainda não foi apresentada.

- Aplicabilidade no Cenário Nacional

Os trabalhos estudados não apresentaram simulações que levem em consideram o cenário nacional atual e o futuro, como por exemplo com a utilização da tarifa branca.

- Levantamento de Cargas Reais

Para realização de simulações mais próximas à realidade seria interessante o levantamento do perfil de consumo de cargas reais, utilizadas em residencias.

- Proposta de Arquitetura

Embora alguns trabalhos tenham proposto arquiteturas para a integração do controlador de cargas em redes inteligentes de energia elétrica, nenhuma das propostas estudadas era completa, isto é levava em consideração não apenas as redes inteligentes mas também mini geração de energia elétrica (solar e/ou eólica) e comunicação com medidores inteligentes.

- Otimização da Demanda

A otimização do consumo doméstico de energia elétrica apresentou mais riqueza nos trabalhos estudados do que a minimização da demanda máxima em um conjunto de cargas. Esta estratégia é útil para a aplicação do controlador em grandes clientes,

como indústrias.

- Impactos do Consumo Reativo

O consumo de energia reativa tem impacto na rede de energia elétrica e, no caso dos clientes industriais, pode causar prejuízos financeiros. Este fator deve ser levado em consideração para aplicabilidade de métodos de otimização em usuários com consumo elevado.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Organização da Pesquisa

Com base no estudo realizado sobre os trabalhos relacionados, optou-se por utilizar o *Smart Home Controller* (SHC) proposto por Di Giorgio e Pimpinella como base para a aplicação das oportunidades de pesquisa encontradas e para atendimento dos objetivos geral e específicos do trabalho.

A pesquisa foi organizada nas seguintes etapas:

- Recriar o modelo do controlador utilizado de Di Giorgio e Pimpinella (2013), de forma que se tenha a base para o trabalho e se possa alterar o modelo livremente.
- Propor uma forma de mensurar o nível de conforto de uma solução e aplicá-la como função-objetivo do modelo.
- Elaborar uma forma de o controlador otimizar os dois objetivos, isto é, propor uma função-objetivo que seja composta por uma parcela relacionada ao consumo energético e outra parcela relacionada ao conforto do usuário.
- Simular o novo modelo de controlador nos mesmos cenários encontrados no trabalho de Di Giorgio e Pimpinella (2013) afim de se realizar análises comparativas sobre as vantagens e desvantagens da adoção do conforto como função-objetivo.
- Elaborar a proposta de arquitetura do controlador e construí-lo afim de atestar o funcionamento do mesmo em um ambiente real.

#### 3.2 Modelo Matemático do Controlador de Di Giorgio e Pimpinella

Giorgio e Pimpinella (2013) apresentaram uma estratégia de otimização do consumo de energia elétrica baseado em um *Smart Home Controller* (SHC). O SHC proposto escolhe o momento de início de execução de cada carga em uma residência de forma que os custos de execução do conjunto de cargas seja minimizado.

As decisões do SHC são tomadas baseadas nos seguintes parâmetros:

- custo das tarifas ao longo do dia;
- demanda máxima contratada;
- consumo de energia de cada carga;
- horário mínimo de início de cada carga (escolha do usuário); e

- horário máximo de término de cada carga (escolha do usuário).

Dado que o SHC é um sistema de tempo discreto que opera a uma certa taxa de amostragem  $T_s$ , que o dia é dividido em  $N$  amostras e que uma residência possui  $M$  cargas planejáveis, o modelo matemático do SHC, descrito como um problema de programação inteira, é apresentado a seguir. A notação dos símbolos utilizados está definida na Tabela 2.

$$f_1(x) = \min \left\{ \sum_{m=1}^M \sum_{i=I_{sm}}^{I_{em}-N_m} \left( \sum_{n=i}^{i+(N_m-1)} \bar{P}_m[n-i] T_s C[n] \right) u_{mi} \right\} \quad (3.1)$$

Sujeito às restrições:

$$\sum_{i=I_{sm}}^{I_{em}-N_m} u_{mi} = 1 \quad (3.2)$$

$$\sum_{m \in M_k} \left( \sum_{i=(k-(N_m-1))}^{k-(k-I_{Em}+N_m)} \hat{P}_m[k-i] u_{mi} \right) \leq P_k \quad (3.3)$$

$$u_{mi} \in \{0, 1\} \quad (3.4)$$

A função-objetivo do controlador é definida pela Equação (3.1). Esta função define o custo total de execução de todas as cargas presentes no ambiente. O somatório mais externo itera sobre todas as cargas, o somatório intermediário itera desde a amostra associada ao mínimo instante em que a  $m$ -ésima carga pode ser acionada até a amostra associada ao máximo instante de acionamento da carga, que é definido como o instante máximo de término subtraído da duração do tempo de execução da carga. O somatório mais interno faz o cálculo do custo de execução de cada carga para cada possível momento de início da execução. O custo energético é dado como o somatório para cada amostra da potência média ( $P_m$ ) vezes o custo tarifário ( $C$ ) vezes o período, que neste caso é igual ao intervalo de amostragem ( $T_s$ ). O somatório mais interno é ainda multiplicado por uma variável de decisão ( $u_{mi}$ ).

O conjunto de restrições definido pela Equação (3.2) estabelece que, para cada carga, o somatório de todas as suas variáveis de decisão deve ser igual a unidade. Como

Tabela 2 – Lista de Símbolos.

Símbolo	Descrição
$M$	Número de cargas planejáveis
$\bar{P}_m$	Vetor da potência média da $m$ -ésima carga
$\hat{P}_m$	Vetor da potência de pico da $m$ -ésima carga
$N_m$	Duração, em número de amostras, da $m$ -ésima carga
$I_{Sm}$	Amostra associada com o horário mínimo de início da $m$ -ésima carga
$I_{Em}$	Amostra associada com o horário máximo de término da $m$ -ésima carga
$S$	Amostra associada ao início do período de planejamento
$E$	Amostra associada ao término do período de planejamento
$u_{mi}$	$i$ -ésima variável de decisão da $m$ -ésima carga
$P_k$	Limite de pico no $k$ -ésimo instante de tempo
$C$	Vetor do custo do consumo de energia elétrica no período
$I_{Bm}$	Amostra associada com o melhor horário de início da $m$ -ésima carga

as variáveis de decisão são binárias isto significa que para cada carga apenas uma variável de decisão poderá assumir o valor unitário enquanto as demais terão valor zero. Esta restrição garante que para cada carga a ser executada o controlador escolherá apenas um momento de início de acionamento.

O conjunto de restrições definido pela Equação 3.3 estabelece que o consumo de pico em qualquer momento durante a execução de todas as cargas deve ser igual ou inferior à curva de limite de pico.

O conjunto de restrições definido pela Equação 3.4 estabelece que as variáveis de decisão só podem assumir os valores zero e um, isto é, são variáveis de decisão binárias.

### 3.3 Nível Global de Conforto

Como demonstrado na sessão anterior, o usuário do controlador é responsável por fornecer o horário mínimo do início de acionamento de uma carga e o horário máximo do término do acionamento da mesma. O usuário não pode, no modelo apresentado até aqui, fornecer ao controlador sua preferência, dentro do intervalo fornecido, sobre o momento de início de acionamento de cada carga.

Esta preferência possui relação direta com o conforto do usuário, que gostaria

de indicar ao controlador não só um intervalo para execução das cargas, como também o horário ideal de início da execução de cada uma destas. Ademais, é importante que o usuário possa classificar as cargas presentes no ambiente no que se refere ao nível de conforto por elas exercidas. Isto é, deseja-se que o controlador saiba quais cargas geram maior impacto no conforto do usuário e que leve esta informação em consideração para a escolha de quais cargas terão seus horários de acionamento mais alterados.

O SHC proposto por Giorgio e Pimpinella (2013) é eficiente em minimizar os custos relacionados ao consumo de energia elétrica mas pode gerar um grande nível de desconforto aos usuários, se o horário de início de acionamento das cargas que estão associadas ao conforto do usuário for muito diferente do horário de início ideal definido.

Para realizar análise sobre o nível de desconforto gerado pelo SHC os seguintes parâmetros foram introduzidos ao problema.

- $C_{Lm}$  : Nível de conforto da  $m$ -ésima carga. É definido como um valor real que varia entre 0, para cargas que não geram desconforto ao ter seu horário de início alterado, e 1 para cargas que geram grande impacto no conforto do usuário ao terem seus horários de início alterados.
- $I_{Bm}$  : Amostra associada com o melhor horário de início da  $m$ -ésima carga. Indica ao controlador qual o horário ideal para o início da carga.

Estas novas variáveis tem seu valor definido pelo usuário, uma vez que não é possível para o controlador determinar o nível de conforto ou o melhor horário de início de cada carga.

Cada solução encontrada pelo controlador pode ter o seu custo energético total calculado de forma que o impacto da solução pode ser facilmente observado.

Do ponto de vista do conforto o custo total da solução não é facilmente mensurável ou comparável qualitativamente. Para solucionar este problema foi definido o *Nível Global de Conforto (NGC)* de uma solução, calculado a partir das Equações 3.5 e 3.6.

$$NGC = \frac{T_s}{C_{LT}} \sum_{i=1}^M C_{Li} \sqrt{(I_i - I_{Bi})^2} \quad (3.5)$$

$$C_{LT} = \sum_{i=1}^M C_{Li} \quad (3.6)$$

em que:

- $T_s$  é o intervalo de amostragem, em minutos.
- $C_{Li}$  é o nível de conforto associado à  $i$ -ésima carga, varia de 0 (zero) a 1 (um);
- $I_i$  é a amostra associada ao tempo de início da  $i$ -ésima carga;
- $I_{Bi}$  é a amostra associada ao melhor tempo de início da  $i$ -ésima carga;
- $M$  é o número total de cargas;
- $C_{LT}$  é a soma dos níveis de conforto de cada carga.

O cálculo do *NGC* é baseado na ideia de desvio-padrão. Primeiro calcula-se o desvio entre a amostra associada ao horário escolhido para execução de uma carga e a amostra associada ao seu horário ideal de início. Para garantir que o desvio seja sempre positivo o mesmo é elevado ao quadrado e em seguida sua raiz quadrada é calculada. Neste ponto tem-se o valor do desvio, em número de amostras, para uma determinada carga. Como o nível de conforto das cargas pode variar, o desvio encontrado é multiplicado pelo nível de conforto de cada carga, dessa forma o desvio de cargas que tem nível de conforto maior terá maior peso sobre o valor total do *NGC*.

A soma dos desvios de cada carga é multiplicada pela taxa de amostragem, para se obter o valor em minutos. Em seguida é feita a divisão pela soma do nível de conforto de todas as cargas, objetivando obter uma média deste desvio. Cargas sem nível de conforto, por exemplo, não tem seu desvio computado na soma, nem influenciam no valor de  $C_{LT}$ .

Ao final do cálculo do *NGC* obtêm-se o valor, em minutos, da média do desvio do tempo de início de execução de cada carga em relação ao seu horário ideal de início, tendo sido levado em consideração o nível de conforto de cada carga. Pode-se utilizar o *NGC* para realizar comparações qualitativas, do ponto de vista do conforto, para diferentes soluções de um mesmo conjunto de cargas.

### 3.4 Conforto como Função-Objetivo

A função-objetivo que maximiza o nível de conforto do usuário trabalha para minimizar o deslocamento do horário de início de cada carga em relação ao horário de início

ideal definido pelo usuário. Na Equação 3.7 é definida a função-objetivo para maximização do conforto.

$$f_2(x) = \min \left\{ \sum_{m=1}^M \sum_{i=I_{sm}}^{I_{em}-N_m} \left( C_{Lm} \sqrt{(i - I_{Bm})^2} \right) u_{mi} \right\} \quad (3.7)$$

O somatório mais externo itera sobre todo o conjunto de cargas a serem otimizadas. O somatório interno itera desde a amostra associada ao instante mínimo de início da carga até a amostra associada ao instante máximo de início da carga. O nível de desconforto gerado é determinado como a raiz quadrada do quadrado da diferença, em número de amostras, do instante de início ideal para o instante de início selecionado vezes o nível de conforto da carga. Desta forma a função-objetivo  $f_2$  é minimizada quando o horário de início de execução das cargas é exatamente igual ao horário ideal escolhido pelo usuário.

A função-objetivo do conforto ( $f_2$ ) utilizada possui relação direta com o *NGC*, isto é, quando a função-objetivo do conforto é minimizada o *NGC* também é.

Um modelo de controlador baseado em conforto, portanto, busca dentre as soluções viáveis aquela que mantem o início de execução do conjunto de cargas o mais próximo possível do momento ideal, priorizando cargas com nível de conforto maiores.

### 3.5 Combinação Linear de Funções-Objetivo

Com a função-objetivo que minimiza o desconforto do usuário definida é necessário fazer o controlador minimizar a combinação das duas funções-objetivo apresentadas até aqui, isto é, o custo energético e o desconforto do usuário. Para alcançar este resultado o controlador proposto minimiza uma combinação linear das duas funções-objetivo descritas anteriormente criando assim uma nova função-objetivo, como apresentado na Equação (3.8). Novas restrições foram adicionadas ao problema e estão descritas nas Equações (3.9), (3.10) e (3.11). Os novos parâmetros introduzidas estão descritas na Tabela 3.

$$f(x) = w_1 f_1(x) + w_2 f_2(x) \quad (3.8)$$

Tabela 3 – Lista de Parâmetros Introduzidos para Combinação Linear de Funções-Objetivo.

Símbolo	Descrição
$w_1$	Peso da função-objetivo de custo energético do controlador
$w_2$	Peso da função-objetivo de conforto do controlador

em que:

$$w_1 + w_2 = 1 \quad (3.9)$$

$$w_1 \geq 0 \quad (3.10)$$

$$w_2 \geq 0 \quad (3.11)$$

Ao variar  $w_1$  e  $w_2$ , o usuário pode alcançar economia de energia agregado a um baixo impacto no seu conforto.

Ao fazer  $w_1 = 1$ , o usuário determina ao controlador que o nível de conforto não é importante para a execução das cargas e o controlador minimizará apenas o os custos do consumo de eletricidade.

Ao fazer  $w_2 = 1$ , o controlador obterá a solução que melhor mantém os níveis de conforto do usuário, obedecendo às restrições impostas.

### 3.6 Modelo Completo do Controlador Proposto

O controlador foi modelado de forma matricial utilizando o *software* MATLAB. Para realizar as simulações o *software* CPLEX é utilizado para aplicar, sobre o modelo gerado, os algoritmos e métodos necessários para encontrar a solução ótima do problema. Para isto, o modelo deve estar na seguinte forma padrão:

$$\min f x^T \quad (3.12)$$

$$A_{eq} x = B_{eq} \quad (3.13)$$

$$A_{ineq}x \leq B_{ineq} \tag{3.14}$$

em que:

- $x$  é um vetor que representa as variáveis de decisão  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ;
- $f$  é um vetor que representa os coeficientes relacionados a cada variável de decisão da função objetivo  $(a_1, a_2, \dots, a_n)$ ;
- $A_{eq}$  é uma matriz que representa um conjunto de equações de restrição;
- $B_{eq}$  é um vetor que representa os valores de cada equação de restrição;
- $A$  é uma matriz que representa um conjunto de inequações de restrição;
- $B$  é um vetor que representa os valores máximos de cada inequação de restrição.

Cada um destes vetores e matrizes foi implementado no MATLAB a partir do modelo matemático proposto, dos parâmetros do usuário e do conjunto de cargas a ser simulado. O vetor  $f$  representa os valores, em sequência, dos coeficientes associados a cada variável de decisão do problema. A matriz  $A_{eq}$  e o vetor  $B_{eq}$  são utilizados para garantir que apenas uma variável de decisão por carga estará ativa, isto é, terá valor unitário. A matriz  $A_{ineq}$  e o vetor  $B_{ineq}$  são utilizados para garantir que o limite de pico seja atendido.

## 4 ESTUDO DE CASO

Com o objetivo de se estudar os impactos causados pela adição da função-objetivo de otimização do conforto do usuário no modelo do controlador, foram realizadas, primeiramente, simulações sobre os mesmos quatro cenários descritos no artigo de Di Giorgio e Pimpinella (2013), e, posteriormente, foi introduzido novo cenário para testar o modelo em um ambiente com tarifa branca e cargas reais.

As ferramentas computacionais utilizadas para realização das simulações foram o *software MATLAB* (versão R2015a) para modelagem do problema de forma matricial e o *software IBM ILOG CPLEX* (versão 12.5.1.0) que foi utilizado para encontrar a solução ótima em cada simulação realizada. Os scripts do *MATLAB* utilizados estão disponíveis nos apêndices deste trabalho.

O computador utilizado para execução dos ambientes simulados possui as seguintes características:

- Processador: Intel Core i7-5500 @ 2.40 GHz (4 Núcleos);
- Memória RAM: 8,00 GB;
- Disco Rígido: SSDA 240 GB;
- Sistema Operacional: Microsoft Windows 7 Ultimate SP1 64bits.

### 4.1 Cenários de Di Giorgio e Pimpinella (2013)

O conjunto de cargas que são utilizadas nas simulações deste cenário estão descritas na Tabela 4. Os parâmetros selecionados pelo usuário, nível de conforto, hora mínima, máxima e ideal de início de cada carga, são apresentados na Tabela 5. O horário ideal de início de cada carga foi escolhido para garantir que o conforto máximo aconteça quando as cargas são iniciadas nos momentos de maior tarifa, fazendo com que os dois objetivos do controlador sejam conflitantes durante as simulações.

Cada simulação foi realizada com valores diferentes de  $w_1$  e  $w_2$  afim de se obter o impacto destas variáveis no modelo. O limite de pico utilizado nas simulações foi de  $4.5kWh$ . Para simular cargas não-planejáveis, isto é, cargas existentes no ambiente mas que seus horários de execução não podem ser alterados, este limite é reduzido utilizando duas gaussianas de  $0.5kWh$  de pico e uma gaussiana de  $1.4kWh$  de pico. As gaussianas estão centradas às 06h00, 13h00 e 20h00 respectivamente.

Tabela 4 – Características das cargas do artigo de Di Giorgio e Pimpinella (2013).

Carga	N. de Etapas	$\Delta t$ (min)	$\bar{P}[kW]$	$\hat{P}[kW]$	$C_L$
Carga 1	1	[10]	[4.4]	[4.4]	0.6
Carga 2	1	[120]	[1]	[1.2]	0.1
Carga 3	2	[10,65]	[1.3,1.3]	[1.7,1.3]	0.5
Carga 4	6	[10,10,5,5,15,10]	[0.13,0.51,0.3,0.26,0.15,0.22]	[0.7,0.51,0.3,0.26,0.15,0.3]	0.2
Carga 5	2	[55,20]	[2,2]	[2.1,2]	0.8
Carga 6	1	[360]	[1.1]	[1.2]	0.7
Carga 7	1	[45]	[0.9]	[1.1]	0.7
Carga 8	1	[40]	[0.368]	[1.1]	0.1
Carga 9	1	[120]	[0.736]	[1.472]	0.1

Tabela 5 – Parâmetros do usuários referentes às cargas do artigo de Di Giorgio e Pimpinella (2013).

Carga	Horário ideal de início	Horário mínimo de início	Horário máximo de término	$C_L$
Carga 1	14:00	14:00	23:59	1.0
Carga 2	14:00	14:00	23:59	0.9
Carga 3	14:00	14:00	23:59	0.8
Carga 4	14:00	14:00	23:59	0.7
Carga 5	14:00	14:00	23:59	0.6
Carga 6	14:00	14:00	23:59	0.5
Carga 7	14:00	14:00	23:59	0.4
Carga 8	14:00	14:00	23:59	0.3
Carga 9	14:00	14:00	23:59	0.2

#### 4.1.1 Cenário 1 - Tarifa Única

Este cenário foi simulado quatro vezes para diferentes valores de  $w_1$  e  $w_2$  em cada execução. O custo total e o  $NGC$  para cada solução encontrada estão descritos na Tabela 6. Nas Figuras 6, 7, 8 e 9 são apresentados os resultados para cada execução da simulação para os respectivos valores de  $w_1$  e  $w_2$ . Na Tabela 7 é apresentado, para cada solução, a hora de início de cada carga.

A partir dos dados apresentados na Tabela 6 pode-se observar que o custo total de execução das cargas foi o mesmo, independentemente dos valores escolhidos para  $w_1$  e  $w_2$ . Isto ocorreu porque a tarifa utilizada neste cenário foi constante durante todo o dia, situação similar a como é realizada tarifação residencial atualmente no Brasil.

Neste tipo de situação o controlador trabalha para manter as cargas dentro do

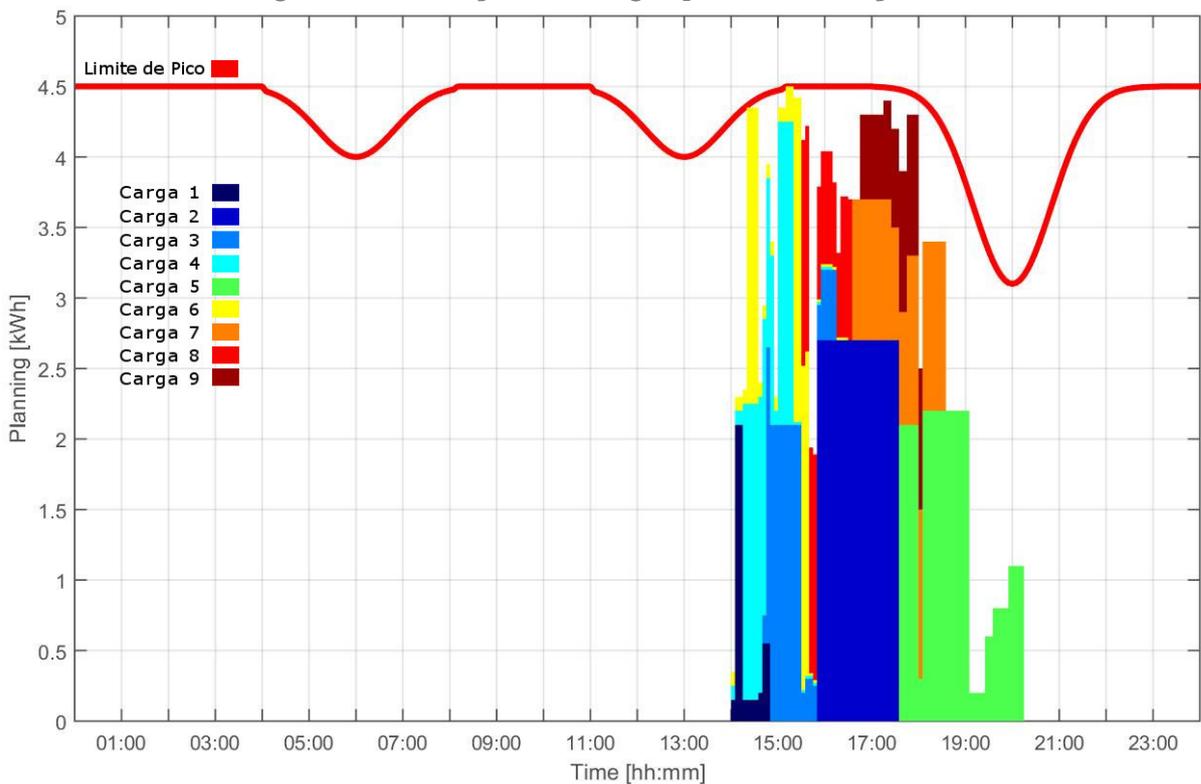
Tabela 6 – Resultados das Simulações do Cenário 1.

Simulação	$w_1$	$w_2$	Custo Total (€)	$NGC$	Tempo de Execução (s)
S1.1	0.3	0.7	248.70	70,74	43.38
S1.2	0.5	0.5	248.70	70,74	59.41
S1.3	0.7	0.3	248.70	70,74	50.86
S1.4	1	0	248.70	286,40	0.08

Tabela 7 – Horário de Início das Cargas do Cenário 1.

Horário	Carga 1	Carga 2	Carga 3	Carga 4	Carga 5	Carga 6	Carga 7	Carga 8	Carga 9
Ideal	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00
Escolhido S1.1	14:00	15:49	14:39	14:00	17:34	14:00	16:34	15:30	16:45
Escolhido S1.2	14:00	15:49	14:39	14:00	17:34	14:00	16:34	15:30	16:45
Escolhido S1.3	14:00	15:49	14:39	14:00	17:34	14:00	16:34	15:30	16:45
Escolhido S1.4	19:39	15:54	22:15	17:34	20:04	14:09	20:34	22:45	15:24

Figura 6 – Alocação das cargas para a Simulação 1.1.

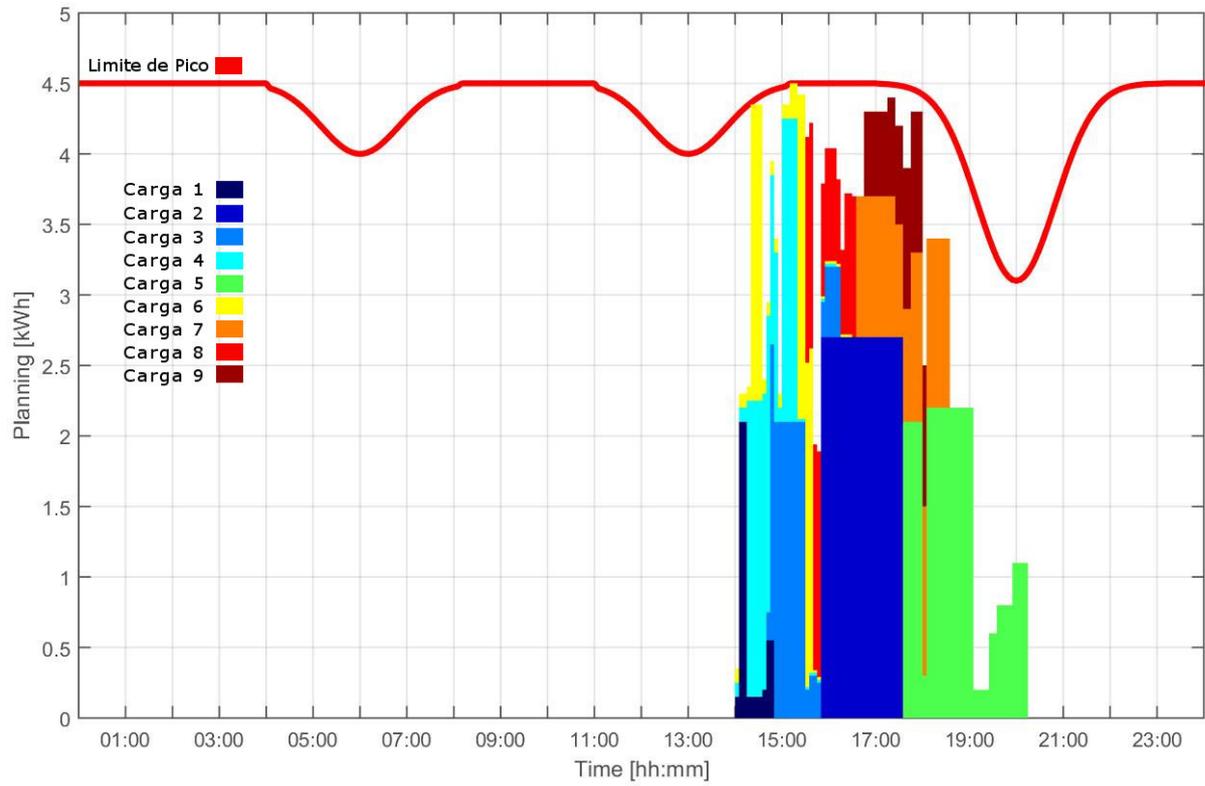


Fonte: O autor.

intervalo desejado pelo usuário e para garantir que o limite de pico não seja ultrapassado. Não há ganhos econômicos em acionar as cargas em momentos distintos do dia.

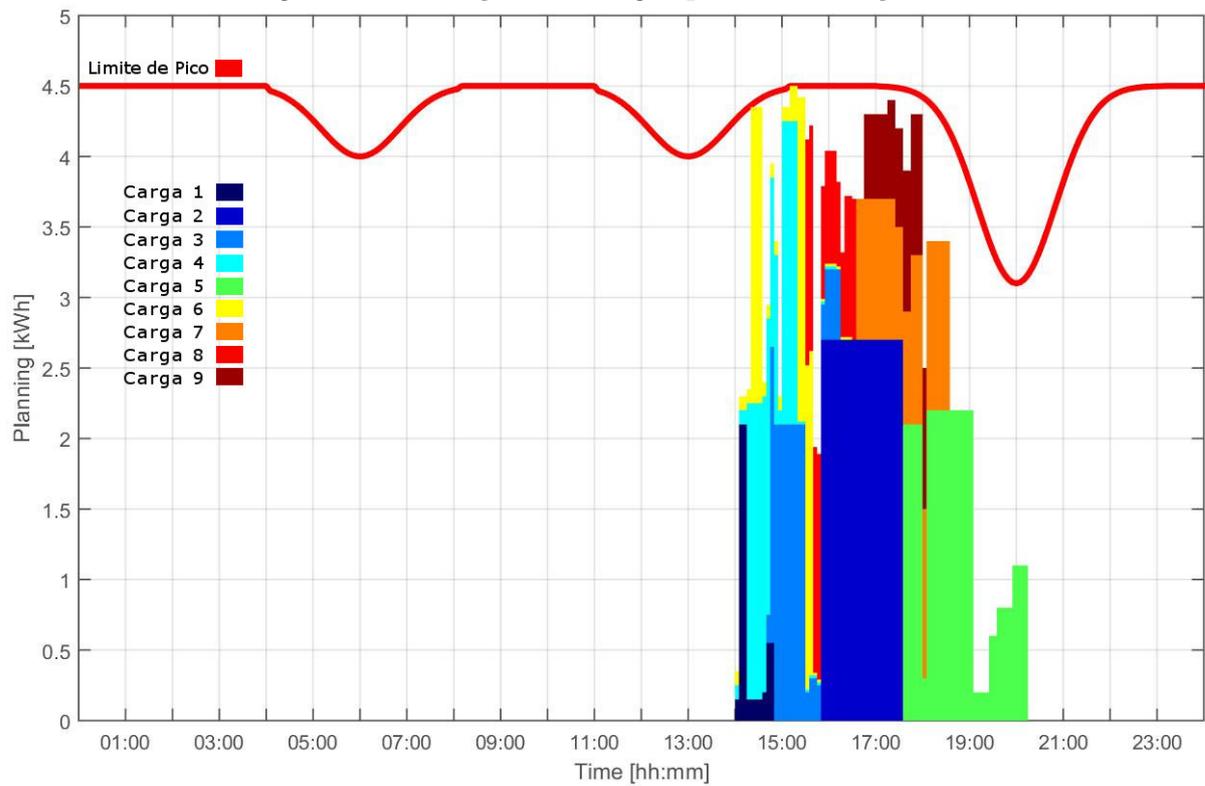
Em outras palavras, para este tipo de cenário, qualquer solução que mantenha o conjunto de cargas abaixo do limite de pico e atenda aos requisitos do usuário de tempo

Figura 7 – Alocação das cargas para a Simulação 1.2.



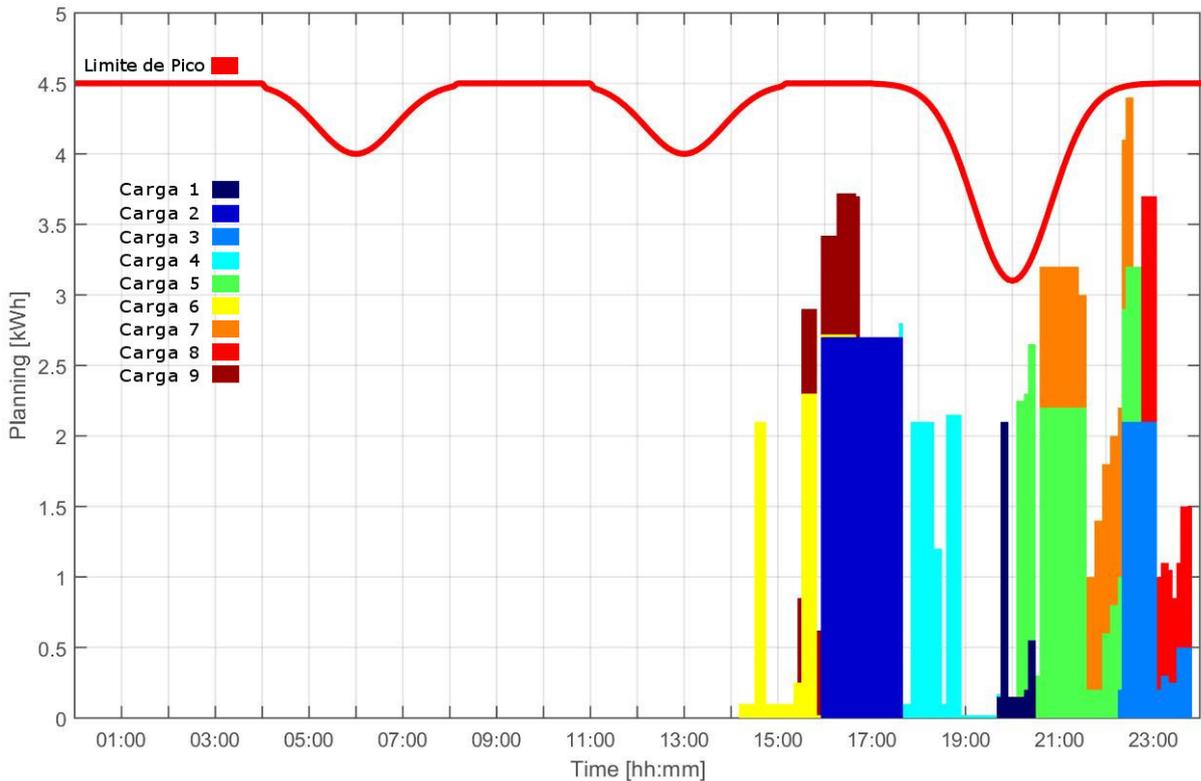
Fonte: O autor.

Figura 8 – Alocação das cargas para a Simulação 1.3.



Fonte: O autor.

Figura 9 – Alocação das cargas para a Simulação 1.4.



Fonte: O autor.

de início e de término do acionamento de cada carga, é uma solução ótima do ponto de vista de economia energética.

Do ponto de vista do conforto, entretanto, a solução ideal para o usuário é aquela que inicia as cargas no melhor momento, segundo critérios do mesmo. A solução ótima viável, isto é, aquela que maximiza o conforto do usuário enquanto atende às restrições impostas ao sistema, é aquela que mantém o horário do início de acionamento do conjunto de cargas o mais próximo possível do momento ideal selecionado pelo usuário, levando em consideração a diferença no impacto do nível de conforto exercido por cada carga e respeitando o limite de pico.

A solução encontrada pelo controlador da simulação 1.4 foi a solução que gerou mais desconforto ao usuário e não obteve nenhum ganho econômico adicional. Todas as soluções que levaram em consideração o conforto do usuário, obtiveram máxima economia energética agregada à otimização do conforto do usuário.

Isto significa que levar o conforto em consideração em situações com tarifa constante, mesmo que se utilize um fator  $w_2$  muito pequeno, garante que, dentre as soluções realizáveis, será escolhida aquela que aumenta o nível do conforto do usuário sem aumentar

os custos energéticos.

Este cenário é, também, o mais próximo da realidade brasileira para a tarifação de grandes indústrias, onde o consumo energético não é taxado, isto é, não há tarifa. Para estes clientes, basta que o limite de pico seja atendido.

O tempo de execução desta simulação sofreu grande degradação com a adição do conforto. Isto ocorreu porque quando se leva em consideração apenas os custos energéticos, a solução ótima é rapidamente obtida, pois na realidade qualquer solução viável é ótima. Com a adição do conforto é necessário realizar uma busca maior dentro da árvore de soluções.

Os resultados das simulações deste cenário demonstraram, portanto, que utilizar o conforto em conjunto com os custos energéticos como função-objetivo do controlador melhora o seu desempenho do ponto de vista qualitativo, para aplicações residenciais com tarifa constante e para aplicações industriais tarifadas apenas sobre a demanda. Isto ocorre pois garante-se que a solução encontrada trará o maior conforto ao usuário que atenda ao limite de pico sem que haja oneração dos custos energéticos. A desvantagem apresentada para a utilização da função-objetivo de conforto neste cenário foi o aumento do tempo de execução para encontrar a solução do problema.

#### **4.1.2 Cenário 2 - Tarifa Dupla**

Neste cenário é utilizado o conjunto de cargas descritas na Tabela 4. Os parâmetros de seleção do usuário para o conjunto de cargas está descrito na Tabela 5. São utilizadas duas tarifas ao longo do dia para este cenário, como segue:

- Tarifa Fora-Ponta das 00h00 as 08h00 (Valor de 16,75 centavos / kWh);
- Tarifa Ponta das 08h00 as 19h00 (Valor de 21.22 centavos / kWh);
- Tarifa Fora-Ponta das 19h00 as 00h00 (Valor de 16,75 centavos / kWh).

Portanto, do ponto de vista de economia energética, alocar cargas entre as 08h00 e 19h00 é menos vantajoso. Do ponto de vista do conforto, é mais vantajoso que as cargas fiquem o mais próximo possível das 14h00.

Este cenário foi simulado quatro vezes com diferentes valores de  $w_1$  e  $w_2$ . O custo total e o *NGC* para cada solução encontrada estão descritos na Tabela 8. Nas Figuras 10, 11, 12 e 13 são apresentados os resultados para cada execução da simulação para os respectivos valores de  $w_1$  e  $w_2$ . Na Tabela 9 é apresentado, para cada solução, a

hora de início de cada carga.

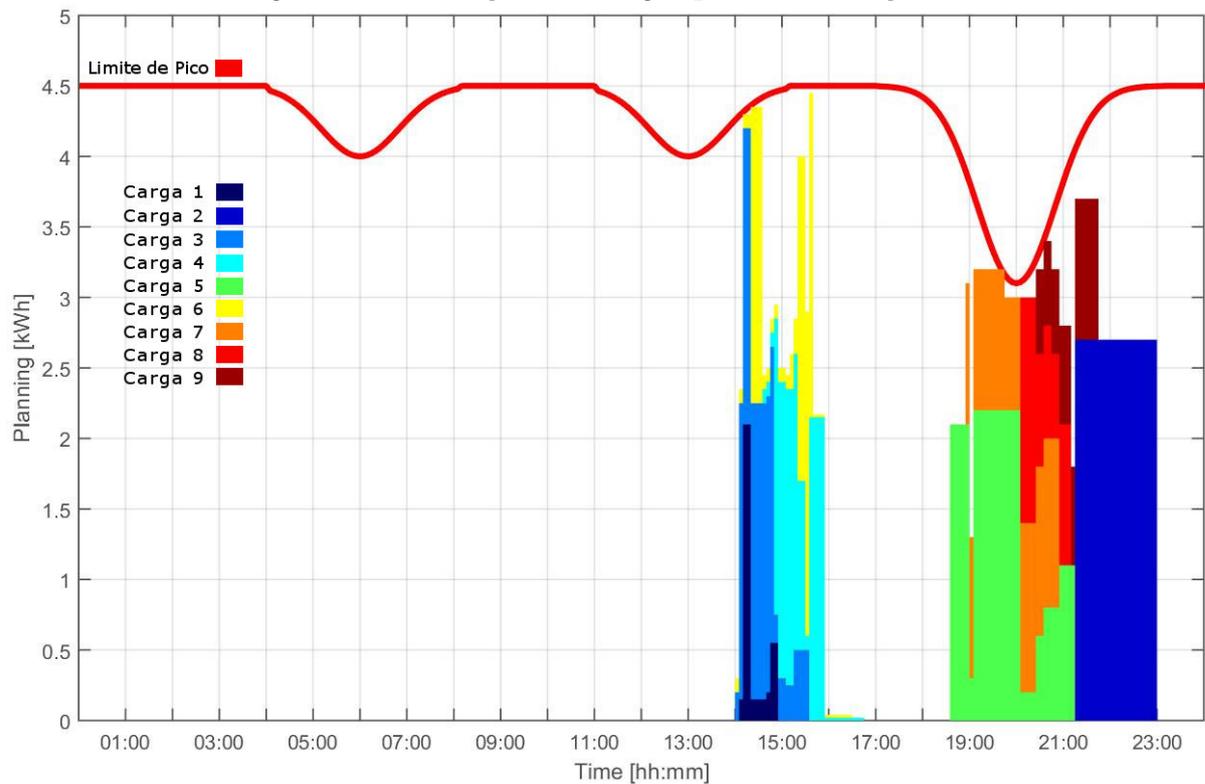
Tabela 8 – Resultados das Simulações do Cenário 2.

Simulação	$w_1$	$w_2$	Custo Total (€)	$NGC$	Tempo de Execução (s)
S2.1	0.3	0.7	248.69	164,90	0.64
S2.2	0.5	0.5	241.22	227,22	6.29
S2.3	0.7	0.3	237.97	293,24	261.71
S2.4	1	0	236.97	374,35	1046.56

Tabela 9 – Horário de Início das Cargas do Cenário 2.

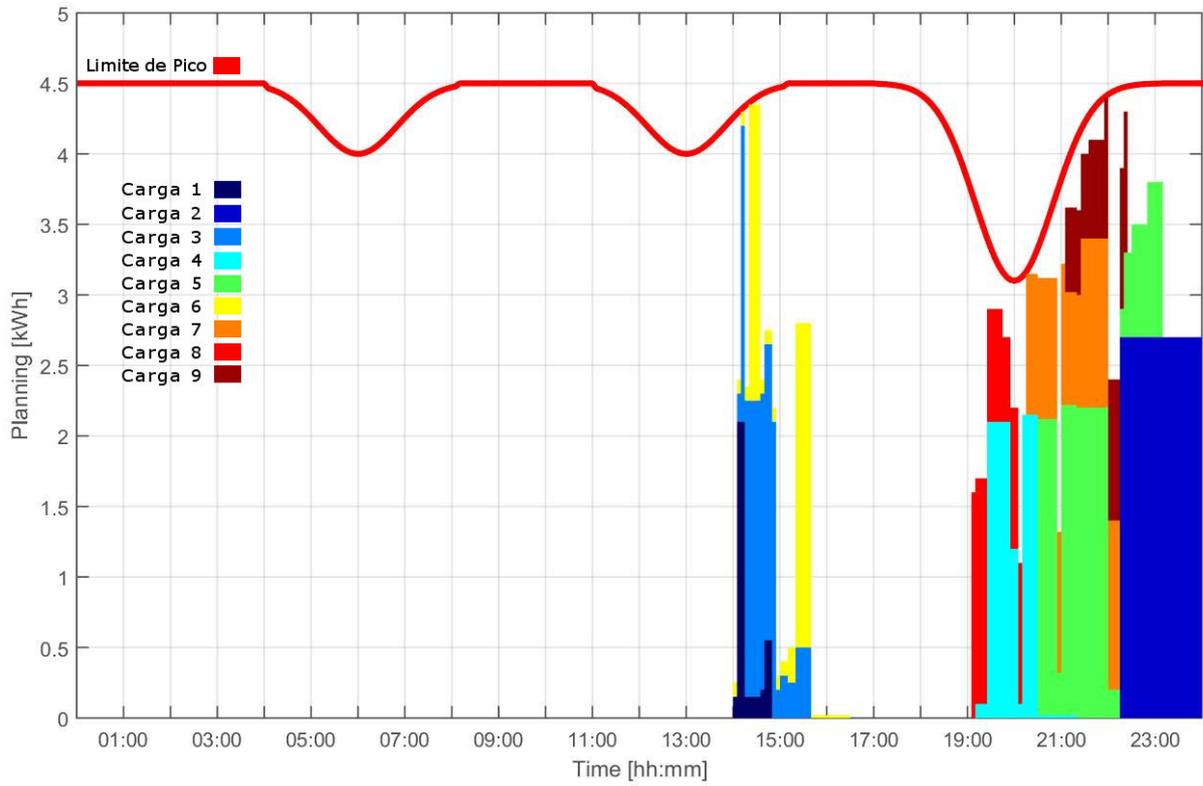
Horário	Carga 1	Carga 2	Carga 3	Carga 4	Carga 5	Carga 6	Carga 7	Carga 8	Carga 9
Ideal	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00
Escolhido S2.1	14:05	21:15	14:00	14:35	18:35	14:00	18:55	20:05	20:25
Escolhido S2.2	14:00	22:15	14:05	19:10	20:30	14:00	20:15	19:05	21:05
Escolhido S2.3	14:00	22:15	21:25	20:55	18:35	14:00	18:55	20:05	22:15
Escolhido S2.4	18:45	22:15	21:05	18:00	19:20	20:35	20:55	22:55	19:35

Figura 10 – Alocação das cargas para a Simulação 2.1.



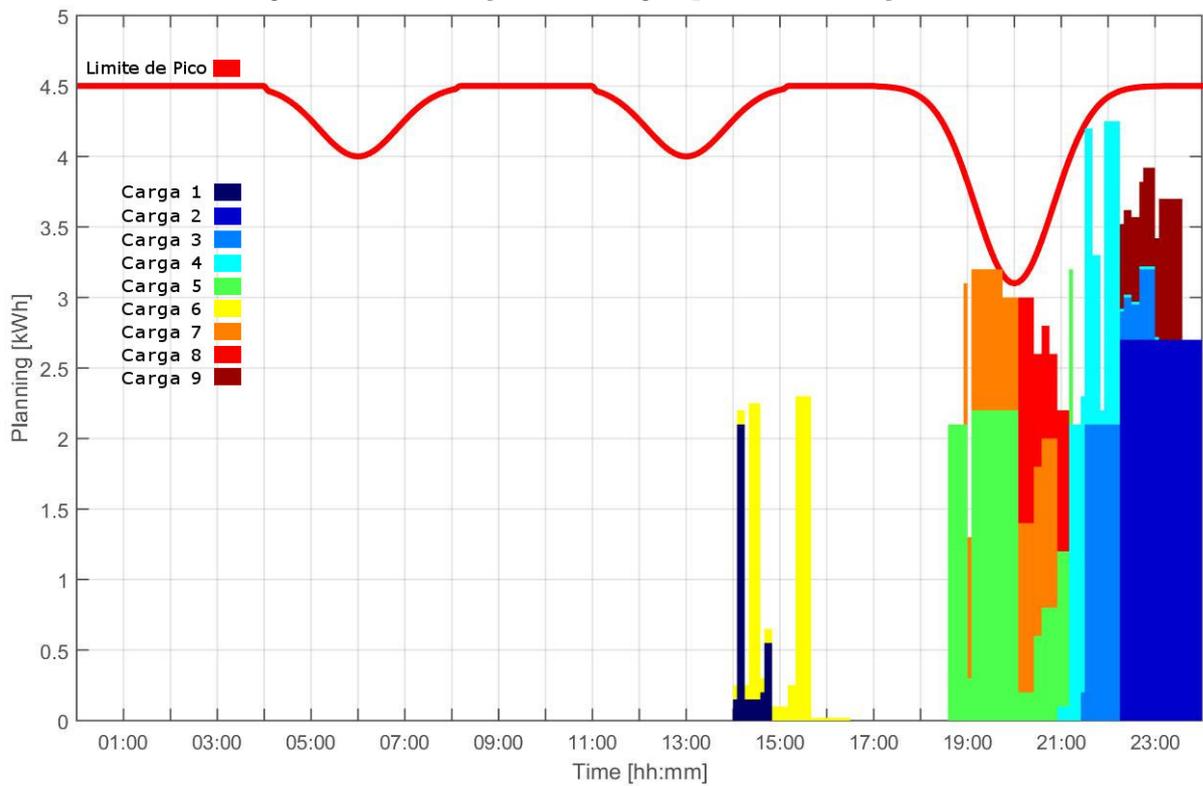
Fonte: O autor.

Figura 11 – Alocação das cargas para a Simulação 2.2.



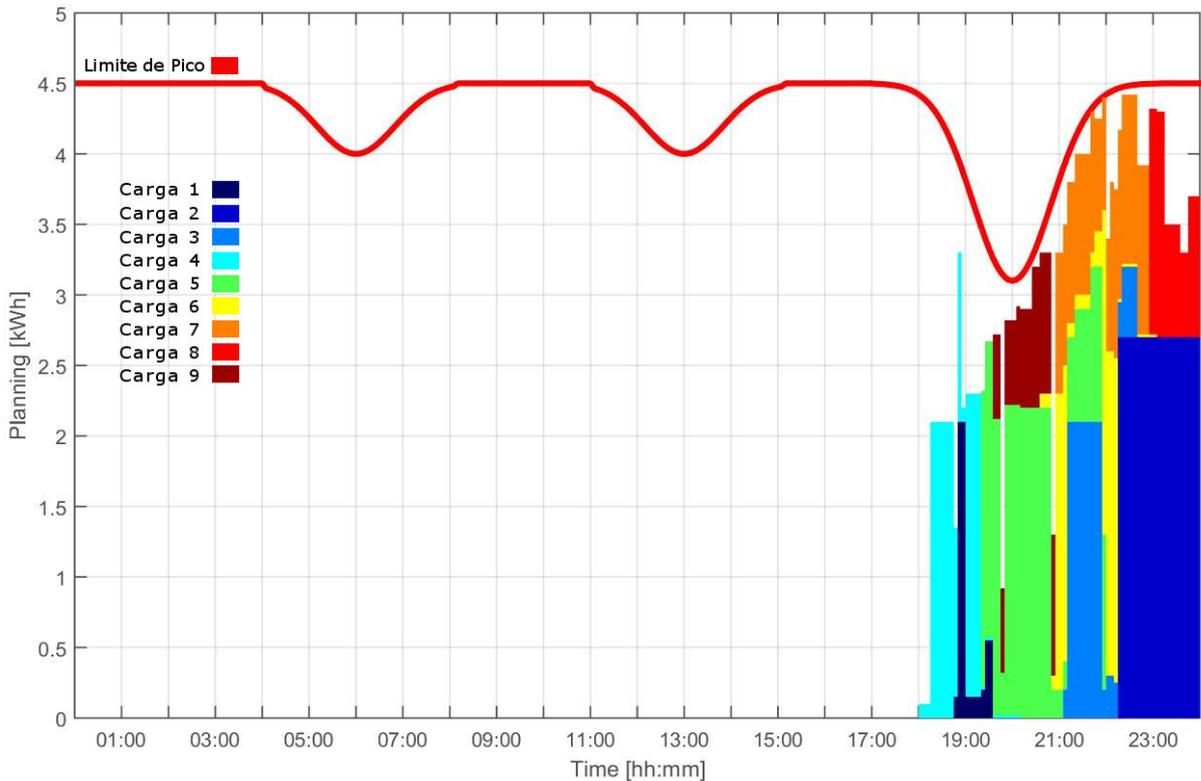
Fonte: O autor.

Figura 12 – Alocação das cargas para a Simulação 2.3.



Fonte: O autor.

Figura 13 – Alocação das cargas para a Simulação 2.4.



Fonte: O autor.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 8, pode-se observar que o custo total mínimo das simulações foi de €236,97 quando o controlador utilizou apenas a função-objetivo de custo energético e o custo total máximo foi de €248,96 na simulação S2.1, que utilizou o menor valor para o peso da função-objetivo de custo energético. Uma variação de aproximadamente 12 centavos, o que representa um acréscimo de 5% em relação ao custo mínimo encontrado.

Analisando o conforto pode-se observar, novamente a partir dos dados da Tabela 8, que o valor mínimo e máximo para o *NGC* foram respectivamente 164,97 e 374,35. Uma variação de 209,39, o que representa mais de 126% do valor mínimo encontrado para o *NGC*.

Em síntese o conforto do usuário pode sofrer grande degradação frente a pouca vantagem econômica. Este tipo de efeito pode fazer a utilização do controlador ser reduzida, ou o usuário pode decidir remover cargas com certo nível de conforto do conjunto de cargas planejáveis.

Analisando os resultados de custo energético e conforto da simulação S2.4 em relação à simulação S2.3 pode-se observar que houve diminuição de 0,42% do custo

energético (1,00 centavo) e aumento de 27,6% do desconforto gerado. A Carga 1, que é a carga com maior nível de conforto, foi sempre alocada no seu horário inicial ideal quando a função-objetivo do conforto foi utilizada pelo controlador. A solução utilizando apenas custo energético alocou a Carga 1 às 18h45, um desvio de 4h45min em uma carga de alto nível de conforto que gerou uma economia de apenas 1,002 centavos na simulação S2.4.

A utilização do conforto nas simulações deste cenário, diferente do que aconteceu no cenário com tarifa constante, teve como efeito a diminuição do tempo para encontrar a solução de cada simulação. Isto ocorreu porque conforme o peso da função-objetivo do conforto é maior, passa a ser necessário uma economia energética maior para justificar acréscimo no desvio do tempo de início de uma carga em relação ao seu início ideal.

Importante também notar que este cenário com tarifa dupla é similar ao aplicado no Brasil em alguns clientes do grupo B, como por exemplo agricultores que possuem horários de desconto para utilizar equipamentos de irrigação.

#### ***4.1.3 Cenário 3 - Tarifa Dupla e DSM com Desconto Tarifário***

Neste cenário é utilizado o conjunto de cargas descritas na Tabela 4. Os parâmetros de seleção do usuário para o conjunto de cargas está descrito na Tabela 5. São utilizadas três tarifas ao longo do dia para este cenário, como segue:

- Tarifa Fora-Ponta das 00h00 as 08h00 (Valor de 16,75 centavos / kWh);
- Tarifa Ponta das 08h00 as 16h00 (Valor de 21.22 centavos / kWh);
- Tarifa Promocional das 16h00 as 18h00 (Valor de 12 centavos / kWh);
- Tarifa Ponta das 18h00 as 19h00 (Valor de 21.22 centavos / kWh);
- Tarifa Fora-Ponta das 19h00 as 00h00 (Valor de 16,75 centavos / kWh).

Portanto é mais vantajoso, do ponto de vista de economia energética, alocar o máximo de cargas no período de 16h00 as 18h00 e em seguida após as 19h00. Do ponto de vista do conforto é mais vantajoso que as cargas fiquem o mais próximo possível das 14h00.

Este cenário foi simulado quatro vezes com diferentes valores de  $w_1$  e  $w_2$ . O custo total e o  $NGC$  para cada solução encontrada estão descritos na Tabela 10. Nas Figuras 14, 15, 16 e 17 são apresentados os resultados para cada execução da simulação para os respectivos valores de  $w_1$  e  $w_2$ . Na Tabela 11 é apresentado, para cada solução, a hora de início de cada carga.

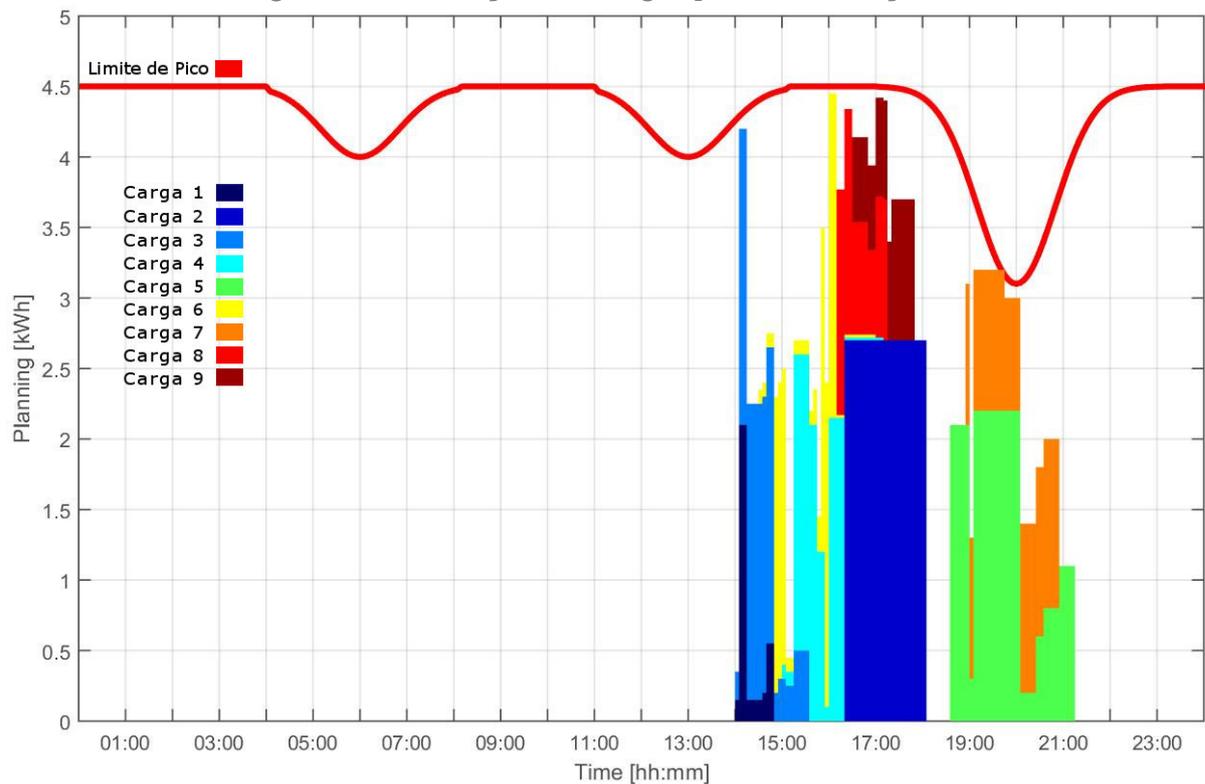
Tabela 10 – Resultados das Simulações do Cenário 3.

Simulação	$w_1$	$w_2$	Custo Total (€)	$NGC$	Tempo de Execução (s)
S3.1	0.3	0.7	214.75	99,08	11.90
S3.2	0.5	0.5	202.80	188,06	96.44
S3.3	0.7	0.3	202.49	192,13	105.24
S3.4	1	0	199.781	269,90	32.36

Tabela 11 – Horário de Início das Cargas do Cenário 3.

Horário	Carga 1	Carga 2	Carga 3	Carga 4	Carga 5	Carga 6	Carga 7	Carga 8	Carga 9
Ideal	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00
Escolhido S3.1	14:00	16:20	14:00	15:00	18:35	14:30	18:55	16:10	16:30
Escolhido S3.2	14:00	16:00	17:40	18:54	20:30	17:25	19:05	16:05	16:25
Escolhido S3.3	14:00	16:05	17:45	19:04	20:30	17:30	19:15	16:05	16:25
Escolhido S3.4	17:45	16:05	19:05	19:54	21:20	17:30	22:00	16:05	16:25

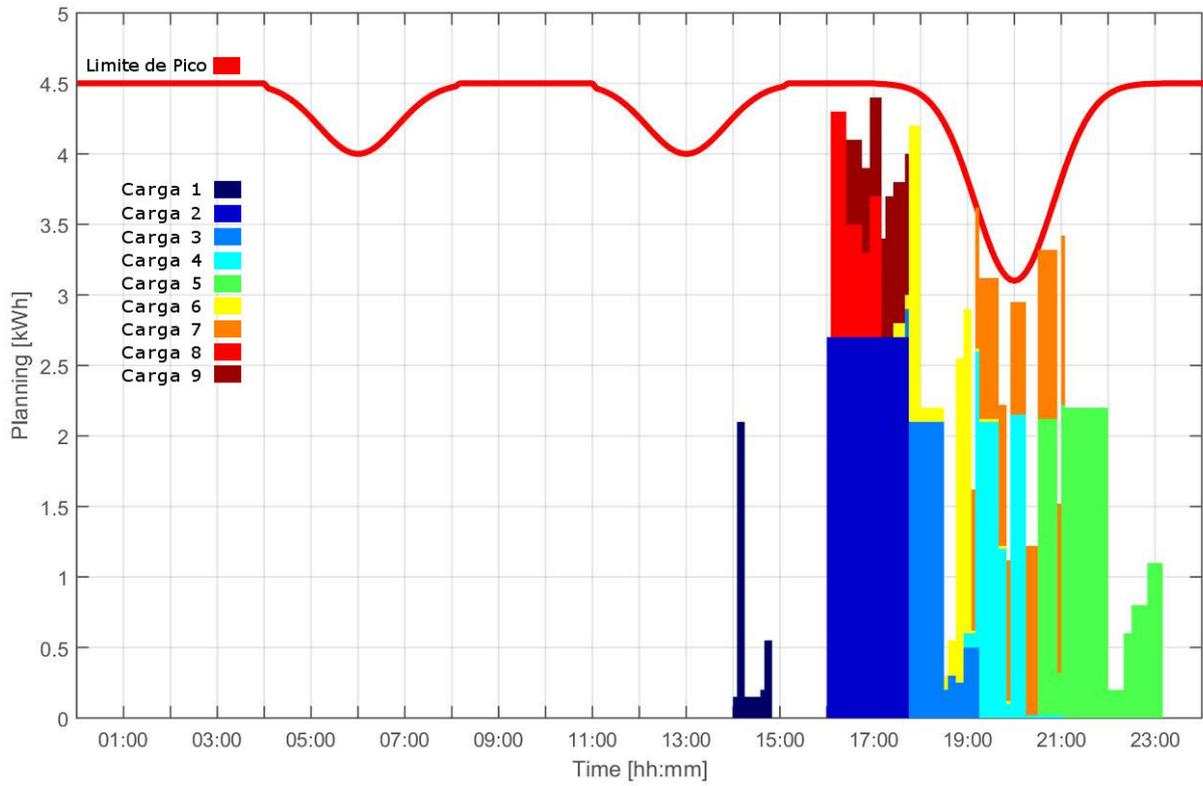
Figura 14 – Alocação das cargas para a Simulação 3.1.



Fonte: O autor.

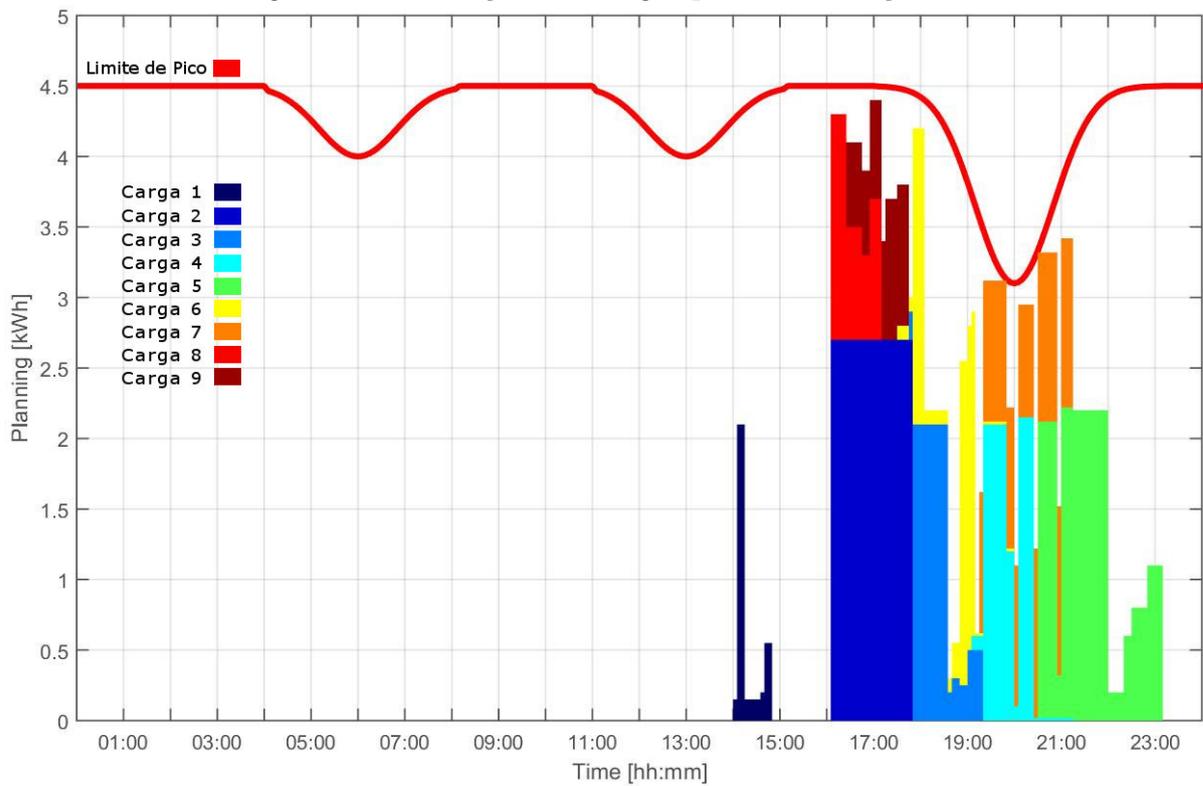
Neste cenário deseja-se simular uma situação com tarifa dupla juntamente com *demand side management*. A concessionária de energia elétrica envia uma mensagem aos seus usuários, utilizando, por exemplo, o conceito de redes inteligentes, informando sobre uma tarifa promocional. Com o controlador integrado à rede da concessionária este tipo

Figura 15 – Alocação das cargas para a Simulação 3.2.



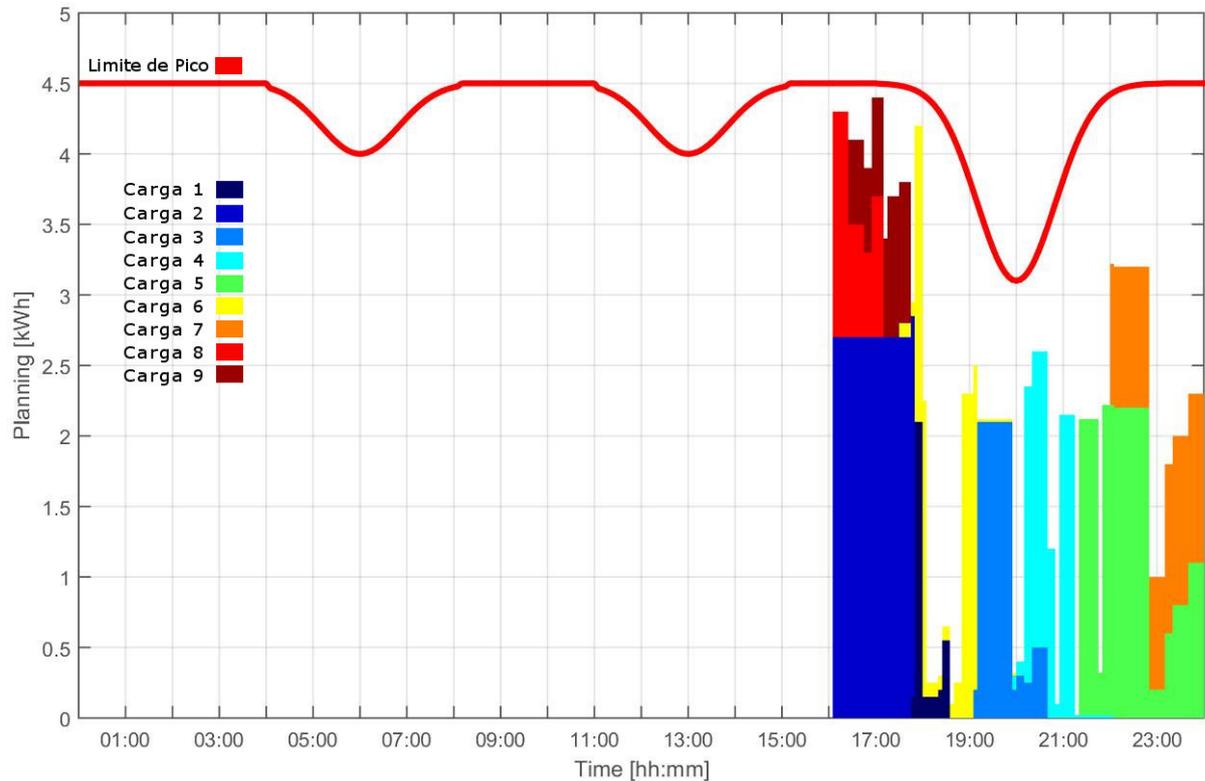
Fonte: O autor.

Figura 16 – Alocação das cargas para a Simulação 3.3.



Fonte: O autor.

Figura 17 – Alocação das cargas para a Simulação 3.4.



Fonte: O autor.

de mensagem é recebida e pode então ser levada em consideração para os cálculos de otimização das cargas que ainda não iniciaram sua execução.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 10, pode-se observar que o custo total mínimo das simulações foi de €199.78 quando o controlador utilizou apenas a função-objetivo de custo energético e o custo total máximo foi de €214.75 na simulação S3.1, que utilizou o menor valor para o peso da função-objetivo de custo energético. Uma variação aproximadamente 15 centavos, o que representa um acréscimo de 7,5% em relação ao custo mínimo encontrado.

Analisando o conforto pode-se observar, novamente a partir dos dados da Tabela 10, que o valor mínimo e máximo para o *NGC* foram respectivamente 99,08 e 269,91. Uma variação de 170,83, o que representa mais de 172,42% do valor mínimo encontrado para o *NGC*.

O tempo de execução das simulações variou mais do que nos cenários anteriores, não apresentando correlação direta com os valores de  $w_1$  e  $w_2$ . O menor tempo de execução aconteceu quando a função-objetivo do conforto teve o maior peso e o segundo menor tempo de execução aconteceu quando a função-objetivo de custo energético teve maior

peso. Isso aconteceu, provavelmente, porque a busca pela solução nos extremos, para o caso deste cenário, é mais simples do que a combinação de objetivos.

Sem ter que levar o conforto em consideração a busca pela solução compreende alocar o máximo de cargas no período de desconto, isto é, entre as 16h00 e 18h00, e alocando o restante a partir das 19h00, momento de tarifa fora-ponta. Já para o objetivo de otimização do conforto busca-se apenas alocar as cargas o mais próximo de seus horários ideais de início, respeitando as restrições do problema.

É importante observar a diferença no tempo de alocação da carga com maior nível de conforto (Carga 1) entre as simulações S3.3 e S3.4. Para uma economia de menos de 3 centavos houve uma diferença de 3h45 no horário de início da carga.

#### **4.1.4 Cenário 4 - Tarifa Dupla e DSM com Redução do Pico**

Neste cenário é utilizado o conjunto de cargas descritas na Tabela 4. Os parâmetros de seleção do usuário para o conjunto de cargas está descrito na Tabela 5. São utilizadas três tarifas ao longo do dia para este cenário, como segue:

- Tarifa Fora-Ponta das 00h00 as 08h00 (Valor de 16,75 centavos / kWh);
- Tarifa Ponta das 08h00 as 19h00 (Valor de 21.22 centavos / kWh);
- Tarifa Fora-Ponta das 19h00 as 00h00 (Valor de 16,75 centavos / kWh).

Portanto, do ponto de vista de economia energética, alocar cargas entre as 08h00 e 19h00 é menos vantajoso. Do ponto de vista do conforto é mais vantajoso que as cargas fiquem o mais próximo possível das 14h00.

Este cenário foi simulado quatro vezes com diferentes valores de  $w_1$  e  $w_2$ . O custo total e o *NGC* para cada solução encontrada estão descritos na Tabela 12. Nas Figuras 18, 19, 20 e 21 são apresentados os resultados para cada execução da simulação para os respectivos valores de  $w_1$  e  $w_2$ . Na Tabela 13 é apresentada, para cada solução, a hora de início de cada carga.

Neste cenário deseja-se simular uma situação com tarifa dupla juntamente com *demand side management*. A concessionária de energia elétrica envia uma mensagem aos seus usuários, utilizando, por exemplo, o conceito de redes inteligentes, informando sobre uma redução de 1.5kW no limite de pico entre as 21h00 e 22h00. Com o controlador integrado à rede da concessionária, este tipo de mensagem é recebida e pode então ser levada em consideração para os cálculos de otimização das cargas que ainda não iniciaram

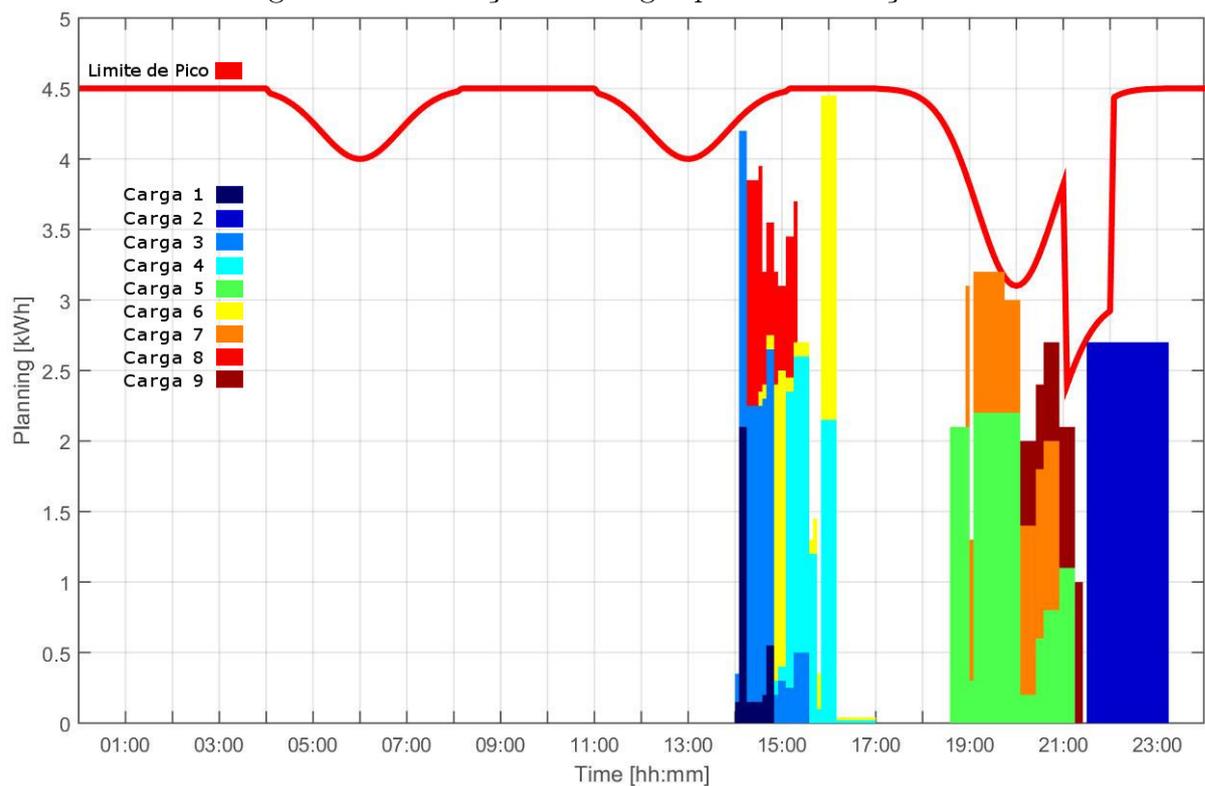
Tabela 12 – Resultados das Simulações do Cenário 4.

Simulação	$w_1$	$w_2$	Custo Total (€)	$NGC$	Tempo de Execução (s)
S4.1	0.3	0.7	253.09	151,02	0.61
S4.2	0.5	0.5	247.57	179,63	2.20
S4.3	0.7	0.3	243.12	225,56	46.41
S4.4	1	0	241.55	354,45	3965.55

Tabela 13 – Horário de Início das Cargas do Cenário 4.

Horário	Carga 1	Carga 2	Carga 3	Carga 4	Carga 5	Carga 6	Carga 7	Carga 8	Carga 9
Ideal	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00	14:00
Escolhido S4.1	14:00	21:30	14:00	14:50	18:35	14:30	18:55	14:15	20:05
Escolhido S4.2	14:05	22:00	14:00	14:35	20:30	14:00	19:05	19:05	19:05
Escolhido S4.3	14:00	22:15	14:05	20:55	18:30	14:00	18:55	20:00	21:30
Escolhido S4.4	22:00	22:15	17:35	20:55	18:30	15:10	18:55	20:00	22:35

Figura 18 – Alocação das cargas para a Simulação 4.1.

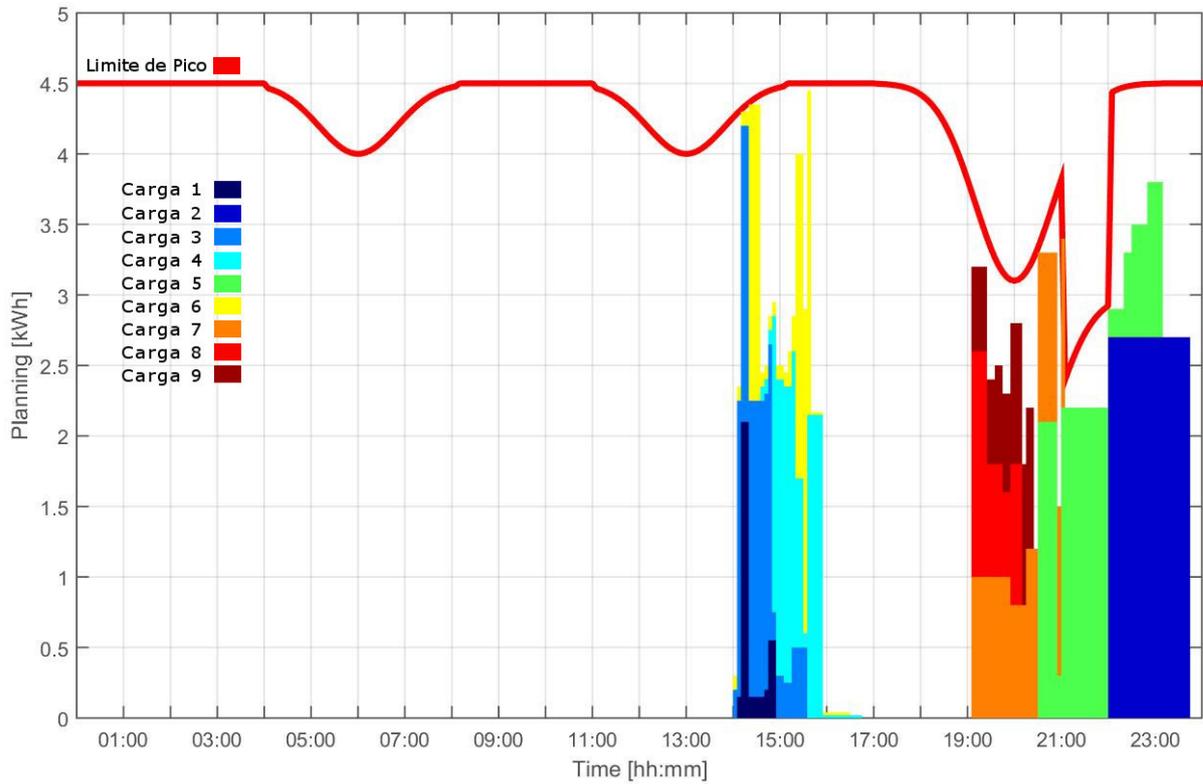


Fonte: O autor.

sua execução.

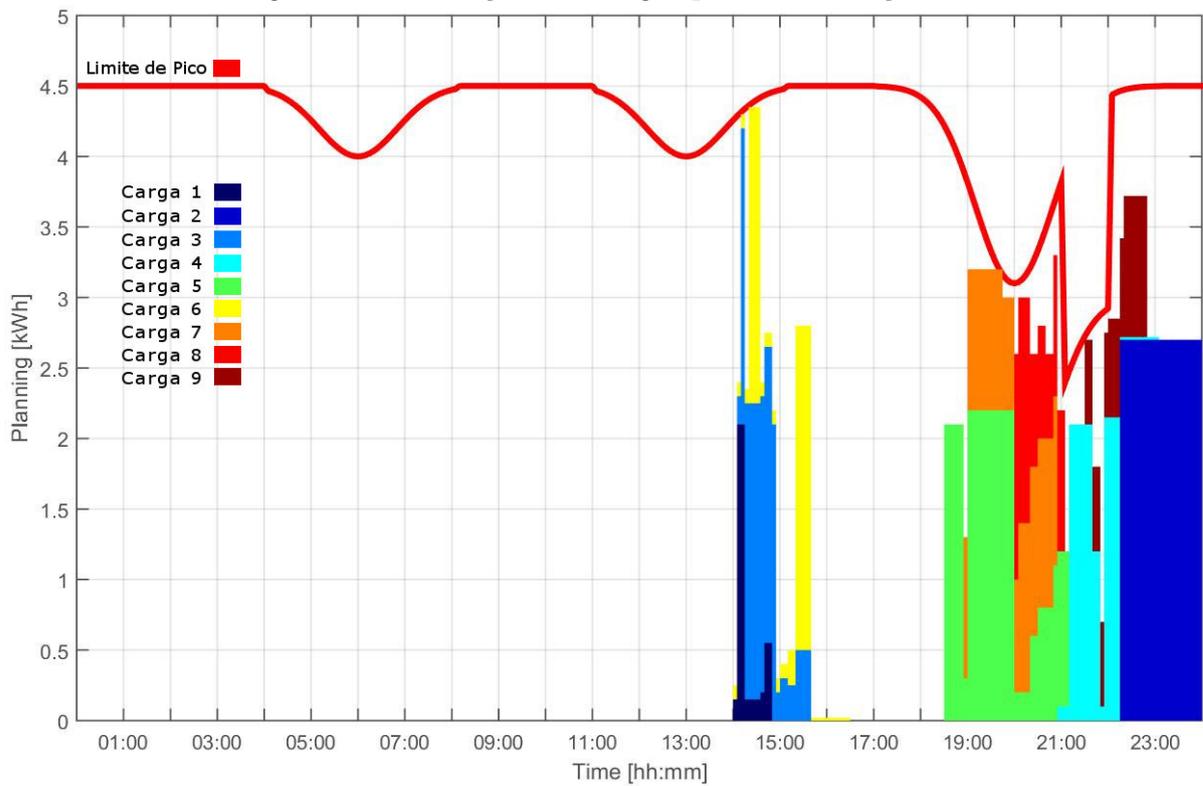
A partir dos resultados apresentados na Tabela 12, pode-se observar que o custo total mínimo das simulações foi de €241,55 quando o controlador utilizou apenas a função-objetivo de custo energético e o custo total máximo foi de €253,09 na simulação

Figura 19 – Alocação das cargas para a Simulação 4.2.



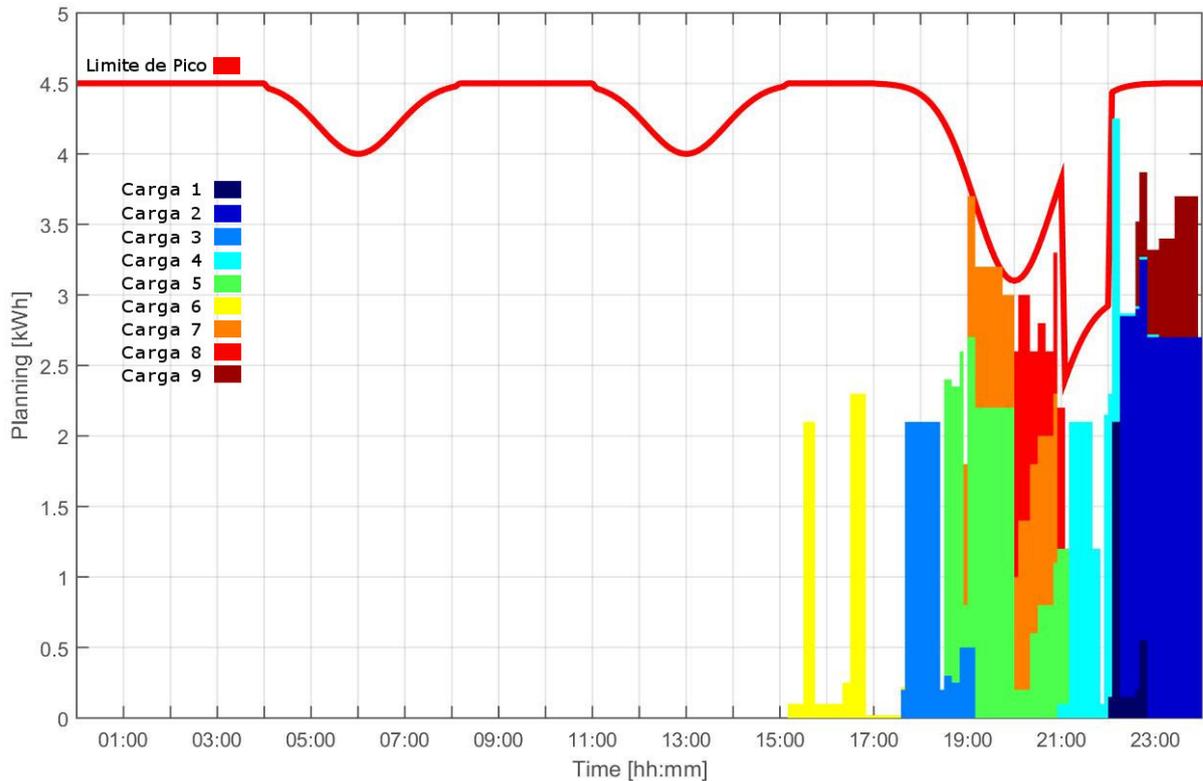
Fonte: O autor.

Figura 20 – Alocação das cargas para a Simulação 4.3.



Fonte: O autor.

Figura 21 – Alocação das cargas para a Simulação 4.4.



Fonte: O autor.

S4.1, que utilizou o menor valor para o peso da função-objetivo de custo energético. Uma variação aproximadamente 12 centavos, o que representa um acréscimo de menos de 5% em relação ao custo mínimo encontrado.

Analisando o conforto pode-se observar, novamente a partir dos dados da Tabela 12, que o valor mínimo e máximo para o *NGC* foram respectivamente 151,02 e 354,46. Uma variação de mais de 203, o que representa mais de 134% do valor mínimo encontrado para o *NGC*.

O tempo de execução das simulações deste cenário variaram diretamente com o valor do peso da função de custo energético ( $w_1$ ). O menor tempo de execução aconteceu quando foi utilizado o menor valor de  $w_1$  (0.3) e foi de pouco mais de 0,6 segundos. O maior tempo de execução aconteceu quando o controlador utilizou apenas a função-objetivo de custo energético. Este tempo foi maior que 3965 segundos, ou pouco mais de 1 hora e 5 minutos. Isto aconteceu porque a restrição de limite de pico foi acentuada no período de tarifa reduzida. Quando o conforto é utilizado pequenas otimizações no custo energético passam a apresentar ganhos menores do que o custo de conforto para deslocar as cargas. Assim, quando o conforto é utilizado o tempo de execução foi substancialmente diminuído.

## 4.2 Novo Cenário

Os cenários apresentados na seção anterior são bastante variados, apresentando situações com tarifas constantes, tarifas diferenciadas, conceitos de DSM com descontos promocionais e restrições quanto ao limite de pico. Entretanto é importante utilizar situações com maior aplicabilidade no curto e médio prazo para o cenário Nacional. Diante do exposto, decidiu-se em criar um novo cenário para realizar simulações.

### 4.2.1 Levantamento de Cargas

Para a execução deste novo cenário foi feito levantamento sobre o perfil de consumo de cargas reais. Este levantamento foi realizado através do monitoramento, utilizando medidor de energia apropriado, do consumo de diversas cargas em uma residência ao longo do tempo.

Na Tabela 14 são apresentados os dados obtidos no levantamento realizado. Os parâmetros de seleção do usuário para o conjunto de cargas está descrito na Tabela 15. O horário ideal de início de cada carga foi escolhido para garantir que o conforto máximo aconteça quando as cargas são iniciadas nos momentos de maior tarifa (posto horário ponta), fazendo com que os dois objetivos do controlador sejam conflitantes durante as simulações.

Tabela 14 – Características das cargas levantadas.

Carga	Descrição	N. de Etapas	$\Delta t$ (min)	$\bar{P}[kW]$	$\hat{P}[kW]$	$C_L$
Carga 1	Ferro de Engomar	1	[120]	[1]	[1.2]	0.1
Carga 2	Ar-condicionado I	2	[10,65]	[1.3,1.3]	[1.7,1.3]	0.5
Carga 3	Maq. de Lavar	6	[10,10,5,5,15,10]	[0.13,0.51,0.3,0.26,0.15,0.22]	[0.7,0.51,0.3,0.26,0.15,0.3]	0.2
Carga 4	Ar-condicionado II	2	[55,20]	[2,2]	[2.1,2]	0.8
Carga 5	Ar-condicionado III	1	[360]	[1.1]	[1.2]	0.7
Carga 6	Ar-condicionado IV	1	[45]	[0.9]	[1.1]	0.7
Carga 7	Bomba recalque	1	[40]	[0.368]	[1.1]	0.1
Carga 8	Bomba filtro	1	[120]	[0.736]	[1.472]	0.1
Carga 9	Iluminação Jardim	1	[660]	[0.3]	[0.3]	0.2

### 4.2.2 Cenário 5 - Tarifa Branca

A tarifa utilizada segue a legislação brasileira da tarifa branca, possuindo três postos horários distintos, como segue:

Tabela 15 – Parâmetros do usuários referentes às cargas reais.

Carga	Horário ideal de início	Horário mínimo de início	Horário máximo de término	$C_L$
Ferro de Engomar	19:30	13:00	23:59	0.1
Ar-condicionado I	19:30	13:00	23:59	0.5
Maq. de Lavar	19:30	13:00	23:59	0.2
Ar-condicionado II	19:30	13:00	23:59	0.8
Ar-condicionado III	19:30	13:00	23:59	0.7
Ar-condicionado IV	19:30	13:00	23:59	0.7
Bomba recalque	19:30	13:00	23:59	0.1
Bomba filtro	19:30	13:00	23:59	0.1
Iluminação Jardim	19:30	13:00	23:59	0.2

- Tarifa Fora-Ponta das 00h00 as 17h00 (Valor de 30 centavos / kWh);
- Tarifa Intermediária das 17h00 as 18h00 (Valor 40 de centavos / kWh);
- Tarifa Ponta das 18h00 as 21h00 (Valor de 60 centavos / kWh);
- Tarifa Intermediária das 21h00 as 22h00 (Valor 40 de centavos / kWh);
- Tarifa Fora-Ponta das 22h00 as 00h00 (Valor de 30 centavos / kWh).

Este cenário foi simulado quatro vezes com diferentes valores de  $w_1$  e  $w_2$ . O custo total e o  $NGC$  para cada solução encontrada estão descritos na Tabela 16. Nas Figuras 22, 23, 24 e 25 são apresentados os resultados para cada execução da simulação para os respectivos valores de  $w_1$  e  $w_2$ . Na Tabela 17 é apresentado, para cada solução, a hora de início de cada carga.

Tabela 16 – Resultados do Cenário 5.

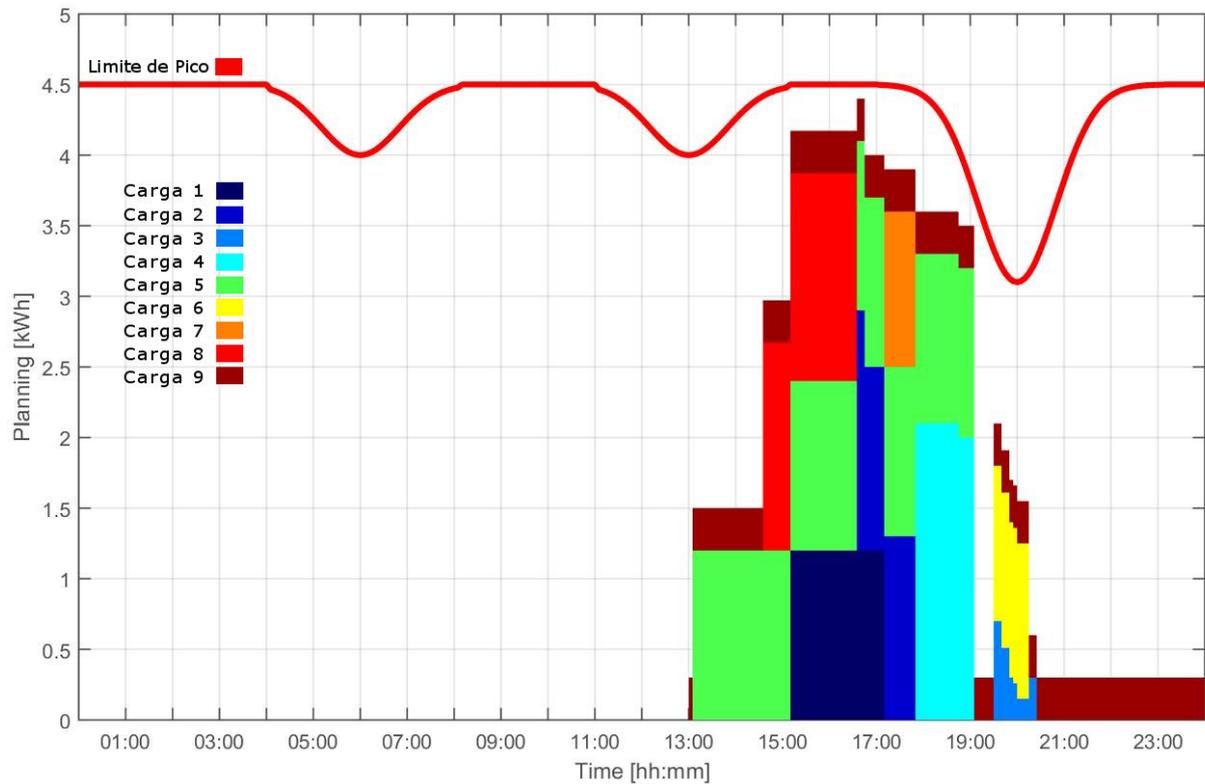
Simulação	$w_1$	$w_2$	Custo Total (¢)	$NGC$	Tempo de Execução (s)
S5.1	0.3	0.7	662.91	34.38	0.41
S5.2	0.5	0.5	623.66	41.82	0.16
S5.3	0.7	0.3	615.68	44.62	0.36
S5.4	1	0	608.52	63.00	0.25

A partir dos resultados apresentados na Tabela 16 pode-se observar que o custo total mínimo das simulações foi de 608.52 centavos quando o controlador utilizou apenas a função-objetivo de custo energético e o custo total máximo foi de 662.91 centavos na simulação S5.1, que utilizou o menor valor para o peso da função-objetivo de custo energético. Uma variação aproximadamente 54.4 centavos, o que representa um acréscimo

Tabela 17 – Horário de Início das Cargas do Cenário 5.

Horário	Carga 1	Carga 2	Carga 3	Carga 4	Carga 5	Carga 6	Carga 7	Carga 8	Carga 9
Ideal	19:30	19:30	19:30	19:30	19:30	19:30	19:30	19:30	19:30
Escolhido S5.1	15:10	16:35	19:30	17:50	13:05	19:30	17:10	14:35	13:00
Escolhido S5.2	14:50	22:45	17:35	16:50	13:00	18:20	18:25	14:50	13:00
Escolhido S5.3	14:50	15:35	17:10	16:50	13:00	18:20	23:05	13:35	13:00
Escolhido S5.4	15:50	14:25	16:50	13:10	13:00	23:15	23:20	14:40	13:00

Figura 22 – Alocação das cargas para a Simulação 5.1.



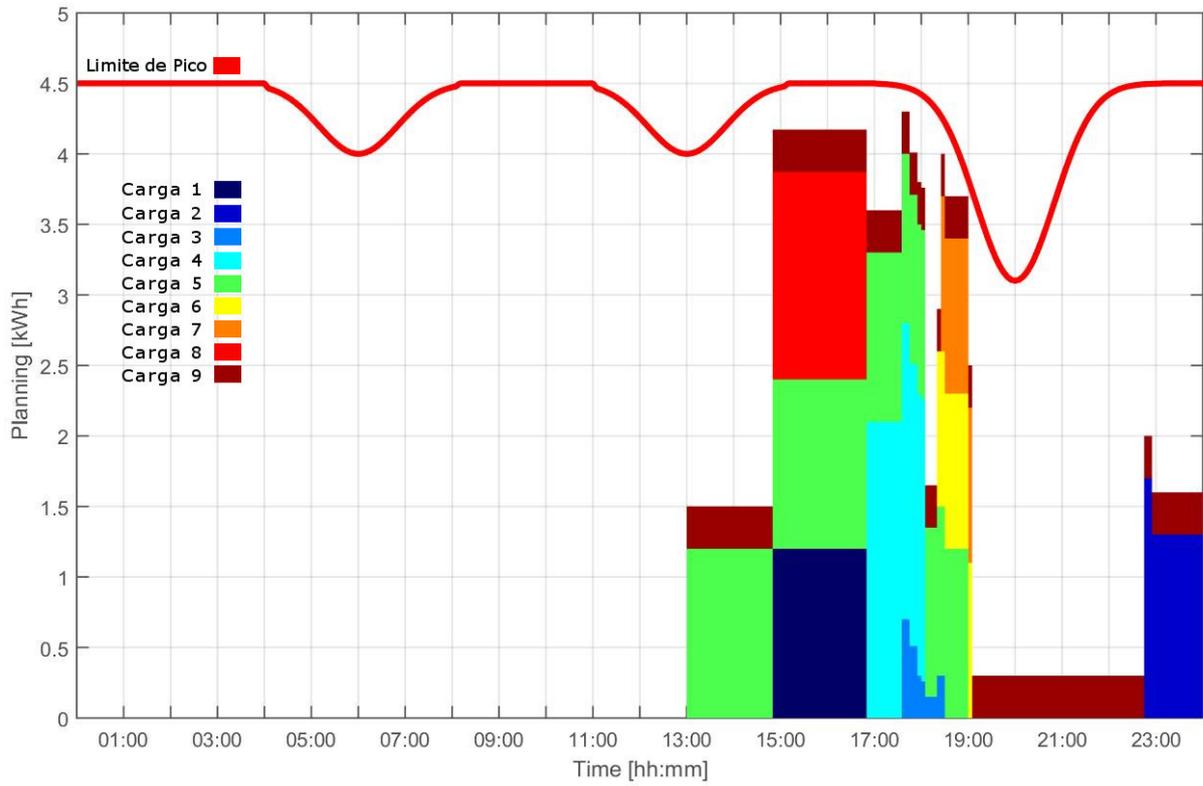
Fonte: O autor.

de menos de 8.94% em relação ao custo mínimo encontrado.

Analisando o conforto pode-se observar, novamente a partir dos dados da Tabela 16, que o valor mínimo e máximo para o *NGC* foram respectivamente 34.38 e 63.00. Uma variação de mais de 28, o que representa mais de 83% do valor mínimo encontrado para o *NGC*.

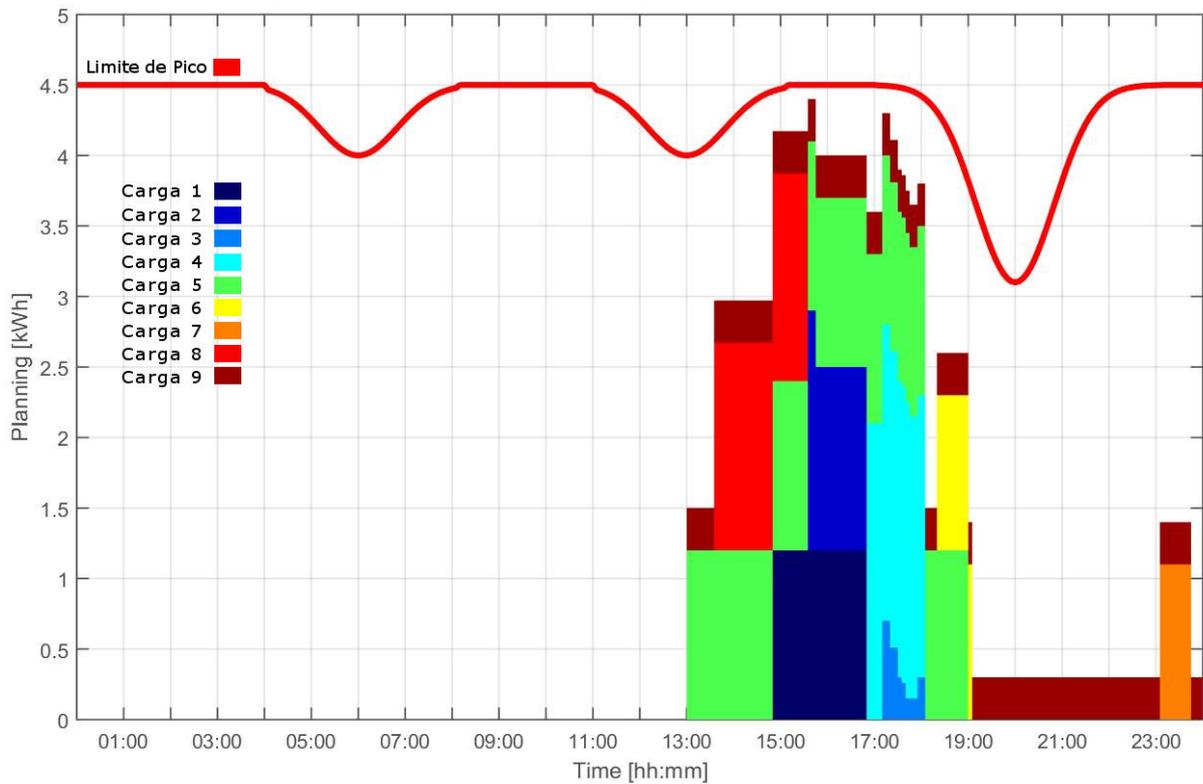
O menor tempo de execução aconteceu na simulação S5.2, quando o  $w_1$  utilizado possuía valor (0.5) e foi de 0,16 segundos. O maior tempo de execução aconteceu quando o controlador utilizou o menor peso para a função-objetivo de custo energético. Este tempo foi de 0.41 segundos. Pode-se observar, portanto, que não houve relação direta com os valores escolhidos de  $w_1$  e  $w_2$  e o tempo para encontrar a solução do problema.

Figura 23 – Alocação das cargas para a Simulação 5.2.



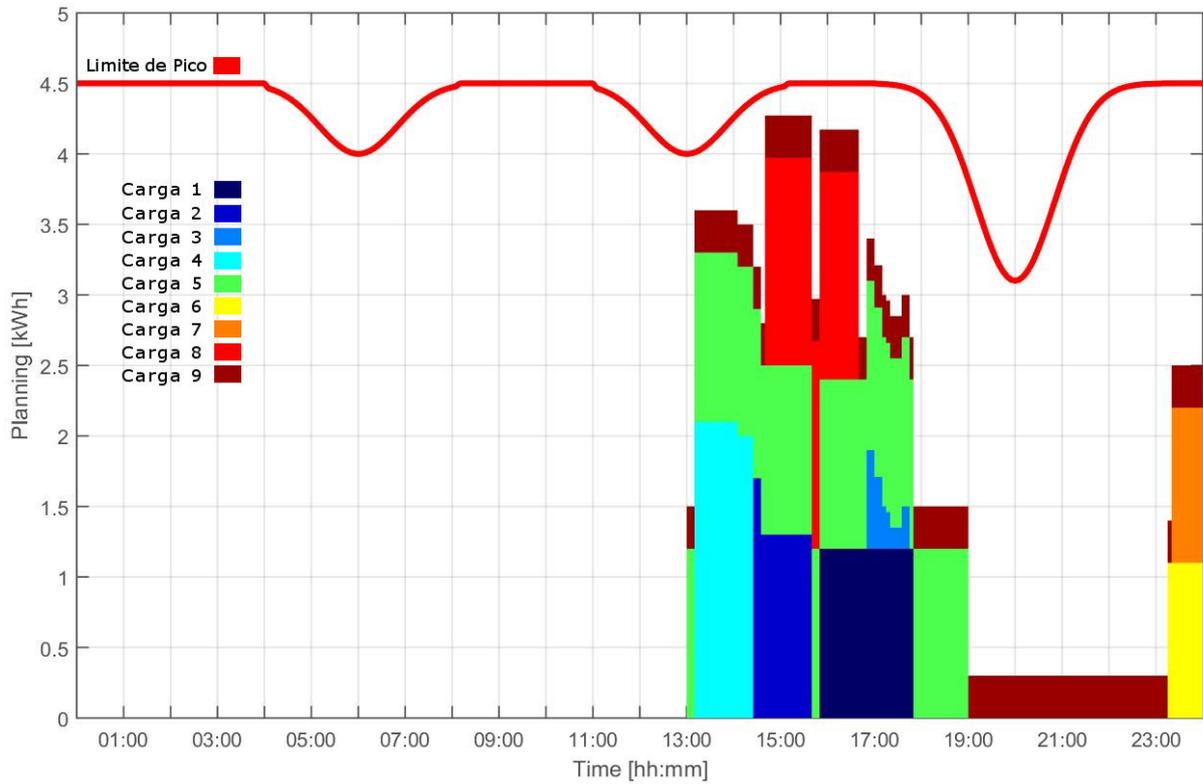
Fonte: O autor.

Figura 24 – Alocação das cargas para a Simulação 5.3.



Fonte: O autor.

Figura 25 – Alocação das cargas para a Simulação 5.4.



Fonte: O autor.

Os resultados desta simulação foram parecidos com os obtidos nos cenários anteriores, no que se refere ao fato do controlador utilizando apenas custo energético propiciar um grande desconforto, em relação aos ganhos econômicos obtidos. Quando o controlador realiza a otimização levando em consideração apenas a função-objetivo de custo energético pode-se observar um grande desvio, no tempo de início, das cargas que possuem maior impacto no conforto do usuário, que no caso desta simulação são as cargas 4, 5 e 6, que representam ar-condicionados.

## 5 CONCLUSÕES

Partindo dos objetivos do trabalho que, de forma resumida, tratavam-se de: levantar o estado da arte sobre estratégias de otimização de consumo energético e conforto, propor um modelo de otimização que traga melhorias em relação aos modelos estudados, validar o modelo proposto através de simulações, realizar análises comparativas do modelo proposto com os estudados e propor uma arquitetura para que tal modelo possa ser implementado na prática, pode-se chegar nas seguintes conclusões.

Com o estudo realizado sobre os trabalhos relacionados foi possível levantar o estado da arte sobre métodos de otimização do consumo de energia elétrica e do conforto dos usuários. Foi possível observar diversas oportunidades de pesquisa, como descrito no Capítulo 2. Com base nas oportunidades levantadas, decidiu-se partir do modelo apresentado por Di Giorgio e Pimpinella (2013) utilizando-o como base e propor melhorias ao mesmo.

Foi mostrado como pode-se obter o nível global de conforto de uma solução, utilizando conceitos de desvio-padrão sobre o horário de início ideal de cada carga, selecionado pelo usuário, e o horário de início selecionado pelo controlador, levando em consideração que cargas diferentes possuem níveis de conforto distintos.

O nível global de conforto (NGC) apresentado foi útil para realizar comparações qualitativas, do ponto de vista do conforto, para diferentes soluções de um mesmo cenário. Baseado neste conceito foi proposta uma nova função-objetivo ao controlador estudado, de forma que o NGC possa ser otimizado, encontrando-se a solução ótima para o conforto do usuário. Foram introduzidas ao problema as variáveis de tempo de início ideal e nível de conforto de cada carga.

Objetivando-se encontrar uma solução que leve em consideração a nova função-objetivo proposta em conjunto com os custos energéticos foi proposto o modelo matemático de um controlador multi-objetivo que realiza a otimização da combinação linear das duas funções-objetivo conflitantes: a minimização dos custos energéticos e a maximização do conforto do usuário. Foram introduzidas ao problema as variáveis de pesos das funções-objetivo que determinam a relevância de cada um dos objetivos de otimização do controlador.

Foram realizadas diversas simulações em cenários distintos objetivando-se validar o modelo proposto frente ao modelo de controlador usado como base. Nas simulações

realizadas observou-se que a introdução da função-objetivo do conforto trouxe benefícios aos cenários estudados.

No ambiente residencial mais comum no Brasil atualmente, que utiliza tarifa constante durante todo o dia, mostrou-se que a introdução do conforto trás grandes benefícios ao garantir que, dentre as soluções realizáveis, o controlador sempre escolherá aquela que maximiza o conforto do usuário sem trazer quaisquer malefícios ao custo energético total. Contudo, neste tipo de cenário, foi observado um aumento no tempo de execução dos algoritmos de otimização, sendo importante salientar que os valores dos tempos de execução mantiveram-se razoáveis para o tipo de aplicação do controlador, uma vez que o tempo máximo neste tipo de cenário foi de menos de um minuto.

Em cenários com tarifas variáveis, foi mostrado que as soluções encontradas com a utilização do controlador apenas com o objetivo de otimização do custo energético podem afetar de forma severa os níveis de conforto do usuário em troca de um ganho muito pequeno para os custos tarifários totais. Mais apropriado é utilizar uma estratégia, como a descrita neste trabalho, que leve em consideração a otimização do conforto de forma que encontre-se um ponto de equilíbrio onde os custos energéticos são pouco afetados, mas há grandes benefícios ao conforto do usuário. As simulações realizadas sobre os cenários apresentados sugerem que o peso da função-objetivo do conforto deva ser consideravelmente menor do que o peso da função custo para que se encontre este ponto de equilíbrio, embora sejam necessários estudos adicionais sobre este tema.

As simulações realizadas também demonstraram que o controlador proposto pode se beneficiar de futuros avanços nas redes de energia elétrica, utilizando os conceitos de redes inteligentes e *demand side management* para proporcionar ganhos tanto aos consumidores como às distribuidoras de energia elétrica.

Um cenário adicional foi criado com o intuito de simular a execução do controlador em um ambiente real. Para este cenário foi realizado o levantamento do perfil de consumo de cargas reais em uma residência, através do monitoramento do consumo, utilizando para isto um medidor de energia apropriado. Os dados obtidos foram inseridos no modelo proposto em um ambiente seguindo a legislação brasileira de tarifa branca. As simulações sobre este cenário mostraram que o controlado pode ter efeitos práticos mesmo sobre cenários nacionais de curto a médio prazo.

Afim de realizar aplicação prática do modelo matemático do controlador foi

proposta uma arquitetura para o mesmo, levando em consideração não somente a comunicação com a rede inteligente de energia elétrica, medidores inteligentes e sistemas de automação residenciais, mas também os conceitos de micro geração e geração distribuída. Esta proposta de arquitetura não chegou a ser implementada na prática. Seu projeto é apresentado de forma resumida no Apêndice A deste trabalho.

### 5.1 Direcionamento para Pesquisas Futuras

Em trabalhos futuros espera-se que as oportunidades de pesquisa observadas mas que não foram atendidas completamente por este trabalho possam ser realizadas.

Espera-se que o controlador possa ser implementado fisicamente e ser utilizado em ambientes reais como mais uma forma de validação de seu modelo e para o levantamento de possíveis problemas ou oportunidades de melhoria que só podem ser observadas com a implementação real do controlador.

O modelo atual leva em consideração o limite de pico como uma restrição do problema, o que significa que o modelo atual poderia ser utilizado em ambientes industriais, que são taxados pela demanda máxima, para encontrar a melhor solução do ponto de vista do conforto que não ultrapasse os limites de pico contratados pelo usuário. Em outras palavras o modelo atual pode ser utilizado para encontrar o limite mínimo de pico de forma iterativa, executando os algoritmos de otimização para diferentes valores de restrição de pico até que se encontre um valor mínimo. Uma clara oportunidade de melhoria para o modelo de controlador apresentado é a sua adaptação para utilização em ambientes industriais. Para tanto, é necessário que o controlador passe a ter como função-objetivo a minimização do consumo de pico do conjunto de cargas, em vez de utilizar esta variável como restrição do problema.

É importante salientar também que os custos associados ao consumo de energia reativa das cargas, isto é, o fato dos clientes industriais serem taxados pelo excesso de consumo reativo, quando o fator de potência cai abaixo do limite estabelecido pela legislação, não são levados em consideração no modelo apresentado. Isto significa dizer que ao se utilizar o modelo proposto em ambientes industriais há o risco do controlador alocar as cargas de forma que haja excesso de consumo reativo e conseqüentemente taxações para os clientes. Para aplicações industriais o ideal é que o controlador fosse capaz de otimizar a demanda máxima contratada, levando em consideração também o consumo reativo das

cargas.

Uma limitação do trabalho apresentado é que a combinação linear das funções-objetivo é um método pobre para a obtenção de de uma solução multi-objetivo. Uma oportunidade de melhoria observada para pesquisas futuras é utilização de outras técnicas de otimização, principalmente que permitam a realização da combinação das duas funções-objetivo descritas de forma mais rica. Como exemplo de técnicas pode-se citar a utilização do conceito de curva de Pareto e Algoritmos Genéticos.

## REFERÊNCIAS

- ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica no Brasil 3a Edição**. 2008. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas\\_par1\\_cap2.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par1_cap2.pdf)>.
- ANEEL. **Resolução Normativa Nº 414/2010**. 2010. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/REN\\_414\\_2010\\_atual\\_REN\\_499\\_2012.pdf](http://www2.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/REN_414_2010_atual_REN_499_2012.pdf)>.
- ANEEL. **Tarifa Branca**. 2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/tarifa-branca>>.
- BEGOVIC, M. Smart homes energy and technology fuse together. **IEEE power & energy magazine**, 2013.
- BEZERRA, J. R.; BARROSO, G. C.; LEÃO, R. P. S.; SAMPAIO, R. F.; MEDEIROS, E. B. Power distribution network planning application based on multi-objective binary particle swarm optimization algorithm. 2013.
- CARREIRO, A. Energy smart house architecture for a smart grid energy box system solution proposal. **Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra**, 2011.
- CEMIG. **MODULAÇÃO DE CARGA**. 2016. Disponível em: <[http://www.cemig.com.br/pt-br/a\\_cemig/nossos\\_negocios/Paginas/modulacao\\_carga.aspx](http://www.cemig.com.br/pt-br/a_cemig/nossos_negocios/Paginas/modulacao_carga.aspx)>.
- CHOI, J.; SHIN, D. Research and implementation of the context-aware middleware for controlling home appliances. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, 2005.
- CORNO, F.; RAZZAK, F. Intelligent energy optimization for user intelligible goals in smart home environments. **IEEE Transactions on smart grid**, 2012.
- ELETROBRAS. **Eletrobras Distribuição Piauí assina contrato para implantar smart grid**. 2015. Disponível em: <<http://www.eletraspiaui.com/materia.php?id=1015>>.
- EPE. **Previsões de carga para o Planejamento Anual da Operação Energética 2016 - 2020**. 2016. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/Boletim%20Tecnico%20ONS-EPE%20-%20Planejamento%20Anual%20ciclo%20202016-2020.pdf>>.
- EXAME. **AES Eletropaulo investe R\$29 mi em projeto de smart grid**. 2014. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/tecnologia/noticias/aes-eletropaulo-investe-r-29-mi-em-projeto-de-smart-grid>>.
- FIGUEIREDO, M.; RIBEIRO, B.; ALMEIDA, A. Electrical signal source separation via nonnegative tensor factorization using on site measurements in a smart home. **IEEE transactions on instrumentation and measurement**, 2014.
- FITZPATRICK, G.; SMITH, G. Proactive fuzzy control and adaptation methods for smart homes. **IEEE Pervasive Computing**, 2009.
- GELLINGS, C. W.; SAMOTYJ, M. Smart grid as advanced technology enabler of demand response. **Springer Science + Business Media Dordrecht**, 2013.

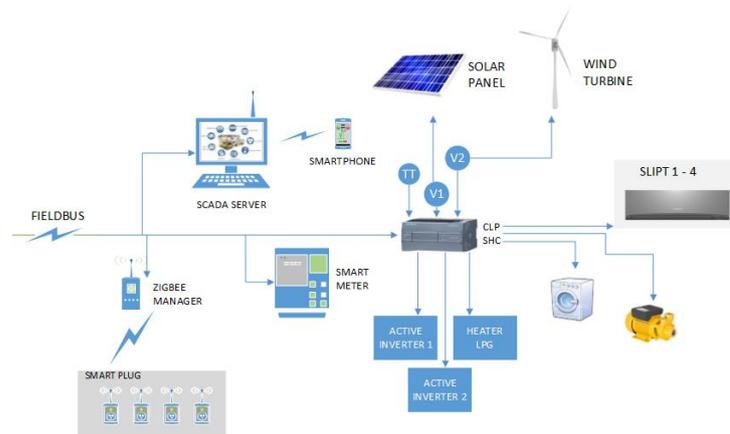
- GIORGIO, A. D.; PIMPINELLA. An event driven smart home controller enabling consumer economic saving and automated demand-side management. **Elsevier Applied Energy**, 2013.
- HAN, D. M.; LIM, J. H. Smart home energy management system using ieee 802.15.4 and zigbee. **IEEE Transactions**, 2010.
- HERNANDEZ, L.; BALADRÓN, C.; AGUIAR, J. A multi-agent system architecture for smart grid management and forecasting of energy demand in virtual power plants. **IEEE Communications Magazine**, 2013.
- HEYDT, G. T. The next generation of power distribution systems. smart gride. **IEEE Transactions**, 2010.
- HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introduction to Operations Research**. 7. ed. [S.l.: s.n.], 2001.
- JACKSON. Improving energy efficiency and smart grid program analysis with agent-based end-use forecasting models. **Texas A&M University**, 2010.
- KOFLER, M. J.; REINISCH, C.; KASTNER, W. A semantic representation of energy-related information in future smart homes. **University of Technology, Automation Systems Group, Vienna**, 2012.
- LI, T.; REN, J.; TANG, X. Secure wireless monitoring and control systems for smart grid and smart home. **IEEE Wireless Communications**, 2012.
- MOMOH, J. A. Electric power distribution, automation, protection and control. **CRC Press**, 2008.
- PANNA, R.; THESRUMLUK, R.; CHANTRAPORNCHAI, C. Development of energy saving smart home prototype. **International Journal of Smart Home**, 2013.
- PASAND, S. M.; KAZEMI, L. M. S.; FIRUZABAD, F. Impacts of automatic control systems of loop restoration scheme on the distribution system reliability. generation, transmission distribution. **IET**, 2009.
- Redes Inteligentes Brasil. **Cidade Inteligente Aquiraz**. 2016. Disponível em: <<http://redesinteligentesbrasil.org.br/cidade-inteligente-aquiraz.html>>.
- SON, Y. S.; KO, Y. B. Design and implementation of intelligent home control systems based on active sensor networks. **IEEE Transactions**, 2008.
- SUH, C.; KOY, Y. B. Design and implementation of intelligent home control systems based on active sensor networks. **IEEE Transactions**, 2008.
- VAINIO, A.-M.; VALTONEN, M.; VANHALA, J. Proactive fuzzy control and adaptation methods for smart homes. **IEEE Intelligent Systems**, 2008.
- WIKIMEDIA. 2014. Disponível em: <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Elongated\\_pentagonal\\_orthocupolarotunda.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Elongated_pentagonal_orthocupolarotunda.png)>.
- WINSTON, W. L. **Operations Research: Applications and Algorithms**. 4. ed. [S.l.: s.n.], 2003.

## APÊNDICE A – PROPOSTA DE ARQUITETURA DA SOLUÇÃO

A arquitetura do sistema proposto neste trabalho é mostrada na Figura 26, em que pode ser visto que o controlador da casa inteligente principal é baseado em um CLP (controlador lógico programável), que é responsável pela gerência de todas as cargas, comunicação com o medidor inteligente (SM) e integração com os níveis mais altos da rede. Utilizando uma rede de comunicação (*fieldbus*) o SHC realiza as seguintes tarefas:

- comunicar-se com as tomadas inteligentes (smart plugs) através do coordenador de rede zigbee (zigbee manager), para ler o consumo de energia e controlar o status de funcionamento de algumas cargas;
- ler o medidor de energia inteligente (SM);
- receber do programa aplicativo de supervisão as definições de programação de funcionamento das cargas;
- controlar o funcionamento dos microgeradores (MGs);;
- habilitar o funcionamento de outras cargas (equipamentos de refrigeração, bombas da piscina, etc.);
- habilitar o funcionamento do sistema de aquecimento por aquecedor de passagem a gás (GLP – gás de petróleo liquefeito).

Figura 26 – arquitetura do sistema proposto.

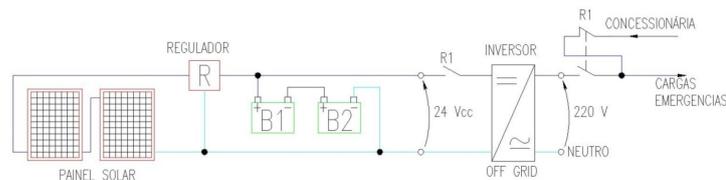


Fonte: O autor

A partir das informações obtidas através da leitura dos dispositivos conectados ao sistema de energia da residência e das predefinições feitas pelo programa de gerência, aplicativo de supervisão baseado em um sistema SCADA (supervisory control and data acquisition), o SHC executa seu programa de controle para alcançar os objetivos definidos

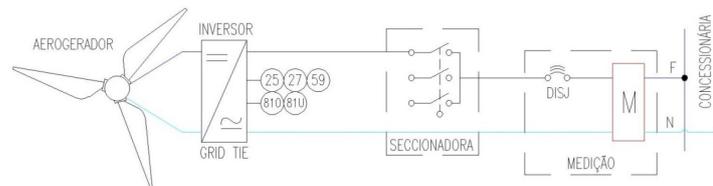
pela função objetivo. No sistema do SG proposto possui duas unidades de microgeração, uma constituída de painéis solares com unidades de armazenamento de energia (baterias) e com inversor do tipo OFF GRID (Figura 27) e aerogerador de baixa potência ligado a um inversor tipo GRID TIE (Figura 28). Estas soluções estão de acordo com a Resolução Normativa N<sup>o</sup> 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e Normas da concessionária local NT-010 (COELCE, 2012).

Figura 27 – microgeração solar com armazenamento e inversor OFF GRID.



Fonte: O autor

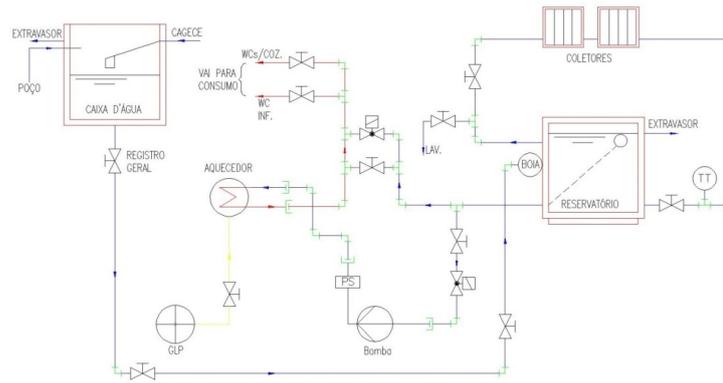
Figura 28 – aerogerador ligado a um inversor tipo GRID TIE.



Fonte: O autor

Na Figura 29 é mostrado o diagrama do sistema hidráulico para aquecimento de água para os banheiros e cozinha baseado em coletores solares, No caso de passar um período maior sem a incidência solar, o sistema de aquecimento baseado em aquecedor de passagem a gás (GLP – gás de petróleo liquefeito) é acionado. Em último caso é que será utilizado um aquecedor elétrico de baixa eficiência do tipo comercial que utiliza resistências elétricas para o aquecimento da água. Este tipo de aquecedor é considerado o maior vilão de todos os sistemas de controle de demanda em sistemas residenciais.

Figura 29 – diagrama do sistema hidráulico para aquecimento de água.



Fonte: O autor

**APÊNDICE B – SCRIPTS MATLAB**

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Universidade Federal do Ceará
% Mestrado em Engenharia de Teleinformática
% Autor: Paulo de Tarso Facó Bezerra Filho
% Orientador: Prof. Dr. Giovanni Cordeiro Barroso
% Coorientador: Prof. Dr. Bruno de Athayde Prata
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% HISTÓRICO
% Versão Autor Comentários
% 1.0 Paulo Facó Primeira versão
% 2.0 Paulo Facó - Permite otimização de:
% - Custo + Conforto (Combinação linear)
% - Salva resultados das simulações em
% C:\shc\result\
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Baseado no artigo "An event driven Smart Home Controller enabling
% consumer economic saving and automated Demand Side Management"
% Autores: Alessandro Di Giorgio e Laura Pimpinella
%
% Este script modela o comportamento de um Smart Home Controller (SHC)
% baseado em eventos. O objetivo do controlador é minimizar os custos
% de energia, respeitando o limite de pico.
%
% O controlador escolhe o tempo de inicio de execução das smart home
% appliance de forma a minimizar o custo do consumo e para manter o
% consumo de pico abaixo do limite.
%
% Cargas monitoraveis e detectaveis são modeladas através de distribuição
% normal e tem impacto no consumo de pico.
%
% A função cplexbilp é utilizada para solução do problema de otimização.
% bilp = binary integer linear problem
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% CONFIGURAÇÃO
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
MINUTS_IN_ONE_DAY = (60*24);
```

```
SAMPLE_INTERVAL = 5; % 5 Minutos

ONE_HOUR_IN_SAMPLES = (60/SAMPLE_INTERVAL); % 1 Hora em Amostas

N_SAMPLES = (MINUTS_IN_ONE_DAY / SAMPLE_INTERVAL); % Amostras em 1 dia

FIRST_SAMPLE = 1;
LAST_SAMPLE = N_SAMPLES;
```

```
% Define qual simulação será executada
%
% 1 = Tarifa constante durante todo o dia.
```

```

% Controle de pico.
%
% 2 = Tarifa com ponta / fora ponta
% Minimização de custos e controle de pico
%
% 3 = Tarifa com ponta / fora ponta / DSM (Demanda Side Management)
% Simula uma mensagem da concessionária de energia informando sobre
% tarifa com desconto entre as 16:00 e 18:00
%
% 4 = Tarifa com ponta / fora ponta / Pico reduzido
% Simula uma mensagem da concessionária de energia reduzindo o limite
% de pico das 21:00 as 22:00 dos 4.5kWh padrão para 3kWh
%
% 5 = Tarifa Branca e Cargas Reais
% Simula situação de carga branca com cargas reais

SIMULATION = 5;
N_SIMULATIONS = 5;

% Define o valor do alfa (w1)
%
% Consumo (FX) | Conforto (GX)
%
% f = (alfa)*FX + (1-alfa)*GX
%
ALFA = 0.3;

SIMUL_TEXT = 'C:\shc\result\result.txt';

SIMUL_FIG = 'C:\shc\result\result.jpg';

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% CARGAS - DI GIORGIO & PIMPINELLA
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if SIMULATION < 5 % simulation 1 a 5 utiliza este conjunto de cargas

N_LOADS = 9; % Numero de cargas

% Numero de fases de cada carga
N_PHASES = [ 6, ... % Carga 1
             1, ... % Carga 2
             7, ... % Carga 3
             6, ... % Carga 4
             8, ... % Carga 5
             6, ... % Carga 6
             3, ... % Carga 7
             4, ... % Carga 8
             3 ]; % Carga 9

COLOR = [ [0 0 0.4]; ... azul escuro % Carga 1
          [0 0 0.8]; ... azul medio % Carga 2
          [0 0.5 1]; ... azul claro % Carga 3
          [0 1 1]; ... ciano % Carga 4

```

```

[0.3 1 0.3]; ... verde % Carga 5
[1 1 0]; ... amarelo % Carga 6
[1 0.5 0]; ... laranja % Carga 7
[1 0 0]; ... vermelho % Carga 8
[0.6 0 0] ]; % vermelho escuro % Carga 9

```

% Amostra associada ao tempo minimo de inicio da carga

```

MIN_TIME = [ ...
14*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 1
14*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 2
14*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 3
14*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 4
14*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 5
14*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 6
14*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 7
14*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 8
14*ONE_HOUR_IN_SAMPLES ]; % Carga 9

```

% Amostra associada ao tempo minimo de inicio da carga

```

BEST_TIME = [ ...
14*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 1
14*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 2
14*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 3
14*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 4
14*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 5
14*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 6
14*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 7
14*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 8
14*ONE_HOUR_IN_SAMPLES ]; % Carga 9

```

% Amostra associada ao tempo máximo de término

```

MAX_TIME = [ ...
24*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 1
24*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 2
24*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 3
24*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 4
24*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 5
24*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 6
24*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 7
24*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 8
24*ONE_HOUR_IN_SAMPLES ]; % Carga 9

```

% Duração de cada fase de cada carga (em minutos)

```

PHASE_DURATION = [...
5, 10, 15, 5, 5, 10, 0, 0; ... % Carga 1
105, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0; ... % Carga 2
5, 25, 20, 5, 10, 10, 20, 0; ... % Carga 3
15, 30, 10, 5, 20, 50, 0, 0; ... % Carga 4
25, 5, 60, 20, 10, 10, 10, 20; ... % Carga 5
20, 15, 35, 10, 20, 50, 0, 0; ... % Carga 6
50, 20, 50, 0, 0, 0, 0, 0; ... % Carga 7
20, 20, 10, 15, 0, 0, 0, 0; ... % Carga 8
30, 20, 30, 0, 0, 0, 0, 0]; % Carga R

```

% Duração total da carga em numero de amostras

```

DURATION = [...
    sum(PHASE_DURATION(1,:))/SAMPLE_INTERVAL, ... % Carga 1
    sum(PHASE_DURATION(2,:))/SAMPLE_INTERVAL, ... % Carga 2
    sum(PHASE_DURATION(3,:))/SAMPLE_INTERVAL, ... % Carga 3
    sum(PHASE_DURATION(4,:))/SAMPLE_INTERVAL, ... % Carga 4
    sum(PHASE_DURATION(5,:))/SAMPLE_INTERVAL, ... % Carga 5
    sum(PHASE_DURATION(6,:))/SAMPLE_INTERVAL, ... % Carga 6
    sum(PHASE_DURATION(7,:))/SAMPLE_INTERVAL, ... % Carga 7
    sum(PHASE_DURATION(8,:))/SAMPLE_INTERVAL, ... % Carga 8
    sum(PHASE_DURATION(9,:))/SAMPLE_INTERVAL]; ... % Carga 9

% Potencia media para cada fase de cada carga
AVG_POWER = [...
    0.02, 1.96, 0.02, 0.02, 0.02, 0.05, 0, 0; ... % Carga 1
    2.36, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0; ... % Carga 2
    0.04, 1.99, 0.28, 0.06, 0.06, 0.06, 0.08, 0; ... % Carga 3
    0.07, 1.40, 0.10, 0.07, 2.02, 0.01, 0, 0; ... % Carga 4
    0.27, 0.05, 2.10, 0.11, 0.11, 0.10, 0.10, 0.26; ... % Carga 5
    0.07, 2.00, 0.07, 1.80, 0.01, 0, 0, 0; ... % Carga 6
    0.80, 0.50, 1.00, 0, 0, 0, 0, 0; ... % Carga 7
    1.40, 0.50, 0.60, 1.00, 0, 0, 0, 0; ... % Carga 8
    0.60, 0.70, 1.00, 0, 0, 0, 0, 0]; ... % Carga 9

% Potencia de pico para cada fase de cada carga
PEAK_POWER = [...
    0.15, 2.10, 0.15, 0.15, 0.20, 0.55, 0, 0; ... % Carga 1
    2.70, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0; ... % Carga 2
    0.20, 2.10, 2.10, 0.20, 0.30, 0.25, 0.50, 0; ... % Carga 3
    0.10, 2.10, 1.20, 0.10, 2.15, 0.02, 0, 0; ... % Carga 4
    2.10, 0.30, 2.20, 0.20, 0.60, 0.80, 0.80, 1.10; ... % Carga 5
    0.10, 2.10, 0.10, 0.25, 2.30, 0.02, 0, 0; ... % Carga 6
    1.00, 0.80, 1.20, 0, 0, 0, 0, 0; ... % Carga 7
    1.60, 0.80, 0.60, 1.00, 0, 0, 0, 0; ... % Carga 8
    0.60, 0.70, 1.00, 0, 0, 0, 0, 0]; ... % Carga 9

% Conforto associado a cada carga valor: 0 a 100
COMFORT_LEVEL = [...
    1.0, ... % Carga 1
    0.9, ... % Carga 2
    0.8, ... % Carga 3
    0.7, ... % Carga 4
    0.6, ... % Carga 5
    0.5, ... % Carga 6
    0.4, ... % Carga 7
    0.3, ... % Carga 8
    0.2]; ... % Carga 9

% Nome das cargas
LOAD_NAMES = {
    'Carga 1' ...
    'Carga 2' ...
    'Carga 3' ...
    'Carga 4' ...
    'Carga 5' ...
    'Carga 6' ...

```

```
'Carga 7' ...
'Carga 8' ...
'Carga 9' ...
};
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% CARGAS REAIS
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
else % simulation 5 utiliza este conjunto de cargas
```

```
N_LOADS = 9; % Numero de cargas
```

```
% Numero de fases de cada carga
```

```
N_PHASES = [ 1, ... % Carga 1
             2, ... % Carga 2
             6, ... % Carga 3
             2, ... % Carga 4
             1, ... % Carga 5
             1, ... % Carga 6
             1, ... % Carga 7
             1, ... % Carga 8
             1]; % Carga 9
```

```
COLOR = [ [0 0 0.4]; ... azul escuro % Carga 1
          [0 0 0.8]; ... azul medio % Carga 2
          [0 0.5 1]; ... azul claro % Carga 3
          [0 1 1]; ... ciano % Carga 4
          [0.3 1 0.3]; ... verde % Carga 5
          [1 1 0]; ... amarelo % Carga 6
          [1 0.5 0]; ... laranja % Carga 7
          [1 0 0]; ... vermelho % Carga 8
          [0.6 0 0] ]; ... vermelho escuro % Carga 9
```

```
% Amostra associada ao tempo minimo de inicio da carga
```

```
MIN_TIME = [ 13*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 1
            13*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 2
            13*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 3
            13*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 4
            13*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 5
            13*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 6
            13*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 7
            13*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 8
            13*ONE_HOUR_IN_SAMPLES ]; % Carga 9
```

```
% Amostra associada ao melhor tempo minimo de inicio da carga
```

```
BEST_TIME = [ 19.5*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 1
             19.5*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 2
             19.5*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 3
             19.5*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 4
             19.5*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 5
             19.5*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 6
             19.5*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 7
             19.5*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 8
             19.5*ONE_HOUR_IN_SAMPLES ]; % Carga 9
```

```
% Amostra associada ao tempo máximo de término
MAX_TIME = [ 24*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 1
             24*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 2
             24*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 3
             24*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 4
             24*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 5
             24*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 6
             24*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 7
             24*ONE_HOUR_IN_SAMPLES, ... % Carga 8
             24*ONE_HOUR_IN_SAMPLES ]; % Carga 9
```

```
% Duração de cada fase de cada carga (em minutos)
PHASE_DURATION = [ 120, 0, 0, 0, 0, 0; ... % Carga 1
                  10, 65, 0, 0, 0, 0; ... % Carga 2
                  10, 10, 5, 5, 15, 10; ... % Carga 3
                  55, 20, 0, 0, 0, 0; ... % Carga 4
                  360, 0, 0, 0, 0, 0; ... % Carga 5
                  45, 0, 0, 0, 0, 0; ... % Carga 6
                  40, 0, 0, 0, 0, 0; ... % Carga 7
                  120, 0, 0, 0, 0, 0; ... % Carga 8
                  660, 0, 0, 0, 0, 0]; % Carga 9
```

```
% Duração total da carga em numero de amostras
DURATION = [...
             sum(PHASE_DURATION(1,:))/SAMPLE_INTERVAL, ... % Carga 1
             sum(PHASE_DURATION(2,:))/SAMPLE_INTERVAL, ... % Carga 2
             sum(PHASE_DURATION(3,:))/SAMPLE_INTERVAL, ... % Carga 3
             sum(PHASE_DURATION(4,:))/SAMPLE_INTERVAL, ... % Carga 4
             sum(PHASE_DURATION(5,:))/SAMPLE_INTERVAL, ... % Carga 5
             sum(PHASE_DURATION(6,:))/SAMPLE_INTERVAL, ... % Carga 6
             sum(PHASE_DURATION(7,:))/SAMPLE_INTERVAL, ... % Carga 7
             sum(PHASE_DURATION(8,:))/SAMPLE_INTERVAL, ... % Carga 8
             sum(PHASE_DURATION(9,:))/SAMPLE_INTERVAL]; ... % Carga 9
```

```
% Potencia media para cada fase de cada carga
AVG_POWER = [...
             1, 0, 0, 0, 0, 0; ... % Carga 1
             1.3, 1.3, 0, 0, 0, 0; ... % Carga 2
             0.13, 0.51, 0.3, 0.26, 0.15, 0.22; ... % Carga 3
             2, 2, 0, 0, 0, 0; ... % Carga 4
             1.1, 0, 0, 0, 0, 0; ... % Carga 5
             0.9, 0, 0, 0, 0, 0; ... % Carga 6
             0.368, 0, 0, 0, 0, 0; ... % Carga 7
             0.736, 0, 0, 0, 0, 0; ... % Carga 8
             0.3, 0, 0, 0, 0, 0]; % Carga 9
```

```
% Potencia de pico para cada fase de cada carga
PEAK_POWER = [...
             1.2, 0, 0, 0, 0, 0; ... % Carga 1
             1.7, 1.3, 0, 0, 0, 0; ... % Carga 2
             0.7, 0.51, 0.3, 0.26, 0.15, 0.3; ... % Carga 3
             2.1, 2, 0, 0, 0, 0; ... % Carga 4
             1.2, 0, 0, 0, 0, 0; ... % Carga 5
             1.1, 0, 0, 0, 0, 0; ... % Carga 6
```

```

1.1 , 0 , 0 , 0 , 0 , 0; ... % Carga 7
1.472 , 0 , 0 , 0 , 0 , 0; ... % Carga 8
0.3 , 0 , 0 , 0 , 0 , 0]; % Carga 9

% Conforto associado a cada carga valor: 0 a 100
COMFORT_LEVEL = [...
    0.1,... % Carga 1
    0.5,... % Carga 2
    0.2,... % Carga 3
    0.8,... % Carga 4
    0.7,... % Carga 5
    0.7,... % Carga 6
    0.1,... % Carga 7
    0.1,... % Carga 8
    0.2]; % Carga 9

% Nome das cargas
LOAD_NAMES = {
    'Ferro de Engomar' ...
    'Ar-condicionadoI' ...
    'Maq. de Lavar' ...
    'Ar-condicionado II' ...
    'Ar-condicionado III' ...
    'Ar-condicionado IV' ...
    'Bomba Recalque' ...
    'Bomba Filtro' ...
    'Iluminação Jardim' ...
};

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% TARIFAS
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Tarifa 1:
% Durante todo o dia: 18 centavos / kwh
TARIFF_1 = 18*ones(1,N_SAMPLES);

% Tarifa 2:
% Fora ponta das 00:00 as 08:00 e das 19:00 as 24:00: 16.75 centavos / kwh
% Ponta das 08:00 as 19:00 : 21.22 centavos / kwh
TARIFF_2 = [16.75*ones(1,8*ONE_HOUR_IN_SAMPLES), ... % Fora ponta
            21.22*ones(1,11*ONE_HOUR_IN_SAMPLES), ... % Ponta
            16.75*ones(1,5*ONE_HOUR_IN_SAMPLES)]; % Fora ponta

% Tarifa 3:
% Fora ponta das 00:00 as 08:00 e das 19:00 as 24:00: 16.75 centavos / kwh
% Ponta das 08:00 as 16:00 e das 18:00 as 19:00 : 21.22 centavos / kwh
% DSM das 16:00 as 18:00 : 12 centavos / kwh
TARIFF_3 = [16.75*ones(1,8*ONE_HOUR_IN_SAMPLES), ... % Fora ponta
            21.22*ones(1,8*ONE_HOUR_IN_SAMPLES), ... % Ponta
            12*ones(1,2*ONE_HOUR_IN_SAMPLES), ... % DSM
            21.22*ones(1,ONE_HOUR_IN_SAMPLES), ... % Ponta
            16.75*ones(1,5*ONE_HOUR_IN_SAMPLES)]; % Fora ponta

% Tarifa Branca:

```

```

% Fora ponta das 00:00 as 18:00 e das 23:00 as 24:00: 16.75 centavos / kwh
% Reservado das 18:00 as 19:00 e das 22:00 as 23:00 : 21.22 centavos / kwh
% Ponta das 19:00 as 22:00 : 12 centavos / kwh
TARIFF_4 = [ 30*ones(1,18*ONE_HOUR_IN_SAMPLES), ... % Fora ponta
            40.6*ones(1,1*ONE_HOUR_IN_SAMPLES), ... % Reservado
            65.7*ones(1,3*ONE_HOUR_IN_SAMPLES), ... % Ponta
            40.6*ones(1,1*ONE_HOUR_IN_SAMPLES), ... % Reservado
            30*ones(1,1*ONE_HOUR_IN_SAMPLES)]; % Fora ponta

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% LIMITE DE PICO
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Limite de pico (4.5Kwh) durante o dia
PEAK_LIMIT = 4.5*ones(1,N_SAMPLES);

% O consumo das cargas monitoráveis e detectáveis é modelado como
% três gaussianas centradas as 08:00, 13:00 e 20:00 com amplitudes de
% 0.5kwh, 0.5kwh e 1.4kwh respectivamente

X = (1:1:4*ONE_HOUR_IN_SAMPLES + 1);
X1 = (1:1:6*ONE_HOUR_IN_SAMPLES + 1);

Y = gaussmf(X, [10 24]); % Gerando gaussiana
Y = 0.5*Y; % Pico de 0.5kwh

Y1 = gaussmf(X1, [10 36]); % Gerando gaussiana
Y1 = 1.4*Y1; % Pico de 1,4Kwh

% Gaussiana centrada as 08:00
PEAK1 = [zeros(1,4*ONE_HOUR_IN_SAMPLES), ...
        Y, zeros(1,16*ONE_HOUR_IN_SAMPLES - 1)];

% Gaussiana centrada as 13:00
PEAK2 = [zeros(1,11*ONE_HOUR_IN_SAMPLES), ...
        Y, zeros(1,9*ONE_HOUR_IN_SAMPLES - 1)];

% Gaussiana centrada as 20:00
PEAK3 = [zeros(1,17*ONE_HOUR_IN_SAMPLES), ...
        Y1, zeros(1,ONE_HOUR_IN_SAMPLES - 1)];

% O limite de pico é o limite original (4.5kwh) menos as 3 gaussianas
PEAK_LIMIT = PEAK_LIMIT - PEAK1 - PEAK2 - PEAK3;

PEAK_LIMIT_BACKUP = PEAK_LIMIT;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% CALCULOS
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if SIMULATION == 1
    TARIFF = TARIFF_1;
elseif SIMULATION == 2 || SIMULATION == 4
    TARIFF = TARIFF_2;
elseif SIMULATION == 3
    TARIFF = TARIFF_3;

```

```

elseif SIMULATION == 5
    TARIFF = TARIFF_4;
end

% Se for simulação 4 o pico é reduzido das 21:00 as 22:00
if SIMULATION == 4
    PEAK4 = [zeros(1,21*ONE_HOUR_IN_SAMPLES), ...
            1.5*ones(1,ONE_HOUR_IN_SAMPLES), ...
            zeros(1,2*ONE_HOUR_IN_SAMPLES)];

    PEAK_LIMIT = PEAK_LIMIT - PEAK4;
else
    PEAK_LIMIT = PEAK_LIMIT_BACKUP;
end

% O problema passado para a função cplexbilp precisa estar na seguinte
% forma:
%   min fx
%   AeqX = Beq
%   Ax <= B

% Primeiros calculos Aeq e Beq
% Beq é um vetor coluna com dimensão = número de cargas
% e todos seus elementos = 1, pois queremos que a soma de todas as
% variaveis de decisao seja = 1 (apenas 1 variavel 'ligada' por carga)
%
% Aeq é uma matriz onde cada linha representa uma carga e cada coluna
% representa uma variavel de decisao. A variavel de decisao é apenas
% de uma certa carga. Exemplo de matriz Aeq para 3 cargas com 2
% variaveis de decisão cada:
%
%      | 1 1 0 0 0 0 |
% Aeq = | 0 0 1 1 0 0 |
%      | 0 0 0 0 1 1 |
%
% Em outras palavras, dizemos ao cplex que a soma de todas as variaveis
% de decisão de uma certa carga deve ser igual a 1. Como este é um
% problema binario então cada variavel pode ser apenas 1 ou 0
% assim, esta restrição fará o cplex escolher apenas 1 variavel
% de decisão por carga

DIMENSION_MAX = 0;
DIMENSION = zeros(N_LOADS,1);

for i=1:N_LOADS
    DIMENSION(i) = (MAX_TIME(i) - DURATION(i) - MIN_TIME(i)) + 1;
    DIMENSION_MAX = DIMENSION_MAX + DIMENSION(i);
end

Aeq = zeros(N_LOADS, DIMENSION_MAX);

aux = 0;

for i = 1:N_LOADS
    Aeq(i,:) = [ zeros(1,aux), ones(1, DIMENSION(i)) , ...

```

```

        zeros(1,(DIMENSION_MAX - DIMENSION(i) - aux)) ];
    aux = aux + DIMENSION(i);
end

Beq = ones(N_LOADS,1);

% Agora fazemos o calculo de FX e GX
% FX é um vetor onde cada elemento representa uma variavel de decisão
% Primeiro os elementos da carga 1, depois da carga 2, 3, etc..
% O numero de variaveis de decisao de uma carga varia.
% Dado que a carga pode iniciar no instante INICIAL, ela dura DURACAO e
% deve terminar no maximo no instante FINAL, o numero de variaveis de
% decisao para essa carga pode ser calculado como:
% N_VARIAVEIS = FINAL - DURACAO - INICIAL.
% FX será um vetor onde a dimensao será a soma do numero de variaveis
% de todas as cargas.
% Ao passarmos este vetor FX = [x1 x2 x3 x4 x5 ... ] para o cplex
% o mesmo irá minimizar a soma x1 + x2 + x3 + x4...
% Obedecendo as restrições: Igualdade Aeq = Beq, que fará só
% haver 1 variavel de decisão 'ligada' para cada carga, que já calculamos
% e a desigualdade Ax <= B, que fará o cplex respeitar o limite de pico
% e calcularemos mais a frente
FX = zeros(1,DIMENSION_MAX);
GX = zeros(1,DIMENSION_MAX);

aux = 1;

% Calculando FX e GX
for load = 1:N_LOADS

    % Amostra associada ao tempo maximo em que a carga deve iniciar
    % para terminar até MAX_TIME
    END_TIME = MAX_TIME(load) - DURATION(load);

    % De MIN_TIME até END_TIME
    for time = MIN_TIME(load):END_TIME

        [ FX_aux , GX_aux ] = shc_obj_func_calc(BEST_TIME(load), ...
                                                N_PHASES(load), ...
                                                PHASE_DURATION(load,:), ...
                                                SAMPLE_INTERVAL, ...
                                                AVG_POWER(load,:), ...
                                                TARIFF(1,:), ...
                                                COMFORT_LEVEL(load), ...
                                                time);

        FX(aux) = FX_aux;
        GX(aux) = GX_aux;
        aux = aux + 1;

    end

end

% Agora vamos calcular o vetor de desigualdade B e a matriz A
% de forma que Ax <= B, é desta forma que modelamos o consumo de pico

```

```

% o vetor B é simplesmente um vetor coluna representando o consumo
% de pico máximo permitido, basta transpor PEAK_LIMIT previamente calculado
B = PEAK_LIMIT';

% O calculo da matriz A que é utilizada para garantir que a restrição do limite
% de pico seja atendida
PEAK_IN_SAMPLES = zeros(N_LOADS, N_SAMPLES);
A = zeros(N_SAMPLES, DIMENSION_MAX);
aux_a = 0;

for load = 1:N_LOADS
    SIZE = MAX_TIME(load) - MIN_TIME(load) + 1;
    DIMENSION_OSM = MIN_TIME(load) - FIRST_SAMPLE;
    DIMENSION_OEM = LAST_SAMPLE - MAX_TIME(load);
    DIMENSION_MAX_2 = MAX_TIME(load) - DURATION(load) - MIN_TIME(load) + 1;

    Am = zeros(SIZE, DIMENSION_MAX_2);
    OSM = zeros(DIMENSION_OSM, DIMENSION_MAX_2);
    OEM = zeros(DIMENSION_OEM, DIMENSION_MAX_2);

    PEAK = zeros(DURATION(load),1);

    aux = 0;
    for phase = 1:N_PHASES(load)
        PEAK = PEAK + [zeros(aux,1) ; ...
            PEAK_POWER(load,phase) * ...
            ones(PHASE_DURATION(load,phase)/SAMPLE_INTERVAL,1) ; ...
            zeros( DURATION(load) - aux - ...
            PHASE_DURATION(load,phase)/SAMPLE_INTERVAL,1) ];

        aux = aux + PHASE_DURATION(load,phase)/SAMPLE_INTERVAL;
    end

    PEAK_IN_SAMPLES(load,:) = [ PEAK ; zeros(N_SAMPLES - DURATION(load),1) ];

    aux = 0;
    for n = 1:DIMENSION_MAX_2
        Am(:,n) = [ zeros(aux,1) ; PEAK ; zeros(SIZE - aux - DURATION(load),1) ];
        aux = aux + 1;
    end

    Aaux = [ OSM ; Am ; OEM ];

    [ k , n_columns ] = size(Aaux);

    for n = 1:n_columns
        A(:,aux_a+n) = Aaux(:,n);
    end

    aux_a = aux_a+n_columns;

end

% Agora que temos todas as matrizes e vetores prontos
% chamamos o cplex para encontrar a solução ótima

```

```

try
options = cplexoptimset;
options.Diagnostics = 'on';

OBJ_FUNC = ( (ALFA)*FX + (1-ALFA)*GX );

[RESULT, fval, exitflag, output] = cplexbilp (OBJ_FUNC, ...
                                             A, ...
                                             B, ...
                                             Aeq, ...
                                             Beq, ...
                                             [ ], ...
                                             options);

fprintf ('\nSolution status = %s\n', output.cplexstatusstring);
fprintf ('Solution value = %d\n', fval);
catch m
disp(m.message);
end

% Agora pegamos o índice das soluções
SOLUTION = find(RESULT,N_LOADS);

% Precisamos retirar o 'offset' das soluções
offset = 0;
for load = 1:N_LOADS
    SOLUTION(load) = SOLUTION(load) - offset + MIN_TIME(load) - 1;
    offset = offset + DIMENSION(load);
end

% Exibe resultados na tela
disp ('Values = ');
disp ((SOLUTION)*(5/60));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% PLOT DOS RESULTADOS
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
X = (1:1:N_SAMPLES);
figure;
plot(X,PEAK_LIMIT, '-r', 'LineWidth',3)
axis([0,288,0,5]);
grid on;
set(gca,'Xcolor',[0.3 0.3 0.3]);
set(gca,'Ycolor',[0.3 0.3 0.3]);
xlabel('Time [hh:mm]');
ylabel('Planning [kWh]');

set(gca, 'XTick', ...
[12 , 24, 36, 48, 60, 72, 84, 96, 108, 120, 132, 144, ...
156, 168, 180, 192, 204, 216, 228, 240, 252, 264, 276]);

set(gca, 'XTickLabel', { ...
    '01:00', '', '03:00', '', '05:00', '', '07:00', '', '09:00', '', '11:00', '', ...
    '13:00', '', '15:00', '', '17:00', '', '19:00', '', '21:00', '', '23:00', '' });

```

```

TIME_VALUE = zeros(N_SAMPLES,1);

for load = 1:N_LOADS
    aux = 0;
    pos_initial = SOLUTION(load);
    for sample = 1:DURATION(load)
        hold('on');
        rectangle('Position',...
            [pos_initial+aux TIME_VALUE(pos_initial+aux) 1 ...
            PEAK_IN_SAMPLES(load,sample)],...
            'LineStyle', 'none','FaceColor', COLOR(load,:));

        TIME_VALUE(pos_initial + aux) = TIME_VALUE(pos_initial + aux) + ...
            PEAK_IN_SAMPLES(load,sample);

        aux = aux + 1;
    end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% ACHANDO CUSTO DA SOLUÇÃO
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
COMFORT_COST = 0;
ECONOMIC_COST = 0;

for load = 1:N_LOADS
    [ FX_aux , GX_aux ] = shc_obj_func_calc(BEST_TIME(load), ...
        N_PHASES(load), ...
        PHASE_DURATION(load,:), ...
        SAMPLE_INTERVAL, ...
        AVG_POWER(load,:), ...
        TARIFF(1,:), ...
        COMFORT_LEVEL(load), ...
        (SOLUTION(load)));

    ECONOMIC_COST = ECONOMIC_COST + FX_aux;
    COMFORT_COST = COMFORT_COST + GX_aux;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% SALVAMENTO DOS ARQUIVOS
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
set(gcf,'PaperUnits','inches','PaperPosition',[0 0 10 6])
saveas(gcf,SIMUL_FIG,'jpg');

NEW_SOLUTION = (SOLUTION)*(5/60);

[nRows , nCols] = size(LOAD_NAMES);
file = fopen(SIMUL_TEXT,'w');
fprintf(file, '%7s %6s\r\n', ' Carga ', ' Inicio ');

for col=1:nCols
    hour = fix(NEW_SOLUTION(col));
    min = (NEW_SOLUTION(col) - hour)*60;
    min = fix(min);
    hour = sprintf('%2d:%02d',hour, min);

```

```
fprintf(file, '%7s %6s\r\n', LOAD_NAMES{:,col}, hour);  
end  
  
SOLUTION = transpose(SOLUTION);  
NGC = sum(COMFORT_LEVEL.*sqrt((SOLUTION - BEST_TIME).^2))/sum(COMFORT_LEVEL);  
  
fprintf(file, '\r\nTempo de Execução: %6.3f %f\r\n', output.time);  
fprintf(file, '\r\nValor da Função Objetivo: %6.3f %f\r\n', fval);  
fprintf(file, '\r\nValor da Função Objetivo Conforto: %6.3f %f\r\n', COMFORT_COST);  
fprintf(file, '\r\nValor da Função Objetivo Custo: %6.3f %f\r\n', ECONOMIC_COST);  
fprintf(file, '\r\nValor do NGC: %6.3f %f\r\n', NGC);  
fclose(file);
```

```
function [FX , GX] = shc_obj_func_calc(BEST_TIME, ...
                                     N_PHASES, ...
                                     PHASE_DURATION, ...
                                     SAMPLE_INTERVAL, ...
                                     AVG_POWER, ...
                                     TARIFF, ...
                                     COMFORT_LEVEL, ...
                                     TIME)

POWER = 0;
aux = 0;

% Otimização de consumo
for phase = 1:N_PHASES

    for duration = 1:((PHASE_DURATION(phase)/SAMPLE_INTERVAL))

        POWER = POWER + ( (AVG_POWER(phase) * ...
                           TARIFF(TIME+duration+aux-1) * ...
                           (SAMPLE_INTERVAL/60)) );

    end
    aux = aux + (PHASE_DURATION(phase)/SAMPLE_INTERVAL);

end

FX = POWER;

% Otimização do conforto
GX = COMFORT_LEVEL*sqrt((TIME - BEST_TIME)^2);

end
```

**APÊNDICE C – ARTIGO SBAI 2015**

# A SMART HOME CONTROLLER USING AN INTEGER PROGRAMMING APPROACH FOR THE OPTIMIZATION OF CONSUMER ECONOMIC SAVING AND COMFORT

PAULO DE TARSO FACÓ BEZERRA FILHO<sup>1</sup>, PEDRO URBANO BRAGA DE ALBUQUERQUE<sup>1</sup>, BRUNO DE ATHAYDE PRATA<sup>2</sup>, GIOVANNI CORDEIRO BARROSO<sup>2</sup>.

1. *Department of Teleinformatics Engineering, Federal University of Ceará  
Campos do Pici S/N, Fortaleza-CE  
E-mails: [paulofaco@gmail.com](mailto:paulofaco@gmail.com), [purbano@ifce.edu.br](mailto:purbano@ifce.edu.br)*

2. *Federal University of Ceará  
Campos do Pici S/N, Fortaleza-CE  
E-mails: [baprata@ufc.br](mailto:baprata@ufc.br), [gcb@fisica.ufc.br](mailto:gcb@fisica.ufc.br)*

**Abstract**— Energy efficiency is a vital subject for the world. In the years to come it is expected that residences and industries will become smart consumers and the grid will be used more efficiently. A smart home controller can help the residential consumers to achieve economic savings by moving the start of each load to times of low tariff. A side effect yet to be studied is the impact on the customer comfort of such controller. In this paper the comfort problem will be mathematically described as an integer programming optimization problem and it will be demonstrated by computer simulations that it is possible to achieve high levels of economic saving without a great impact on the user comfort level by making the controller optimize a combination of both objective functions.

**Keywords**— Automation, Energy Efficiency, Demand Side Management, Combinatorial Optimization.

**Resumo**— O primeiro capítulo apresenta uma revisão da literatura sobre eficiência energética e *demand side management*. No capítulo dois é apresentado a formulação matemática de um controlador residencial para economia de energia e é introduzido o nível de conforto como função-objetivo. O capítulo três apresenta simulações realizadas sobre o modelo matemático do controlador para diferentes cenários e configurações. O capítulo quatro discute os resultados das simulações com foco nas consequências da introdução da nova função-objetivo. No capítulo cinco as contribuições deste artigo são apresentadas. O capítulo seis apresenta as conclusões do trabalho e os próximos melhoramentos a serem implementados. No capítulo sete constam as referências bibliográficas.

## 1 Introduction

Over the past years has emerged the concept of smartness as a basic feature of the home automation systems. In this context, smartness means that systems of different manufacturers must work in an integrated form, aiming to guarantee to the user safety and the simplicity of utilization for the adopted solutions. In this way, a building can be automated but it may not be an intelligent building case it does not ensure the interoperability between its systems.

New methods for costs reduction in energy systems have been proposed in the most diverse areas. Several researchers have reported the proposition of home automation technologies, like Smart Home (SH) systems (Vainio, 2012; Fitzpatrick, 2009; Carreiro, 2011; Corno & Razzak, 2012; Di Giorgio & Pimpinella, 2012; Gellings & Samotyj, 2013; Panna et al. 2013).

The application of the concept of intelligent networks, which are also called Smart Grids (SG), among other tools, have used integrated and intelligent actions between producers, distributors and clients, by means of control and communication systems with bidirectional networks, thus ensuring, in an efficient way, the sustainable, economic and safe energy supply (Momoh, 2008; Pasand et al.,

2009; Heydt, 2010; Jackson, 2010; Bezerra et al., 2013). Based on the concept of SG, it was proposed the application of residential automation (Suh & Ko, 2008; Han & Lim, 2010; Son et al., 2010; Kofler et al., 2012; Li, 2012; Hernández et al., 2013).

In particular, the search of solutions aiming to improve the energetic efficiency in SH's has been approached for several authors (Choi et al., 2005; Fitzpatrick et al. 2009; Begovic, 2013; Gellings & Samotyj, 2013; Panna et al., 2013; Figueiredo et al., 2014).

Although the literature on Smart Home concept in a home automation perspective is vast, the proposition of methods which consider the interests of the customers is very limited.

This paper aims at presenting an integer programming approach for the optimization of a Smart Home Controller considering consumer economic saving and comfort. The proposed approach can consider three possibilities: (i) the minimization of energy costs, (ii) the maximization of the consumer comfort, and (iii) a multiobjective approach which uses the weighted sum of the above mentioned objective functions.

The remaining parts of this paper are structured as follow. In the second section, the mathematical for-

mulations are presented. In the third section, computational simulations are presented. In the fourth section is presented the results discussion. At the end, the paper presents some conclusions and recommendations for future research.

## 2 Mathematical Formulations

### 2.1 Minimization of Energy Costs

Di Giorgio and Pimpinella (2012) presented a strategy for optimization of the electrical power consumption based on a Smart Home Controller (SHC). Such SHC selects the time of start of each load presented in a residence in such a way that the power consumption costs will be minimum.

The proposed SHC takes decisions based on the following parameters:

- costs (Tariff) along the day
- maximum demand along the day
- power consumption of each load, and
- minimum starting time of each load (decision of the user)

Given that such SHC is a discrete-time system that works on a certain sample rate ( $T_s$ ), that a day is divided in  $N$  samples and that the residence has  $M$  plannable loads, the mathematical model of the SHC, as an integer programming problem, can be described as follow. Each symbol is described on table 1.

$$f_1(x) = \min \left\{ \sum_{m=1}^M \sum_{i=I_{Sm}}^{I_{Em}-N_m} \left( \sum_{n=i}^{i+(N_m-1)} \bar{P}_m[n-i]T_s C[n] \right) u_{mi} \right\} \quad (1)$$

$$u_{mi} \in \{0,1\}$$

$$M = 1, 2, 3, \dots, M$$

$$i = I_{Sm}, I_{Sm} + 1, \dots, I_{Em} - N_m$$

subject to

$$\sum_{i=I_{Sm}}^{I_{Em}-N_m} u_{mi} = 1 \quad m = 1, 2, 3, \dots, M \quad (2)$$

$$\sum_{m \in M_k} \left( \sum_{i=(k-(N_m-1))}^{k-(k-I_{Em}+N_m)^+} \hat{P}_m[k-i]u_{mi} \right) \leq P_k \quad (3)$$

$$k = S, S + 1, \dots, E - 1$$

In Table 1 is presented the list of used symbols.

The objective function  $f(x)$  states that the SHC should select one starting time for each load granted that this starting time is greater than the minimum

starting time and that the load finishes before its final ending time. The SHC finds the starting times of each load such that the sum of the economic costs of all the loads is minimum.

The set of constraints of type (2) guarantees that only one starting time per load will be selected. The set of constraints of type (3) imposes that the power consumption in any given moment will be less or equal the maximum peak power permitted.

**Table 1 - List of symbols**

Symbol	Meaning
$M$	Number of plannable loads
$\bar{P}_m$	Average power time sequence of $m$ th load
$\hat{P}_m$	Peak power time sequence of $m$ th load
$N_m$	Duration in samples of $m$ th load
$I_{Sm}$	Sample associated with the minimum starting time of the $m$ th load
$I_{Em}$	Sample associated with the maximum ending time of the $m$ th load
$S$	Planning period starting time
$E$	Planning period ending time
$u_{mi}$	$i$ th decision variable of the $m$ th load
$P_k$	Virtual power threshold at $k$ th time instant
$C$	Daily energy price sequence
$I_{Bm}$	Best starting time of the $m$ th load
$C_{Lm}$	Comfort level of the $m$ th load
$w_1$	Controller weight of economic optimization
$w_2$	Controller weight of comfort optimization

### 2.2 Introducing New Objective Function: Comfort

The stated SHC is efficient in minimizing the power consumption costs of plannable loads but, as it will be demonstrated, it can lead to a great level of discomfort if the starting time of the loads vary greatly from the best (from a user's perspective) possible starting time.

To perform analysis about the level of discomfort generated by the SHC the following parameters will be introduced on the problem.

- Comfort level of each load ( $C_{Lm}$ ). Vary from 0 (changing the starting time of the load as no effect on the generated discomfort) and 1 (changing the starting time of the load as great impact on the generated discomfort)
- Possible best starting time of each load ( $I_{Bm}$ )
- Controller weights for economic and comfort optimization. ( $w_1$ ) and ( $w_2$ )

All those new variables are user's decision since there's no way for the SHC to determine the comfort level or the best starting time for each load. It gives the user the possibility to set the SHC as a full eco-

nomic optimizer or a full comfort optimizer by simple varying the value of such variables.

The mathematical model for the minimization of the discomfort of all loads in a residence can be stated as follow.

$$f_2(x) = \min \left\{ \sum_{m=1}^M \sum_{i=I_{Sm}}^{I_{Em}-N_m} (C_{Lm}|i - I_{Bm}|)u_{mi} \right\} \quad (4)$$

The proposed enhanced SHC will aim to minimize the economic costs of running all loads while maintaining an acceptable level of discomfort from the user's perspective. To achieve such result the SHC will minimize the linear combination of the two objective-functions creating a new one. This new objective function is stated as follow.

$$f(x) = w_1 f_1(x) + w_2 f_2(x) \quad (5)$$

Where

$$w_1 + w_2 = 1 \quad (6)$$

$$w_1 \geq 0 \quad (7)$$

$$w_2 \geq 0 \quad (8)$$

By varying  $w_1$  and  $w_2$  the user can achieve both, economic saving and comfort level that will satisfy him the most.

Setting  $w_1$  to 1 the user determines to the SHC that the discomfort generated is not important and the controller should do all efforts to minimize the economic costs.

Instead, setting  $w_2$  to 1 the user decides that the controller should only takes comfort into account, making sure that all loads will start as close as possible to their best starting time.

**Table 3 – Load Profiles**

Load	Phases	$\Delta t$ (min)	P[kW]	P[kW]	$C_{Lm}$
1	6	[5,10,15, 5, 5,10]	[0.02, 1.96, 0.02, 0.02, 0.02, 0.05]	[0.15, 2.1, 0.15, 0.15, 0.2, 0.55]	1.0
2	1	[105]	[2.36]	[2.7]	0.9
3	7	[5,25, 20,5,10, 10,20]	[0.04, 1.99, 0.28, 0.06, 0.06, 0.06, 0.08]	[0.2, 2.1, 2.1, 0.2, 0.3, 0.25, 0.5]	0.8
4	6	[15,30, 10,5, 20,50]	[0.07, 1.4, 0.10, 0.07, 2.02,0.01]	[0.1, 2.1, 1.2, 0.1, 2.15, 0.02]	0.7
5	8	[25, 5, 60,20, 10,10,10,20]	[0.27, 0.05, 2.1, 0.11, 0.11, 0.10, 0.10,0.26]	[2.1, 0.3, 2.2, 0.2, 0.6, 0.8, 0.8, 1.1]	0.6
6	6	[20,15, 35,10, 20,50]	[0.07, 2, 0.07, 0.07, 1.8,0.01]	[0.1, 2.1, 0.1, 0.25, 2.3, 0.02]	0.5
7	3	[50,20,50]	[0.8, 0.5,1]	[1, 0.8, 1.2]	0.4
8	4	[20,20, 10,15]	[1.4, 0.5, 0.6, 1]	[1.6, 0.8, 0.6,1]	0.3
9	3	[30,20,30]	[0.6, 0.7,1]	[0.6, 0.7,1]	0.2

### 3 Results

The same four original simulations performed by Di Giorgio and Pimpinella (2012) were remade here to demonstrate the impacts of using a SHC with and without comfort analysis. MATLAB and IBM CPLEX were used as the tools for the simulations.

Table 2 summarizes the four simulations tariff differences.

**Table 2 – Simulation's Tariffs**

Simulation	Fare	Time period	C [cent/kWh]
1	Standard	[00:00 – 24:00]	18.00
2	Off-peak	[00:00 – 08:00]	16.75
	Peak	[19:00 – 24:00] [08:00 – 19:00]	21.22
3	Off-peak	[00:00 – 08:00]	16.75
	Peak	[19:00 – 24:00]	21.22
	DSM	[08:00 – 16:00] [18:00 – 19:00] [16:00 – 18:00]	12.00
4	Off-peak	[00:00 – 08:00]	16.75
	Peak	[19:00 – 24:00]	21.22
	DSM	[08:00 – 19:00] [16:00 – 18:00]	12.00

The simulations were performed on a residence with nine plannable loads. The new parameters  $C_{Lm}$  and  $I_{Bm}$  are added on each load. In the Table 3 is described the load's profile.

The sample interval used is 5 minutes. The best starting time of each load is set at 18:00. The minimum starting time of each load is set at 14:00 and maximum end time at 23:59.

Each simulation was run four times. One time using only cost as the objective-function and other three times using the proposed approach of mixing cost

saving and comfort enhancement. The difference between those three are the values of  $w_1$  and  $w_2$ . Table 4 summarizes the simulations results.

**Table 4 – Simulation Results**

Simulation		1	2	3	4	
Original SHC (Di giorgio and Pimpinella (2012))		Cost	248,7	236,965	199,781	241,546
		Discomfort	16,05	14,51	10,71	16,56
New SHC	$(w_1 = 0.3 \text{ and } w_2 = 0.7)$	Cost	248,7	241,073	201,281	244,109
			0%	1,73%	0,75%	1,06%
		Discomfort	6,18	9,99	7,09	9,66
			-61,49%	-31,15%	-33,80%	-41,67%
	$(w_1 = 0.5 \text{ and } w_2 = 0.5)$	Cost	248,7	237,032	201,281	247,365
			0%	0,03%	0,75%	2,40%
		Discomfort	6,18	13,52	7,09	9,54
			-61,49%	-6,82%	-33,80%	-42,39%
	$(w_1 = 0.7 \text{ and } w_2 = 0.3)$	Cost	248,7	237,032	199,796	243,088
			0%	0,03%	0,01%	0,64%
		Discomfort	6,18	13,52	9,3	10,8
			-61,49%	-6,82%	-13,16%	-34,78%

### 3.1 Discussion

We can see from the obtained results that the new SHC produces, on average, an increase of 0,62% on the economic cost and an improvement of 35,74% on the comfort level. The largest increase of costs were 2,4% (for a 42,39% increase in comfort) and the lowest increase in comfort was 6,82% (for an increase of 0,03% in costs). In the Table 5 is summarized the average of energy cost and comfort, obtained by varying the weights of the above mentioned criteria.

**Table 5 – SHC average result by weights**

Weights	Cost Average Increase	Comfort Average Increase
$(w_1 = 0.3 \text{ and } w_2 = 0.7)$	0,885%	42,03%
$(w_1 = 0.5 \text{ and } w_2 = 0.5)$	0,795%	36,13%
$(w_1 = 0.7 \text{ and } w_2 = 0.3)$	0,17%	29,06%

We can see from Table 5 the new SHC is able to greatly increase the comfort level while keeping the increase in economic costs on a minimum.

The user could decide the values of the weights, meaning that he could decide to use the SHC as a full economic saving device, as proposed by Di Giorgio and Pimpinella (2012) by setting  $w_1$  to 1 and  $w_2$  to zero.

Alternatively the user could use the SHC as a full comfort device, meaning it would work as a scheduler turning the loads on when the user intended them to. To do that the user would set  $w_1$  to zero and  $w_2$  to 1.

The user could use a mixed approach selecting  $w_1$  and  $w_2$  to values to accomplish both economic saving and comfort increase according to the user's preference.

All three runs of simulation 1 using the new SHC accomplished a 61,49% reduction on the discomfort level, meaning the loads are, in average, 61,49% closer to their best starting time, giving the user the feeling that the loads are starting when he originally wanted to.

The most interesting aspect of simulation 1 though is that it accomplished this great increase on comfort without increasing the economic cost. In other words the user is saving just as much money as before but with way more comfort. That is true for any value of  $w_2$  other than zero.

This happens because in simulation 1 the tariff is constant throughout the day so there is no economic saving on moving the loads far away from their best starting time. The original SHC worked just to find a solution under the constraints. The new SHC finds the solution under the constraint that maximizes the comfort level. Figure 1 shows how each load was distributed over the day using the original SHC. Figure 2 shows the same scenario using the new SHC. The red line represents the maximum allowed peak power, the curve goes down in specific times to simulate the loads that cannot be controlled by the SHC.

It is important to notice that simulation 1 represents a scenario very common worldwide. In many countries, as in Brazil, the residential user pays a standard fixed tariff during the day.

In some scenarios, the original SHC could find many solutions for the same problem. It could select the worst (from a comfort level view) of those solutions.

The new SHC guarantees to select the best one while still maximizing the economic saving.

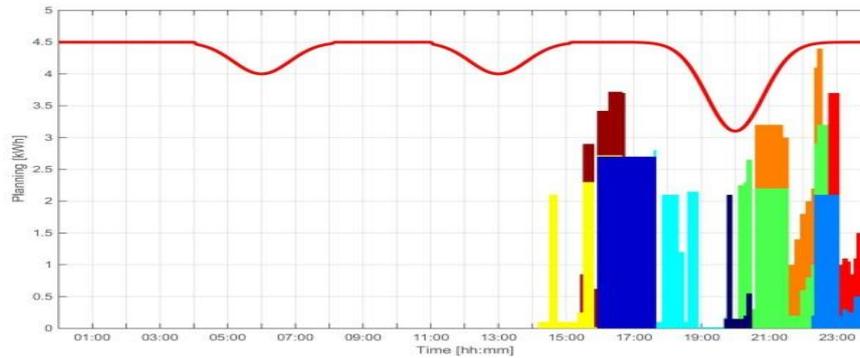


Figure 1 - Old SHC result for simulation 1

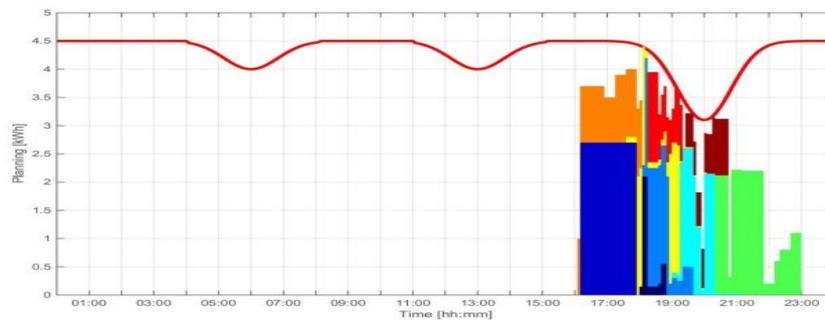


Figure 2 - New SHC result for simulation 1

#### 4 Article's Contributions

This article improved the mathematical model of a smart home controller by adding the user's comfort as an objective function. The enhanced controller gives the user the choice to configure the controller from only economic saving to only comfort maximization including any range between them. This was accomplished by making the controller a multi-objective one where a combination of comfort and economic saving is optimized.

#### 5 Conclusions

As demonstrated by the simulation's results, adding the comfort as an objective function qualitatively improved the smart home controller performance by minimizing the deviation of the start time of each load from the desired user's best starting time without compromising too much the economic savings.

For the scenarios when the tariff is constant throughout the day the new smart home controller guarantees to find the best solution, from a comfort side of view. Those scenarios are quite common, like today in Brazil.

The next improvements, in development by the authors, to be made on the smart home controller are:

- Add the functionality for the same load to run more than once in the same day: the actual SHC mathematical model is not able to run the same load more than once. The user could add two equal loads and make their possible starting time to be mutual exclusive but in that way it is not guaranteed that the best solution will be found.
- Add the possibility to use the peak power as an objective function instead of a constraint: it is quite common that a user, specially an industrial one, to be charged by the maximum medium peak power consumption over a given interval (commonly known as demand). The demand shall be added as an objective function so the controller will be able to effectively optimize industrial user's economic cost.

#### References

- BEGOVIC, M. *Smart Homes energy and technology fuse together*. IEEE power & energy magazine. Outubro 2013.
- BEZERRA, J. R.; BARROSO, G. C.; LEÃO, R. P. S.; SAMPAIO, R. F.; MEDEIROS, E. B. *Power Distribution Network Planning Application Based on Multi-Objective Binary Particle Swarm Optimization Algorithm*. In: Ying

Tan; Yuhui Shi; Hongwei Mo. (Org.). *Lecture Notes in Computer Science - Advances in Swarm Intelligence*. 1ed. Berlin: Springer-Verlag, 2013.

CARREIRO, A. M. *Energy Smart House Architecture for a Smart Grid Energy Box System Solution Proposal*. Dissertação de Mestrado em Energia para a Sustentabilidade da Universidade de Coimbra. 2011.

CHOI, J.; SHIN, D.; SHIN. *Research and Implementation of the Context-Aware Middleware for Controlling Home Appliances*. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. February 2005.

CORNO, F.; RAZZAK, F. *Intelligent Energy Optimization for User Intelligible Goals in Smart Home Environments*. *IEEE Transactions on smart grid*. December 2012.

FIGUEIREDO, M.; RIBEIRO, B.; ALMEIDA, A. *Electrical Signal Source Separation Via Nonnegative Tensor Factorization Using On Site Measurements in a Smart Home*. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*. Fevereiro 2014.

FITZPATRICK, G; SMITH G. *Technology-Enabled Feedback on Domestic Energy consumption: Articulating a Set of Design Concerns*. *IEEE pervasive computing*. 2009.

GELLINGS, C. W.; SAMOTYJ, M. *Smart Grid as advanced technology enabler of demand response*. *Springer Science + Business Media Dordrecht*. Julio 2013.

DI GIORGIO, A.; PIMPINELLA. *An event driven Smart Home controller enabling consumer economic saving and automated Demand-Side Management*, *ELSEVIER Applied Energy, Volume 96, Pages 92–103, August 2012*.

HAN, D.-M.; LIM J.-H. *Smart Home Energy Management System using IEEE 802.15.4 and ZigBee*. *IEEE Transactions*. Novembro 2010.

HERNÁNDEZ, L.; BALADRÓN, C.; AGUIAR, J.; M., CARRO, B., SÁNCHEZ-JAIME A.; CHINARRO, L., David, GOMEZ-SANZ, J. J.; COOK, D. *A Multi-Agent*

*System Architecture for Smart Grid Management and Forecasting of Energy Demand in Virtual Power Plants*. *IEEE Communications Magazine*, Janeiro 2013.

HEYDT, G.T. *The next generation of power distribution systems*. *Smart Grid, IEEE Transactions*. 225–235, dezembro 2010.

JACKSONJ. *Improving energy efficiency and smart grid program analysis with agent-based end-use forecasting models*. Texas A&M University. USA, 2010.

KOFLER, M. J.; REINISCH, C.; KASTNER, W. *A semantic representation of energy-related information in future smart homes*. Vienna University of Technology, Automation Systems Group, Vienna. 2012.

LI, T., REN, J.; TANG X. *Secure Wireless Monitoring and Control Systems for Smart Grid and Smart Home*. *IEEE Wireless Communications*. Junho 2012.

MOMOH, James A. *Electric Power Distribution, Automation, Protection and Control*. CRC Press, 2008.

PANNA R., THESRUMLUK, R.; CHANTRAPORNCHAI C. *Development of Energy Saving Smart Home Prototype*. *International Journal of Smart Home*. 2013.

PASAND S. M.; KAZEMI, L. M. S.; FIRUZABAD, F. *Impacts of automatic control systems of loop restoration scheme on the distribution system reliability*. *Generation, Transmission Distribution, IET*, 2009.

SON, Y.-S.; PULKKINEN, T.; MOON K. D.; KIM, C. *Home Energy Management System based on Power Line Communication*. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 56, No. 3. Agosto 2010.

SUH, C.; KO Y.-B. *Design and Implementation of Intelligent Home Control Systems based on Active Sensor Networks*. *IEEE Transactions*. Julho 2008.

VAINIO, Antti-M.; VALTONEN; M.; VANHALA, J. *Proactive Fuzzy Control and Adaptation Methods for Smart Homes*. *IEEE intelligent systems*. 2008.