

# Automatic Consumption Management for Prepaid Electricity Meter with NILM

W. Souza, *Member, IEEE*, F. Garcia, A. Moreira, *Member, IEEE*, F. Marafão, *Member, IEEE*, and L. Silva, *Member, IEEE*

**Abstract**—Recently, the Brazilian Electricity Regulatory Agency (ANEEL) regularized the electricity prepayment system and opened a general discussion about the technologies, resources, and implementations for the prepayment metering system. In several countries, the consumer charges the value equivalent to the kilowatt-hours that he wishes to buy for use. However, some consumers purchase credit with the expectation that the charge remains for a specific time, but they may be surprised with the credit end before the expected time. For this reason, this paper proposes automatic consumption management for prepaid meters that analyzes the consumer appliance behavior, performs the temporal analysis of consumption by appliances, defines the cost management per load with high energy consumption and sends sound signals to the consumer ends the appliance usage. The objective of this management system is to ensure that the credit will be used for the consumer expected time.

**Index Terms**—Cognitive meter, Electric consumption management, Pre-paid electric meter, Smart metering system.

## I. INTRODUÇÃO

DEVIDO à demanda crescente de energia elétrica, existe a necessidade de melhorar a gestão e promover o consumo sustentável [1-3]. Para isso, buscaram-se alternativas para aprimorar tanto o sistema elétrico quanto oferecer novos recursos que promovam a eficiência energética.

Neste contexto, foi desenvolvida uma nova geração de medidores de energia elétrica dentro do modelo de redes inteligentes [1,4,5], que podem ser utilizados em qualquer ponto do sistema elétrico: na geração, transmissão, distribuição ou no uso final de energia elétrica. Como os pontos de medição necessitam informar dados confiáveis e precisos para a gestão de energia elétrica, os equipamentos modernos de medição são capazes de: armazenar dados e transmiti-los a centrais de controle e monitoramento; integrar-se com os dispositivos elétricos existentes no sistema; realizar procedimentos remotamente; e agregar funções inteligentes [1, 5, 6]. Para isso, tem-se os medidores inteligentes de energia elétrica, que são dispositivos eletrônicos com comunicação bidirecional e medição de energia em quadrantes [2, 7].

No Brasil, mesmo com a evolução dos medidores inteligentes, os consumidores cativos ainda não possuem detalhamento ou opções sobre o faturamento de consumo.

A energia elétrica é cobrada atualmente como um sistema pós-pago, em que a cobrança ocorre após o uso. Portanto, visando propor novas alternativas para o consumidor, como também a redução de inadimplências e perdas não técnicas, tem-se a proposta de implantação do sistema de pré-pagamento de energia elétrica. Tal modelo é análogo ao sistema de telefonia pré-paga, porém a regulamentação é recente e estão sendo abertas consultas com empresas e com a população para entender a demanda e recursos para essa nova opção.

Como motivação à implantação dessa nova tecnologia, destaca-se a redução de perdas não técnicas, provenientes sobretudo de furto. Por exemplo, houve em 2015 cerca de 5% de perdas não técnicas de energia elétrica, equivalente a uma perda de R\$ 8 bilhões. Ainda, no mesmo ano, houve o percentual de inadimplência e não pagamento de 1,74%, correspondente a uma perda de aproximadamente R\$ 3 bilhões [8]. Portanto, com a implantação de novas tecnologias e soluções, pode-se buscar meios para a redução das perdas, bem como os custos operacionais provenientes de faturas por estimativa, de cobrança por inadimplência e cortes indevidos.

Embora o modelo atual de medidor pré-pago seja eficiente, não é o ideal para alguns consumidores, sobretudo àqueles com baixa renda, pois o consumidor pode estar desprevenido financeiramente no momento em que o valor creditado acabar, ainda mais se os créditos acabarem antes do tempo previsto pelo consumidor. Desta maneira, é necessária a existência de um sistema gerenciador que permita ao consumidor estar ciente do consumo como também possibilitar restrições de uso, para que o crédito realizado pelo consumidor do sistema pré-pago atinja a expectativa de dias.

Desta forma, este artigo apresenta um sistema pré-pago que integra técnicas de desagregação de cargas com a estimação de uso de energia, de acordo com o perfil do consumidor ou da classe social. Caso o consumidor adote o gerenciamento do consumo para que o crédito dure por um determinado período, a estimação permite a restrição do consumo diário de cada carga (eletrodoméstico). Desta forma, não haverá interrupção da energia de forma inesperada ou antes da expectativa.

Como desenvolvimento do trabalho, a seção II apresenta o uso do sistema pré-pago em diversos países, as vantagens e métodos. A seção III apresenta a metodologia implementada neste trabalho. A seção IV apresenta os resultados deste sistema e a seção V apresenta as conclusões.

## II. O SISTEMA PRÉ-PAGO

### A. Sistema Pré-pago no Mundo

O modelo de negócios visado pelas concessionárias de energia elétrica ao redor do mundo envolve os tipos de

W. A. Souza and L. C. Pereira da Silva are with the State University of Campinas, Campinas, São Paulo, Brazil, {wesley, lui}@dsee.fee.unicamp.br.

A. C. Moreira is with the Federal University of São João Del-Rei, Ouro Branco, Minas Gerais, Brazil, amoreira@gmail.com.

F. D. Garcia and F. P. Marafão are with the Univ Estadual Paulista, Campus Sorocaba, São Paulo, Brazil, fmarafao@sorocaba.unesp.br.

pagamento pós-pago e pré-pago. A diferença entre os dois está no modo de pagamento que pode ser efetuado o pagamento previamente (pré-pago) ou após o uso do serviço (pós-pago). No caso do sistema pré-pago, se o crédito estiver esgotado, o fornecimento da energia elétrica é interrompido, geralmente pela atuação de um relé.

Historicamente o sistema pré-pago de energia não é uma novidade. No Reino Unido, tal sistema já existe desde a década de 1970 [9], com medidores eletromecânicos pré-pagos creditados por moedas e eram utilizados, sobretudo, em acomodações alugadas de baixo custo. Porém, com novos países aderindo a este sistema, os propósitos começaram a se distinguir e ficar característico, de acordo com a situação econômica, social ou emergente em cada país.

Com base nos dados levantados em [9, 10], as Tabelas I, II e III apresentam as principais motivações, os públicos-alvo e as tecnologias existentes ao redor do mundo. Os tipos de tecnologias de medidores são apresentados na Figura 1.

TABELA I  
MOTIVAÇÃO PARA A IMPLANTAÇÃO DO MEDIDOR PRÉ-PAGO

Motivação	Países
Expandir a área de fornecimento de energia elétrica e diminuir o número de consumidores sem medidor	África do Sul, Austrália, Colômbia, Índia, Moçambique e Peru
Reduzir as perdas (técnicas e não técnicas), fraudes e roubos de energia elétrica	África do Sul, Angola, Bangladesh, Colômbia, Gana, Índia, Moçambique, Nigéria, Peru, Reino Unido e Uganda
Reorganização do setor elétrico	Angola, Etiópia, Nigéria e Uganda
Garantia do pagamento pelo serviço utilizado	Austrália, Irlanda, Holanda, Nova Zelândia e Reino Unido
Reduzir atrasos de pagamento	África do Sul, Angola, Gana, Moçambique e Uganda
Reduzir inadimplências	Argentina, Austrália, Estados Unidos, Holanda, Irlanda, Nova Zelândia e Reino Unido
Reduzir custos com desconexão	Estados Unidos e República Dominicana
Resolver custos e problemas no sistema de medição	Gana, Moçambique e Nigéria
Aprimorar a qualidade do serviço	Etiópia e Peru
Induzir à população a utilizar a energia de maneira mais eficaz	Austrália, Colômbia, Holanda, Irlanda, Nova Zelândia e Reino Unido
Mudança do cenário devido a uma grande crise financeira	Argentina

TABELA II  
PÚBLICOS-ALVO PARA A INSTALAÇÃO DO MEDIDOR PRÉ-PAGO

Grupo-alvo	Países
Rural, tribos e em áreas remotas	África do Sul, Argentina, Austrália, Índia, Peru e República Dominicana
Localizado em grandes cidades	Gana
Baixa renda ou de pobreza	África do Sul, Estados Unidos, Nova Zelândia e Peru
População hispânica	Estados Unidos
Consumidores que já tiveram histórico de inadimplência	Colômbia, Estados Unidos, Reino Unido e República Dominicana
Perfis residenciais e comerciais	Gana
Todas as classes	Bangladesh, Etiópia, Holanda, Irlanda, Moçambique, Nigéria e Uganda

TABELA III  
TECNOLOGIAS DE MEDIDOR PRÉ-PAGO (FIGURA 1)

Tecnologia	Países
Medidor com <i>Smartcard</i> (cartão com chip) (a)	África do Sul, Austrália, Bangladesh, Estados Unidos, Etiópia, Peru e Reino Unido
Medidor com cartão magnético (a)	Austrália e Reino Unido
Medidor eletrônico com teclado e recarga por ativação de crédito (b)	África do Sul, Argentina, Bangladesh, Colômbia, Gana, Índia, Irlanda, Moçambique, Nigéria, Nova Zelândia, Peru, Reino Unido e República Dominicana
Medidor em duas partes (teclado separado do medidor) e recarga por ativação de crédito (c)	Argentina, Colômbia, Peru, República Dominicana
Medidor inteligente ( <i>Smart meter</i> ) (d)	Estados Unidos e Peru
Medidor com chave eletrônica (e)	Reino Unido

De acordo com as Tabelas I, II e III, observa-se que nos países desenvolvidos o objetivo principal é oferecer às famílias pobres opções e treinamentos para melhorar a gestão de consumo de energia elétrica, evitando assim que a conta a ser paga seja alta como também minimizar inadimplências e atrasos com o pagamento [11-15].

Já nos países subdesenvolvidos e em desenvolvimento, o principal objetivo é atender a demanda de energia elétricas em áreas de difícil acesso, sobretudo áreas rurais, além de oferecer alternativas para redução de fraudes e roubos de energia elétrica [13-15].

Em comum entre países desenvolvidos, subdesenvolvidos e em desenvolvimento está o foco em aumentar a eficiência da concessionária de energia elétrica, reduzir custos operacionais e perdas comerciais. Outra semelhança é em relação ao público alvo, que são pessoas que geralmente são de baixa renda ou habitam regiões de difícil acesso.

Mas essa não é uma regra, na Irlanda do Norte há uma alta penetração dos medidores pré-pagos entre classes sociais média e alta, sendo que cerca de 41% dos clientes são residenciais [16]. Na Holanda, as concessionárias estão atraindo os clientes de alta renda para utilização do medidor pré-pago com a justificativa de auxiliar na conscientização do consumo de energia elétrica e também promover o uso de um cartão portátil, do tipo “*pay as you go*”, para ser usado onde o consumidor desejar [9, 16].

Outro ponto em comum entre os países é a modernização da infraestrutura de medição de energia elétrica. Os medidores pré-pagos possuem a comunicação bidirecional, remetendo a interação entre a concessionária e o ponto de consumo, permitindo a conscientização sobre a energia elétrica e o aumento da eficiência do sistema [9, 10, 17, 18].

A mudança de comportamento do sistema elétrico representa o agrupamento de variáveis quantitativas (como as econômicas, logísticas ou de controle) e qualitativas (decorrentes das relações com a sociedade e inclusão de aspectos voltados à consciência de consumo) [9, 18].



Fig. 1. Modelos de medidores com sistema de pré-pagamento.

Estudos sobre o comportamento do consumidor diante de informações dinâmicas de consumo e preços usando sistemas de pré-pagamento concluíram que a resposta da demanda à variação do preço da eletricidade poderia atingir a redução de 30% em relação a uma situação sem este tipo de informação [17].

Entre as tecnologias de medidores, conforme apresentadas na Figura 1, tem-se:

**a) Medidores com smartcard / Medidor com cartão magnético:** insere-se, neste caso, um cartão com crédito no medidor para que ele forneça energia elétrica. Este cartão pode ser comercializado em pontos autorizados de venda ou pela internet. Os cartões podem ser de um determinado valor de consumo ou podem ser recarregáveis que identificam o usuário e o valor de crédito;

**b) e c) Medidor com teclado / Medidor com teclado separado (em duas partes):** Neste tipo de medidor, o consumidor digita um código no teclado (acoplado no medidor ou em um terminal separado fisicamente do medidor, mas conectado ao medidor) para inserir créditos no medidor. O código alfanumérico é geralmente um código de 16 ou 20 dígitos. Esta tecnologia permite a compra de créditos pela internet e através de pontos autorizados de venda. Este tipo de cartão é semelhante àquele que se utiliza para realizar a carga da telefonia móvel pré-paga;

**d) Medidor inteligente:** Neste caso, o medidor inteligente possui comunicação bidirecional e deve-se pagar o crédito pelo sistema da concessionária. A concessionária realiza a conexão automática do ponto na rede elétrica e quando o crédito expirar, o sistema da concessionária realiza a desconexão automática, por ação de relés.

**e) Medidor com chave eletrônica:** Neste caso, há uma chave eletrônica que o consumidor adquire e pode levá-la onde utilizar os serviços de eletricidade, gás e água. Para creditar valor na chave eletrônica, o usuário vai a um ponto autorizado de venda, apresenta a chave e paga o valor a ser creditado. Em 2010, existiam 2,4 milhões de medidores com a tecnologia da chave eletrônica no Reino Unido [19].

Vale destacar que, no Reino Unido, é possível encontrar alguns medidores que recebem créditos por moedas, porém alguns especialistas não consideram este método como um sistema pré-pago por não haver praticidade, pois neste método as concessionárias necessitam ir em cada medidor para coletar as moedas depositadas [9]. No mundo, tem-se vantagens no uso do medidor pré-pago conforme apresentada na Tabela I. No sistema de pré-pagamento, o consumidor é o gerenciador do

próprio consumo de energia elétrica e as concessionárias reduzem o custo operacional, diminuem as taxas de perdas, diminuem a lista de inadimplência, entre outros.

### B. Sistema Pré-pago no Brasil

No Brasil, iniciou-se o uso do sistema pré-pago de forma pontual, no final da década de 2000, em algumas localizações nos estados do Amazonas e no Pará, onde foram instalados medidores pré-pagos para permitir o acesso à energia em comunidades isoladas e de difícil acesso [20,21].

Para amplo uso, em 2014 houve a publicação da resolução nº 610/2014 que regulamenta o serviço de pré-pagamento através de medidores eletrônicos. A resolução é exclusiva para unidades do grupo B (baixa tensão) e tem como objetivo de ampliar o oferecimento do serviço de energia elétrica para qualquer público-alvo, podendo ser pessoas que moram em áreas remotas, zonas rurais, zonas urbanas residenciais, comerciais e industriais. O consumidor poderá opcionalmente e gratuitamente aderir ao sistema e poderá voltar ao sistema pós-pago a qualquer momento, e a concessionária tem 30 dias para readaptar o ponto de medição. O consumidor poderá realizar a compra de créditos a partir de 20kWh e também existirá o crédito emergencial, que corresponde a um valor extra que mantém o fornecimento de energia para que o consumidor possa comprar a recarga sem transtorno.

Em 2017, a ANEEL abriu a consulta pública nº 16/2017 entre o mês de dezembro de 2017 a março de 2018, formulando um questionário com os seguintes itens:

- A opção de faturamento pré-pago deve ou não existir;
- Há vantagem ou desvantagem para o sistema pré-pago em:
  - Não haver leitura manual do consumo;
  - Não haver impressão da fatura;
  - Não haver entrega da conta da fatura;
  - Instalação de um novo medidor;
  - Corte e religamento automático de energia;
  - Custos administrativos do sistema para a aquisição de créditos;
  - Redução do furto e fraude da energia elétrica;
  - Não pagamento, inadimplência e juros;
  - Maior controle da energia elétrica;
  - Pagamento adiantado do consumo.
- O pré-pagamento deve ser opcional ou obrigatório para as distribuidoras e se a adesão ao sistema pré-pago deve ser opcional ou obrigatória ao consumidor;
- O pré-pagamento deve ser oferecido a todos os consumidores, sendo aqueles que atendam critérios da ANEEL ou que atendam os critérios da distribuidora;

- Quais seriam os critérios técnicos, econômicos, geográficos para seleção dos consumidores;
- Os requisitos do sistema devem ser flexibilizados. Se sim, quais serão as alternativas dos requisitos do sistema do medidor (tele medição, corte e religamento ou outros). Ainda, se sim, quais serão as alternativas dos requisitos tecnológicos de *software* (aplicativo para celular, agência virtual ou outros);
- Se existe algum critério restritivo técnico ou econômico que deve ser explicitado no regulamento;
- Se a concessionária pode condicionar a adesão ao consumidor ao pré-pagamento para a quitação de débitos pendentes.

Portanto, busca-se no Brasil expectativas do público frente à real aplicabilidade do sistema de pré-pagamento, quais serão os benefícios, o público alvo, os custos e as especificações de *hardware* e *software*.

Como o pré-pagamento é algo que está começando a ser consolidado no Brasil, há tendência às novas implementações. Com as novas gerações de medidores inteligentes, é possível a sua adaptação ao sistema de pré-pagamento. Os medidores cognitivos [2,22-25] são evoluções dos medidores inteligentes, apresentando funções e comportamentos inteligentes, tais como: desagregação de cargas e estratégias para a economia de energia [24,25]. Este tipo de medidor é uma interessante abordagem para o sistema de pré-pagamento, sobretudo na maximização da duração dos créditos efetuados. Com base nesta proposição, que é a contribuição principal deste artigo, a seção III apresenta a metodologia proposta neste artigo.

### III. SISTEMA DE GERENCIAMENTO AUTOMÁTICO DE MEDIDORES PRÉ-PAGOS

A desagregação de cargas corresponde ao processo de reconhecimento do uso de uma carga em um determinado período [26]. Assim, é possível estipular o consumo de energia e o estado de funcionamento para cada carga, também é possível analisar o comportamento, fornecer o controle e monitoramento [27]. Desta forma, estão sendo desenvolvidas

novas propostas de desagregação de cargas [1,6,7,24,28], que podem ser classificadas de três maneiras:

- **NILM**: do inglês *Nonintrusive Load Monitoring*, chamada de técnica não intrusiva ou concentrada. Esta metodologia possui um único medidor alocado no ponto de entrada de energia na residência (Ponto de Acoplamento Comum). Como existe um único ponto de medição, há a análise por algoritmos de características para a identificação das cargas que consumiram energia elétrica. São encontradas na literatura técnicas de análise macroscópica (extração de características pela assinatura de potência) [28-30] e microscópica (extração de características pela análise das formas de onda de tensão e corrente) [24].
- **ILM**: do inglês *Intrusive Load Monitoring*, chamada de técnica intrusiva ou distribuída. Esta metodologia possui diversos pontos de medição distribuídos, sendo cada ponto exclusivo para uma única carga. A desagregação é feita por *hardware* utilizando sensores individuais, diferente da técnica concentrada em que a desagregação é realizada por *software* (algoritmos de desagregação) [31]. Por ser feito o monitoramento por equipamento, o método possui maior precisão e permite interação (criar regras de automação, conexão, desconexão das cargas);
- **sILM**: do inglês *Semi-Intrusive Load Monitoring*, chamada de técnica semi-intrusiva ou parcialmente distribuída, é equivalente com uma versão intermediária entre as técnicas concentrada e distribuída. A sILM consiste na medição por circuitos ou grupos de cargas (exemplo: um cômodo de uma residência). Neste caso, a desagregação é feita por software, mas a desagregação será feita em cada medição de circuito, permitindo com que os erros no processo de classificação diminuam.

Entre as três técnicas apresentadas, tem-se a NILM como promissora para implantação nos medidores das residências. Desta forma, será necessária a troca dos medidores elétricos atuais para esta nova geração de medidores com desagregação de cargas. Para o sistema de pré-pagamento, o medidor com NILM poderia apresentar vantagens na gestão do consumo e na expectativa de economia para o consumidor.

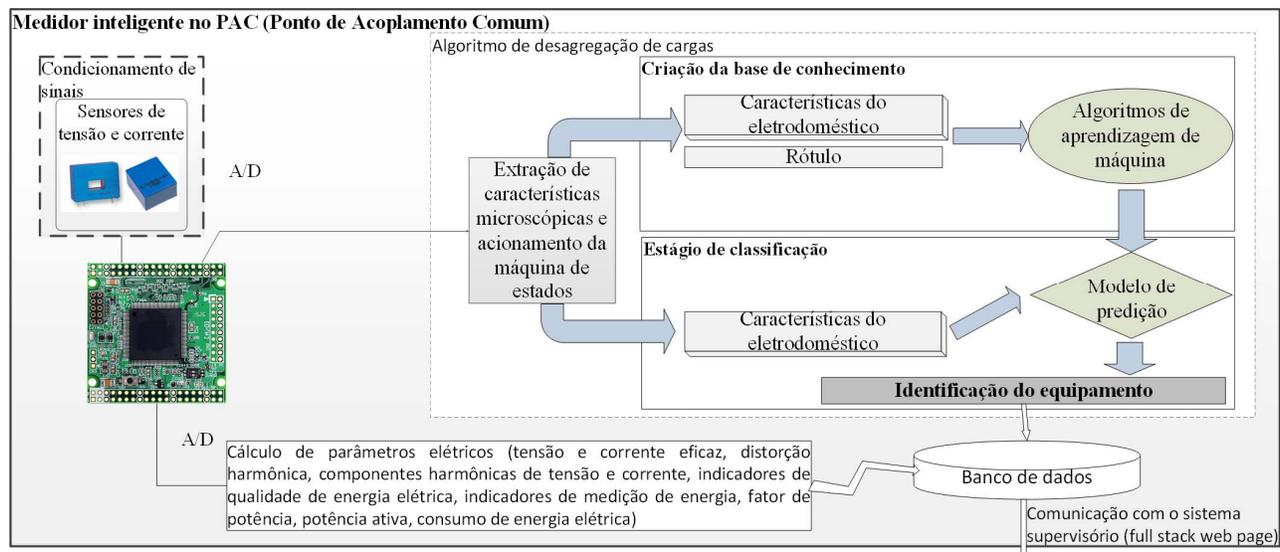


Fig. 2. Arquitetura do medidor cognitivo proposto em [24].

Para este projeto, tem-se adaptação da implementação do sistema de desagregação proposto por Souza em [24], apresentado na Figura 2. Neste sistema, há a extração microscópica de dados (ou seja, pela análise das formas de onda de tensão e corrente) e, junto com a assinatura de potência, é feita a detecção de cargas por algoritmos de máquina de estados e de reconhecimento de padrões.

No caso da arquitetura do medidor cognitivo apresentada na Figura 2, há a aquisição de sinais, a análise da assinatura de potência em conjunto com o armazenamento de: indicadores de consumo, de qualidade da energia elétrica, de continuidade e do consumo integrado). Quando há um evento de carga ligada, carga desligada ou mudança de nível de potência da carga, há a detecção de rampa, as características das formas de onda são extraídas para o novo evento e são enviadas ao algoritmo de reconhecimento de padrões. Em [24] com as características e o conjunto de dados criado, o algoritmo de aprendizagem de máquina que obteve maior exatidão foi o KNN (*k-nearest neighbor*) [24,32].

Após o reconhecimento de carga, dados referentes à carga são armazenados em um banco de dados. Estes dados contêm a identificação da carga, a potência média da carga, o horário de início do ciclo de funcionamento, o horário de fim do funcionamento e o tipo de carga (potência constante, variável, múltiplos estágios). Tais dados são armazenados no sistema embarcado do medidor criado em [24], mas podem ser enviados à nuvem ou para um servidor local. Para visualização de informações, há um sistema supervisor, no qual o consumidor pode realizar as seguintes ações: verificar as cargas que consumiram energia em diversos períodos (diário, semanal, mensal, semestral), previsão de consumo no mês, seguir sugestões para economia de energia elétrica, confrontar os indicadores de continuidade do fornecimento, entre outros.

No contexto do sistema de pré-pagamento de energia elétrica, a arquitetura do medidor se manteve, porém foi adicionado um dispositivo sonoro, como o apresentado na Figura 3. A função do dispositivo sonoro é avisar ao consumidor que é momento de desligar a carga que está utilizando. Também foram adaptadas técnicas para o gerenciamento de consumo de acordo com a flexibilidade, ou seja, o consumidor pode ser induzido a reduzir o consumo de algumas cargas (por exemplo, o tempo de uso do chuveiro) para buscar a redução do consumo de energia elétrica.



Fig. 3. Dispositivo emissor de som sem fio D-Link DHC-S220.

O sistema de gestão que está sendo proposto neste trabalho tem a necessidade de conhecer previamente o padrão de consumo desagregado de energia elétrica do consumidor ou da região. Portanto, há a aprendizagem comportamental de uso de eletrodomésticos do consumidor para que o sistema possa

gerenciar o consumo e restringir conforme a necessidade configurada pelo consumidor. Essa etapa é importante para indicar quais são as cargas que permitem a flexibilidade ou redução de uso. Esta análise tem como objetivo:

- Separar as cargas que não permitem a flexibilidade, como a geladeira, que possui ciclos ao decorrer do dia e se for desligada pode estragar os alimentos do consumidor.
- Identificar as cargas que não permitem flexibilidade por ser pouco utilizada ou que necessita funcionar durante um tempo pré-estabelecido ou definido para realizar uma tarefa, como o micro-ondas e a máquina de lavar roupas.
- Identificar as cargas responsáveis por uma grande parcela de consumo ou por uso frequente. São exemplo destas cargas o chuveiro, o ar condicionado e o ferro de passar roupas. Estas são as cargas de interesse que o sistema indica para a redução de uso para alcançar o objetivo de consumo, tanto na redução de consumo quanto na duração de créditos, de acordo com a expectativa do consumidor.

Após conhecer o comportamento do consumidor, o sistema pré-pago fica disponível. Há uma interface na qual o consumidor coloca crédito e a expectativa de duração, junto com a ciência de que o sistema será intrusivo e emitirá sons para policiar o consumidor no uso ponderado de seus equipamentos. Após isso, o sistema fica responsável em verificar a factibilidade do consumo cadenciado, de acordo com a expectativa, e ajudar o consumidor a reduzir o consumo. Através do comportamento levantado de consumo, o sistema analisa o histórico, quais cargas que poderão sofrer a redução de uso e estabelece a redução de uso das cargas.

A seção IV apresenta dois resultados: conforme a análise do comportamento de consumo de uma residência, utilizando o medidor desenvolvido em [24] e; conforme o histórico médio de consumo de uma região, através dos dados do SINPHA (Sistema de Informações de Posses de Eletrodomésticos e Hábitos de Consumo) do Procel (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica) [33].

## IV. RESULTADOS

### A. Caso 1 – Dados Coletados de uma Residência

Para este caso, foram coletados o consumo desagregado de uma residência por três meses, no período de abril a junho de 2018. A Tabela IV apresenta os valores da média mensal do consumo na residência separado por equipamentos.

Com os resultados de desagregação da Tabela IV, o sistema consulta, em uma tabela no banco de dados, os equipamentos a serem classificados como “flexível”, “parcialmente flexível” e “não flexível”, conforme apresenta a Tabela V.

As cargas “flexíveis” são aquelas que o sistema faz a programação para a redução de uso. As consideradas “parcialmente flexíveis” são aquelas que podem ser sugerida a redução de consumo, caso o consumidor não esteja respeitando as ordens de redução de uso ou dependendo da política rígida do consumo, de acordo com a expectativa de duração. As cargas “não flexíveis” são aquelas que o sistema não fará a redução. A categoria “outros” não há flexibilidade, pois podem ocorrer erros na detecção junto com a soma de equipamentos que consomem pouca energia elétrica.

De acordo com os três meses, o consumo médio mensal na residência é equivalente a 225,2 kWh, tendo as cargas:

- **Flexíveis:** 133,1 kWh, correspondente a 59,1% do consumo total;
- **Parcialmente flexíveis e não flexíveis:** 92,1 kWh, correspondente a 40,9% do consumo total.

TABELA IV  
CONSUMO MÉDIO MENSAL DAS CARGAS NA RESIDÊNCIA UTILIZADA COMO ESTUDO DE CASO

Carga / Eletrodoméstico	Potência Nominal (W)	Consumo no mês (kWh)	Tempo médio de uso por operação (minutos)
Ar condicionado	1200	48,0	77,8
Chuveiro	5500	46,1	9,4
Televisão	120	29,7	111,4
Geladeira	135	28,2	-
Ferro de passar roupas	1300	15,1	48,4
Laptop	40	13,0	490
Forno elétrico	3000	12,1	60,5
Iluminação	4 a 30	9,3	-
Máquina de lavar roupas	400	7,2	240,2
Micro-ondas	1250	5,2	8,05
Outros	-	11,3	-
<b>Consumo total</b>	-	<b>225,2</b>	-

TABELA V  
FLEXIBILIDADE DAS CARGAS PARA A REDUÇÃO DE CONSUMO

Carga / Eletrodoméstico	Condição
Ar condicionado	Flexível
Chuveiro	Flexível
Televisão	Flexível
Geladeira	Não flexível
Ferro de passar roupas	Parcialmente flexível
Laptop	Parcialmente flexível
Forno elétrico	Não flexível
Iluminação	Flexível
Máquina de lavar roupas	Não flexível
Micro-ondas	Não flexível
Outros	Não flexível

O sistema reserva 92,1 kWh como consumos que não poderão ser ajustados. O restante será reajustado para a redução de consumo e alcançar as metas. Para este propósito, foi considerado o valor de crédito de 200 kWh e a expectativa de duração do crédito por 30 dias. Nesta aplicação, o protótipo do medidor está ligado no PAC, mas não está substituindo o medidor convencional. Assim sendo, o sistema solicita que o usuário coloque o código de recarga e a expectativa de uso, conforme a interface apresentada na Figura 4.



Fig. 4. Interface para a inserção de créditos e de expectativa de duração.

Após a verificação do código de recarga, o sistema confirma ao consumidor o valor creditado e oferece a opção ao gerenciamento automático do consumo, de acordo com o tempo de expectativa do usuário, conforme a Figura 5.

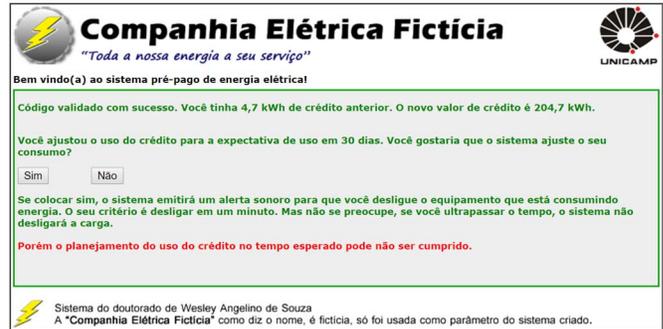


Fig. 5. Interface para confirmação do gerenciamento do consumo.

Se o consumidor optar pelo gerenciamento, o sistema se adaptará às situações de cargas flexíveis. Esta técnica é simples, pois subtrai-se do crédito o consumo médio das cargas que não possuem flexibilidade. Tem-se 92,1 kWh de consumo das cargas “parcialmente flexíveis” e “não flexíveis”. Assim, o sistema faz a gestão das cargas “flexíveis” dentro do valor remanescente de 107,9 kWh. Em seguida, o sistema coleta do banco de dados do medidor o histórico de uso dos equipamentos na residência e retorna uma tabela com o tempo de uso diário, quantas vezes a carga foi utilizada em média por dia e cria uma tabela com estimativas de redução proporcional ao consumo médio do consumidor. A Tabela VI apresenta as informações que o sistema coleta para o início da gestão e a Tabela VII apresenta o ajuste do sistema para controlar o tempo reduzido de uso das cargas.

TABELA VI  
PLANO DE REDUÇÃO DE CONSUMO DO GERENCIADOR

Carga / Eletrodoméstico	Uso médio diário	Consumo Atual	Meta de consumo
Ar condicionado	0,6	48,0	36,0
Chuveiro	1,8	46,1	34,6
Televisão	4,3	29,7	22,3
Iluminação	35,4	9,3	7,0
Cargas não flexíveis	-	92,1	92,1
Total do consumo	-	225,2	200,0

TABELA VII  
PLANO DE REDUÇÃO DE TEMPO DE USO DE CARGAS

Carga / Eletrodoméstico	Tempo de uso por operação atual (minutos)	Tempo de uso por operação ajustado (minutos)
Ar condicionado	77,8	58,0
Chuveiro	9,4	7,0
Televisão	111,4	83,5
Iluminação	-	-

Após a criação das regras de redução, o sistema permanece realizando a desagregação e detecta o instante em que a carga foi ligada, iniciando uma espécie de “cronômetro”. Quando o tempo de uso estiver a um minuto do tempo determinado pelo sistema, é enviado um comando para o dispositivo emissor de som, que toca continuamente por cinco segundos, deixando o

consumidor ciente de que o tempo de uso do eletrodoméstico está se esgotando. Como se trata de um sistema não intrusivo, dá-se ao consumidor a opção de ignorar o sinal. Para alcançar as metas de duração do crédito, o atendimento ao alerta sonoro é primordial. Neste estudo de caso, foi feito o atendimento ao alerta, havendo uma significativa redução de consumo e a meta de consumo foi atingida, conforme apresenta a conta de energia elétrica da Figura 6.

HISTÓRICO DE CONSUMO		kWh	Dias
2018	AGO	172	31
	JUL	228	30
	JUN	231	30
	MAI	217	31
	ABR	222	30
	MAR	225	30
	FEV	214	28
	JAN	231	32
2017	DEZ	241	30
	NOV	225	29
	OUT	221	32
	SET	240	31
	AGO	235	32

Fig. 6. Descrição do histórico de consumo da conta na residência.

Portanto, o alerta ajudou o consumidor a alcançar o objetivo de consumo abaixo de 200 kWh dentro do tempo esperado. A Tabela VIII apresenta o consumo desagregado no mês.

Carga / Eletrodoméstico	Consumo no mês (kWh)	Tempo médio de uso por operação (minutos)
Ar condicionado	14,2	53,8
Chuveiro	33,7	7,3
Televisão	22,7	103,4
Geladeira	25,9	-
Ferro de passar roupas	13,7	43,8
Laptop	15,0	450
Forno elétrico	5,7	63,3
Iluminação	10,9	-
Máquina de lavar roupas	8,7	230,1
Micro-ondas	3,7	6,0
Outros	17,9	-
Consumo total	172,2	-

Houve redução maior do que a meta estabelecida por razões climáticas, pois no mês de junho é inverno e o ar condicionado foi pouco utilizado. Mesmo assim, houve a preocupação do consumidor em reduzir os gastos com energia e os valores de uso definidos como meta ficaram próximos ao consumo na residência. A seguir serão apresentados resultados para o perfil de curva de carga da região. Portanto, os dados de consumo desagregados não foram coletados pelo medidor de energia e tampouco utilizado o comportamento padrão do consumidor.

### B. Caso 2 - Dados com Base na Curva de Carga da Região

No ano de 2005, o Procel fez um levantamento da curva de carga no país (SINPHA) [33], dividido por regiões. Por ser um estudo feito em 2005, os dados de cargas tendem a não ser equivalente às cargas atuais, pois os eletrodomésticos foram aperfeiçoados, alguns substituídos ou inutilizados desde 2005. A Figura 7 apresenta a curva de cargas do SINPHA para a

região Sudeste e a Tabela IX apresenta o consumo, de acordo com dados do SINPHA [33] e do governo federal [34].

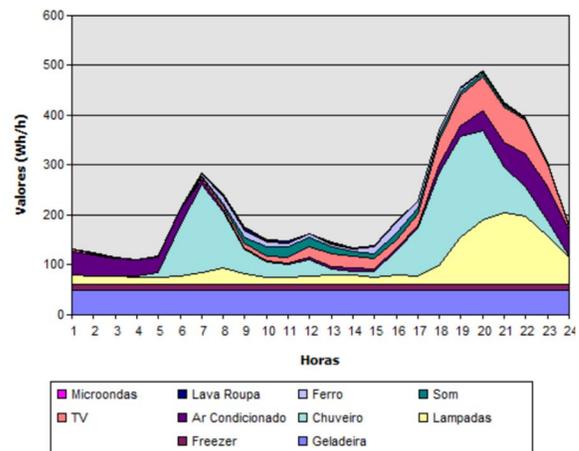


Fig. 7. Curva de cargas na região Sudeste, em 2005, SINPHA [33].

Carga / Eletrodoméstico	Condição	Consumo (%)
Chuveiro	Flexível	27,5%
Geladeira	Não flexível	22,2%
Lâmpadas (Iluminação)	Flexível	20,7%
Ar condicionado	Flexível	11,1%
Televisor	Flexível	7,8%
Freezer	Não flexível	4,8%
Ferro de passar roupas	Parcialmente flexível	2,9%
Som	Não flexível	2,2%
Máquina de lavar roupas	Não flexível	0,6%
Micro-ondas	Não flexível	0,2%

Se considerar o consumo médio da residência nos três meses anteriores (225,3 kWh), o consumo desagregado seria de acordo com a Tabela X. A Tabela X também apresenta a meta de consumo. As cargas “Som” e “Freezer”, por não existirem na residência, são classificadas como “outros”, portanto considerada como carga “não flexível”. Assim, tem-se 32,9% (74,05 kWh) de consumo de cargas “não flexíveis”, restando 125,95 kWh para as cargas “flexíveis”.

Carga / Eletrodoméstico	Consumo “atual” (kWh)	Meta de consumo (kWh)
Chuveiro	62,1	51,7
Lâmpadas (Iluminação)	46,6	38,8
Ar condicionado	25,0	20,8
Televisor	17,6	14,7
“Não flexíveis”	74,0	74,0
Consumo total	225,3	200,0

Após a criação da estimativa, o sistema estabelece o tempo de uso das cargas de acordo com a alimentação de dados do consumidor, da análise socioeconômica e das estações do ano (por exemplo, o uso do ar condicionado é maior no verão).

Na residência do estudo de caso, tem-se dois moradores, ar condicionado, não há freezer, o mês é de inverno e as duas pessoas passam período integral fora da residência. Desta forma, é feito um cronograma de uso para atingir as metas, seguindo as potências nominais das cargas na residência,

conforme apresenta a Tabela XI. Tomando como referência o consumo da residência em estudo no mês de agosto, as metas foram alcançadas, conforme apresenta a Tabela XII.

TABELA XI  
METAS DE CONSUMO E TEMPO DE USO POR CARGAS

Carga / Eletrodoméstico	Potência nominal (W)	Uso médio diário	Meta de consumo (kWh)	Tempo de uso (min)
Chuveiro	5500	2,00	51,7	9,4
Lâmpadas	-	-	38,8	-
Ar condicionado	1200	0,33	20,8	104
Televisor	120	1,50	14,7	163,3

TABELA XII  
META DE CONSUMO E CONSUMO MENSAL NA RESIDÊNCIA

Carga / Eletrodoméstico	Consumo no mês (kWh)	Meta de Consumo (kWh)	Expectativa
Ar condicionado	14,2	20,8	Atingida
Chuveiro	33,7	51,7	Atingida
		14,7	Não
Televisão	22,7		atingida
Iluminação	10,9	38,8	Atingida
Não flexíveis	90,7	74,0	-
Consumo total	172,2	200,0	Atingida

O consumo com ar condicionado, chuveiro e iluminação foi menor, mas o consumo com televisão e cargas não flexíveis foi maior. Desta maneira, o sistema permite a aproximação da meta quando se utilizam valores médios das curvas de carga, porém não garante a expectativa. Portanto, o ideal é conhecer previamente o consumo do consumidor ou uma análise atualizada do consumo das cargas da região.

## V. CONCLUSÃO

Este artigo mostrou um estudo sobre a tecnologia de medidores de energia elétrica com o sistema de pré-pagamento no mundo, bem como os motivos da adoção, as classes de interesse e as tecnologias utilizadas. No Brasil, o sistema de pré-pagamento de energia começou a ser regulamentado e analisadas futuras aplicações e tecnologias.

Frente a esta nova opção, o artigo apresentou uma nova técnica para a gestão de consumo baseada na desagregação não intrusiva de cargas. O gerenciador recebe do consumidor o valor creditado e a expectativa de duração do crédito. O gerenciador obtém informações de histórico de consumo, analisa as cargas que permitem a flexibilidade da redução de uso e determina o tempo máximo de uso para cada carga flexível. Quando o tempo de uso está próximo ao limite, um sinal é enviado à sirene, que toca por cinco segundos e avisa o consumidor que a carga que está em uso deve ser desligada.

Os resultados em uma residência, utilizando o protótipo do medidor cognitivo de [24] que foi ajustado para este projeto, demonstraram que o sistema alcançou o objetivo, a redução de consumo e a expectativa dos créditos durarem o tempo definido pelo consumidor. Porém, é necessário que o histórico de consumo seja compatível com o consumidor, por isso o primeiro resultado se mostrou factível e atingiu o objetivo, enquanto o segundo resultado atingiu parte do objetivo. A curva de carga do SINPHA, por ser de 2005, pode ser também o

motivo deste problema, pois houve uma considerável evolução das cargas residenciais desde o ano de 2005.

## AGRADECIMENTO

Os autores agradecem a FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, processo 2012/19375-1) e a CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz, processo PD ANEEL-0063-3032/2017) pelos recursos destinados ao desenvolvimento desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- [1] Barai, G. R.; Krishnan, S. and Venkatesh, B. Smart metering and functionalities of smart meters in smart grid - a review. *IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, pp. 138-145, 2015.
- [2] Makonin, S.; Popowich F. and Gill, B. The cognitive power meter: Looking beyond the smart meter. *26th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, pp. 1-5, 2013.
- [3] Platt, G.; West, S. and Moore, T. The real-world challenges and opportunities of distributed generation. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 1112-1116, 2015.
- [4] Souza, W. A. et al. Power Quality, Smart Meters and Additional Information from Different Power Terms. *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 1, pp. 158-165, 2015.
- [5] Zheng, J.; Gao D. W. and Lin, L. Smart Meters in Smart Grid: An Overview. *IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*, Denver, CO, pp. 57-64, 2013.
- [6] Oprea, I. and Caracasian, L. On the implementation of the functionalities of smart metering systems. *8th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, Bucharest, pp. 1-6, 2013.
- [7] Oprea, I. and Caracasian, L. The relation between smart meters and electricity consumers. *12th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, Wroclaw, pp. 325-329, 2013.
- [8] Instituto Acende Brasil. Perdas Comerciais e Inadimplência no Setor Elétrico. *White Paper 18*, São Paulo, 40 p. 2017.
- [9] Esteves, G. R. T. et al. An overview of electricity prepayment experiences and the Brazilian new regulatory framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 54, pp. 704-722, 2016.
- [10] Kambule, N.; Yessoufou, K.; Nwulu, N. A review and identification of persistent and emerging prepaid electricity meter trends. *Energy for Sustainable Development*, vol 43, pp. 173-185, 2018.
- [11] Tewari, D. D.; Shah, T. An assessment of South African prepaid electricity experiment, lessons learned, and their policy implications for developing countries. *Energy Policy*, vol 31, pp. 911-927, 2003.
- [12] Gaunt, C. T. Electricity distribution industry restructuring in South Africa: A case study. *Energy Policy*, vol 36, pp. 3448-3459, 2008.
- [13] Baptista, I. We Live on Estimates': Everyday Practices of Prepaid Electricity and the Urban Condition in Maputo, Mozambique. *Int. Journal of Urban and Regional Research*, vol 39, pp. 1004-1019, 2015.
- [14] Darby, S. J. Metering: EU policy and implications for fuel poor households. *Energy Policy*, vol 49, pp. 98-106, 2012.
- [15] Deloitte. Evolving measures for the effective implementation of Prepaid Metering in the country. *Report to 'Forum of Regulators' on Pre-paid Meter*, pages 96, 2011.
- [16] Gans, W.; Alberini, A.; Longo A. Smart meter devices and the effect of feedback on residential electricity consumption: Evidence from a natural experiment in Northern Ireland. *Energy Economics*, pp. 729-743, 2013.
- [17] Chinomona, R.; Sandada, M. Customers' Perceptions on ESKOM's Pre-Paid Billing System and the Effects on Their Satisfaction and Trust. *Mediterranean Journal of Social Sciences*, vol 5, pp. 119, 2014.
- [18] Never, B. Social norms, trust and control of power theft in Uganda: Does bulk metering work for MSEs? *Energy Policy*, vol 82, pp. 197-206, 2015.
- [19] Owen, G.; Ward, J. Smart pre-payment in Great Britain. *Sustainability first*, p 38, 2010.

- [20] ANEEL, Resolução Autorizativa nº 2150 de 4 de novembro de 2009, *Agência Nacional de Energia Elétrica*, 2009.
- [21] ANEEL, Resolução Autorizativa nº 1822 de 3 de março de 2009, *Agência Nacional de Energia Elétrica*, 2009.
- [22] Garcia, F. D. Medidor cognitivo de energia para aplicações em eficiência energética. *Dissertação de Mestrado*, FEB/UNESP, 2018
- [23] Paes, F. L. et al. Arquitetura do Medidor Cognitivo de Energia. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*. Vol 7, n.2, pp. 189-198, 2018.
- [24] Souza, W. A. Estudos de Técnicas de Análise e Tecnologias para o Desenvolvimento de Medidores Inteligentes de Energia Residenciais. *Tese de Doutorado*. UNICAMP. Campinas, São Paulo. 2016.
- [25] Garcia F. D. et al. Power Metering: History and Future Trends. *Ninth Annual IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*, Denver, CO, pp. 26-33, 2017.
- [26] Rathmair, M. and Haase, J. Load identification and management framework for private households. *39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, Vienna, pp. 5729-5734, 2013.
- [27] Abubakar, I. et al. Application of load monitoring in appliances' energy management – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 67, pp. 235-245, 2017.
- [28] Dong, M. et al. An Event Window Based Load Monitoring Technique for Smart Meters. *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. 787-796, 2012.
- [29] Fernandes, R. A. S.; da Silva, I. and Oleskovicz, M. Load Profile Identification Interface for Consumer Online Monitoring Purposes in Smart Grids. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, no. 3, pp.1507-1517, 2013.
- [30] Huang, T. D.; Wang, W. S. and Lian, K. L. A New Power Signature for Nonintrusive Appliance Load Monitoring. *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol.6, no.4, pp.1994-1995, 2015.
- [31] Ridi, A.; Gisler C. and Hennebert, J. A Survey on Intrusive Load Monitoring for Appliance Recognition. *22nd International Conference on Pattern Recognition*, Stockholm, pp. 3702-3707, 2014.
- [32] Souza, W. A. et al. A NILM dataset for cognitive meters based on conservative power theory and pattern recognition techniques. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, pp.1-14, 2018.
- [33] Procel Info, Sistema de Informações de Posses de Eletrodomésticos e Hábitos de Consumo. *Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética*, 2005. Acessado em 25/07/2018. Disponível em <<http://www.procelinfo.com.br/Sinpha/Home.asp>>.
- [34] Brasil. Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil. *Pesquisa de Posse de Equipamentos e hábitos de consumo*. Ano base 2005. Classe Residencial. Governo Federal, 2007.