



**INSTITUTO FEDERAL  
SANTA CATARINA**

**CÂMPUS FLORIANÓPOLIS  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**BRUNA PEIXOTO DE SOUZA**

# **Gerenciamento de energia através da lógica fuzzy em um sistema híbrido isolado de geração de energia**

**Florianópolis – SC  
2018**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLÓGICA DE SANTA CATARINA  
CÂMPUS FLORIANÓPOLIS  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**BRUNA PEIXOTO DE SOUZA**

**GERENCIAMENTO DE ENERGIA ATRAVÉS DA LÓGICA FUZZY EM  
UM SISTEMA HÍBRIDO ISOLADO DE GERAÇÃO DE ENERGIA**

**FLORIANÓPOLIS, JUNHO DE 2018.**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLÓGICA DE SANTA  
CATARINA  
CÂMPUS FLORIANÓPOLIS  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**BRUNA PEIXOTO DE SOUZA**

**GERENCIAMENTO DE ENERGIA ATRAVÉS DA LÓGICA FUZZY EM  
UM SISTEMA HÍBRIDO ISOLADO DE GERAÇÃO DE ENERGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
submetido ao Instituto Federal de  
Educação, Ciência e Tecnologia de Santa  
Catarina como parte dos requisitos para  
obtenção do título de Engenheiro(a)  
Eletricista.

Professor Orientador: Everthon Taghori  
Sica, Dr. Eng<sup>o</sup>.

**FLORIANÓPOLIS, JUNHO DE 2018.**

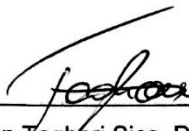
**GERENCIAMENTO DE ENERGIA ATRAVÉS DA LÓGICA FUZZY EM UM  
SISTEMA HÍBRIDO ISOLADO DE GERAÇÃO DE ENERGIA**

**BRUNA PEIXOTO DE SOUZA**

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro(a) Eletricista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, junho, 2018.

Banca Examinadora:



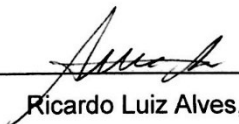
---

Everthon Taghóri Sica, Dr. Eng°



---

Edison A. C. Aranha Neto, Dr. Eng°



---

Ricardo Luiz Alves, Dr. Eng°

## **AGRADECIMENTOS**

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração.

Ao professor Everthon Taghori Sica, pela orientação, apoio e confiança durante esse período e pela amizade e aprendizado ao longo do curso.

Aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional não somente durante a elaboração deste trabalho, mas em todos os anos dedicados ao curso.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

## RESUMO

O trabalho se constitui na implementação e simulação de um modelo de sistema de gerenciamento de energia de um sistema híbrido isolado de geração de energia que possui como componentes: gerador a óleo diesel com potência de 75 kVA; sistema fotovoltaico com potência instalada de 30 kWp; sistema de armazenamento com baterias de íon lítio com capacidade de 150 kWh/75kW. A carga considerada possui um pico de demanda máximo de 40 kVA. A metodologia de controle de gerenciamento de energia aplicada é analisada em duas estratégias: lógica Fuzzy e controle convencional *cycle-charging*. As simulações são realizadas através do *software* MATLAB, com a utilização da ferramenta *Fuzzy Logic Toolbox* e o Simulink para a modelagem do sistema. Os resultados para três perfis de carga diferentes, para cada metodologia de gerenciamento, são confrontados através das condições de suprimento de energia e utilização da energia renovável, para que se encontre a melhor solução, ou seja, com um balanço de energia mais próximo de zero ou menor possível.

**Palavras-chave:** Energia. Lógica Fuzzy. Gerenciamento de Energia. Cycle-charging.

## **ABSTRACT**

This work consists in the implementation and simulation of a model of energy management system of an isolated hybrid energy generation system that has as components: diesel generator with power of 75 kVA; photovoltaic system with installed power of 30 kWp; storage system with lithium ion batteries with a capacity of 150 kWh / 75 kW. The load considered has a maximum demand peak of 40 kVA. The applied energy management control methodology is divided into two: Fuzzy logic and conventional cycle-charging control. The simulations are performed through the MATLAB software, using the Fuzzy Logic Toolbox and Simulink for system modeling. The results for three different load profiles for each management system are confronted through the power supply conditions and use of renewable energy, in order to arrive at the best solution, which is an energy balance closer to zero or less possible.

**Keywords:** Energy. Fuzzy Logic. Energy Management. Cycle-charging.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema Interligado Nacional (SIN). .....	11
Figura 2 - Estratégia cycle-charging para um sistema FV/Diesel/Baterias. ....	24
Figura 3 - Diagrama de blocos do controle utilizando lógica Fuzzy.....	25
Figura 4 - Exemplo de etiquetas para representação de conjuntos Fuzzy do mesmo universo de discurso. ....	27
Figura 5 - Agregação dos conjuntos Fuzzy. ....	28
Figura 6 - Exemplo de agregação de regras. ....	29
Figura 7 - Exemplo do processo de inferência Mamdani. ....	31
Figura 8 - Perfis de carga utilizados na simulação. ....	34
Figura 9 - Potência normalizada do dia com melhor índice de irradiação do ano. ....	34
Figura 10 - Potência normalizada do dia com pior índice de irradiação do ano. ....	35
Figura 11 - Blocos de entrada das curvas de carga e irradiação no Simulink. ....	35
Figura 12 - Cálculo do estado de carga das baterias. ....	36
Figura 13 - Controlador Cycle-charging. ....	37
Figura 14 - Funções de pertinência de entrada do controlador Fuzzy. ....	38
Figura 15 - Função de pertinência de saída do controlador Fuzzy.....	40
Figura 16 - Resultados com controlador Fuzzy para perfil residencial de carga. ....	42
Figura 17 - Resultados com controlador Fuzzy para perfil industrial de carga.....	42
Figura 18 - Resultados com controlador Fuzzy para perfil comercial de carga.....	43
Figura 19 - Energia consumida do gerador, em kWh, no <i>software</i> Simulink. ....	43
Figura 20 - Suprimento da carga gerenciador Fuzzy, residencial, industrial e comercial, respectivamente. ....	45
Figura 21 - Suprimento da carga gerenciador CC, residencial, industrial e comercial, respectivamente. ....	45



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Regras Fuzzy que resultam no comando do gerador.....	41
Tabela 2 - Resultados da simulação para os controladores CC e Fuzzy. ....	44
Tabela 3 - Carregamento das baterias.....	46

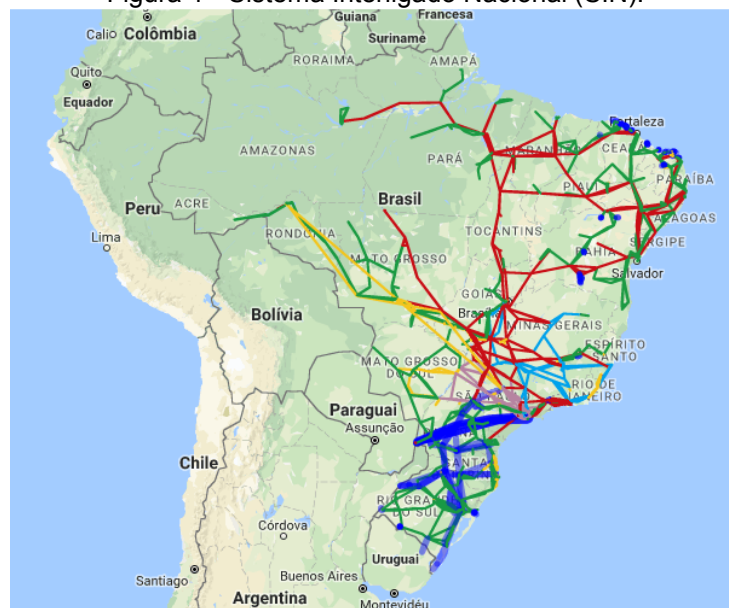
## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA .....	12
1.2	JUSTIFICATIVA .....	13
1.3	OBJETIVO GERAL .....	14
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	15
<b>2</b>	<b>SISTEMAS HÍBRIDOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA</b> .....	<b>16</b>
2.1	COMPONENTES DE GERAÇÃO E ARMAZENAMENTO DO SISTEMA HÍBRIDO DE ENERGIA .....	17
2.1.1	<b>Gerador diesel</b> .....	<b>17</b>
2.1.2	<b>Sistema fotovoltaico</b> .....	<b>18</b>
2.1.3	<b>Sistema de armazenamento de energia</b> .....	<b>18</b>
2.2	ESTRATÉGIAS DE CONTROLE E GERENCIAMENTO DE ENERGIA ....	19
2.3	CONCLUSÃO .....	21
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>23</b>
3.1	MÉTODO DE CONTROLE CYCLE-CHARGING .....	23
3.2	MÉTODO DA LÓGICA FUZZY PARA CONTROLE (CONTROLE DIFUSO) .....	24
3.2.1	<b>Fuzzificação</b> .....	<b>25</b>
3.2.2	<b>Inferência</b> .....	<b>28</b>
3.2.3	<b>Defuzzificação</b> .....	<b>31</b>
3.3	CONCLUSÃO .....	32
<b>4</b>	<b>ESTUDO DE CASO</b> .....	<b>33</b>
4.1	ENTRADA DE DADOS NA SIMULAÇÃO .....	33
4.1.1	<b>Perfis de carga e irradiação solar</b> .....	<b>33</b>
4.1.2	<b>Estado de carga do sistema de armazenamento (SOC)</b> .....	<b>36</b>
4.2	CONTROLADORES .....	36
4.2.1	<b>Controlador <i>cycle-charging</i></b> .....	<b>36</b>
4.2.2	<b>Controlador Fuzzy</b> .....	<b>37</b>
4.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	41
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>50</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Sistema Interligado Nacional (SIN) não possui uma cobertura total no território brasileiro, como pode ser visto na Figura 1. Existem locais no norte do país, por exemplo, que não possuem redes de transmissão interligadas ao SIN, chamados de Sistemas Isolados. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (2014), sistemas isolados são sistemas elétricos de serviço público de distribuição de energia elétrica que, em sua configuração normal, não estejam eletricamente conectados ao Sistema Interligado Nacional – SIN, por razões técnicas ou econômicas. Isso acontece devido ao afastamento de algumas regiões dos centros de produção de energia elétrica ou dos pontos de conexão ao sistema elétrico de potência, além da preservação ambiental, o que dificulta a instalação de linhas de transmissão e distribuição assim como a logística de entrega de energia.

Figura 1 - Sistema Interligado Nacional (SIN).



Fonte: ONS (2017).

Cada sistema isolado deve possuir capacidade para atender sua própria carga, já que não há intercâmbio de energia entre as regiões como acontece nas localidades atendidas pelo SIN. No entanto, atualmente, os sistemas isolados existentes no Brasil são, majoritariamente, atendidos por geradores a óleo, o que torna o gerenciamento energético inexistente e o suprimento de energia ineficiente, poluente e de alto custo.

Uma alternativa a esse sistema de atendimento a demanda somente por geradores a óleo são os sistemas híbridos de geração de energia. Um sistema híbrido é composto por mais de uma fonte de geração de energia. As configurações de fontes de produção de energia são geralmente de pequenas dimensões, o que faz com que esses sistemas, na maioria das vezes, possam ser operados em modo isolado, fornecendo energia para áreas remotas, onde a extensão da rede elétrica traria custos excessivos (RIBEIRO, 2009).

### 1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O sistema híbrido ao qual esse estudo se baseia possui como componentes: gerador a óleo diesel com potência de 75 kVA; sistema fotovoltaico com potência instalada de 30 kWp; sistema de armazenamento com baterias de íon lítio com capacidade de 150 kWh/75kW. A carga considerada possui um pico de demanda máximo de 40 kVA.

Um sistema de gerenciamento de energia é necessário quando se tem fontes distintas em um sistema híbrido, como é o caso do sistema proposto. Isto se dá predominantemente pela intermitência das fontes renováveis que dependem de condições não controláveis, como a irradiação solar por exemplo. Uma estratégia de controle e gerenciamento de energia deve garantir alta eficiência e confiabilidade do sistema.

O problema se constitui na implementação e simulação de um modelo de gerenciador de energia de um sistema híbrido isolado através da lógica Fuzzy, que leva em consideração a não linearidade da geração fotovoltaica de energia, e posterior comparação com método convencional de controle de despacho de energia elétrica (*cycle-charging*).

Um parâmetro importante levado em consideração é que o tempo de aceleração e desaceleração do gerador a diesel é desconsiderado neste estudo, sendo considerado apenas quando já se encontra em pleno funcionamento. Além disso, a eficiência dos módulos fotovoltaicos é considerada 21%, a área da instalação fotovoltaica 100 m<sup>2</sup>, a temperatura ambiente e dos módulos 25 °C e o coeficiente de temperatura de máxima potência, baseado em uma média do que é

encontrado em datasheets dos módulos fotovoltaicos, é de  $-0,4 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ . Outros parâmetros de funcionamento relacionados ao gerenciamento energético são explicados na Capítulo 3.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A existência de sistemas isolados é explicada pela grande dimensão territorial do Brasil, o qual possui regiões de produção de energia muito afastadas dos maiores centros de consumo além de que, muitas vezes, existem regras de preservação ambiental e dificuldades de instalação de redes de transmissão e distribuição.

O Planejamento Energético dos Sistemas Isolados de 2018, do ONS (Organizador Nacional do Sistema), abrange 233 sistemas isolados, localizados principalmente na região Norte, nos estados do Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia e Roraima. Além disso, há o sistema isolado da ilha de Fernando de Noronha, em Pernambuco (ONS, 2018). A área atendida pelos sistemas isolados em 2009, no Brasil, contemplava uma população de 7,5 milhões de habitantes (ELETROBRÁS, 2009).

A maioria desses sistemas isolados, atualmente, é composta apenas de geradores a óleo, com pouco ou nenhum controle e gerenciamento energético, de alto custo devido a dependência de combustível, de forma limitada, poluente e ineficiente. Além disso, a logística de abastecimento para cada unidade geradora é altamente dificultosa visto que, como já mencionado, esses sistemas possuem localidades afastadas e de difícil acesso, na maioria das vezes (PORTAL BRASIL, 2011).

A principal dificuldade dos sistemas isolados é o planejamento visto que o intercâmbio de energia entre as regiões não é possível devido a não interligação com o SIN (Sistema Interligado Nacional). Cada um deles deve atender de forma confiável sua carga e ainda possuir uma capacidade de expansão da oferta de energia, uma vez que podem acontecer aumentos de demanda do mercado que atendem (ELETROBRÁS, 2009).

O atendimento aos sistemas isolados é, geralmente, realizado por usinas térmicas que usam como combustível o óleo diesel e caracterizam-se pelo alto número de unidades geradoras de pequeno porte (ONS, 2018). Desta forma, o suprimento energético destas localidades somente a óleo diesel contrasta com a prioridade dada na regulação e com o desejado pela sociedade atual que é a utilização crescente de fontes de energia renováveis (EPE, 2014).

Existem áreas onde uma ou mais fontes de energia renovável se destacam e podem ser combinadas a outras formas de geração de energia, formando um único sistema que se mostra atrativo economicamente, na maioria das vezes, além de confiável e flexível (BARRETO e PINHO, 2008). Dessa forma, justifica-se a possibilidade da aplicação de sistemas híbridos em locais que não são atendidos pelo SIN, visto que uma fonte de geração pode suprir a falta temporária de outra, aumentando a confiabilidade do atendimento a demanda do local.

Com a análise de todos esses fatos, os estudos para melhoramento das tecnologias utilizadas nesses sistemas, incluindo fontes alternativas de geração de energia, sistema de armazenamento e gerenciamento energético é importante para garantir a continuidade dos serviços de geração e a qualidade do atendimento, evitando cortes e reduzindo perdas.

### 1.3 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um modelo de simulação para o gerenciamento energético de um sistema híbrido isolado composto por gerador a diesel, sistema fotovoltaico e baterias e comparar a estratégia desenvolvida em Fuzzy com a estratégia de controle convencional *cycle-charging*.

### 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Simular computacionalmente a estratégia de controle e gerenciamento através da lógica Fuzzy;
- b) Simular computacionalmente a estratégia de controle e gerenciamento convencional *cycle-charging*;

- c) Comparar as duas estratégias simuladas;
- d) Analisar os resultados dos testes realizados em simulação, propor melhorias e apontar as dificuldades encontradas.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em 6 capítulos. O Capítulo 1 envolve a introdução e objetivos do trabalho, assim como uma justificativa para o mesmo. O Capítulo 2 traz a fundamentação teórica para que os próximos capítulos sejam melhor entendidos. No Capítulo 3 são explicadas as metodologias de controle utilizadas no estudo de caso. O estudo de caso inicia no Capítulo 4, apresentando os parâmetros utilizados nas simulação e a análise dos resultados obtidos. O trabalho encerra-se com uma conclusão geral, no Capítulo 5 e bibliografias utilizadas (Capítulo 6).

## 2 SISTEMAS HÍBRIDOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA

O primeiro sistema híbrido no Brasil, implantado em 1986, está situado em Fernando de Noronha e é composto por 75 kW de geração eólica e gerador diesel de 50 kW. O sistema já foi reopontencializado e atualmente possui uma capacidade de geração de 2,1 MW. Os demais sistemas híbridos implantados no Brasil estão situados na Amazônia, suprindo áreas que não são atendidas pelo SIN (Sistema Interligado Nacional) (BARRETO e PINHO, 2008).

Sistemas híbridos de produção de energia elétrica são sistemas que combinam duas ou mais fontes de produção de energia. As configurações de fontes de produção de energia são geralmente de pequenas dimensões, o que faz com que esses sistemas, na maioria das vezes, possam ser operados em modo isolado, fornecendo energia para áreas remotas, onde a extensão da rede elétrica traria custos excessivos (RIBEIRO, 2009).

De acordo com Matos (2013), estes sistemas podem ser constituídos apenas por fontes renováveis ou pela combinação de fontes não-renováveis com renováveis, dependendo da disponibilidade de recursos e estrutura do local a ser instalado. Em muitos casos, são constituídos de pelo menos uma fonte de energia renovável e por um sistema de geração à óleo diesel, que pode operar como *backup*, de modo a garantir a continuidade e maior confiabilidade dos sistemas híbridos.

A utilização de diversas fontes de geração de energia torna o sistema mais complexo e requer um gerenciamento e otimização do uso de cada fonte e de todo o conjunto. Assim, é necessária a aplicação de um controle de todas as fontes para que haja máxima eficiência na entrega da energia para o usuário (MATOS, 2013).

O modo de operação e despacho de energia de um sistema híbrido varia de acordo com os componentes do mesmo. Esta complexidade está relacionada com a natureza dos componentes, por exemplo, o funcionamento do gerador a diesel, que está limitado a uma potência máxima, o que influencia no seu custo de operação e eficiência e o sistema de baterias, que traz variáveis que devem ser



levadas em consideração no controle de despacho como corrente máxima admitida, estado de carga mínimo e máximo (RIBEIRO, 2009).

## 2.1 COMPONENTES DE GERAÇÃO E ARMAZENAMENTO DO SISTEMA HÍBRIDO DE ENERGIA

### 2.1.1 Gerador diesel

O gerador diesel nos sistemas híbridos de energia tem a função de atenuar o efeito da diminuição de produção de origem renovável durante períodos de pouca disponibilidade de recursos, durante a noite, por exemplo, para situações de geração de energia fotovoltaica. Ele serve como um sistema de apoio ao sistema de fontes renováveis, fazendo com que o sistema de armazenamento não necessite de um superdimensionamento além de aumentar a confiabilidade do conjunto em termos de diminuição do fator de probabilidade de perda de carga (RIBEIRO, 2009).

De acordo com Ameen, Pasupuleti e Khatib (2015), o gerador diesel é utilizado em sistemas híbridos de geração de energia como uma fonte de *backup* de energia. Quando não há energia advinda das fontes renováveis e o banco de bateria está descarregado, o gerador entra em operação suprindo a demanda com a potência necessária. O consumo desse gerador é dependente de suas condições de manufatura.

Além disso, o gerador diesel desempenha um papel fundamental em termo de otimização do controle do sistema já que, normalmente, deve trabalhar entre 70% e 90% da sua potência nominal para se ter uma utilização economicamente eficiente (RIBEIRO, 2009).

Por isso, Chang (2012) afirma que o gerador deve trabalhar o máximo de tempo possível a plena carga para assim maximizar sua eficiência e minimizar seu custo. Quando o gerador opera em baixa carga faz com que exista um aumento da fragilidade do cilindro, alta perda por fricção, aumento da viscosidade do óleo, baixa temperatura de combustão e deposição de combustível o que resultará em gastos maiores de manutenção e baixa eficiência do combustível e do gerador.

Quando existe um sistema de baterias instalado juntamente com um gerador, isso pode ajudar a suprir as cargas mais altas e o gerador diesel pode,

ainda, carregar as baterias, se houver excedente de energia, através de conversores CA/CC (Corrente alterna/Corrente contínua). Isso permite que o gerador diesel funcione com uma eficiência maior pois pode operar a plena carga e não desperdiçar energia (CHANG, 2012).

### 2.1.2 Sistema fotovoltaico

Usualmente, o sistema fotovoltaico é considerado como a principal fonte de geração de energia do sistema híbrido. A função, de modo geral, desse sistema é a transformação da irradiação solar em corrente contínua, essa corrente alimentará as cargas após a passagem por um controlador e inversor (MOHAMMED, PASUPULETI, *et al.*, 2015).

A potência fotovoltaica é dependente da irradiação solar, da diferença de temperatura entre os módulos e o ambiente e da eficiência do módulo fotovoltaico e inversor. Essa potência pode ser calculada através da equação (1) (LI, WEI e XIANG, 2012).

$$P_{pv} = k_1 \times A_s \times G \times (1 - k_T \Delta T) \quad (1)$$

Onde:

$P_{pv}$  é a potência da geração fotovoltaica em W;

$k_1$  é a eficiência dos módulos e do inversor;

$A_s$  é a área instalada dos módulos;

$k_T$  é o coeficiente de temperatura do módulo, presente no datasheet do fabricante;

$\Delta T$  é a diferença de temperatura entre o módulo e o ambiente;

$G$  é a irradiação do período, em  $W/m^2$ .

### 2.1.3 Sistema de armazenamento de energia

Quando existe excedente da geração renovável, que depende das condições ambientais, as baterias absorvem essa energia para que, no futuro, uma carga seja suprida com essa energia. Outra função do banco de baterias é promover

uma maior estabilidade (em frequência) ao sistema elétrico durante as transições de cargas de maior potência, atenuando as quedas de tensões bruscas (REIS, 2002).

As baterias tem como uma de suas características a estabilização das flutuações de corrente oriundas dos arranjos fotovoltaicos, assegurando uma faixa de corrente mais adequada para a operação dos componentes do sistema serem alimentados (MATOS, 2013).

De acordo com Li, Wei e Xiang (2012), o comportamento das baterias é caracterizado pelo estado de carga (SOC – *State of Charge*). Esse parâmetro deve ser levado em consideração no projeto da estratégia de controle do sistema híbrido de energia. Isso se dá pelo motivo de que as baterias possuem um estado de carga (SOC) mínimo e máximo para que sua vida útil seja preservada. Além disso, existem outros fatores que devem ser monitorados e controlados para que a utilização do sistema de armazenamento não prejudique a vida útil das baterias (RIBEIRO, 2009).

Esse SOC é calculado de acordo com a equação (2) (ZHAO, ZHANG, *et al.*, 2013). É importante ressaltar que o período de tempo em que a bateria foi operada entra nessa equação pois, quanto mais tempo é retirada ou injetada energia nas baterias, o SOC apresentará menor ou maior estado de carga (SOC).

$$SOC_{t+\Delta t} = SOC_t - P_{bat-t} \times \frac{\Delta t}{C_{bat}} \quad (2)$$

Onde:

$SOC_{t+\Delta t}$  é o estado de carga que está sendo calculado;

$SOC_t$  é o estado de carga atual das baterias;

$P_{bat-t}$  é a potência atual das baterias, em W;

$\Delta t$  é a intervalo de tempo em que se está calculando, em segundos;

$C_{bat}$  é a capacidade das baterias, em kWh.

## 2.2 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE E GERENCIAMENTO DE ENERGIA

Um sistema de gerenciamento de energia é necessário quando se tem fontes distintas em um sistema híbrido. Isto se dá predominantemente pela

intermitência das fontes renováveis que dependem de condições não controláveis, como a irradiação solar por exemplo. Uma estratégia de controle e gerenciamento de energia deve garantir alta eficiência e confiabilidade do sistema.

Assim, de acordo com Adouane, Haddadi, *et al.* (2014), os parâmetros chaves para uma boa estratégia são:

- Suprir o pico de demanda da carga por todo o tempo;
- Utilizar prioritariamente a energia disponível nas fontes renováveis;
- Reduzir o número de ciclos liga/desliga do gerador;
- Permitir o carregamento das baterias com energia excedente do gerador;
- Proteger as baterias contra sobrecarga e descarga profunda;
- Controlar automaticamente as cargas; e
- Informar o usuário sobre as condições do sistema.

Algumas das principais estratégias de despacho e controle de fontes são *cycle-charging*, *load following*, estratégia de suavização de picos de demanda, controle preditivo e o emprego de logica difusa (Fuzzy).

Segundo Ribeiro (2009), a estratégia de controle e despacho *cycle-charging* define que, quando da utilização do gerador, este irá trabalhar à sua potência nominal ou à potência para a qual não há desperdício de energia. De acordo com Kansara e Parekh (2013), essa é a melhor estratégia para sistemas que possuem pouca ou nenhuma fonte de energia renovável.

Para Kansara e Parekh (2013), a estratégia conhecida como *load following* possui a característica de ser ótima para sistemas com muitas fontes renováveis (capacidade das fontes maior que demanda da carga). Ela indica que se as baterias não possuem capacidade de atendimento total a carga, o gerador diesel funciona em um nível que supra apenas a demanda da carga (cargas prioritárias). Outras funções com menor prioridade como carregar baterias e suprir cargas não prioritárias são deixadas para as fontes renováveis.

Ribeiro (2009) adiciona que as baterias são carregadas apenas pela produção de energia de origem renovável. Assim, as baterias são carregadas até atingir o valor de estado de carga máximo (*State of Charge* -  $SOC_{max}$ ) ou atingirem seu fluxo de carga máximo de carga admissível numa hora. Se houver déficit de

energia e as baterias estiverem abaixo de seu estado de carga mínimo (*State of Charge* -  $SOC_{min}$ ), o gerador é ligado.

Para Gupta, Saini e Sharma (2008), na estratégia de suavização de pico de demanda as baterias não são utilizadas para suprir a carga em qualquer período de tempo, é utilizada prioritariamente para amortecer as flutuações de carga (picos de demanda). Salis et al. (2016) afirmam que custos com energia podem ser reduzidos se um sistema de armazenamento for carregado e descarregado nos períodos de máxima demanda. Esse processo pode reduzir esses custos em, aproximadamente, 20%.

Segundo Souza (2015), o controle preditivo é uma classe de controladores que utilizam explicitamente um modelo do sistema, para prever ações de controle que minimizam uma função objetivo. O objetivo dessa estratégia é determinar padrões de demanda, geração e carga e descarga do sistema de armazenamento para minimizar o uso de combustível através do gerador diesel enquanto satisfaz todas as restrições do sistema (OH, CHAE, *et al.*, 2017).

A lógica Fuzzy é um ramo da inteligência artificial que lida com algoritmos de raciocínio usado para emular o pensamento humano e tomar decisões em máquinas. Estes algoritmos são utilizados em aplicações onde os dados do processo não podem ser representados em forma binária (MARTINS, 2014). Segundo Nafeh (2009), essa lógica tem sido considerada uma das mais ativas áreas para controle da maioria das aplicações fotovoltaicas, especialmente sistemas híbridos FV (Fotovoltaico)/Diesel/Baterias. Isso se deve ao fato de que o sistema FV apresenta um comportamento de corrente/tensão não linear devido às condições da irradiação solar variável além de que a operação do gerador diesel e baterias são dependentes da saída de energia do sistema FV.

### 2.3 CONCLUSÃO

A estratégia mais utilizada em gerenciamento energético é a *cycle-charging*. No entanto, como essa metodologia é pautada pela lógica convencional binária, não trata da melhor forma possível a tomada de decisões diante da intermitência de fontes renováveis. Esta estratégia pode, por vezes fazer, com que

exista um desperdício de energia advinda de fontes renováveis além de maior consumo de combustíveis fósseis.

Quando se tem um sistema híbrido, na maioria das vezes, existe uma fonte de energia renovável intermitente, ou seja, a geração pode estar produzindo em níveis baixos, médios ou altos do recurso energético primário. Dessa forma, analisando-se as características do controle através da lógica Fuzzy, chega-se a conclusão de que esse tipo de estratégia apresentará melhores tomadas de decisões que a lógica convencional visto que esta apresenta apenas o nível baixo e alto e pode apresentar níveis intermediários entre os máximos e mínimos, o que representa melhor uma fonte intermitente.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia do controle convencional utilizada para posterior análise e comparação é o método *cycle-charging*. Esta será comparada com a metodologia de controle difuso, também chamado de controle Fuzzy. A comparação entre os métodos se dará pelo consumo do gerador diesel, carga e descarga das baterias e balanço energético do sistema.

Entre os procedimentos utilizados no trabalho podem ser citados:

- Modelagem e simulação do sistema de controle de método convencional *cycle-charging* através do *software* MATLAB;
- Modelagem e simulação do sistema de controle de método difuso (Fuzzy) através do *software* MATLAB;
- Análise e comparação dos resultados dos métodos de controle.

#### 3.1 MÉTODO DE CONTROLE CYCLE-CHARGING

A estratégia de controle *cycle-charging* é estudada e analisada pela maioria das referências de controle de sistemas híbridos isolados. De acordo com Kansara e Parekh (2013), ela indica que, sempre que um gerador tenha que ser operado, opere com toda a sua capacidade e, se houver energia excedente, carregue o banco de baterias além da carga.

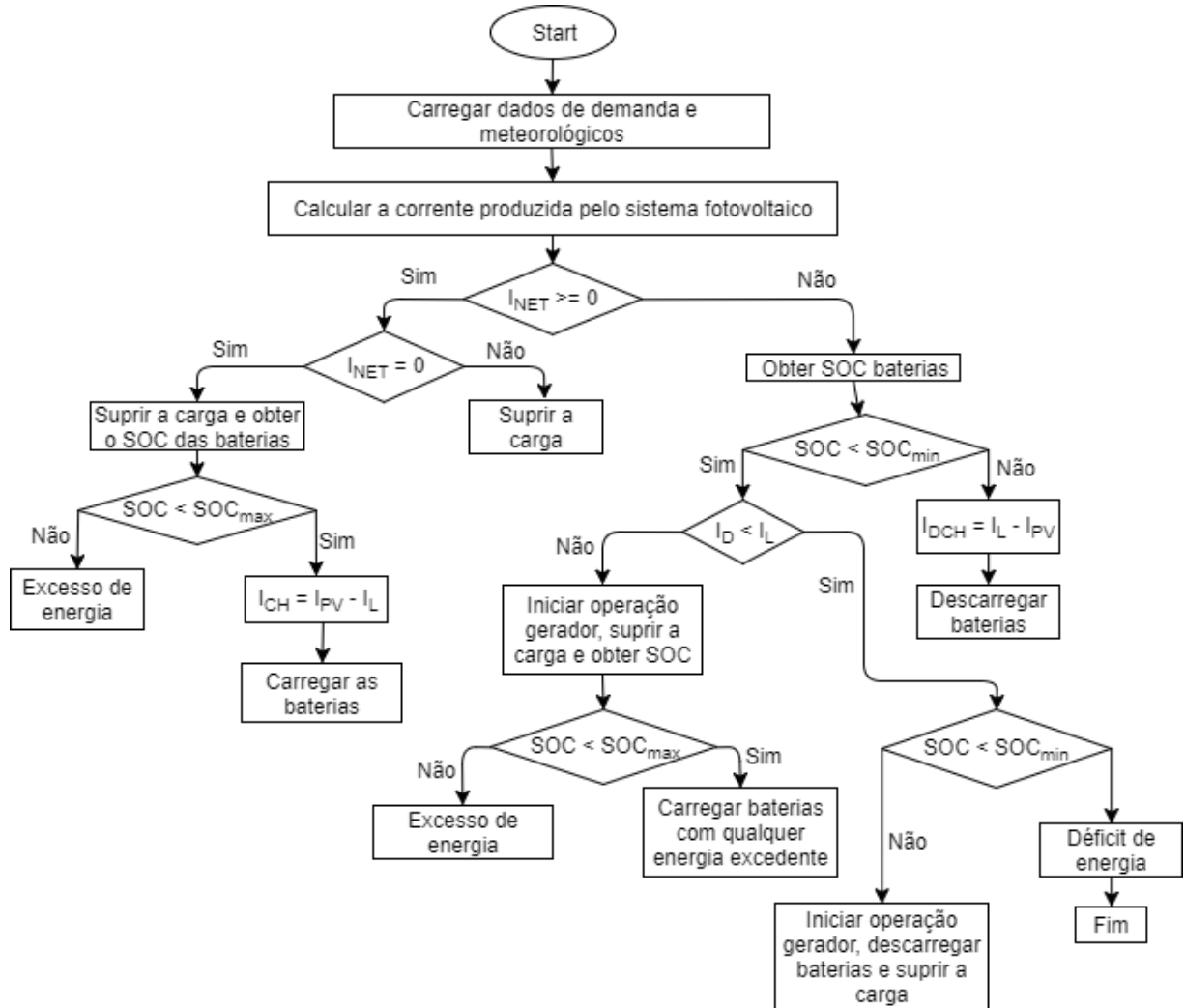
O gerador diesel continua operando em sua plena carga até que o estado máximo de carga da bateria seja alcançado ou quando a fonte renovável gerar energia suficiente para suprir a demanda ou ainda quando a fonte renovável suprir a carga e carregar as baterias com o excesso de energia gerada (GUPTA; SAINI; SHARMA, 2008).

Na Figura 2 é apresentado um fluxograma de acordo com de como um sistema híbrido FV (Fotovoltaico)/Diesel/Baterias opera com esse tipo de estratégia. A saber (AMEEN; PASUPULETI; KHATIB, 2015):

- A corrente  $I_{NET}$  é a corrente do sistema FV menos a corrente requerida pela carga;
- SOC é o estado de carga das baterias;

- $I_L$  é a corrente requerida da carga;
- $I_D$  é a corrente do gerador diesel;
- $I_{CH}$  e  $I_{DCH}$  é corrente de carga e descarga das baterias.

Figura 2 - Estratégia cycle-charging para um sistema FV/Diesel/Baterias.



Fonte: Adaptado de Ameen, Pasupuleti e Khatib (2015).

### 3.2 MÉTODO DA LÓGICA FUZZY PARA CONTROLE (CONTROLE DIFUSO)

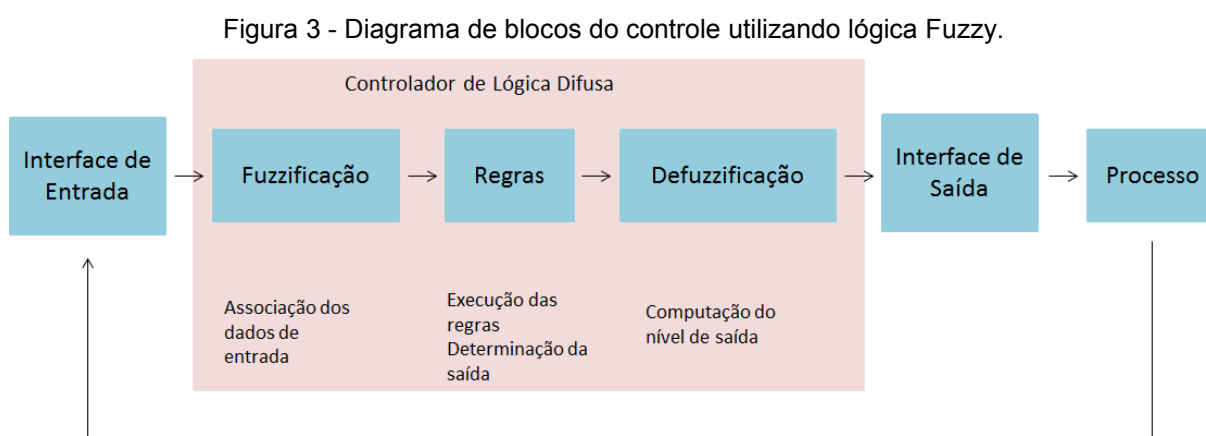
Segundo Canappele (2007), a lógica Fuzzy provê um método de traduzir expressões verbais, vagas, imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana em uma forma compreensível pelos computadores.

A lógica difusa é um ramo da inteligência artificial que lida com algoritmos de raciocínio usado para emular o pensamento humano e tomar decisões em máquinas. Estes algoritmos são utilizados em aplicações onde os dados do



processo não podem ser representados em forma binária. Em contraste com a lógica tradicional, a lógica Fuzzy pode ser pensada como lógica cinzenta, que gera uma forma de expressar entre valores de 0 e 1. Esse tipo de lógica associa nível, com um intervalo de dados, dando-lhe um valor de 1 ao seu máximo e 0 ao seu mínimo (MARTINS, 2014).

Os principais componentes de um controlador de lógica difusa são: Fuzzificação, Inferência e Defuzzificação. Um diagrama desse tipo de lógica é apresentado na Figura 3.



Fonte: Martins (2014).

### 3.2.1 Fuzzificação

O processo de Fuzzificação é a interpretação dos dados de entrada (valores *crisp*<sup>1</sup>) do controlador difuso (MARTINS, 2014). É o processo de transformação da entrada em graus de pertinência ou de certeza no conceito, produzindo uma interpretação ou adjetivação da entrada (CANAPPELE, 2007).

Durante a Fuzzificação, o controlador analisa os dados de entrada de acordo com gráficos definidos pelo utilizador, chamados de funções de pertinência. Essas funções agrupam os dados de entrada e o controlador atribui aos dados de entrada um nível entre 0 e 1 conforme eles se encaixem em cada função de pertinência. Esses gráficos podem apresentar diversas formas, dependendo do

<sup>1</sup> Como são chamados os conjuntos na Teoria Clássica de Conjuntos. É definido como um subconjunto de um universo qualquer.

conjunto de dados, sendo o mais comum a triangular, a trapezoidal e a gaussiana. (MARTINS, 2014).

Ao considerar um conjunto Fuzzy, um elemento  $x$  pertencente ao conjunto universo  $U$  tem um determinado grau de pertinência com relação ao conjunto  $A$ , definido no intervalo  $[0,1]$  e descrito por  $\mu_A(x)$ , onde 0 representa a exclusão total do elemento em relação ao conjunto, e o valor 1 significa a inclusão total do elemento. Um valor entre esses dois representa uma pertinência parcial (ANDRADE; FLAUZINO; SILVA, 2010).

Para Andrade, Flauzino e Silva (2010), conjuntos Fuzzy são definidos por pares ordenados, que indicam cada elemento com seu grau de pertinência para o conjunto em questão, assim como na expressão (3).

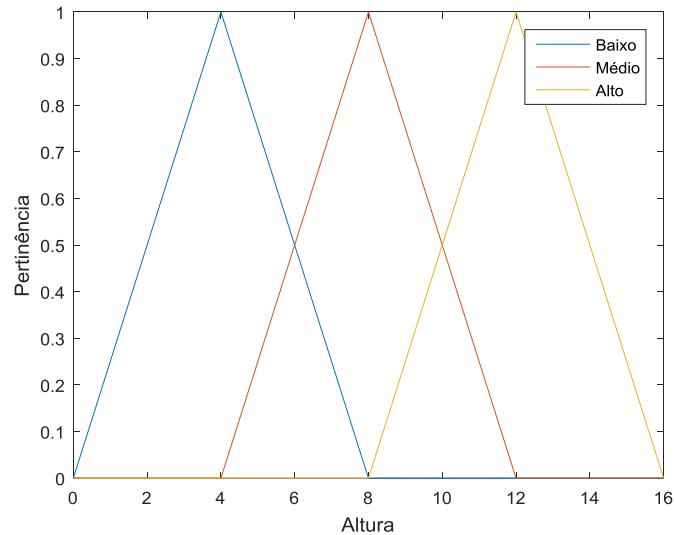
$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in U\} \quad (3)$$

Um conjunto Fuzzy também pode ser representado, de maneira mais completa, através da expressão (4), onde o numerador indica o grau de pertinência do elemento representado pelo denominador no conjunto difuso  $\tilde{A}$  e o sinal de adição significa agregação (ROSS, 2010).

$$\tilde{A} = \left\{ \frac{\mu_A(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_A(x_2)}{x_2} + \dots \right\} \quad (4)$$

Cada conjunto Fuzzy recebe um valor linguístico conhecido como etiqueta para identifica-lo no universo em que está inserido. Um valor linguístico pode ser definido, de uma maneira informal, como uma variável cujos valores são palavras ou sentenças, ao invés de números (ROMERO, 2018). Cada universo é definido por uma variável linguística, como por exemplo, "Altura". Como exemplo dessas etiquetas, para melhor entendimento, é apresentada a Figura 4.

Figura 4 - Exemplo de etiquetas para representação de conjuntos Fuzzy do mesmo universo de discurso.



Fonte: Elaboração própria.

Neste exemplo, a altura (metros) é o dado de entrada do problema e se encontra no eixo horizontal. Para cada valor de altura, é atribuído um valor de pertinência conforme as funções de pertinência triangulares do problema. Essas funções são criadas pelo usuário para que o controle tome decisões baseadas em quão alto, quão baixo ou quão médio é a variável altura, para este caso. A altura de 4 metros, por exemplo, possui grau máximo de pertinência na etiqueta Baixo, porém, a altura 5 metros possui dois graus de pertinência, nas etiquetas denominadas Baixo e Médio. Para que se resulte em um único grau de pertinência, nesses casos, é necessária a aplicação de agregações.

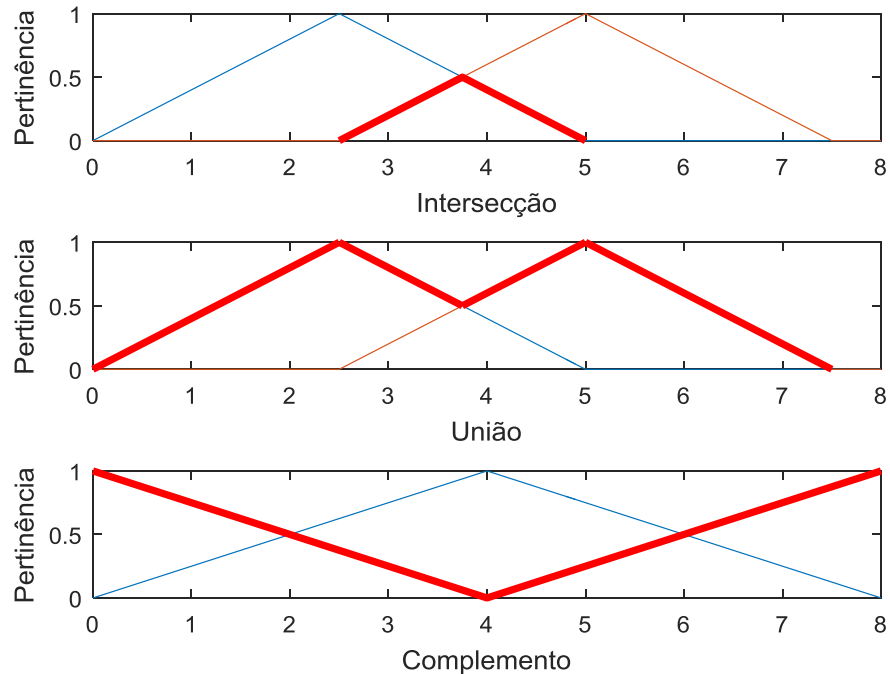
Assim como em conjuntos numéricos clássicos, é possível realizar operações com os conjuntos difusos de um mesmo universo através dos métodos de agregação que podem ser de intersecção (5), união (6) e complemento (7) (ROSS, 2010). Essas operações são utilizadas quando um valor *crisp* (entrada real do controlador) possui pertinência em mais de uma etiqueta. Para melhor entendimento, as operações podem ser visualizadas através das linhas destacadas em vermelho na Figura 5.

$$\mu(x_1, x_2) = \min(\mu_1, \mu_2) \quad (5)$$

$$\mu(x_1, x_2) = \max(\mu_1, \mu_2) \quad (6)$$

$$\mu(x_1, x_2) = 1 - \mu(x) \quad (7)$$

Figura 5 - Agregação dos conjuntos Fuzzy.



Fonte: Elaboração própria.

Quando se é necessário relacionar dois universos diferentes são utilizadas as relações Fuzzy onde cada elemento de um conjunto possui uma dependência (seja nula ou não) com cada elemento de outro conjunto. Assim, sejam  $X$  e  $Y$  dois universos quaisquer, uma relação Fuzzy  $R$  é um conjunto Fuzzy definido em  $X \times Y$  que associa a cada elemento de  $X \times Y$  um grau de pertinência definido no intervalo unitário, ou seja  $R: X \times Y \rightarrow [0; 1]$  (ROMERO, 2018).

Essas relações podem seguir os mesmos métodos de agregação das equações (5), (6) e (7) se for necessário (ROSS, 2010).

### 3.2.2 Inferência

A Inferência é o processo de análise dos dados de entrada para se chegar a uma saída de controle. Esse processo é realizado através da inferência de regras IF – THEN (SE – ENTÃO) (MARTINS, 2014). Os especialistas tomam decisões baseados em conhecimentos, muitas vezes armazenados na forma de

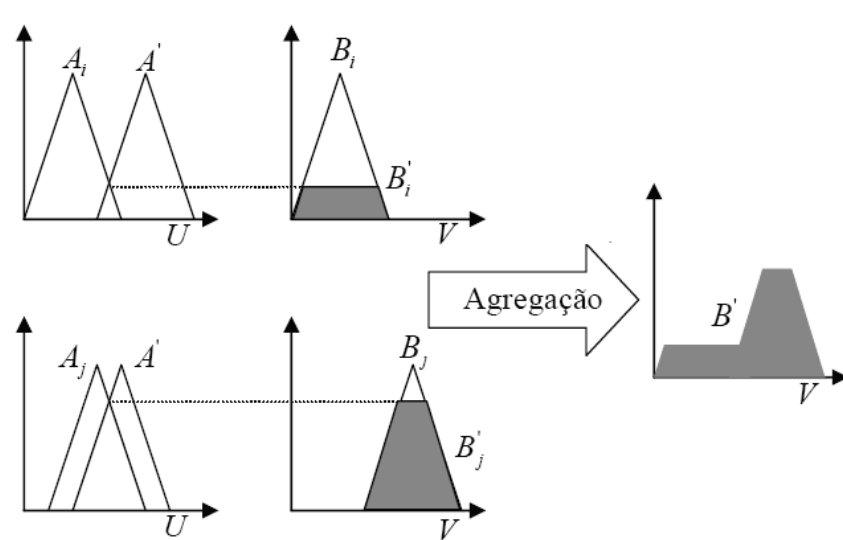
regras. Inconscientemente, muitas vezes, regras do tipo IF – THEN são aplicadas (CANAPPELE, 2007).

Essas regras relacionam pelo menos dois universos Fuzzy diferentes, utilizando as equações (8) ou (9), para que se chegue a um resultado de saída do controlador. Os graus de pertinência resultantes, então, são transferidos para cada conjunto Fuzzy, ou seja, etiqueta das funções de pertinência de saída do controlador de acordo com as regras ativas inseridas pelo especialista humano (ROSS, 2010).

A regra é ativada se uma condição de entrada satisfaz a parte IF (SE) da declaração da regra e isso resulta em uma saída de controle com base na parte THEN (ENTÃO) da declaração da regra. Uma regra pode ter várias condições de entrada, que são ligadas através de conectores lógicos OR (OU) ou AND (E) (MARTINS, 2014).

A ativação da regra gerará um resultado de saída nas funções de pertinência de saída com seus níveis associados. O nível da função de pertinência de saída é afetado pelo nível dos dados de entrada da função de pertinência de entrada (MARTINS, 2014). Para Andrade, Flauzino e Silva (2010), quando mais de uma regra é ativada, as contribuições das diversas regras após a inferência são combinadas pelo operador de agregação. Um exemplo de inferência de união pode ser vista na Figura 6.

Figura 6 - Exemplo de agregação de regras.



Fonte: Andrade, Flauzino e Silva (2010).

Matematicamente, o processo de inferência através de regras resulta em um valor de grau de pertinência e segue as equações de operação de conjuntos de universos iguais ou distintos já mencionados e resultam nas equações abaixo.

Para SE  $x$  é  $A$ , ENTÃO  $y$  é  $B$ :

$$R = (A \times B) \cup (\bar{A} \times y) \quad (8)$$

$$\mu_R(x, y) = \max[(\mu_A(x) \cap \mu_B(y)), (1 - \mu_A(x))] \quad (9)$$

Onde a parcela  $\mu_A(x) \cap \mu_B(y)$  representa  $A \times B$  e a parcela  $1 - \mu_A(x)$  representa  $\bar{A} \times y$  Para SE  $x$  é  $A$ , ENTÃO  $y$  é  $B$ , SE NÃO  $y$  é  $C$ :

$$R = (A \times B) \cup (\bar{A} \times C) \quad (10)$$

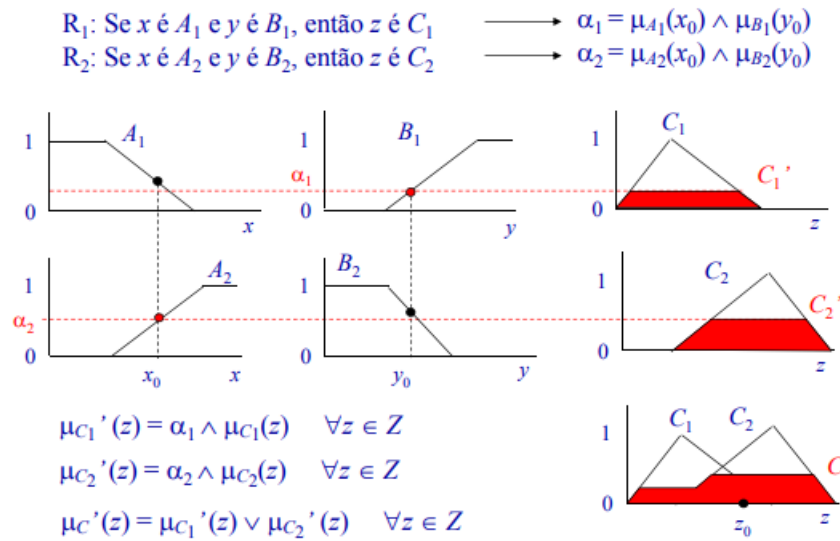
$$\mu_R(x, y) = \max[(\mu_A(x) \cap \mu_B(y)), ((1 - \mu_A(x)) \cap \mu_C(y))] \quad (11)$$

Onde a parcela  $(1 - \mu_A(x)) \cap \mu_C(y)$  representa  $\bar{A} \times C$ .

Existem dois tipos diferentes de modelos de inferência: o Mamdani e o Takagi-Sugeno (T-S). O primeiro é um dos modelos de inferência mais utilizados para se obter conclusões a partir de fatos e regras Fuzzy e é baseado numa estrutura simples de operações max-min envolvendo regras de inferência do tipo: Se  $x$  é  $A$  e  $y$  é  $B$  então  $z$  é  $C$ , onde  $A$ ,  $B$  e  $C$  são conjuntos Fuzzy. O método T-S modela o consequente da regra como uma equação linear: Se  $x$  é  $A$  e  $y$  é  $B$  então  $z = ax + by + c$ , neste caso, é preciso aplicar técnicas de modelagem usando dados de entrada-saída para obter as regras (ENGEL, 2017).

Neste caso, como a maioria das aplicações Fuzzy, é utilizado o método Mamdani para o processo de inferência. Para melhor entendimento, um exemplo desse processo, utilizando a base teórica das regras e agregações explicadas anteriormente, é apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Exemplo do processo de inferência Mamdani.



Fonte: Engel (2017).

### 3.2.3 Defuzzificação

A saída do processo de inferência continua a ser um conjunto Fuzzy, mesmo que a entrada seja um valor *crisp*. Este fato sugere que exista um método, chamado de Defuzzificação, para que esse conjunto seja transformado novamente em um valor *crisp* que represente a saída do controlador Fuzzy.

Existem muitos métodos de Defuzzificação, mas os mais comuns e apresentados neste trabalho são o método do valor máximo e o método do centróide. O método do valor máximo baseia-se no maior valor de saída da função de pertinência com o maior nível e é mais utilizado em funções discretas. O método do centro de gravidade é obtido calculando-se matematicamente o centro de massa das funções de pertinência resultantes da ativação das regras, o valor de saída que é enviada para o módulo de interface de saída é o valor dos dados de saída na intersecção do eixo horizontal e do centróide (MARTINS, 2014).

As equações (12) e (13) representam o método dos máximos e centróide, respectivamente.

$$\mu_C(z^*) \geq \mu_C(z) \quad (12)$$

$$z^* = \frac{\int \mu_c(z)zdz}{\int \mu_c(z)dz} \quad (13)$$

### 3.3 CONCLUSÃO

Como exposto, a lógica Fuzzy consegue tomar decisões melhores quando se trata de fontes intermitentes como a solar. Isso porque com a Fuzzificação e Defuzzificação a lógica traduz, de acordo com as funções de pertinência, qual o nível (no intervalo de zero até um) que a geração se encontra, o que pode fazer com que muitas vezes o gerador a diesel possa ser poupado e haja menor desperdício e, conseqüentemente, de energia como acontece com a lógica convencional *cycle-charging*.

Para melhor entendimento dessas diferenças, é realizado um estudo de caso que simula, para as mesmas condições, dois gerenciadores energéticos: um utilizando a lógica Fuzzy e outro a *cycle-charging*.



## 4 ESTUDO DE CASO

Para o estudo de caso do sistema de controle são realizadas simulações utilizando os modelos já descritos na revisão bibliográfica e metodologia. Estas são realizadas através do *software* MATLAB, com a ferramenta Simulink. O sistema é avaliado empregando simulação do tipo barra única, mantendo o foco no gerenciamento energético das fontes disponíveis, desprezando-se as dinâmicas elétricas do sistema.

As características dimensionais do sistema são: sistema fotovoltaico com potência nominal de 30 kWp, gerador a diesel para backup com potência nominal de 75 kW, sistema de armazenamento de energia com capacidade nominal de 75 kW/150 kWh. A carga considerada possui um pico máximo de demanda de 40 kVA.

### 4.1 ENTRADA DE DADOS NA SIMULAÇÃO

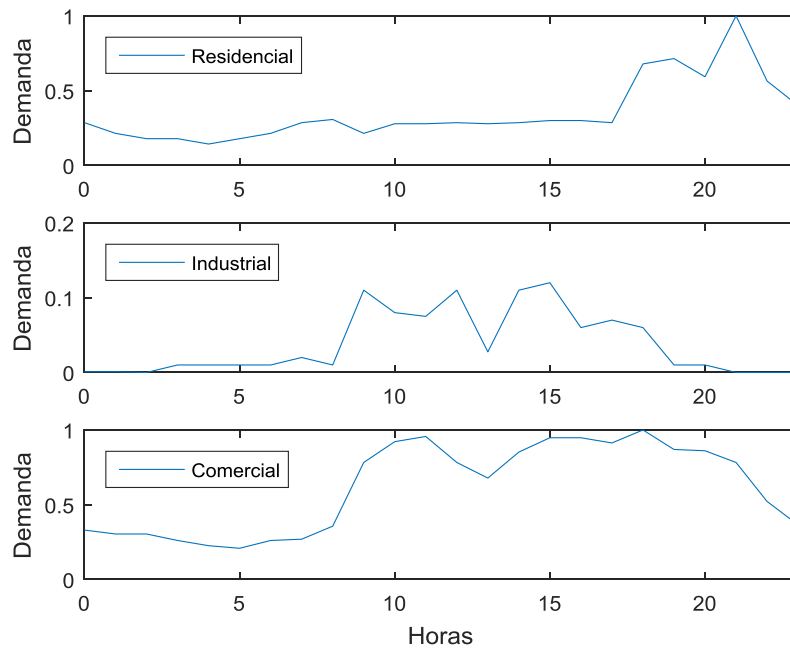
#### 4.1.1 Perfis de carga e irradiação solar

É desejável simular diversos cenários com curvas de demanda apresentando fatores de carregamento diferentes, visando analisar o comportamento dos controladores em condições operacionais distintas. Dessa forma, são coletados perfis de carga de diferentes classes, através de Marques (2014), como residencial, industrial e comercial.

As curvas coletadas são normalizadas para que seja possível utilizar somente o perfil de carga, com a demanda máxima escolhida de acordo com o projeto. Os perfis estão apresentados na Figura 8.

Os dados de irradiação utilizados são dados medidos a cada minuto durante o período de um ano. Estes dados estão disponíveis na plataforma do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e pertencem a uma localização geograficamente próxima ao local onde o sistema será implantado, ou seja, a Ilha das Cobras, no Paraná.

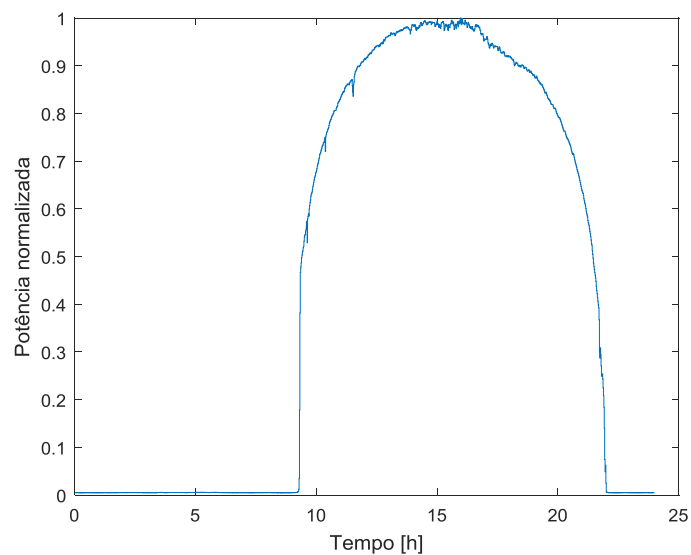
Figura 8 - Perfis de carga utilizados na simulação.



Fonte: Marques (2014).

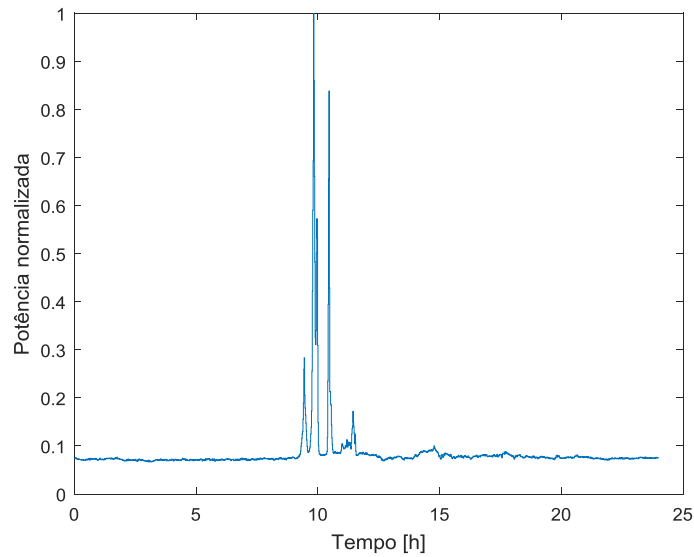
A partir desses dados, são selecionados dois dias específicos que representam o melhor e pior nível de irradiação do ano. Estes são o 19º e o 272º dia do ano, considerando-se um ano com 365 dias, e estão demonstrados na Figura 9 e na Figura 10 já representados como potência de geração solar de acordo com a equação (1).

Figura 9 - Potência normalizada do dia com melhor índice de irradiação do ano.



Fonte: Elaboração própria.

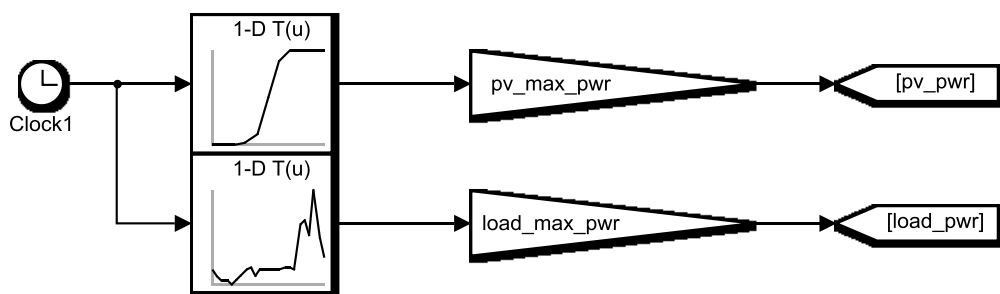
Figura 10 - Potência normalizada do dia com pior índice de irradiação do ano.



Fonte: Elaboração própria.

Os dados das curvas de demanda e de potência de geração fotovoltaica, já normalizados, são inseridos na simulação através do bloco do Simulink chamado *Lookup Table*. Esse bloco utiliza dois vetores de igual dimensão: um contendo os dados em si (eixo y) e o outro os instantes de tempo de cada ponto no primeiro vetor (eixo x). Desta forma a utilização de curvas com diferentes pontos de amostragem é facilitada. Esses blocos são apresentados na Figura 11.

Figura 11 - Blocos de entrada das curvas de carga e irradiação no Simulink.



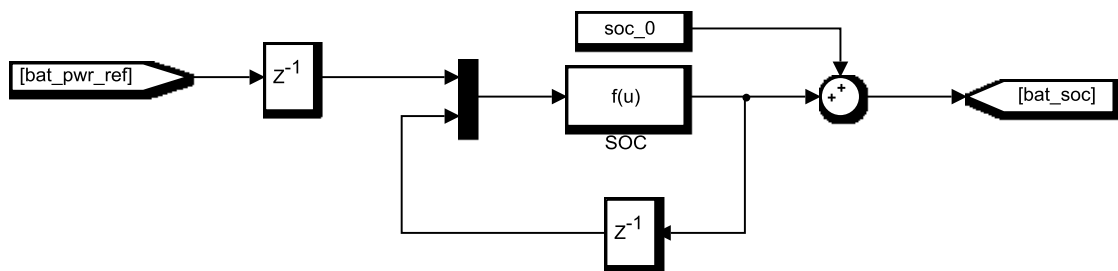
Fonte: Elaboração própria.

Os blocos de ganho a potência fotovoltaica e demanda de carga máxima para o sistema isolado proposto, de modo que a simulação utilize dados próximos da realidade para o sistema.

### 4.1.2 Estado de carga do sistema de armazenamento (SOC)

O estado de carga inicial (*State of Charge* - SOC) das baterias para é considerado 0,5, ou seja, a bateria se encontra com 50% de sua capacidade de armazenamento completa. Esse estado de carga é atualizado a cada período da simulação diretamente no Simulink, como mostra a Figura 12.

Figura 12 - Cálculo do estado de carga das baterias.



Fonte: Elaboração própria.

No bloco  $f(u)$  é inserida a equação (2), que utiliza a potência da bateria e o SOC do momento anterior ao cálculo. Os *delays* precisam ser utilizados devido ao *loop* algébrico<sup>2</sup>. A etiqueta SOC\_0 representa a constante que representa o SOC inicial das baterias que é somado com o SOC calculado para que se tenha o SOC atual do sistema.

## 4.2 CONTROLADORES

O período de controle para ambos os controladores é de um segundo.

### 4.2.1 Controlador *cycle-charging*

Este tipo de controle é simulado para fins de comparação de resultados com o controlador Fuzzy, estabelecendo uma linha de base para a operação do sistema proposto.

---

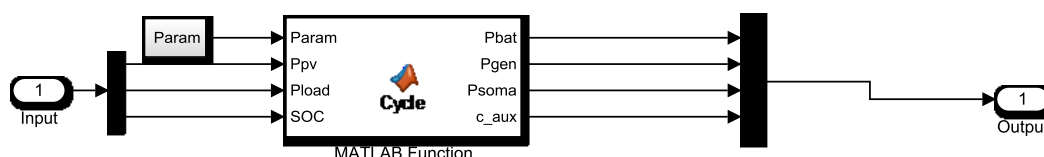
<sup>2</sup> Isso significa que uma saída do bloco depende do valor de uma entrada do mesmo bloco.

As entradas e parâmetros de configuração desse controlador são: (i) Potências nominais das fontes; (ii) Limites máximo e mínimo de SOC para o sistema de armazenamento, para esta simulação sendo 80% e 20%, respectivamente; (iii) Geração fotovoltaica e demanda atual, compondo a potência de balanço do sistema; e (iv) Estado de carga das baterias (*State of Charge* - SOC).

As saídas deste controlador são: (i) Potência de referência das baterias; e (ii) Potência de referência do gerador a diesel.

Este controlador é simulado com a utilização do bloco MATLAB *Function*, onde é inserido o código de controle baseado em lógica convencional binária e que segue o fluxograma da Figura 2. Assim, as entradas e saídas são representadas no *software* como mostra a Figura 13.

Figura 13 - Controlador Cycle-charging.



Fonte: Elaboração própria.

#### 4.2.2 Controlador Fuzzy

Para realizar testes do controle via lógica difusa no sistema isolado, é utilizada a *Fuzzy Logic Toolbox* do *software* MATLAB®. Uma interface pode ser acessada diretamente ao digitar *FuzzyLogicDesigner* no terminal do MATLAB. Nesse recurso é possível configurar as funções de pertinência de entrada e de saída do bloco de controle Fuzzy proposto, as regras de controle e simular o comportamento do sistema de maneira discreta.

Essas entradas e saída configuradas podem então ser exportadas diretamente para o bloco no *Fuzzy Logic Controller* no Simulink, o qual realiza os cálculos associados às etapas da lógica Fuzzy de acordo com as entradas e saídas configuradas.

Para este caso, restrições de operação do gerador a diesel também são levadas em consideração para tomada de decisão no controle. O tempo atual de

operação do gerador é uma entrada do sistema de controle, pois a vida útil do gerador e a sua eficiência são dependentes desta característica de operação. Para este sistema, as restrições consideradas são:

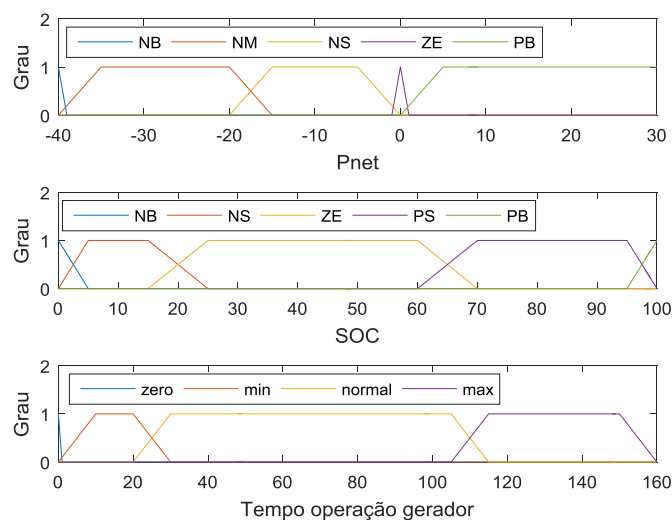
- Tempo mínimo de operação: 30 minutos;
- Tempo normal de operação: entre 20 e 120 minutos; e
- Tempo máximo de operação: acima de 120 minutos.

As entradas do controlador Fuzzy são:

- Balanço de potência, calculado pela diferença entre a potência de geração fotovoltaica e a demanda, chamado  $P_{NET}$ ;
  - Os limites do balanço de potência são -40 kW e +30 kW, representando a máxima demanda da carga e a máxima geração renovável, respectivamente.
- Estado de carga da bateria (SOC), em porcentagem;
- Tempo de operação do gerador, em minutos.

As entradas do controlador Fuzzy são transformadas nas funções de pertinência apresentadas na Figura 14. Nela estão representadas as etiquetas NB (*Negative Big*), NM (*Negative Medium*), NS (*Negative Small*), ZE (*Zero*), PB (*Positive Big*) e PS (*Positive Small*) que são etiquetas características de aplicações Fuzzy, que descrevem as entradas do controlador explicadas no parágrafo anterior.

Figura 14 - Funções de pertinência de entrada do controlador Fuzzy.



Fonte: Elaboração própria.

Cada função de pertinência é um conjunto Fuzzy e, dessa forma, pode ser representado pela equação (4), que como explicado anteriormente, representa a pertinência (numerador) do valor crisp de entrada (denominador), como apresentam as equações (14), (15), e (16).

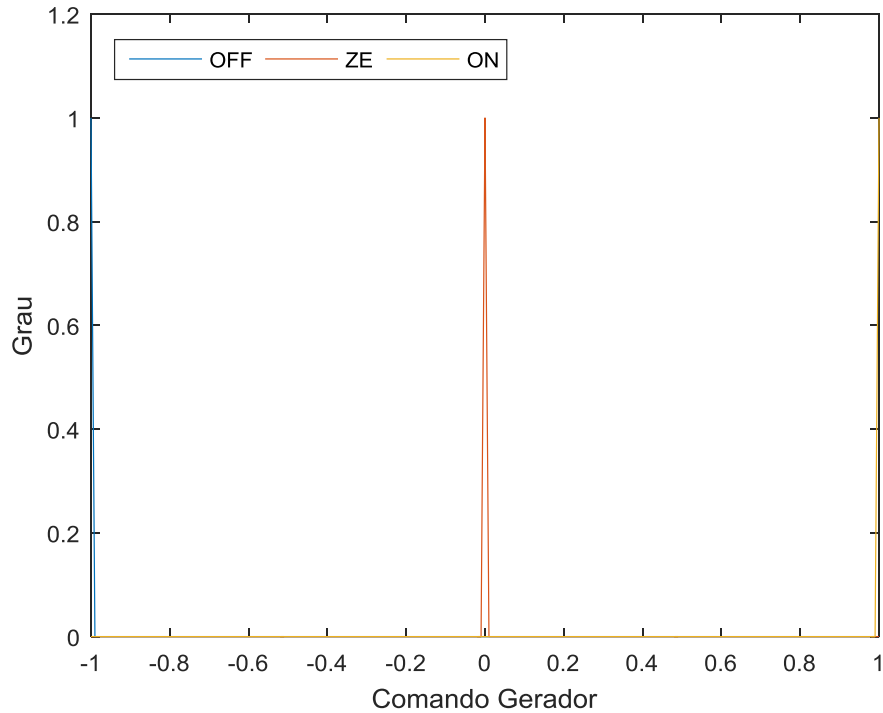
$$\text{Pnet:} \left\{ \begin{array}{l} NB = \left\{ \frac{0}{-40} + \frac{1}{-40} + \frac{0}{-40} \right\} \\ NM = \left\{ \frac{0}{-40} + \frac{1}{-35} + \frac{1}{-20} + \frac{0}{-15} \right\} \\ NS = \left\{ \frac{0}{-20} + \frac{1}{-15} + \frac{1}{-5} + \frac{0}{0} \right\} \\ ZE = \left\{ \frac{0}{0} + \frac{1}{0} + \frac{0}{0} \right\} \\ PB = \left\{ \frac{0}{0} + \frac{1}{5} + \frac{1}{30} + \frac{0}{30} \right\} \end{array} \right. \quad (14)$$

$$\text{SOC:} \left\{ \begin{array}{l} NB = \left\{ \frac{0}{0} + \frac{1}{0} + \frac{0}{5} \right\} \\ NS = \left\{ \frac{0}{0} + \frac{1}{5} + \frac{1}{15} + \frac{0}{25} \right\} \\ ZE = \left\{ \frac{0}{15} + \frac{1}{25} + \frac{1}{60} + \frac{0}{70} \right\} \\ PS = \left\{ \frac{0}{60} + \frac{1}{70} + \frac{1}{95} + \frac{0}{100} \right\} \\ PB = \left\{ \frac{0}{95} + \frac{1}{100} + \frac{0}{100} \right\} \end{array} \right. \quad (15)$$

$$\text{Tempo:} \left\{ \begin{array}{l} zero = \left\{ \frac{0}{0} + \frac{1}{0} + \frac{0}{0} \right\} \\ min = \left\{ \frac{0}{0} + \frac{1}{10} + \frac{1}{20} + \frac{0}{30} \right\} \\ normal = \left\{ \frac{0}{20} + \frac{1}{30} + \frac{1}{105} + \frac{0}{115} \right\} \\ max = \left\{ \frac{0}{105} + \frac{1}{115} + \frac{1}{150} + \frac{0}{160} \right\} \end{array} \right. \quad (16)$$

A saída desse controlador representa o comando de operação do gerador. Esta é composta de três etiquetas, "OFF", "ON" e "ZE", sendo esta última a decisão de não modificar o estado da fonte de geração. As funções de pertinência do controlador são apresentadas na Figura 15.

Figura 15 - Função de pertinência de saída do controlador Fuzzy.



Fonte: Elaboração própria.

Essa saída possui representação matemática apresentada na equação (17).

$$\text{Comando: } \begin{cases} OFF = \left\{ \frac{0}{-1} + \frac{1}{-1} + \frac{0}{-1} \right\} \\ ZE = \left\{ \frac{0}{0} + \frac{1}{0} + \frac{0}{0} \right\} \\ ON = \left\{ \frac{0}{1} + \frac{1}{1} + \frac{0}{1} \right\} \end{cases} \quad (17)$$

A configuração das regras é feita em duas etapas. A primeira com base em uma matriz de comparação entre a variável de entrada Pnet e o SOC, como apresenta a Tabela 1, onde a saída é o comando de operação do gerador a diesel. Na segunda, que leva em consideração as restrições do tempo de operação do gerador a diesel, são criadas regras específicas de maior peso que as demais: se o tempo de operação do gerador é mínimo, o gerador não pode ser desligado e, se for máximo, o gerador deve ser desligado.



Tabela 1 - Regras Fuzzy que resultam no comando do gerador.

Entradas	SOC					
	Etiquetas	NB	NS	ZE	PS	PB
<i>Pnet</i>	NB	ON	ON	ZE	ZE	OFF
	NM	ON	ON	ZE	OFF	OFF
	NS	ON	ON	ZE	OFF	OFF
	ZE	ON	ZE	ZE	OFF	OFF
	PB	ZE	ZE	OFF	OFF	OFF

Fonte: Elaboração própria.

A Defuzzificação é feita com base no método dos máximos, pois a saída possui características discretas e, para esses casos, esse método é o melhor indicado (CANAPPELE, 2007). Essa etapa do controle Fuzzy é realizada pelo *software*, sem a necessidade de criação de código específico visto que a ferramenta do MATLAB já possui essa funcionalidade.

A partir dos dados de entrada e da saída do controlador Fuzzy (potência do gerador a diesel), calcula-se a potência de referência para o sistema de armazenamento. Basicamente, o armazenamento é utilizado de forma a manter o balanço energético (18) instantâneo do sistema e garantir a estabilidade. Por convenção, a potência do sistema de armazenamento apresenta valor negativo quando está em operações de carga e positivo quando em descarga.

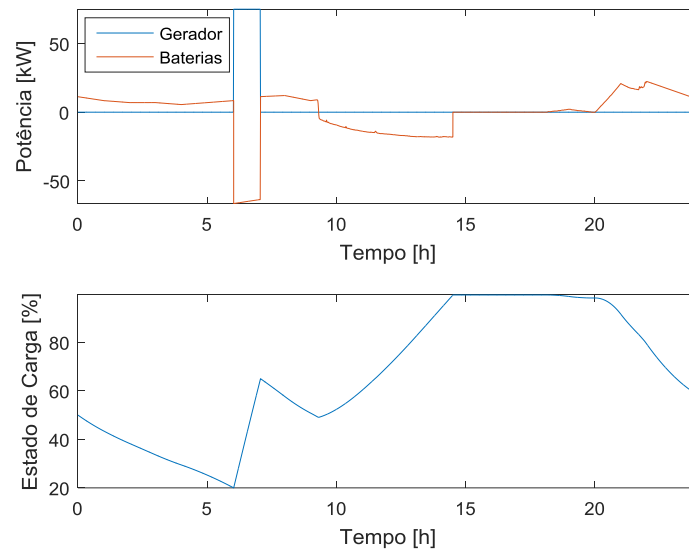
$$P_{ESS} + P_{GEN} + P_{LOAD} + P_{PV} = 0 \quad (18)$$

Em que  $P_{ESS}$  é a potência do sistema de armazenamento,  $P_{GEN}$  é a potência do gerador a diesel,  $P_{LOAD}$  é a potência demandada pela carga e  $P_{PV}$  é a potência do gerador fotovoltaico.

### 4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Resultados com a utilização do controlador Fuzzy para os dias de níveis ótimos de irradiação são apresentados nas Figuras 16, 17 e 18 para cada perfil de carga simulado.

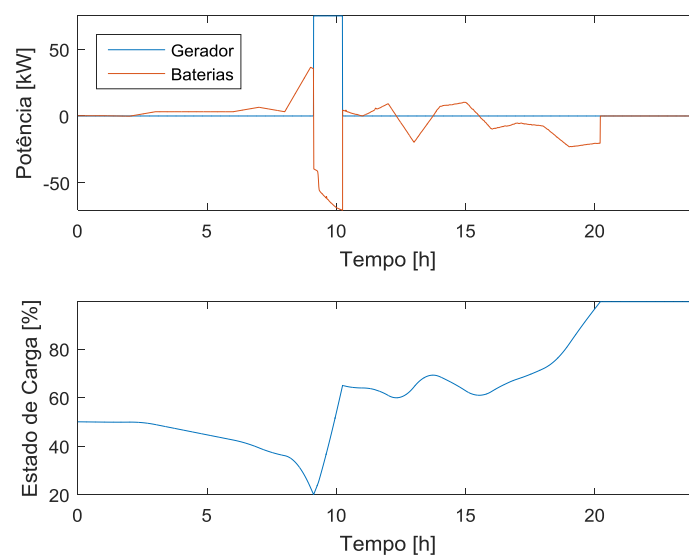
Figura 16 - Resultados com controlador Fuzzy para perfil residencial de carga.



Fonte: Elaboração própria.

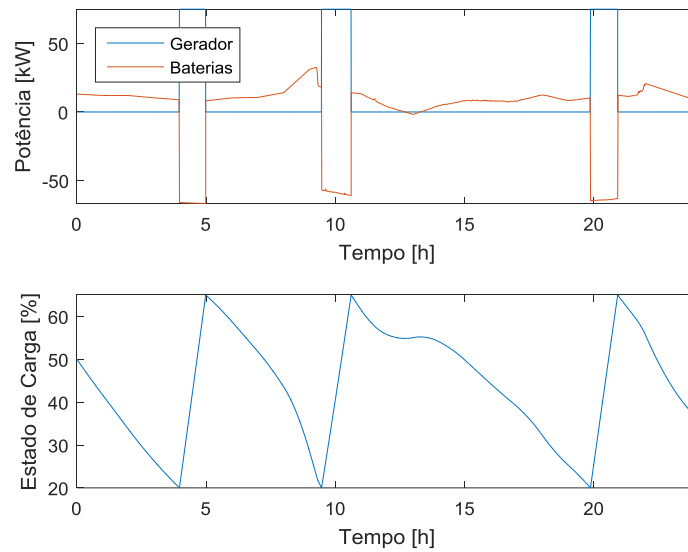
É perceptível que a profundidade de descarga das baterias muda conforme mudam os perfis simulados. Essa é uma característica própria do controlador Fuzzy, que se adequa às condições do ambiente, podendo ser mais agressivo com profundidades maiores como nos perfis residencial e industrial (com uma profundidade de carga e descarga de, aproximadamente, 80%) ou mais contido como no perfil comercial, onde a profundidade é de 20% a 65%, apresentando um intervalo de 45% para ciclos de carga e descarga.

Figura 17 - Resultados com controlador Fuzzy para perfil industrial de carga



Fonte: Elaboração própria.

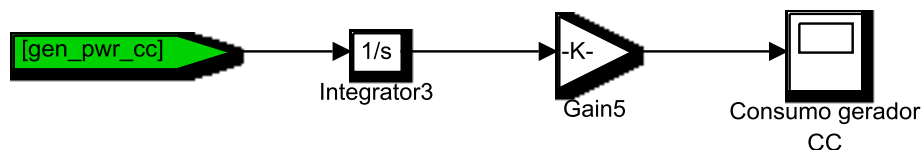
Figura 18 - Resultados com controlador Fuzzy para perfil comercial de carga



Fonte: Elaboração própria.

A comparação dos resultados se dá através do consumo, em kWh, do gerador diesel, carga e descarga das baterias e balanço energético final. Estes aplicados em dias de níveis altos e baixos de irradiação, para a estratégia Fuzzy e *cycle-charging*. Essas energias são calculadas através de blocos integradores no Simulink, visto que a energia é a potência integralizada. Um exemplo de um desses cálculos é apresentado na Figura 19, o ganho (1/3600) é utilizado para que a unidade de saída seja kWh.

Figura 19 - Energia consumida do gerador, em kWh, no *software* Simulink.



Fonte: Elaboração própria.

Os resultados numéricos, para o período de 24h, estão apresentados na Tabela 2, onde FIS (*Fuzzy Inference System*) representa o gerenciador Fuzzy e CC, o *cycle-charging*. Os perfis de carga estão representados pelos números 1 (residencial), 2 (industrial) e 3 (comercial). As potências da geração solar dos dias com alta baixa irradiação estão apresentada na Figura 9 e Figura 10, respectivamente. O carregamento das baterias, representado na coluna 5 da Tabela 2, possui valor negativo pois a entrada de energia no sistema de armazenamento é

considerada negativa e a saída (bateria alimentando a carga), positiva. Isso é um parâmetro adotado para a realização da simulação.

Tabela 2 - Resultados da simulação para os controladores CC e Fuzzy.

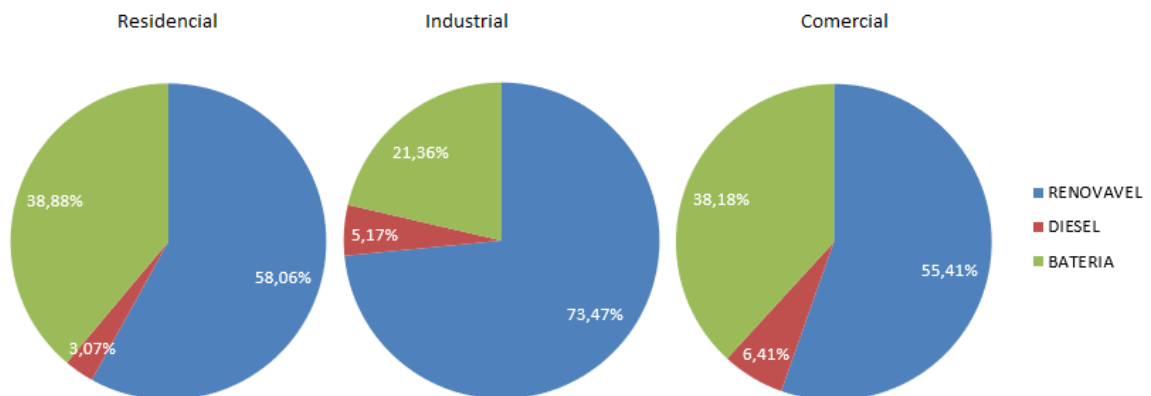
Perfil	Controle	Irradiação	Diesel [kWh]	Carga Bat. [kWh]	Descarga Bat. [kWh]	Balanco de Energia [kWh]
1	FIS	Alta	77,85	-143,10	130,90	52,87
		Baixa	274,10	-204,10	206,20	0,00
	CC	Alta	104,40	-138,30	126,80	80,20
		Baixa	236,30	-181,80	221,50	0,00
2	FIS	Alta	84,02	-139,40	65,13	29,06
		Baixa	216,00	-147,10	175,00	0,00
	CC	Alta	107,60	-137,60	64,05	53,40
		Baixa	260,10	-192,10	175,90	0,00
3	FIS	Alta	241,20	-203,10	223,70	0,00
		Baixa	535,60	-337,60	327,00	0,00
	CC	Alta	302,30	-266,10	225,50	0,00
		Baixa	552,40	-360,00	332,70	0,00

Fonte: Elaboração própria.

Descontando a recarga das baterias (valor negativo) através da energia do gerador a diesel e fotovoltaico, é apresentado um gráfico de pizza para cada um dos perfis com a parcela de suprimento de cada fonte para os índices altos de irradiação. A Figura 20 representa o gerenciador Fuzzy e a Figura 21, o gerenciador *cycle-charging* (CC).

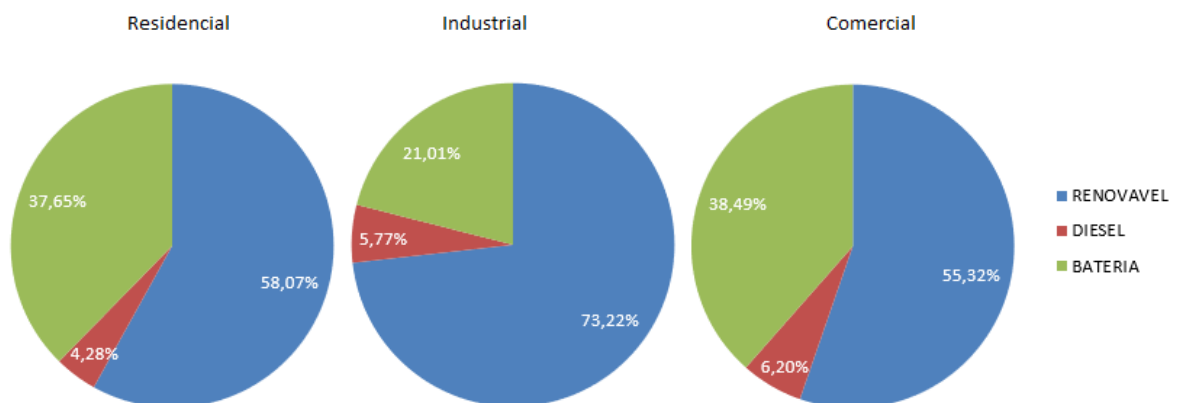
É notável que as parcelas de participação no suprimento da carga para os dois gerenciadores são muito próximas e fazem parecer que os gerenciadores realizam um trabalho parecido no gerenciamento de energia. No entanto, o que difere entre eles é o excedente de energia. Por exemplo, nos perfis de carga residencial e industrial, o gerenciador CC (*cycle-charging*) utiliza em maior parcela o gerador diesel para suprimento da carga. No entanto, se a Tabela 2 for analisada, percebe-se que o gerenciador CC apresenta um excedente de energia maior, o que indica um desperdício de geração renovável maior que o gerenciador Fuzzy.

Figura 20 - Suprimento da carga gerenciador Fuzzy, residencial, industrial e comercial, respectivamente.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 21 - Suprimento da carga gerenciador CC, residencial, industrial e comercial, respectivamente.



Fonte: Elaboração própria.

Isso pode ser explicado através das parcelas de carga da bateria através do gerador a diesel e fotovoltaico. Na Tabela 3 são apresentadas as parcelas de carga para cada perfil dos dois gerenciadores e esclarece que a fraqueza do gerenciador CC (*cycle-charging*) é a tomada de decisão de carregamento das baterias com a utilização da energia renovável, ou seja, em todos os perfis de carga a bateria utiliza para carregamento mais o gerador a diesel do que o fotovoltaico. Isso ocorre devido aos limites pré-estabelecidos de estado de carga máximo e mínimo do sistema de armazenamento, não sendo mutável dependente das condições de geração.

Tabela 3 - Carregamento das baterias.

Gerenciador	Perfil	Carga através do FV	Carga através do gerador a diesel
FIS	Residencial	75,63	67,50
	Industrial	71,84	67,55
	Comercial	0,00	203,10
CC	Residencial	48,29	90,01
	Industrial	47,50	53,40
	Comercial	0,00	266,10

Fonte: Elaboração própria.

Essa utilização do gerador a diesel e desperdício de energia renovável se traduzem em custo para o consumidor, visto que o consumo do combustível aumenta de um gerenciador para o outro, com energia que pode ser considerada sem custo de produção (fotovoltaica) sendo desperdiçada. Ou seja, quanto menor e mais próximo de zero for o balanço energético do sistema, melhor é o gerenciador e o sistema estará utilizando a melhor forma a energia das fontes.

## 5 CONCLUSÃO

Um bom gerenciador de energia é caracterizado, além de outros fatores, pelo balanço de energia. O resultado ideal é o suprimento total da carga e, ao mesmo tempo, evitar o desperdício de energia renovável disponível, além de minimizar o uso das baterias e do gerador a diesel, reduzindo o custo de atendimento. Nas simulações, apenas há excedente de energia para o perfil de carga residencial e industrial, com o gerenciador Fuzzy (FIS) apresentando melhores resultados se comparado com o *cycle-charging* (CC).

As parcelas de participação no suprimento da carga (Figura 20 e Figura 21) para os dois gerenciadores são muito próximas. No entanto, o que difere entre eles é a utilização da energia produzida. No geral, o controlador lógico difuso apresentou melhores resultados, indicados na forma de menor uso do gerador a diesel. Isso pode ser visto, principalmente, na Tabela 3, onde o carregamento do banco de baterias é realizado em maior parte pela energia renovável, evitando o desperdício de energia. Esse desperdício é medido através do balanço de energia, na Tabela 2, onde mais uma vez o controlador FIS (*Fuzzy Inference System*) apresenta resultados melhores, ou seja, um balanço de energia menor. Destacam-se os perfis de carga residencial e industrial, onde o controlador FIS apresentou redução de, aproximadamente, 34% e 45% no desperdício de energia renovável.

No controlador FIS, os limites de carga e descarga do sistema de baterias são ajustados conforme as condições de operação atual, levando em consideração não somente a energia armazenada, mas o balanço de energia do sistema. Em alguns cenários, como no residencial e industrial, esses limites ficam entre 20% e 65%, enquanto que no cenário comercial, o controlador FIS é mais agressivo e se torna mais parecido com o controle convencional *cycle-charging*, com ciclos de carregamento mais bem definidos e com profundidades de carga e descarga de 80%, aproximadamente.

Além disso, o gerenciador FIS também leva em consideração as restrições temporais de operação do gerador, o que preserva sua vida útil. Esse tipo de restrição é pouco compatível com a metodologia de controle *cycle-charging* devido às suas características completamente baseadas em regras e lógica binária.

É importante ressaltar que a estabilidade e dinâmica do sistema elétrico não é levada em consideração nas simulações. Isso indica que, adicionalmente a esse estudo, a estabilidade do gerador a diesel assim como suas rampas de aceleração e desaceleração devem ser acrescentadas para um funcionamento adequado do sistema. As simulações são realizadas de forma estática, no estudo somente do gerenciamento de energia e despacho de fontes de geração.

Em estudos futuros, previsões de geração renovável e demanda podem ser adicionadas ao processo de inferência Fuzzy, com o objetivo de diminuir ainda mais o desperdício de energia das fontes renováveis e reduzir o uso do gerador a diesel. Para melhorar a comparação entre os dois métodos, um modelo de custo de operação do sistema pode ser modelado.

Por fim, informo as publicações dos seguintes trabalhos correlatos a este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC):

1. SOUZA, B. P. ; ZENI, V. S. ; SICA, Everthon T. ; PICA, C. Q. ; HERNANDES, M. . Fuzzy Logic Energy Management System in Islanded Hybrid Energy Generation Microgrid. In: Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2018, Montreal. 31st Annual IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE 2018), 2018.
2. ZENI, V. S. ; SOUZA, B. P. ; SICA, Everthon T. ; PICA, C. Q. ; HERNANDES, M. . Gerenciador Energético Fuzzy para Sistemas Isolados Híbridos de Energia. In: XIV Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, 2018, Recife, Brasil.
3. SICA, Everthon Taghori; STOCKERT, E. R. V.; SOUZA, B. P.; NOVAK, C.; SOUZA, M. P. Avaliação dos impactos da produção de energia de uma microcentral fotovoltaica na qualidade de energia e no sistema de proteção de um unidade consumidora: um estudo de caso. In: XVII ERIAC - Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ, 2017, Ciudad del Este. XVII ERIAC. Ciudad del Este: Cigré, 2017.
4. MEURER, A. L. K. ; NOVAK, C. ; SOUZA, B. P. ; SICA, Everthon T. . Aos Impactos da Implementação do Laboratório Piloto de Microgeração Fotovoltaica no Campus Florianópolis. In: Seminário de



Pesquisa, Extensão e Inovação, 2015, Florianópolis. SEPEI 2015, 2015.

5. SOUZA, B. P. ; NOVAK, C. ; SICA, Everthon T. ; TAKIGAWA, F. Y. K. .  
Gestão Pelo Lado da Demanda por meio de Micro geração Solar Fotovoltaica e sua Políticas de Conexão. In: Congreso Internacional de Distribución Eléctrica (CIDEL), 2014, Buenos Aires. CIDEL. Buenos Aires: ADERA, 2014. No qual o prêmio de Menção Honrosa foi concedido aos autores.

## 6 REFERÊNCIAS

ADOUANE, M. et al. Monitoring and smart management for hybrid plants (photovoltaic-generator) in Ghardaia. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 6, Abril 2014.

AMEEN, A. M.; PASUPULETI, J.; KHATIB, T. Simplified performance models of photovoltaic/diesel generator/battery system considering typical control strategies. **Energy Conversion and Management**, Selangor, v. 99, p. 313-325, Maio 2015.

ANDRADE, L. C. M. D.; FLAUZINO, R. A.; SILVA, I. N. D. Sistemas Fuzzy para Previsão de Demanda de Energia Elétrica no Curtíssimo Prazo. **9th Brazilian Conference on Dynamics Control and their Applications**, São Paulo. Junho 2010.

BARRETO, E. J. F.; PINHO, J. T. **Sistemas Híbridos - Soluções Energéticas para a Amazônia**. Ministério de Minas e Energia. Brasília. 2008.

CANAPPELE, F. D. L. **Desenvolvimento de um Modelo Fuzzy para Otimização da Energia Gerada por um Sistema Híbrido (Solar-fotovoltaico e eólico)**. Dissertação de Mestrado - UNESP - Faculdade de Ciências Agrônomicas. Botucatu. 2007.

CHANG, C. A. **Otimização Técnico Econômica de um Sistema Híbrido Fotovoltaico-Diesel com Banco de Baterias**. Dissertação de Mestrado - PUC-Rio. Rio de Janeiro. 2012.

ELETOBRÁS. **Sistemas Elétricos Isolados - Relatório de Síntese, período de 2008 a 2018**. Eletrobrás. [S.I.]. 2009.

ENGEL, P. M. **Redes Neurais e Sistemas Fuzzy**. Aula - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2017.

EPE. **Sistemas Isolados - Planejamento do Atendimento aos Sistemas Isolados**. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília. 2014.

GUPTA, A.; SAINI, R. P.; SHARMA, M. P. Computerized Modelling of Hybrid Energy System—Part II: Combined Dispatch Strategies and Solution

Algorithm. **5th International Conference on Electrical and Computer Engineering**, Dhaka, 20-22 Dezembro 2008. 20-22.

LI, J.; WEI, W.; XIANG, J. A Simple Sizing Algorithm for Stand-Alone PV/Wind/Battery Hybrid Microgrids. **Energies**, Hangzhou, v. 5, p. 5307-5323, Dezembro 2012.

MARTINS, M. A. **Desenvolvimento de funções de lógica difusa para PLC**. Dissertação de Mestrado - Instituto Superior de Engenharia do Porto. Porto. 2014.

MATOS, M. B. D. **Análise Energética de um Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico com Armazenamento de Energia Elétrica através do Hidrogênio e Banco de Baterias**. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. Campinas. 2013.

MOHAMMED, A. et al. A review of process and operational system control of hybrid photovoltaic/diesel generator systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 436-446, 2015.

OH, S. et al. Efficient Model Predictive Control Strategies for Resource Management in an Islanded Microgrid. **eENERGIES**, v. 10, n. 7, Julho 2017.

ONS. ONS conclui o plano anual da operação dos sistemas isolados para o ano de 2018. **ONS**, 2018. Disponível em: <<http://ons.org.br/Paginas/Noticias/2017-pensisol.aspx>>. Acesso em: 27 Março 2018.

PORTAL BRASIL. Sistema Interligado Nacional: Sistemas Isolados, 2011. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2011/12/sistemas-isolados>>. Acesso em: 28 Agosto 2017.

REIS, L. O. M. D. **Lógica Fuzzy aplicada ao controle de um sistema híbrido de geração de energia elétrica: eólica, fotovoltaica e biogás**. Aula - Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá. 2002.

RIBEIRO, P. J. S. **Optimização de Estratégias de Operação de Sistemas Híbridos**. Dissertação de Mestrado - FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto. 2009.

ROMERO, R. A. F. **Sistemas Inteligentes**. Aula - LABIC - USP. São Paulo. 2018.

ROSS, T. J. **Fuzzy Logic with Engineering Applications**. 3. ed. [S.l.]: Wiley, 2010.

SALIS, R. T. D. et al. Energy Storage Control for Peak Shaving in a Single Building. **IEEE International Conference on Communications (ICC)**, Kuala Lumpur, Julho 2016.

ZHAO, B. et al. Operation Optimization of Standalone Microgrids Considering Lifetime Characteristics of Battery Energy Storage System. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. 4, n. 4, 2013.