

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA  
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**RENAN ALGUSTO PIRES FERREIRA**

**SINTONIA DO CONTROLE PROPORCIONAL INTEGRATIVO  
DERIVATIVO EM MICRORREDES BASEADO EM OTIMIZAÇÃO  
POR ENXAME DE PARTÍCULAS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CORNÉLIO PROCÓPIO**

**2016**

**RENAN ALGUSTO PIRES FERREIRA**

**SINTONIA DO CONTROLE PROPORCIONAL INTEGRATIVO  
DERIVATIVO EM MICRORREDES BASEADO EM OTIMIZAÇÃO  
POR ENXAME DE PARTÍCULAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título Engenheiro Eletricista no Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Renan Durand

**CORNÉLIO PROCÓPIO**

**2016**



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
**Campus Cornélio Procópio**  
**Departamento de Engenharia Elétrica**  
**Curso de Engenharia Elétrica**



## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Renan Augusto Pires Ferreira**

**Sintonia do controle proporcional integrativo derivativo em microrredes baseado em otimização por enxame de partículas**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 08:30hs do dia 16/06/2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof(a). Dr(a). Fábio Renan Durand - Presidente (Orientador)

---

Prof(a). Dr(a). Murilo da Silva - (Membro)

---

Prof(a). Dr(a). Marcelo Favoretto Castoldi - (Membro)

Este trabalho é dedicado à minha tia de criação Maria Madalena (em memória), aos meus avós e pais, por sempre acreditarem em toda minha dedicação pelos estudos. A minha namorada e meus amigos, por toda força me passada durante a realização da graduação.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse. Por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

Agradeço aos meus pais, Roberto Ferreira e Rosângela Pires de Oliveira, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Agradeço a minha namorada, pelo companheirismo e compreensão ao longo deste trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Fábio Renan Durand, por toda sua dedicação e valorosa orientação. Pelo suporte no tempo que lhe coube, e pelas suas correções, incentivos e todos os ensinamentos repassados.

A todos os amigos que fizeram parte da minha formação e que continuarão presentes em minha vida.

Agradeço a Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procópio pela oportunidade de fazer o curso, e pelo ambiente criativo e amigável que proporciona.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação.

“Procure ser um homem  
de valor, em vez de ser  
um homem de sucesso”

**Albert Einstein**

## RESUMO

FERREIRA, Renan Augusto Pires. **Sintonia do controle proporcional integrativo derivativo em microrredes baseado em Otimização por Enxame de Partículas**. 2015. 45f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procopio, 2015.

Neste trabalho é descrito a sintonia do controlador proporcional integrativo derivativo presente numa microrrede, baseada na inteligência do enxame de partículas. O algoritmo de otimização por enxame de partículas (PSO) foi proposto com o objetivo de melhorar a determinação dos parâmetros do controlador, a fim de reduzir a variação de frequência numa microrrede após perturbações. No modelo desenvolvido são consideradas as funções transferência dos recursos energéticos presentes. Os resultados gráficos mostram a viabilidade do algoritmo na sintonia do controlador. Desta forma a variação de frequência no sistema foi reduzida tornando a rede mais estável quando sujeita a perturbações.

**Palavras-chave:** Microrrede. Controlador proporcional integrativo derivativo. PSO. Variação de frequência.

## ABSTRACT

FERREIRA, Renan Augusto Pires. **Sintonia do controle proporcional integrativo derivativo em microrredes baseado em Otimização por Enxame de Partículas**. 2015. 45f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

In this monography describes the tuning of the controller proportional integrative derivative present in microrrede based on particle swarm intelligence . The optimization algorithm by particle swarm optimization (PSO) was proposed in order to improve the determination of the controller parameters in order to reduce variation in frequency after microrrede disorders. In the developed model are considered the transfer functions of energy resources present . The graphical results demonstrate the feasibility of the tuning algorithm in the controller. Thus the frequency of variation in the system was reduced making the network more stable when subjected to disturbances.

**Keywords:**Microgrid. Proportional integrative derivative controller. PSO. Frequency variation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de geração distribuída.....	17
Figura 2 - Rede principal e Microrrede .....	18
Figura 3 - Geração de energia por célula de combustível.....	19
Figura 4 - Estrutura do aerogerador .....	22
Figura 5 - Energia fotovoltaica conectada à rede .....	23
Figura 6 - Controle PID de uma planta.....	30
Figura 7 - Bando de pássaros .....	33
Figura 8 - Cardume de peixes.....	34
Figura 9 - Movimento de partículas .....	35
Figura 10 - Topologia da microrrede estudada.....	38
Figura 11 - PID sintonizado por Ziegler-Nichols.....	39
Figura 12 - Variação de frequência com degrau de carga de 10% e PID sintonizado através do PSO.....	40
Figura 13 - Variação de frequência com degrau de carga de 20% e PID sintonizado através do PSO.....	41
Figura 14 - Variação de frequência com degrau de carga de 40% e PID sintonizado através do PSO .....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores de capacidade em relação às velocidades dos ventos .....	21
Tabela 2 - Tecnologias de armazenamento de energia .....	25
Tabela 3 - Limites de variação de frequência no setor elétrico brasileiro .....	27
Tabela 4 - Parâmetros PID obtidos por Ziegler-Nichols .....	38
Tabela 5 - Parâmetros PSO adotados .....	40

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	12
1.1 PROBLEMA .....	13
1.2 JUSTIFICATIVA .....	14
1.3 OBJETIVOS .....	14
1.3.1 OBJETIVO GERAL .....	14
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
<b>2. ASPECTOS TEÓRICOS</b> .....	15
2.1 MICRORREDES .....	17
2.1.1 Fontes energéticas .....	18
2.2 QUALIDADE DE ENERGIA.....	25
2.2.1 Análise de frequência.....	26
<b>3. CONTROLE DE MICRORREDES</b> .....	28
3.1 CONTROLADOR PROPORCIONAL INTEGRATIVO DERIVATIVO .....	29
3.2 MODELAGEM DE FONTES DE ENERGIA.....	31
<b>4. OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS</b> .....	33
<b>5. RESULTADOS</b> .....	38
<b>6. CONCLUSÃO</b> .....	43
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	43

## 1. INTRODUÇÃO

A demanda de energia elétrica torna-se cada vez maior devido aos avanços tecnológicos, que exigem um grande aumento na produção de energia devido ao crescimento do consumo. Este aumento de produção faz com que novas fontes energéticas sejam exploradas (energia eólica, biomassa, solar, etc.), acarretando um aumento no nível de complexidade e incerteza no projeto e análise de redes elétricas. Uma alternativa para suprir o aumento de carga com garantia é o uso de geração distribuída [1].

As principais características da geração distribuída de energia consistem da proximidade da unidade geradora à carga e a utilização de centrais geradoras de menor porte, comparada a unidades de geração centralizada. Este tipo de geração pode pertencer a um produtor independente de energia elétrica, a um autoprodutor, à concessionária, ou em parceria dos mesmos, e pode ser dividida de acordo com sua potência em micro (até 100 kW), mini (até 1 MW), pequena (de 1 MW a 30 MW), média (de 30 MW a 50MW) e grande (de 50 MW a 100MW) [2].

O conceito de geração distribuída não substitui o sistema de geração centralizado, e consiste de um complemento [1]. Com inúmeras redes (micro, pequena, média ou grande) conectadas a um sistema central interligado, surgem novos desafios como a estabilidade do sistema e qualidade de energia [2].

Os principais parâmetros do sistema de energia elétrica são tensão e frequência que devem ser controlados para manutenção dos níveis de desempenho e estabilidade requeridos. Neste sentido, são empregadas estratégias de controle adequadas quando há presença de uma microrrede ao lado de grandes quantidades de unidades geradoras comuns [1].

As estruturas de controle do sistema elétrico são divididas em três principais: controle central, agente único e controle descentralizado. No controle central os parâmetros das microrredes são recolhidos e controlados por um único controlador central. No método de agente único a unidade controladora passa a ser responsável pelas cargas locais. Já no sistema descentralizado, cada micro rede tem a presença de um controlador local [1].

A qualidade de energia elétrica no Brasil é regulamentada e estabelecida pelo módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema

Elétrico Nacional (PRODIST), que estabelece padrões de qualidade do produto e qualidade do serviço. Na qualidade do produto, os aspectos considerados são: tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variações de tensão em curta duração e variação de frequência. Já a qualidade do serviço tem como principal objetivo estabelecer procedimentos relativos à qualidade do serviço prestado pelas distribuidoras aos consumidores [3].

## 1.1 PROBLEMA

Neste estudo será abordado o problema de variação de frequência em microrredes quando sujeita a um evento, como por exemplo, aumento ou corte de carga.

Em diversas situações a resposta do sistema elétrico a alguns eventos foge dos padrões impostos pela regulamentação de qualidade de energia. Uma maneira de resolver esse problema é a utilização de controladores com finalidades específicas na rede elétrica, como os controladores de frequência, controladores de tensão, harmônicos, etc. [4].

Nas microrredes a geração distribuída inclui várias formas de recursos energéticos, como baterias, eólico, microturbinas, geradores a diesel, células combustíveis e painéis fotovoltaicos. Sendo assim, é necessária a modelagem de cada tipo de fonte, para que permita o estudo por simulação computacional [1].

Tendo em conta a modelagem de cada tipo de fonte é necessário um método de controle específico que integre as necessidades das cargas com os limites das unidades geradoras, para que os limites de qualidade de energia estabelecidos pelo PRODIST sejam respeitados [4].

Utilizar um laço de controle na microrrede com a presença de um controlador proporcional integrativo derivativo (PID) é uma alternativa para o controle de frequência [1]. Sendo assim, o problema a ser investigado neste estudo é a variação de frequência em uma microrrede e a utilização do algoritmo de otimização por enxame de partículas (PSO –Particle Swarm Optimization) para otimizar os parâmetros do PID, a fim de que, a partir destes valores otimizados, as respostas de variação de frequência respeitem os limites

estabelecidos pela ANEEL e aumente a qualidade e confiabilidade da microrrede [4].

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O conceito de geração distribuída passa a ser muito utilizada a partir do crescimento significativo da demanda de energia elétrica, por consequência de um grande avanço tecnológico atual, que exige aumento tanto na quantidade de geração de energia, quanto na sua qualidade para distribuição até o consumidor final. Com isso, é necessário o incremento de fontes de geração no sistema que acima de tudo respeite aspectos ambientais impostos na atualidade por críticos da área. Sendo assim, o uso de energias renováveis e modificações no sistema de energia passam a desenvolver um papel importante na sociedade, como grande exemplo o uso de geração distribuída. Com a utilização deste sistema, surgem novos desafios na sua utilização, em especial no quesito qualidade de energia [1]. Desta forma, técnicas de controle são utilizadas para o funcionamento adequado destas redes. O algoritmo de otimização por enxame de partículas auxiliará na determinação dos parâmetros do controlador, auxiliando o controle de frequência e tensão, aumentando a confiabilidade das redes elétricas para que supra as necessidades de demanda energética da sociedade

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem por objetivo sintonizar parâmetros de controladores de uma microrrede utilizando o algoritmo de otimização por enxame de partículas, a fim de melhorar a qualidade e confiabilidade nos quesitos de variação de tensão e frequência na rede elétrica utilizada.

### 1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar matematicamente a topologia de uma microrrede a fim de otimizar o seu controle por meio de simulações computacionais.
- Identificar qual a malha de controle correta, a quantidade de controladores e suas referentes posições dentro da microrrede para que o controle seja feito de maneira correta.
- Utilizar o PSO para sintonizar os parâmetros dos controladores PIDs usados na malha de controle da microrrede modelada.
- Configurar as constantes do PSO de modo que este consiga ler e estimar corretamente os parâmetros de toda microrrede e dos controladores utilizados.
- Analisar as respostas de variação de frequência de acordo com os parâmetros estimados.
- Investigar se os resultados obtidos estão de acordo com os valores indicados nas normas de qualidade de energia promulgada pela ANEEL.

## **2. ASPECTOS TEÓRICOS**

A geração distribuída é definida como geração descentralizada, e consiste de uma fonte de geração conectada diretamente ao consumidor ou a rede de distribuição. Este tipo de geração pode ser relacionado com sua potência instalada, por exemplo, no Brasil o conceito deste tipo de geração limita-se em potências instaladas em até 30 MW, ou algumas vezes até 50 MW [2].

A Resolução Normativa nº 482/2012 publicada pela ANEEL estabelece algumas normas para micro e mini geração distribuída. Segundo ela, a micro geração distribuída indica uma central geradora com potência instalada menor ou igual 100 kW, e a mini com potência instalada superior a 100kW e menor ou igual a 1 MW [5].

Os aumentos significativos das críticas ambientalistas e da demanda de energia mundial são causas da necessidade de implantação de novas formas de geração de energia, que passam a complementar o sistema atual com intuito de suprir novas necessidades [2].

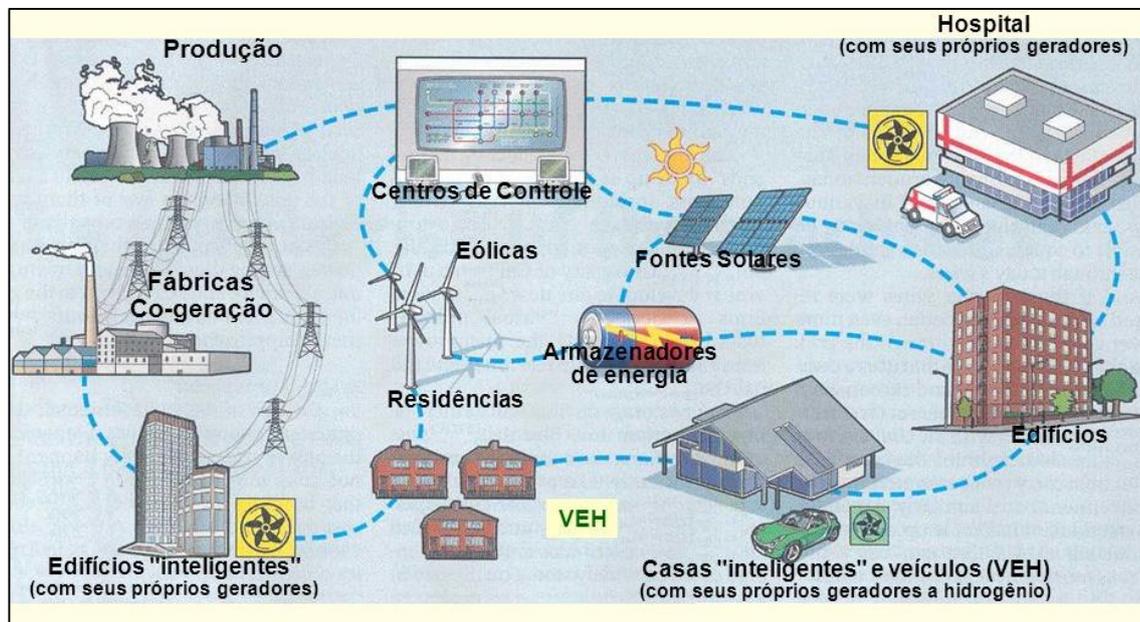
O conceito de geração distribuída passa a ser interessante a partir de que o sistema atual, o centralizado, necessita da construção de novas grandes unidades geradoras, de sistemas de transmissão e distribuição, que é consequência de um desenvolvimento tecnológico contínuo que exige uma demanda de energia cada vez maior [2].

Pode ser classificada com relação ao seu tipo de operação em dois tipos: Geração distribuída isolada e geração distribuída interligada. No caso isolado, ela opera de forma isolada aos demais sistemas elétricos. Já na interligada, a geração distribuída opera paralelamente ao sistema elétrico central, sendo dividida em geração possuída operada pela concessionária, geração possuída e operada pelo consumidor e geração do consumidor operada pela concessionária [6].

Um fator favorável para a utilização de geração distribuída é a redução de perdas, em particular a perda devido à impedância da rede, que varia entre 4 a 7% da potência transmitida. Ainda, verifica-se que a proximidade da unidade geradora à carga resulta na diminuição das perdas deste tipo [2].

A geração distribuída pode aumentar a confiabilidade do sistema elétrico, aumentando a qualidade de energia e disponibilizando um fornecimento com menos interrupções, evitando longos períodos sem fornecimento de energia [2].

A figura 1 ilustra basicamente um sistema de geração distribuída com seus elementos típicos: presença de várias unidades geradoras, algumas cargas, armazenadores de energia e centro de controle da rede.



**Figura 1 - Sistema de geração distribuída**  
Fonte: Adaptado de [6]

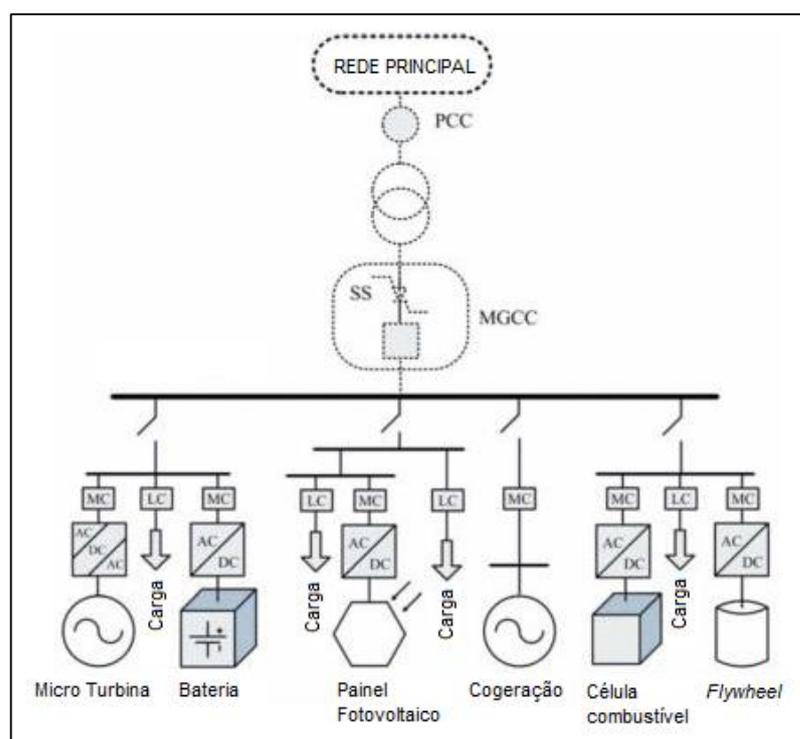
## 2.1 MICRORREDES

O conceito de microrrede, segundo a ANEEL, é uma classificação de geração distribuída com potência instalada até 100kW e podem operar de dois modos, o modo interligado normal e o modo de emergência. No primeiro modo, a microrrede é ligada ao sistema central interligado, sendo denominado no Brasil de SIN (Sistema Interligado Nacional), e tem as funções de alimentar suas cargas ou injetar energia na rede interligada. Já no modo de emergência, a microrrede funciona de modo isolado (também chamado de modo ilhado), autônomo, dos demais sistemas [5].

Os elementos típicos que compõem uma microrrede são: microfuentes, cargas, dispositivos de armazenamento de energia, conversores de potência e controladores. As microfuentes são pequenas unidades geradoras de centenas de kW ou menos, sendo geralmente células a combustível, unidades de cogeração, geradores eólicos, geradores a diesel ou módulos fotovoltaicos. Já

os dispositivos de armazenamentos podem ser compostos por baterias e *flywheels* (conhecido como volante de inércia) [7].

A figura 2 mostra a estrutura de um sistema elétrico com presença de microrredes. Nela indica a rede principal, que é as redes de distribuição e transmissão do sistema central, o ponto de acoplamento comum (PCC), o controlador central das microrredes (MGCC, *micro grid central controller*), uma chave estática (SS, *static switch*), as microfontes de energia e seus respectivos controladores MC (*microsourcescontrollers*), as cargas e seus controladores LC (*loadcontrollers*) e os dispositivos de armazenamento [1].



**Figura 2- Rede principal e Microrrede**  
Fonte: Adaptado de [1]

### 2.1.1 Fontes energéticas

- Células a combustível

A Célula a combustível é um transdutor eletroquímico que converte continuamente energia química em energia elétrica na combinação de um elemento combustível com outro oxidante – a combinação de um átomo de oxigênio com dois de hidrogênio é a mais utilizada. A sua operação é com alta eficiência e com baixas perdas de conversão. São constituídas por eletrodos

positivos e negativos, com presença de eletrólitos e catalisadores em todas as células. Os eletrólitos têm o papel de transportar íons produzidos nos polos positivos (nomeado de cátodo) ou negativos (ânodo) de um para o outro. Já o catalisador, tem a função de acelerar as reações eletroquímicas do processo. A figura 3 mostra um modelo deste tipo de geração [8].

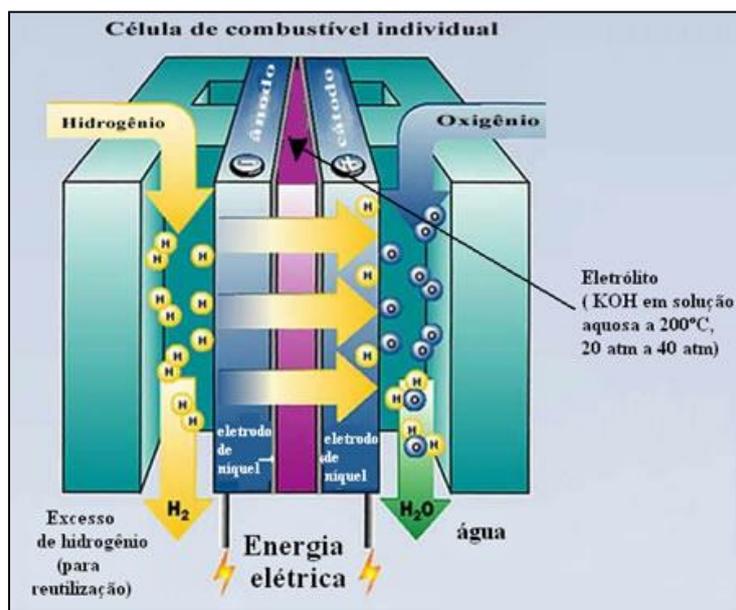


Figura 3 - Geração de energia por célula de combustível  
Fonte: [9]

- Unidades de Cogeração

A cogeração de energia é um termo que é discutido e usado a vários anos. Seu espaço foi perdido após meados do século XX, pois foram sendo substituídas pela energia elétrica produzida por grandes unidades geradoras, ficando com utilidade limitada em apenas em sistemas isolados e em indústrias que possuem grandes quantidades de dejetos industriais, como por exemplo indústria canavieira, de papel e celulose e plataformas submarinas [8].

Através de conscientizações de impactos ambientais, como exemplo a redução na emissão de  $CO_2$ , e de novos modelos de setor elétrico, de exemplo a geração distribuída, nos últimos anos a geração elétrica por cogeração voltou a ser estimulada, buscando vários estudos para seu desenvolvimento [8].

A análise técnica da cogeração de energia é feita por ciclos termodinâmicos, possuindo aplicações distintas e tecnologias próprias, sendo eles [10]:

- **Ciclos Otto e Diesel:** São comuns na utilização de potências até a ordem de 20kW. A quantidade de energia recuperada não é muito expressiva, portanto seu uso é mais constante em aplicações que necessitam de pequenas quantidades de calor. Este ciclo compõe motores de combustão interna que reaproveita energia proveniente dos gases de exaustão e do calor dos sistemas de lubrificação [10];
- **Ciclo Rankine:** O calor resultante da combustão é transferido pela caldeira para a água que vaporiza, e este vapor aciona a turbina para geração de energia. Utiliza combustíveis de baixo custo: bagaço de cana, lenha, carvão [10];
- **Ciclo Brayton:** Os gases de exaustão da turbina a gás possuem temperaturas elevadas (380 a 600°C) e são aproveitados para o sistema de cogeração com a transferência deste calor para a caldeira [10];
- **Ciclo combinado:** Processo de geração de energia que utiliza turbinas a vapor e a gás, que acionam geradores elétricos. Cogeração neste ciclo é utilizada em casos que necessita de produção variável de energia elétrica e térmica. A energia presente nos gases de exaustão do combustível queimado na turbina a gás, transfere calor para a caldeira para a geração de vapor, este vapor aciona a turbina a vapor de condensação [10].

- Geração eólica

A utilização da energia eólica para geração de energia elétrica iniciou-se como consequência da crise petrolífera em meados da década de 70, mas o uso de energia eólica tem começado a milhares de anos, quando eram utilizadas em sistemas de traça naval, moinhos de vento e bombeamento de água. Nos últimos 30 anos, este tipo de geração foi alvo de muitos estudos e obteve-se grandes avanços tecnológicos de seus componentes[11]:

- Questões estruturais das torres;
- Processos aerodinâmicos;
- Sistemas eletro-eletrônicos de potência;

- Controle da geração;
- Injeção de energia no sistema elétrico.

O potencial eólico se diz aproveitável quando alguns parâmetros em sua totalidade são alcançados, como por exemplo: A uma altura de 50 metros, é necessário que a densidade da geração seja de no mínimo  $500 \text{ W/m}^2$ , o que impõe dos ventos velocidades mínimas de 7 a 8  $\text{m/s}$ . Com base nesses dados, a Organização Mundial de Meteorologia descreve que apenas 13% da superfície terrestre possui ventos nestas velocidades à 50 metros de altura [11].

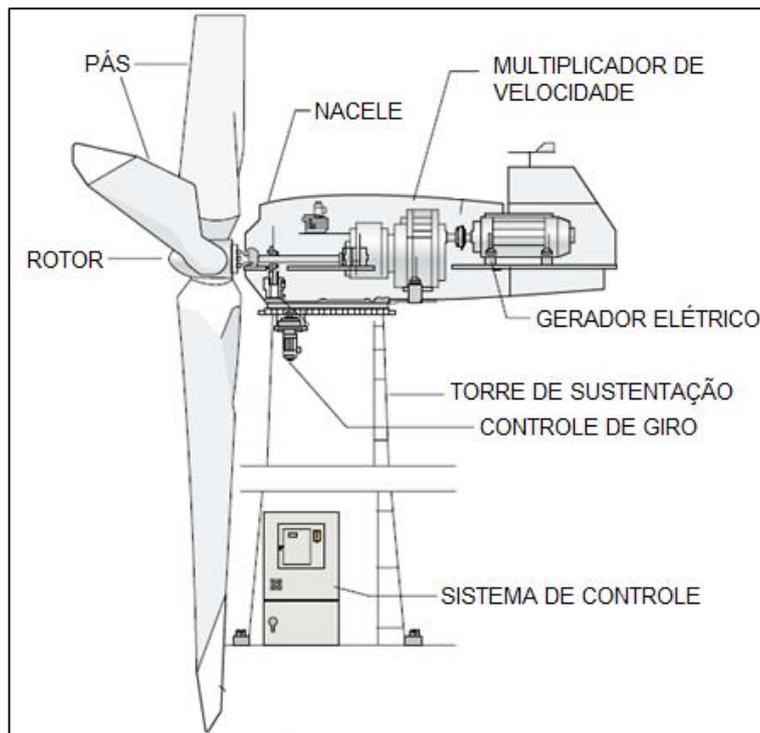
Para estudo da disponibilidade de energia elétrica por meio da geração eólica, criou-se o fator de capacidade ( $C_p$ ), que é a razão entre a potência média no eixo da turbina e a máxima potência disponível. Estes fatores, juntamente com a localização geográfica, são utilizados no desenvolvimento de projetos de turbinas. A tabela 1 mostra o fator de capacidade relacionado com a velocidade dos ventos[11].

**Tabela 1 - Fatores de capacidade em relação às velocidades dos ventos**

Velocidade (m/s)	6 a 6,5	6,5 a 7	7 a 7,5	7,7 a 8	8 a 8,5	>8,5
$C_p$	0,13	0,17	0,20	0,25	0,30	0,35

Fonte: [11]

É necessário um fluxo forte contínuo dos ventos para um bom aproveitamento de energia, pois a energia cinética contida pelas pás está associada à coluna de ar que se desloca a uma velocidade constante e uniforme, porém atualmente algumas pás possuem controle de vento, o que estabiliza sua rotação independente da velocidade soprada. O processo completo de geração de eletricidade a partir do potencial eólico é dado por aerogeradores, com estrutura mostrada na figura 4 [11].



**Figura 4 - Estrutura do aerogerador**  
 Fonte: Adaptado de [12]

Os elementos que compõem o aerogerador são:

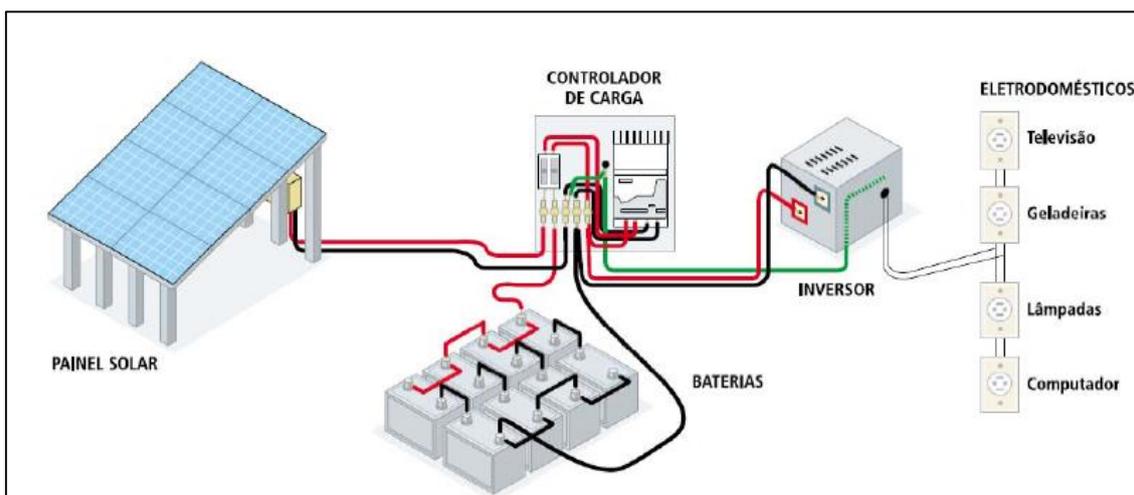
- **Rotor:** Eixo da turbina;
- **Pás:** Elemento responsável pela captação da energia cinética dos ventos;
- **Controle de giro:** Sistema com função de girar a turbina para melhor aproveitamento do vento;
- **Sistema de controle:** Responsável pelo controle de toda estrutura do aerogerador;
- **Multiplicador de Velocidade:** Ampliar a razão da velocidade do eixo do gerador com o rotor da turbina;
- **Gerador elétrico:** Transforma energia mecânica do eixo em energia elétrica;
- **Torre de sustentação:** Sustenta a estrutura do aerogerador;
- **Nacelle:** Estrutura que abriga os elementos do gerador [11].

- Módulos fotovoltaicos

O sistema fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839, pelo pesquisador Alexandre Edmond Becquerel. A aplicação dessa modalidade de energia é predominantemente em baixa potência na faixa de kW. Nos casos de incidência em sistemas de maior porte, são conectadas em níveis de tensão elevados [11].

O efeito de conversão de energia fotovoltaica em elétrica ocorre com base na incidência de raios solares sobre um material semiconductor. Neste efeito, as células solares permitem que os fótons presentes na incidência da luz são convertidos em energia elétrica [11].

A incidência de luz solar faz com que elétrons se transferem entre diferentes bandas de energia e cria-se uma diferença de potencial entre dois eletrodos. Produz tensão de corrente contínua (CC) nos terminais, que é injetada na rede através de inversores, como mostrado na figura 5 [11].



**Figura 5 - Energia fotovoltaica conectada à rede**  
**Fonte: Adaptada de [11]**

- Geradores a diesel

O gerador a diesel é definido como a ligação de um motor diesel estacionário, com um gerador elétrico, normalmente um gerador síncrono. Motores a diesel são máquinas de combustão interna destinadas à geração de energia mecânica, ou força motriz. Esta energia transfere-se para o gerador com intuito de transformá-la em energia elétrica [13].

A frequência elétrica da energia gerada desta máquina é ligada diretamente com a velocidade do motor, sendo controlada por um regulador de velocidade do motor. Este regulador tem ação no ajuste do fluxo de combustível fornecido a máquina primária com intuito de que a velocidade do gerador e do motor se mantenha constante, diminuindo casos de variação da frequência [13].

Para instalação de um gerador a diesel várias restrições devem ser respeitadas e consideradas para casos de despacho da energia proveniente dele. Sendo elas: tempo mínimo de funcionamento do motor, quantidade de ligações e paradas e potência mínima gerada., sendo que este fornece potência ativa e reativa para a rede elétrica [13].

- Dispositivos de armazenamento

Os dispositivos de armazenamento são comumente encontrados em sistemas de pequeno porte, e raramente utilizados em sistemas de grande porte. Quando nestes, tem função de diminuir transitórios de corrente causados por grandes variações de carga no sistema [13].

Nos sistemas de pequeno porte, como em microrredes, os dispositivos de armazenamento têm função de auxiliar a rede elétrica em momentos de falta de energia, impedindo casos de interrupção [13].

O dispositivo de armazenamento mais utilizado nas redes elétricas é a bateria eletroquímica, porém existem novas propostas de dispositivos que garantem menores custos e maiores vidas-úteis [13]. Dentre eles estão:

- **Volantes de inércia – *flywheel*:** Volante que acoplado a um gerador armazena energia cinética. Mais eficiente que baterias convencionais, o *flywheel* gira em altas velocidades e possuem pequenas perdas;
- **Armazenamento baseado em ar-comprimido:** Ar atmosférico comprimido por um compressor obtendo grandes potência armazenadas na forma de energia;
- **Bombeamento hidráulico:** energia elétrica armazenada em energia potencial gravitacional. Água armazenada em tanques de grande altura por meio de bombas. Energia potencial é transformada em mecânica através de uma turbina hidráulica acoplada a um gerador elétrico [13].

A tabela 2 compara parâmetros das formas de armazenamento.

**Tabela 2 - Tecnologias de armazenamento de energia**

Tecnologia	Rendimento (%)	Densidade energética (Wh/kg)	Custo		Vida útil (Anos)
			(Euro/kW)	(Euro/kWh)	
Baterias	60-80	35-60	550-3700	115-570	5-15
Ar comprimido	50-70	100-120	4600-5700	12-60	30
Volante de inércia	80-95	40-350	850-3700	460-810	30
Armazenamento hidráulico	65-70	-	4600-5700	6-18	50

Fonte: [13]

- Conversores de potência

Os conversores de energia têm a função de converter variados tipos de energia transformando-as numa forma adequada para que sejam injetadas na rede elétrica. Os tipos de conversores são de dois tipos, os inversores e os retificadores [13].

Os inversores têm por finalidade converter tensões de corrente contínua CC em tensões de corrente alternada - CA. São utilizados com objetivo de injetar na rede energia provenientes dos dispositivos de armazenamento e de fontes geradoras de energia CC, como exemplo os painéis fotovoltaicos e baterias, dissipando baixas quantidades de energia. Já os retificadores possuem contrárias funções, ou seja, converter tensão alternada em contínua[13].

## 2.2 QUALIDADE DE ENERGIA

O crescimento contínuo na demanda de energia elétrica infere vários desafios para mantê-la em boa qualidade para consumo do cliente, pois qualquer distúrbio na rede que interfira o funcionamento dos equipamentos implica transtornos por parte dos consumidores[21].

Atualmente o sistema elétrico como um todo está constituído de diferentes formas de carga e geração. O emprego dessas novas formas implica em maiores dificuldades para controle de estabilidade da energia. Como exemplo, pode-se citar o aumento do número de cargas eletrônicas nas diversas

classes consumidoras, este tipo de carga gera uma “poluição” no sistema elétrico, pois causam distúrbios na rede, como distorção nas formas de onda, tanto de corrente como tensão, e ainda, estas cargas sofrem grandes problemas de funcionamento quando submetidas a esses distúrbios [21].

No Brasil as regras referentes à qualidade são estabelecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, através do PRODIST, módulo 8, revisão 7. Este módulo refere-se exclusivamente sobre a qualidade de energia elétrica e variação de seus indicadores. A data de vigência desta revisão iniciou-se em 01/01/2016 [3].

A avaliação da qualidade de energia elétrica é promovida pela análise de vários aspectos: Continuidade de fornecimento, tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variação de tensão de curta geração e variação de frequência [3].

### 2.2.1 Análise de frequência

A variação frequência de um sistema elétrico é um indicador crítico e certamente o parâmetro de qualidade que possui o menor range. Diante deste indicador, a ANEEL estabelece o esquema regional de alívio de carga (ERAC), que é um sistema de proteção que reduz os efeitos de subfrequência provenientes das perdas de blocos de geração, por meio de um desligamento automático e escalonado das cargas utilizando relés de frequência [3].

Variações de frequência são observadas como resultados do balanço dinâmico entre cargas e geração no caso de alguma alteração. Variações que ultrapassam para operação normal em regime permanente por faltas em sistemas de transmissão, saída de um grande bloco de carga ou pela saída de operação de uma grande fonte geradora. Em sistemas isolados os desvios de frequência resultam em proporções mais significativas[23].

Os valores de frequência estabelecidos pela ANEEL são mostrados na tabela 3.

Tabela 3 - Limites de variação de frequência no setor elétrico brasileiro

Situação	Valor mínimo [Hz]	Valor máximo [Hz]	Duração
Regime permanente	59,9	60,1	-
Recuperação do equilíbrio carga-geração	59,5	60,5	≤30 s
	56,5	66	Condições extremas
	-	$62 < f < 63,5$	≤30 s
	-	$63,5 < f \leq 66$	≤10 s
Corte de geração ou corte de carga	$58,5 > f > 57,5$	-	≤10 s
	$57,5 > f > 56,5$	-	≤5 s

Fonte: [3]

### 3. CONTROLE DE MICRORREDES

As microrredes, como na figura 2, são administradas pelo MGCC, que é instalado no lado de baixa tensão da rede. Ele funciona basicamente como uma interface entre a microrrede e o sistema principal de distribuição. Logo após este controlador, cada micro fonte e cada dispositivo de armazenamento de energia são controlados localmente por um MC, e cada carga controlada por um LC [14].

Estes controladores formam dois conjuntos de dispositivos, um formado pelo MGCC, e o outro pelos MC e LC. Para que a operação do sistema seja dada de forma correta, é necessária uma estrutura de comunicação bastante eficaz entre estes dois grupos, ou seja, o MGCC promovendo uma gestão adequada, os LCs controlando corretamente suas cargas, e os MCs estabelecendo corretamente os níveis de produção de potência ativa e reativa de seus micro geradores [14].

Cada controlador tem suas funções diversificadas que dependem do modo de operação. A seguir mostra algumas funções do MGCC, MC e LC em cada modo [14]:

MGCC no modo interligado;

- Previsão de consumo;
- Previsão de geração;
- Despacho econômico de micro geração;
- Avaliação da segurança de exploração;
- Gestão de cargas;
- Interface com o sistema de distribuição [14].

MGCC no modo emergência;

- Controle da potência ativa dos micros geradores – que muda de um estado econômico (interligado) para um estado de controle de ajuste de produção isolada;
- Controle secundário após a ação inicial dos MCs;
- Possuir informação sobre as cargas – para controlar o uso dos dispositivos de armazenagem e proceder a função de interrupção de algumas cargas [14].

MC e LC, em ambos os modos;

- Operar como controladores locais;
- Contribuir para o despacho econômico;
- Contribuir para o controle local dos dispositivos de armazenamento – em situações de seguimento de carga e gestão de cargas com possibilidade de interrupção [14].

Mais da metade dos controladores industriais em uso atual emprega esquemas de controle proporcional integrativo derivativo (PID), ou PID modificado. Em microrredes estes podem ser utilizados no controle de parâmetros do sistema [4].

### 3.1 CONTROLADOR PROPORCIONAL INTEGRATIVO DERIVATIVO

A grande utilização dos controladores PID se dá por sua simples funcionalidade e por seu desempenho robusto em várias condições de funcionamento, permitindo que seja operado de maneira direta e simples. Ele é composto por três coeficientes: proporcional, integrativo e derivativo, que são variados a fim de obter respostas ideais. O PID aproveita as características de cada coeficiente deste a fim de se obter uma melhora no regime transitório e permanente do sistema controlado [4].

Várias formas de sintonia dos controladores PID vêm sendo desenvolvidas, pois a maioria destes é ajustada em campos, como por exemplo, a forma automática, que tem a capacidade de fazer a sintonia on-line do controlador [4].

O PID é utilizado na maioria dos sistemas de controle, principalmente quando o modelo matemático da planta é bastante complexo, o que o torna mais útil em comparação com processos analíticos [4].

O método de sintonia do controlador PID mais tradicional é o de Ziegler e Nichols, portanto alguns outros vêm sendo estudados, como os algoritmos de otimização bio-inspirados, que executam métodos de busca inspirados na natureza, baseados numa população de indivíduos, analisando o comportamento desta [15].

A equação (1) apresenta o modelo tradicional do PID, e a figura 6 um sistema de malha fechada com uma planta ligada a um bloco de um controlador PID, que mostra seus três índices, o proporcional, o integrativo e o derivativo [4].

$$u(t) = K_p \cdot \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(s) ds + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

Em que:

$u(t)$  - Sinal de controle;

$e(t)$  - Sinal de erro no domínio do tempo;

$e(s)$  - Sinal de erro no domínio da frequência;

$K_p$  – Ganho proporcional;

$T_i$  – Tempo integral (ação integral);

$T_d$  - Tempo derivativo (ação derivativa).

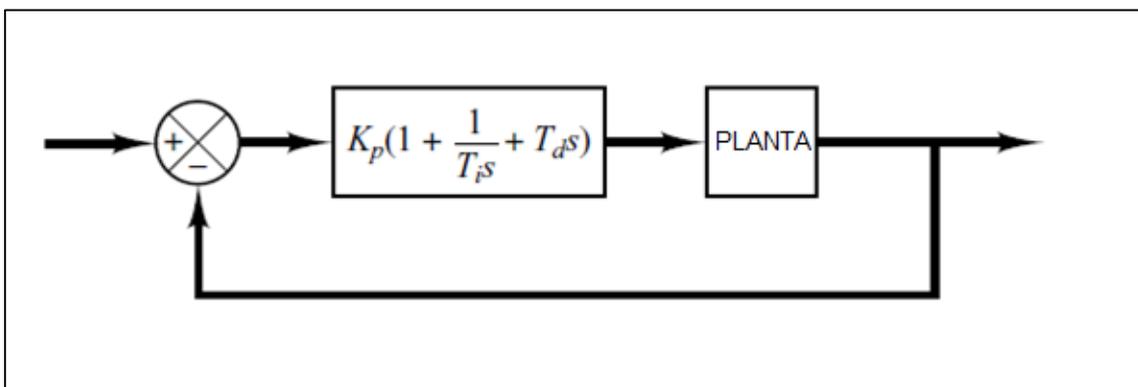


Figura 6 - Controle PID de uma planta  
Fonte: [4] adaptado

- Ação proporcional

A ação proporcional age paralelamente ao erro entre a entrada e a saída do sistema, e só utiliza este como variável de controle. Pode ser representado pela equação (2) [16].

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (2)$$

- Ação integrativa

Tem como função zerar o erro, portanto se for utilizada em modo isolado a estabilidade do sistema tende a diminuir, sendo assim, esta é operada juntamente à ação proporcional como mostrado na equação (3). A integral do erro no tempo faz com que o erro da saída em relação à entrada seja muito menor [16].

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(s) ds \quad (3)$$

- Ação derivativa

Tem ação proporcional à derivada do erro, sendo sensível às variações da variável de entrada. Quando unida com a ação proporcional, ilustrada na equação (4), a derivada faz com que acelere a ação do controle [16].

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_p \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

### 3.2 MODELAGEM DE FONTES DE ENERGIA

Atualmente a matriz energética brasileira é composta por diversas fontes de energia, entre elas estão: Termoelétricas, fotovoltaicas, eólica, biomassa, etc. Estas podem ser modeladas matematicamente a fim de realizar estudos via simulações computacionais. Nesta seção serão apresentados os modelos dos sistemas de geração e armazenamento de energia utilizados no desenvolvimento deste estudo.

Gerador a diesel, turbinas eólicas e *flywheel* são os recursos energéticos utilizados neste trabalho.

No gerador a diesel a função transferência tem como componentes o ganho do gerador e sua constante de tempo. Tais parâmetros são representados

por  $K_{DEG}$  e  $T_{DEG}$ , respectivamente. A variação de potência do gerador ( $\Delta P_{DEG}$ ) e variação de frequência ( $\Delta f$ ) também representam sua equação [24].

A função transferência do gerador a diesel é dada por:

$$G_{DEG}(s) = \frac{K_{DEG}}{1 + sT_{DEG}} = \frac{\Delta P_{DEG}}{\Delta f} \quad (5)$$

A turbina eólica tem como função transferência:

$$G_{WTGk}(s) = \frac{K_{WTG}}{1 + sT_{WTG}} = \frac{\Delta P_{WTGk}}{\Delta P_W}, k = 1,2,3 \quad (6)$$

Sendo  $K_{WTG}$  o ganho das turbinas eólicas e  $T_{WTG}$  a constante de tempo das turbinas. A variação de potência das turbinas é representada por  $\Delta P_{WTG}$ , e  $\Delta P_W$  a variação de potência extraída do vento [24].

O recurso de armazenamento de energia utilizado neste estudo é o *flywheel*, que tem seu modelo matemático representado por:

$$G_{FESS}(s) = \frac{K_{FESS}}{1 + sT_{FESS}} = \frac{\Delta P_{FESS}}{\Delta f} \quad (7)$$

Onde  $K_{FESS}$  é o ganho do *flywheel*,  $T_{FESS}$  a constante de tempo do *flywheel* e  $\Delta P_{FESS}$  a variação de potência do *flywheel* [24].

#### 4. OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS

Durante alguns anos vários pesquisadores vêm estudando o comportamento social de alguns grupos de animais. Diante disso, o comportamento dos pássaros foi destaque para alguns pesquisadores, entre eles Frank Heppner, que decide modelar tais comportamentos e descrevê-los. Após isso, os pesquisadores James Kennedy e Russel Eberhart em 1995, desenvolveram técnicas de otimização baseada nos comportamentos descritos por Heppner, ficando conhecido como *particle swarm optimization* (otimização por enxame de partículas), com sigla de PSO [17].

O PSO é um tipo de inteligência de enxame baseado em bando de pássaros e também em cardume de peixes, como mostrado nas figuras 7 e 8. Ele se baseia na colaboração dos indivíduos para sua evolução e vem sendo aplicado com bastante êxito em diversas áreas como: Controle de sistemas de lógica Fuzzy, treinamento de redes neurais e áreas de possível aplicação de algoritmos genéticos. É um método de otimização iterativo de funções não lineares contínuas [18].



**Figura 7 - Bando de pássaros**  
**Fonte: [19]**



Figura 8 - Cardume de peixes  
Fonte: [20]

O algoritmo simula basicamente o comportamento de um bando de pássaros diante da procura de alimento no voo. Estes seres procuram por comida aleatoriamente em uma determinada área e nenhum deles sabem onde ela se encontra, portanto reconhecem a distância que estão a cada passo (iteração) de tempo do processo de busca. Sendo assim, a melhor maneira de se aproximarem do alimento é seguir o pássaro que se encontra mais perto [18].

O PSO modela este comportamento utilizando-o na resolução de problemas de otimização. Cada solução representa um pássaro em seu estado de busca, sendo tratado como uma partícula, e a união desta forma o enxame. O ponto ótimo localizado é o ponto da comida, sendo assim, as partículas se movimentam através do espaço atrás de outras que possuem a solução ótima atual [21].

O algoritmo PSO possui algumas vantagens sobre outros métodos: é adaptável a processamento paralelo, exige menor poder de processamento por ser eficiente, possui poucos parâmetros a serem exigidos e possui simples implementação [21].

Para a modelagem matemática do comportamento, os pássaros são tratados como partículas, e o ponto da comida como solução ótima. Cada partícula é decomposta por dois vetores [21]:

- $x(t)$  – Localização da partícula no espaço em função de tempo;

- $v(t)$  - Velocidade instantânea da partícula em função do tempo.

Em busca da melhor posição em relação ao ponto ótimo, as partículas se movimentam a cada iteração alterando seus vetores de localização e velocidade considerando nos passos à frente, a experiência adquirida em iterações passadas. Dentro de uma área de busca de alimento de  $n$  dimensões, os vetores das partículas ficam da forma mostrada nas equações (8) e (9) [15].

$$v_i(t) = [v_{i1}(t), v_{i2}(t), \dots, v_{in}(t)]^T \quad (8)$$

$$X_i(t) = [X_{i1}(t), X_{i2}(t), \dots, X_{in}(t)]^T \quad (9)$$

Sendo que o índice  $i$  representa uma determinada partícula [17].

A figura 9 ilustra os movimentos das partículas ao longo das iterações, variando os dois vetores correspondentes a procura do valor próximo ao ótimo, que são o máximo ou o mínimo local [21].

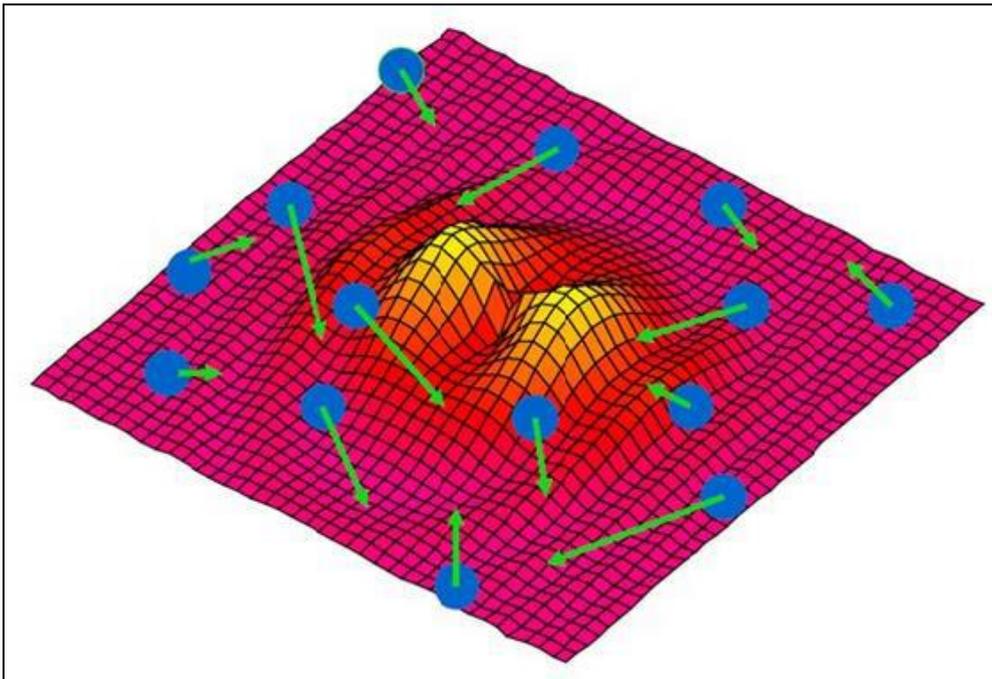


Figura 9 - Movimento de partículas  
Fonte: [21]

O algoritmo é inicializado com um grupo de partículas aleatórias em busca da solução ótima, aproximando-se desta a cada iteração. Em cada passo do programa, é armazenado os melhores resultados, o resultado melhor de cada

partícula (melhor resultado particular), e o melhor resultado de qualquer outra partícula (melhor resultado global), sendo estes[21]:

- $p_{best}$  - *Particular best* (melhor resultado particular);
- $g_{best}$  – *Global best* (melhor resultado global).

Estes resultados são armazenados no algoritmo na forma das equações (10) e (11) [14].

$$p_{best} = [p_{best_{i1}}(t), p_{best_{i1}}(t), \dots, p_{best_{i1}}(t)] \quad (10)$$

$$g_{best} = [g_{best_{i1}}(t), g_{best_{i1}}(t), \dots, g_{best_{i1}}(t)] \quad (11)$$

As equações (12) e (13) ilustra os vetores de velocidade e localização das partículas em cada iteração  $(t + 1)$  em que  $v_{ij}$  e  $X_{ij}$  são elementos  $i$ -ésimos dos vetores para a  $i$ -ésima partícula [21].

$$v_{ij}(t + 1) = W \cdot v_{ij}(t) + c_1 \cdot rand1_{ij} \cdot (p_{best_{ij}}(t) - X_{ij}(t)) + c_2 \cdot rand2_{ij} \cdot (g_{best_{ij}}(t) - X_{ij}(t)) \quad (12)$$

$$X_{ij}(t + 1) = X_{ij}(t) + v_{ij}(t + 1) \quad (13)$$

Onde:

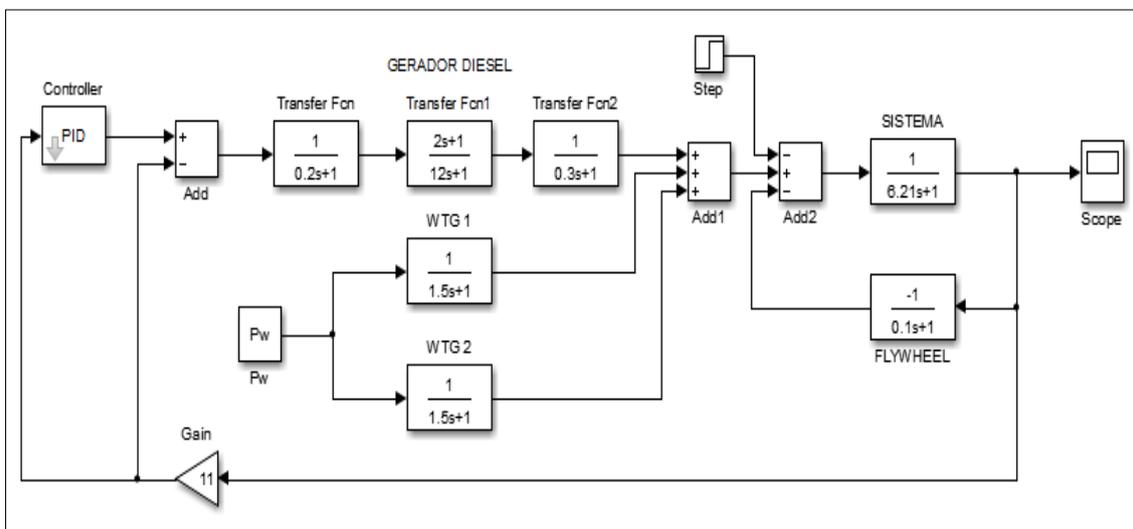
- $j$  - Índice de dimensão;
- $c_1, c_2$  - Fatores de treinamento;
- $t$  - Tempo;
- $W$  - Peso de inércia;
- $rand1, rand2$  - números aleatórios de 0 a 1.

Para inicialização do algoritmo, é necessário inicializar um número  $N$  de partículas, suas dimensões, os fatores  $c_1$  e  $c_2$  e os vetores  $v_{max}$ ,  $v_{min}$ ,  $X_{max}$  e  $X_{min}$ . Os passos de operação do PSO podem ser divididos[21]:

- **1º Passo** – Inicializar os parâmetros do PSO:  $v_{max}$ ,  $v_{min}$ ,  $X_{max}$ ,  $X_{min}$ ,  $N$  e  $W$ . O peso de inércia é fixado em 0,9;
- **2º Passo** - Inicializar as partículas  $v_i(t)$  e  $X_i(t)$  de forma randômica;
- **3º Passo** - Inicializar os vetores  $p_{best}$  de todas as partículas com os valores obtidos dos vetores de posição do 2º Passo;
- **4º Passo** – Determinar  $g_{best}$ ;
- **5º Passo** – Renovar os vetores  $v_i$  e  $X_i$ ;
- **6º Passo** – Atualizar o  $p_{best}$  das partículas;
- **7º Passo** - Analisar  $g_{best}$ . Caso  $g_{best}(t+1)$  for melhor que  $g_{best}(t)$ , então  $g_{best}(t) = g_{best}(t+1)$ ;
- **8º Passo** – O algoritmo se encerra se for atingido um valor máximo local (proximidade ao ótimo), no contrário, retorna o 5º Passo [21].

## 5. RESULTADOS

Os resultados da simulação de sintonia do controlador PID em microrrede baseado no algoritmo PSO são mostrados nesta seção, objetivando diminuir as variações de frequência no sistema quando suposto a variações de carga. A microrrede estudada baseia-se em um conjunto de duas turbinas eólicas interligadas a um gerador a diesel e em um sistema de armazenamento flywheel. Estas simulações foram desenvolvidas no ambiente MatLab/Simulink 2013a, e a composição do sistema é mostrada na Figura 10, onde WTG 1 e WTG 2 representam as turbinas eólicas.



**Figura 10 - Topologia da microrrede estudada**  
**Fonte: Autoria própria**

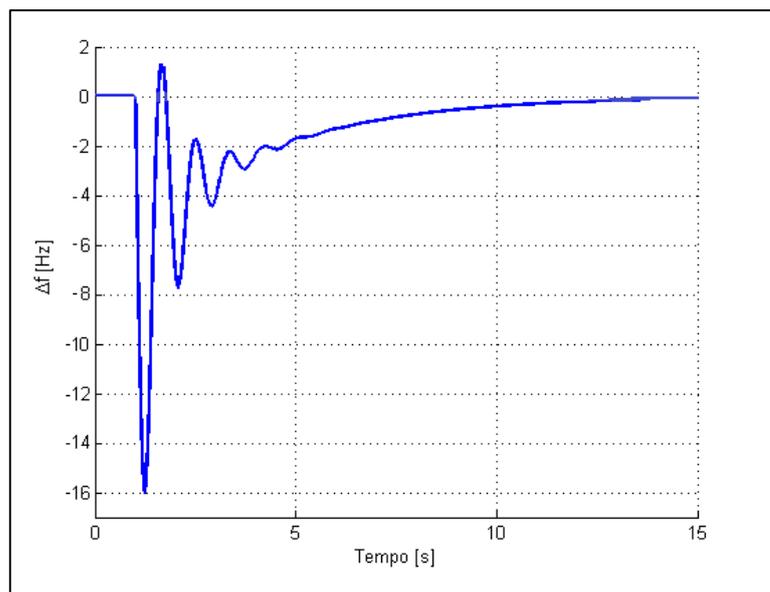
Inicialmente, foi aplicado um degrau de carga no sistema de 10% da capacidade das unidades geradoras, a 1 segundo de simulação. A Tabela 4 mostra os parâmetros do controlador encontrados na primeira simulação que foi sintonizada através do método Ziegler- Nichols, que é um método tradicional para estudo de parâmetros do controlador PID.

**Tabela 4 - Parâmetros PID obtidos por Ziegler-Nichols**

PARÂMETRO	VALOR
$K_p$	4,921
$K_i$	1,998
$K_D$	0,473

**Fonte: Autoria própria**

A partir destes valores de  $K_P$ ,  $K_i$  e  $K_D$ , a resposta de variação de frequência é mostrada na Figura 11, onde mostra que o valor nulo de variação se estabelece em 15 segundos de simulação, relatando que o controlador da planta não consegue fornecer energia para um ponto de consumo com frequência fixa em 60Hz. A frequência do sistema varia de um mínimo de -16Hz em aproximadamente 1,25 segundos após a perturbação, chegando a um máximo de 1,57 Hz em 1,41 segundos, o que não atende aos valores de variação de frequência estabelecidos pela norma brasileira.



**Figura 11 - PID sintonizado por Ziegler-Nichols**  
**Fonte: Autoria própria**

Com o objetivo de reduzir a variação de frequência no sistema, utilizou-se a sintonização do controlador baseada no algoritmo PSO. A Tabela 5 mostra os parâmetros utilizados no algoritmo para simulação. Através de testes empíricos, foi demonstrado que a quantidade do número de partículas  $N$  e o número máximo de iterações estão diretamente ligados à resposta de estabilidade de frequência do sistema.

**Tabela 5 - Parâmetros PSO adotados**

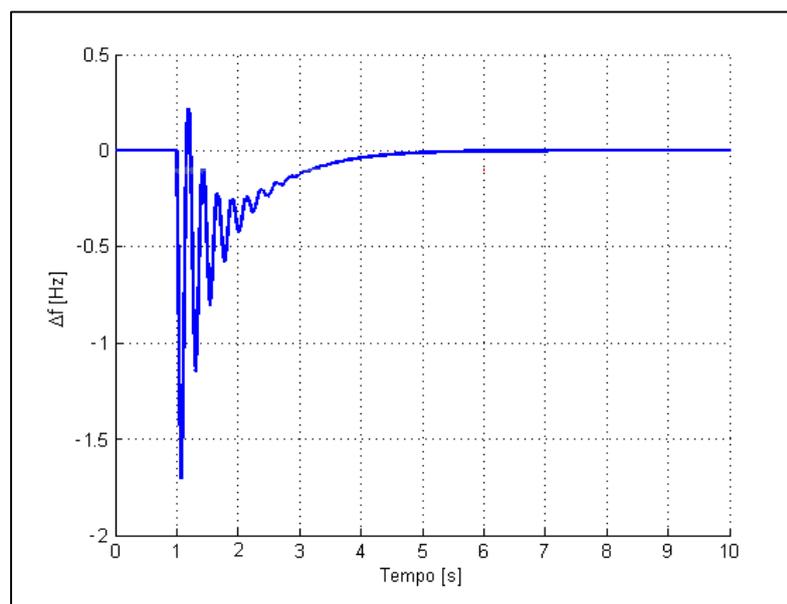
Parâmetro	Valor
<b>N</b> (tamanho do enxame)	50
<b>bird_step</b> (número máximo de iterações)	50
<b>dim</b> (dimensão do problema)	3
<b>c1</b>	0,12
<b>c2</b>	1,2
<b>W</b> (peso de inércia)	0,9

Fonte: Aatoria própria

A partir dos parâmetros do algoritmo mostrados, obtiveram-se os seguintes valores das constantes do controlador

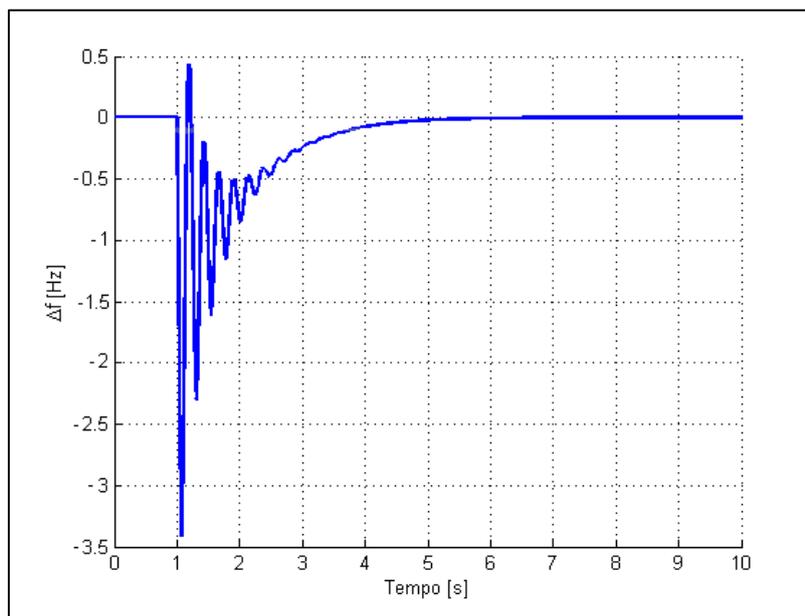
- $K_p = 19,821$
- $K_i = 15,453$
- $K_D = 6,392$

Utilizando os parâmetros do controlador PID otimizados pelo método PSO e aplicando um degrau de carga de módulo igual a 10 % da potência das unidades geradoras em 1 segundo de simulação, observa-se que o sistema responde satisfatoriamente, não ultrapassando o valor mínimo e máximo normativo (-0,5 Hz à +0,5 HZ em 30 segundos) e retornando aos valores de regime permanente em menos de 2 segundos, mostrado na Figura 12.



**Figura 12 - Variação de frequência com degrau de carga de 10% e PID sintonizado através do PSO**  
 Fonte: Aatoria própria

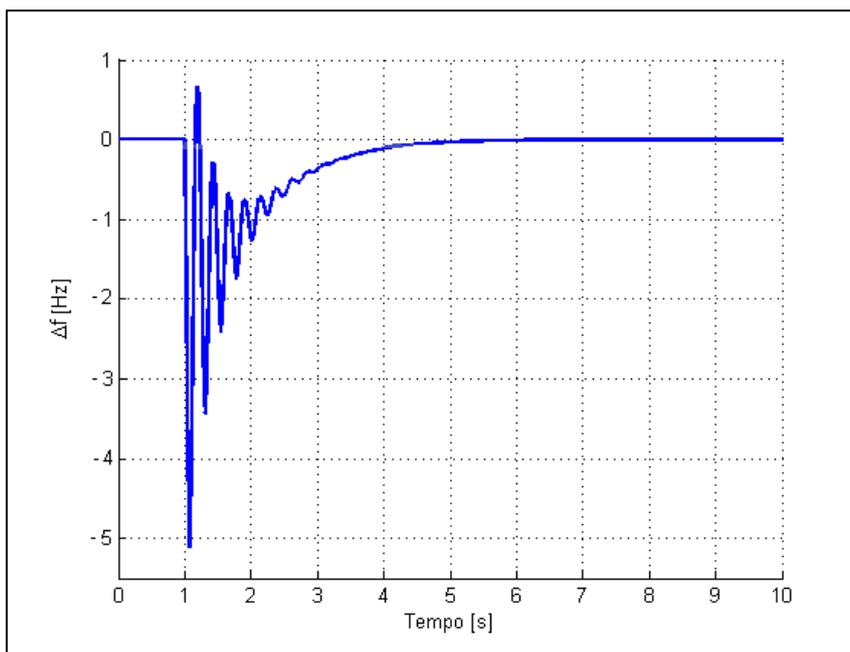
Após observar a variação de freqüência com um degrau de carga de 10%, este valor foi aumentado para 20%, que indica uma perturbação mais severa no sistema. Observa-se na Figura 13, que em aproximadamente 3 segundos de simulação, a variação de freqüência da microrrede já consegue estar dentro da faixa de valores estabelecidos pela norma.



**Figura 13 - Variação de frequência com degrau de carga de 20% e PID sintonizado através do PSO**

**Fonte: Autoria própria**

Por último, foi utilizado um degrau de carga de 40% em 1 segundo de simulação, mostrado na Figura 14. Observa-se que a variação de freqüência extrapolou o valor mínimo estabelecido pela norma (-3,5 Hz). Embora em aproximadamente 3 segundos a variação retorne aos valores de regime permanente, nota-se que esta situação consistiria em riscos de danos aos consumidores. Assim, para o sistema estudado, recomenda-se utilizar degraus de carga máximos de 20% da capacidade das unidades geradoras.



**Figura 14 - Variação de frequência com degrau de carga de 40% e PID sintonizado através do PSO**  
**Fonte: Autoria própria**

## 6. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi proposto a otimização da sintonia de controladores PID utilizando o algoritmo bio-inspirado PSO, com o objetivo de diminuir as variações de frequência em uma microrrede que opera em modo ilhado, com diferentes fontes energéticas. Tais variações se dão por conta de eventos que a rede é sujeita, como aumento e corte de carga.

Os resultados gráficos demonstraram que o algoritmo PSO foi capaz de obter uma sintonia para o controlador melhor do que a obtida pelo método Ziegler-Nichols, ou seja, reduziu os valores de máximos e mínimos no transitório do sistema e o tempo de assentamento da variação.

Embora já fosse esperado que o algoritmo PSO fosse superior ao método Ziegler-Nichols, visto que este último não pretende ser a resposta ótima, mas sim um ponto de partida para a sintonia do controlador PID, a diferença entre os resultados obtidos pelos dois métodos é significativa. Esta diferença mostra a importante relação da sintonia dos controladores com o desempenho final do sistema.

O estudo demonstrou que o algoritmo PSO pode ser empregado em problemas de sintonia de controladores PID para o controle de frequência em microrredes ilhadas com resultados satisfatórios.

Como oportunidade de melhoria para estudos posteriores, surge a ideia de analisar uma microrrede no modo conectado, interagindo com outras microrredes.

## REFERÊNCIAS

- 1 H.Bevrani, F. Habibi, P. Babahajyani, M. Watanabe, and Y. Mitani, **"Intelligent Frequency Control in an AC Microgrid: Online PSO-Based Fuzzy Tuning Approach,"** *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 3, pp. 1935-1944, 2012.
- 2 XAVIER DIAS, Marcos Vinícius. **"Geração Distribuída no Brasil: oportunidades e barreiras."**2005. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.
- 3 ANEEL, **"PRODIST",***Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica - revisão 7*, ed: ANEEL, 2016, 75 p.
- 4 K. Ogata, **"Modern Control Engineering"**, 5ª ed. New Jersey: Prentice Hall, 2010.
- 5 Cadernos Temáticos ANEEL. **"Micro e minigeração distribuída : sistema de compensação de energia elétrica."** Brasília, DF. Agencia Nacional de Energia Elétrica, 2014. 32 p.
- 6 SILVA, João Batista. **"A visão do operador da rede"**. Instituto Nacional de Eficiência Energética (VII Seminário de Geração Distribuída) – ONS, Rio de Janeiro, 2004.
- 7 REIS, Lineu Belico dos. **"Geração de energia elétrica."** 2ed. Barueri,SP:Manole,2011.
- 8 BRITO, Osório de. **"O que é Cogeração."** Instituto Nacional de Eficiência Energética. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em <[http://www.inee.org.br/forum\\_co\\_geracao.asp?Cat=gd](http://www.inee.org.br/forum_co_geracao.asp?Cat=gd)>. Acesso em: 16 abril. 2015.
- 9 FOGAÇA, Jennifer Rocha Vargas. **"Pilha de combustível"**. Mundo educação. Disponível em <<http://www.mundoeducacao.com/quimica/pilha-combustivel.htm>>
- 10 ODDONE, Domingos Carlos. **"COGERAÇÃO: UMA ALTERNATIVA PARA PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE."** 2001. 88 p. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo – Escola Politécnica, São Paulo, 2001.
- 11 POMÍLIO, José Antenor. **"Eletrônica de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica."** 2013. 34 p. Campinas, 2013
- 12 ANEEL, **"Atlas de energia elétrica do Brasil"**. 38 p. Elementos de um aerogerador. 2008.

- 13 BOLAÑOS, Julio Romeu Martinez. “**CONTROLADOR SUPERVISÓRIO INTELIGENTE PARA SISTEMAS HÍBRIDOS EÓLICO – DIESEL – BATERIA DE PEQUENO PORTE.**” 2007. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia e Automação Elétrica) - Universidade de São Paulo – Escola Politécnica, São Paulo, 2007.
- 14 MADUREIRA, André Guimarães. “**Definição de Estratégias de Controle e Avaliação da Estabilidade em Redes de Baixa Tensão com Micro-Geração Funcionando em Rede Isolada.**” 2005. 146 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2005.
- 15 AZEVEDO, Rayann Pablo de Alencar. “**Aplicações didáticas de algoritmos bio-inspirados para o projeto ótimo de filtros analógicos.**” Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação. 8 p. Palmas, 2012.
- 16 GOMES, Sergio Augusto Pereira. “**Comparação entre Métodos de Identificação de Plantas com Respostas ao Degrau Monotonicamente Crescentes e Sintonia de Controladores PID.**” 2008. 85 p. Projeto de Graduação (Graduação de Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- 17 CARACIOLO, Marcel P. “**Introdução à Inteligência de Enxame – Otimização por enxame de partículas**”. Artificial Intelligence in Motion. São Paulo, 2009. Disponível em <<http://aimotion.blogspot.com.br/2009/04/introducao-inteligencia-de-enxame.html>>. Acesso em: 05 maio. 2015.
- 18 AUGUSTUS, Glaucus. “**Inteligência de enxame e o algoritmo das abelhas.**” 2005. 27 p. Monografia (Ciência da Computação) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- 19 MANTE, Maria. “**Lições de Companheirismo**”. 2012. Disponível em <<http://www.materiaincognita.com.br/solidariedade-que-aprendemos-com-voodoo-gansos-selvagens/#axzz3agkW7Bkd>> Acesso em: 17 maio 2015.
- 20 BANFI, Franco. “**Imagens fauna e flora marinha**”. BBC Brasil. 2013. Disponível em <<http://noticias.terra.com.br/ciencia/animais/fauna-e-flora-marinha-revelam-cores-vibrantes-no-fundo-do-mar,d87c2736534af310VgnVCM10000098cceb0aRCRD.html>> Acesso em: 17 maio 2015.
- 21 J. Kennedy and R. Eberhart, “**Particle swarm optimization,**” in *Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on*, 1995, pp. 1942-1948 vol.4.
- 22 PARANÁ. Copel. “**Requisitos técnicos para a conexão de geração em paralelo com o sistema elétrico da Copel.**” Curitiba, 2006. 18 p.

23 PAULILO, Gilson. “**Qualidade de energia**”. MEGABARRE Brasil. 37 p. Itajubá, 2008.

24 LEE, Dong-Jing; WANG, Li. Small-Signal Stability Analysis of an Autonomous Hybrid Renewable Energy Power Generation/Energy Storage 50 System Part I: Time-Domain Simulations. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 23, nº1, p. 311-320, mar. 2008. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4453988>>. Acesso em: 22 abr. 2016.