

UNIVERSIDADE CANDIDO MENDES – UCAM  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PESQUISA OPERACIONAL E  
INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL  
MESTRADO EM PESQUISA OPERACIONAL E INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL

Luciano Resende Dias

MODELO DE SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE CORREÇÃO DE  
FATOR DE POTÊNCIA UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

CAMPOS DOS GOYTACAZES, RJ  
Março de 2015

UNIVERSIDADE CANDIDO MENDES – UCAM  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PESQUISA OPERACIONAL E  
INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL  
MESTRADO EM PESQUISA OPERACIONAL E INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL

Luciano Resende Dias

MODELO DE SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE CORREÇÃO DE  
FATOR DE POTÊNCIA UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em  
Pesquisa Operacional e Inteligência Computacional da  
Universidade Candido Mendes – Campos / RJ, para a  
obtenção do grau de MESTRE EM PESQUISA OPERACIONAL  
E INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL.

Orientador: Prof. Ítalo Oliveira Matias, D.Sc.

Coorientador: Prof. Milton Erthal, D.Sc.

CAMPOS DOS GOYTACAZES, RJ  
Março de 2015

D541m Dias, Luciano Resende.

Modelo de simulação de um sistema de correção de fator de potência utilizando algoritmos genéticos / Luciano Resende Dias. – 2015.  
86f. ; il.

Orientador: Ítalo de Oliveira Matias.

Dissertação de Mestrado em Pesquisa Operacional e Inteligência Computacional – Universidade Candido Mendes – Campos. Campos dos Goytacazes, RJ, 2015.

Bibliografia: f. 78 - 85.

1: Simulação (inteligência computacional). 2. Algoritmo genético. 3. Sintonia de Controladores PID (inteligência computacional).. 4: Compensação de reativos (inteligência computacional). I. Universidade Candido Mendes – Campos. II. Título.

CDU – 004.383.4/421

LUCIANO RESENDE DIAS

## MODELO DE SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Pesquisa Operacional e Inteligência Computacional da Universidade Candido Mendes – Campos / RJ, para a obtenção do grau de MESTRE EM PESQUISA OPERACIONAL E INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL.

Aprovada em \_\_\_\_\_ de março de 2015.

### **BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Ítalo de Oliveira Matias, D.Sc.- Orientador  
Universidade Candido Mendes

---

Prof. Milton Erthal Junior, D. Sc. – Coorientador  
Universidade Candido Mendes

---

Prof. Aldo Shimoya, D. Sc.  
Universidade Candido Mendes

---

Prof. Diego da Silva Sales, D. Sc.  
Instituto Federal Fluminense

CAMPOS DOS GOYTACAZES, RJ.  
2015

Porque Dele, e por Ele, e para Ele, são todas as coisas; glória, pois, a Ele eternamente. Amém.”

Bíblia Sagrada, ACR, Romanos 11:36.

## RESUMO

### MODELO DE SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA UTILIZANDO TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL

As cargas indutivas conectadas à rede elétrica necessitam de energia reativa fornecida, de forma geral, pela fonte de alimentação do circuito em que elas estão instaladas. No entanto, o consumo elevado desta forma de energia traz prejuízos ao sistema como aumento no valor da corrente elétrica que circula pelos equipamentos e redução da eficiência da instalação elétrica, pois, apesar da energia reativa ser necessária para gerar o campo magnético responsável pelo funcionamento de equipamentos constituídos por bobinas, esta forma de energia não é convertida em trabalho útil. Por isso, torna-se necessário utilizar um sistema de compensação de energia reativa que seja capaz de fornecer parte do reativo necessário para a carga. Neste trabalho, foi desenvolvido um modelo computacional utilizando o ambiente *MATLAB® / SIMULINK* para simular a utilização do motor síncrono como compensador de reativos em instalações elétricas com cargas variáveis. O controle do funcionamento da máquina simulada foi realizado através de um controlador PID com dois graus de liberdade, sintonizado por técnicas de Inteligência Computacional. No processo de sintonia do controlador, foram testadas quatro configurações de Algoritmos Genéticos com o objetivo de encontrar um vetor de parâmetros de ajuste que retornasse o menor tempo de resposta do compensador. Após a execução das rodadas de simulação, os resultados obtidos mostraram que o sistema de compensação proposto efetuou a correção do fator de potência obedecendo aos critérios de tempo de acomodação e limite de erro na correção, estabelecidos no início do projeto.

**PALAVRAS-CHAVE:** Compensação de Reativos, Motor Síncrono, Sintonia de Controladores PID, Algoritmos Genéticos, Simulação.

## **ABSTRACT**

### **A SIMULATION MODEL OF A POWER FACTOR CORRECTION SYSTEM USING COMPUTACIONAL INTELLIGENCE TECHNIQUES**

Inductive loads connected to the power grid require reactive power supplied, generally, by power supply of the circuit in which are installed. However, the high consumption of this type of energy causes problems to the system such as an increase in the amount of electric current flowing through the equipment and reduction of efficiency in the electrical installation, despite the reactive power is needed to generate the magnetic field responsible for the operation of equipment consisting of coils, this form of energy is not converted into useful work. Therefore, it becomes necessary to use a reactive power compensation system capable of providing necessary reactive energy for the load. In this work, was developed a computational model using the MATLAB / SIMULINK environment to simulate the use of synchronous motor as reactive compensator in electrical installations with variable loads. The Control of the simulated operation of the machine is performed by a PID controller with two degrees of freedom, tuned by Computational Intelligence techniques. In the tuning process, have been tested four configurations of Genetic Algorithm in order to find a tuning parameter vector to return the lowest compensator response time. After running the simulation rounds, the results showed that the proposed compensation system achieved the power factor correction obeying the settling time criteria and error threshold on the correction, established early in the project.

**KEYWORDS:** Reactive Compensation, Synchronous Motor, tuning PID controllers, Genetic Algorithms, Simulation.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b>	Distribuição de publicações por países	21
<b>Figura 2:</b>	Quantitativo de publicações entre os anos de 1985 e 2014	22
<b>Figura 3:</b>	Distribuição de artigos publicados por país	24
<b>Figura 4:</b>	Distribuição de publicações entre os anos de 1982 e 2014	24
<b>Figura 5:</b>	Gráfico da tensão x tempo em um circuito CC	29
<b>Figura 6:</b>	a) Forma de onda periódica senoidal de tensão, b) corrente elétrica produzida por uma tensão senoidal.	30
<b>Figura 7:</b>	Formas de onda de tensão e corrente em fase em uma carga resistiva	31
<b>Figura 8:</b>	Onda de tensão e corrente defasadas em $90^\circ$ nos circuitos indutivos puros	31
<b>Figura 9:</b>	Onda de corrente adiantada em $90^\circ$ em relação à onda de tensão em circuitos capacitivos puros	32
<b>Figura 10:</b>	a) Triângulo de potências com potência reativa indutiva, b) triângulo de potências com potência reativa capacitiva	33
<b>Figura 11:</b>	a) Banco de capacitores fixo, b) Banco de capacitores automáticos	35
<b>Figura 12:</b>	Exemplo de curva V determinando as regiões de operação para um motor síncrono	37
<b>Figura 13:</b>	Diagrama de blocos de um sistema de controle típico de malha fechada	38
<b>Figura 14:</b>	Pseudocódigo de um programa evolutivo básico	46
<b>Figura 15:</b>	Demonstração da representação binário com um cromossomo de 12 bits	47
<b>Figura 16:</b>	Etapa de cruzamento onde o operador de <i>crossover</i> de um ponto é aplicado para gerar dois filhos	49
<b>Figura 17:</b>	Aplicação do operador de mutação em um indivíduo da população	50
<b>Figura 18:</b>	Fluxograma com as etapas de um AG padrão	51

<b>Figura 19:</b>	a) motor síncrono utilizado nos ensaios em detalhe. b) bancada didática de máquinas elétricas do LABCE, onde pode ser visualizado o painel de controle (I), o motor síncrono (II), o motor assíncrono (III) e o motor de corrente contínua (IV)	53
<b>Figura 20:</b>	(A) Módulo de carga indutiva, (B) Módulo de carga resistiva	53
<b>Figura 21:</b>	Pseudocódigo mostrando a sequência de execução da função <i>fitness_degrau</i>	57
<b>Figura 22:</b>	Pseudocódigo mostrando a sequência de execução da função <i>fitness_rampa</i>	58
<b>Figura 23:</b>	Codificação binária dos indivíduos que representam possíveis soluções par ao problema tratado	58
<b>Figura 24:</b>	Pseudocódigo utilizado no algoritmo empregado neste trabalho	61
<b>Figura 25:</b>	Diagrama de blocos do sistema de compensação de reativos, onde podem ser observados: (I) valor de referência, (II) Controlador proposto, (III) Modelo do motor síncrono, (IV) Cargas que podem ser simuladas e (V) ferramenta de visualização de gráficos do <i>Simulink®</i>	62
<b>Figura 26:</b>	Curva V utilizada para gerar o modelo matemático do motor síncrono utilizado	65
<b>Figura 27:</b>	Evolução dos melhores indivíduos gerados em cada interação do AG utilizando a configuração 1	66
<b>Figura 28:</b>	Evolução dos melhores indivíduos encontrados pelo algoritmo genético com a utilização da configuração 2	67
<b>Figura 29:</b>	Gráfico com a evolução da aptidão dos melhores indivíduos encontrados durante as interações do AG utilizando a configuração 3	68
<b>Figura 30:</b>	Evolução das melhores soluções encontradas durante a execução do AG utilizando a configuração 4	69
<b>Figura 31:</b>	Gráfico da resposta do controlador PID2L a um distúrbio gerado com a mudança no valor do fator de potência da carga	71
<b>Figura 32:</b>	Gráfico onde pode ser visualizada a redução do valor do erro do sistema em relação ao valor de referência escolhido	72
<b>Figura 33:</b>	Gráfico da resposta do controlador aos distúrbios e variações no <i>set-point</i> do sistema	73
<b>Figura 34:</b>	Curva do erro em função do tempo obtida durante o período de simulação do sistema de compensação de reativos	74

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b>	Distribuição dos registros relacionados à pesquisa classificados por tipo	21
<b>Tabela 2:</b>	Distribuição dos registros encontrados	23
<b>Tabela 3:</b>	Configuração do motor síncrono da bancada SD-2100b	52
<b>Tabela 4:</b>	Características elétricas dos módulos de cargas da bancada SD-2100b	54
<b>Tabela 5:</b>	Parâmetros escolhidos para seleção e cruzamento de indivíduos em cada configuração de AG	61
<b>Tabela 6:</b>	Conjunto de valores obtidos após a execução das quatro configurações do AG	70
<b>Tabela 7:</b>	Combinações possíveis que os módulos de carga utilizados na seção 3.1 podem apresentar	86

## LISTA DE SIGLAS

AG: Algoritmo Genético

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

IA: Inteligência Artificial

IC: Inteligência Computacional

LABCE: Laboratório de Conversão de Energia

P: Ação Proporcional

I: Ação Integrativa

IFF: Instituto Federal Fluminense

PI: Ação Proporcional e Integrativa

PD: Ação Proporcional e Derivativa

PID: Ação Proporcional, Integral e Derivativa

PID2L: Controlador PID com dois graus de liberdade

AE: Algoritmo Evolutivo

RNA: Rede Neural Artificial

EP: Enxame de Partículas

Ts\_degrau: função de avaliação das variações da carga no trabalho

Ts\_rampa: função de avaliação das variações de set-point no trabalho

CC: Corrente Contínua

CA: Corrente Alternada

EP: Enxame de Partículas

FP: Fator de Potência

PID1: Controlador Proporcional, Integral e Derivativo com um grau de liberdade

LF: Lógica Fuzzy

CF: Controlador Fuzzy

IBP: Incremental Back Propagation

RBP: Resilient Back Propagation

BBP: Batch Back Propagation

AC: Alternate Current

DTSMC: Discrete Time Sliding Control

SMO: Sliding Mode Observer

BP: Back Propagation

DBD: Delta-bar-Delta

EDBD: Extended Delta-bar-Delta

DRS: Directed Random Search

## SUMÁRIO

<b>1:</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	15
1.1	OBJETIVO	18
<b>1.1.1:</b>	<b>Objetivo Geral</b>	18
<b>1.1.2:</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	18
1.3	JUSTIFICATIVA	19
<b>2:</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	20
2.1:	REVISÃO DE LITERATURA	20
<b>2.1.1:</b>	<b>Análise Bibliométrica</b>	20
2.1.1.1:	Base Scopus	20
2.1.1.2:	Base Engineering Village	22
2.2:	ESTADO DA ARTE	25
2.3:	PRINCÍPIOS DE CORRENTE ALTERNADA	29
<b>2.3.1:</b>	<b>Defasagem em circuitos CA</b>	30
<b>2.3.2:</b>	<b>Potência elétrica em circuitos CA</b>	32
<b>2.3.3:</b>	<b>Correção de fator de potência</b>	33
2.4:	MÁQUINA SÍNCRONA	36
2.5:	CONTROLE AUTOMÁTICO	38
<b>2.5.1:</b>	<b>Ações básicas de controle</b>	39
2.5.1.1:	Ação de controle <i>on-off</i>	39
2.5.1.2:	Ação de controle proporcional (P)	40
2.5.1.3:	Ação de controle integral (I)	41
2.5.1.4:	Ação de controle proporcional e integral (PI)	41
2.5.1.5:	Ação de controle proporcional e derivativa (PD)	41

2.5.1.6:	Ação de controle proporcional, integral e derivativa (PID).	42
2.5.1.6.1:	Controlador PID com dois graus de liberdade PID2L	43
2.6:	INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (IA)	44
2.7:	ALGORITMO GENÉTICO (GA)	45
<b>2.7.1:</b>	<b>Estrutura do algoritmo genético</b>	46
<b>3:</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	52
3.1:	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	52
3.2:	COLETA DE DADOS	54
3.3:	COMPENSADOR DE REATIVOS	55
<b>3.3.1:</b>	<b>Controlador PID2L</b>	55
<b>3.3.2:</b>	<b>Algoritmo genético</b>	58
3.4:	SIMULADOR	62
<b>3.4.1:</b>	<b>Plataforma de simulação</b>	62
<b>4:</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	64
4.1:	RESULTADOS	64
<b>4.1.1:</b>	<b>Resultados do ensaio realizado</b>	64
<b>4.1.2:</b>	<b>Resultados da sintonia do controlador</b>	65
4.1.2.1:	Configuração 1	66
4.1.2.2:	Configuração 2	67
4.1.2.3:	Configuração 3	68
4.1.2.4:	Configuração 4	69
<b>4.1.3:</b>	<b>Resultados da simulação</b>	70
4.2:	DISCUSSÃO	74
<b>5:</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	76
5.1:	CONCLUSÃO	76
5.2:	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77
<b>6:</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	78
	<b>APÊNDICE A: COMBINAÇÕES POSSÍVEIS QUE OS MÓDULOS DE CARGA SÃO UTILIZADOS NA SEÇÃO 3.1 PODEM APRESENTAR.</b>	86

## 1: INTRODUÇÃO

Em um sistema elétrico as cargas conectadas à rede podem ser consideradas resistivas, capacitivas ou indutivas, de acordo com suas características predominantes. Quando são alimentadas por tensão contínua (CC), absorvem da fonte potência ativa. Em sistemas que possuem cargas alimentadas por tensão alternada (CA), além da potência ativa a potência reativa também é absorvida (ROBBINS; MILLER, 2012).

As cargas indutivas e capacitivas alimentadas em CA drenam potência ativa e reativa da rede. A potência ativa é responsável por gerar calor, potência mecânica no eixo de um motor elétrico, luz em uma lâmpada ou outras formas de energia. A potência reativa é utilizada para gerar o campo magnético no caso de elementos indutivos ou para gerar o campo elétrico quando os elementos são capacitivos, mas esta forma de potência não é convertida em calor ou outra forma útil de potência (JOÃO MAMED FILHO, 2007).

A energia reativa demandada pelas cargas reativas (capacitores e indutores) deve ser fornecida por alguma fonte no circuito, no caso a alimentação principal da instalação, que entrega o reativo necessário e também a energia ativa que efetivamente irá executar algum trabalho útil. Um alto consumo de reativos provoca uma redução da eficiência do sistema acarretando multas emitidas pela concessionária de energia elétrica além de outros problemas relacionados aos equipamentos elétricos (COLAK; BAYINDIR; BAY, 2003).

O consumo de energia reativa elevado provoca o super dimensionamento de transformadores, geradores, cabos e outros equipamentos conectados à rede. Quando é efetuado o controle da potência reativa de uma instalação, conseguimos uma redução de consumo de energia elétrica, operação da instalação dentro dos

limites estabelecidos pelas agências reguladoras do setor reduzindo a aplicação de multas por excedente de reativos e aumento da confiabilidade do sistema como um todo (AL-HAMRANI; VON JOUANNE; WALLACE, 2002).

As agências reguladoras do setor estipulam limites de operação que todos os consumidores devem atender em relação ao consumo de energia reativa. No caso de consumidores industriais este consumo torna-se um problema, pois suas cargas, de forma geral, são de natureza indutiva, por exemplo: motores de indução, fornos elétricos, sistemas de iluminação à descarga, dentre outros equipamentos que necessitam de um campo magnético para poderem funcionar. As cargas indutivas drenam da fonte toda potência reativa que elas precisam fazendo com que o dimensionamento de todo o circuito seja feito em função da potência total necessária (ANEEL, 2010).

Cargas capacitivas podem atuar como fornecedores de reativos e quando instaladas próximas de cargas que estão consumindo energia reativa, liberam a fonte desta função e reduzem o esforço mecânico e elétrico dos condutores e outros equipamentos ligados antes destas cargas (JOÃO MAMED FILHO, 2007).

Tradicionalmente a compensação de energia reativa tem sido feita com a instalação de bancos de capacitores fixos ou variáveis em que um dado *set-point* é definido e relés, temporizadores e contatores interligam grupos internos, este tipo de correção é conhecida como método clássico (BAYINDIR et al., 2009). Apesar de serem utilizados amplamente devido à sua facilidade de instalação, custo e simplicidade no projeto, os bancos de capacitores possuem respostas lentas às mudanças de condições da carga, problemas mecânicos, sub ou sobre compensação e inserção de harmônicos na rede elétrica (BAYINDIR; SAGIROGLU; ÇOLAK, 2009).

Além de bancos de capacitores, motores síncronos podem ser utilizados para efetuar a compensação de reativos no sistema elétrico. Estes motores possuem alta eficiência, relativa baixa sensibilidade a variações na tensão da rede e ótimo controle de velocidade, sendo utilizados em várias aplicações como, por exemplo: sistemas de perfuração, ventilação industrial e usinas de energia (BAYINDIR; SAGIROGLU; COLAK, 2009).

Os problemas encontrados quando são utilizados bancos de capacitores podem ser resolvidos com o uso de motores síncronos (SAGIROGLU; COLAK; BAYINDIR, 2006). Estas máquinas operam como cargas resistivas, indutivas ou

capacitivas dependendo da tensão que é aplicada à bobina excitação da máquina. Diferentemente de outras máquinas elétricas rotativas CC ou CA que conseguem colocar seu eixo em rotação a partir de um estado de repouso, o motor síncrono necessita de algum tipo de mecanismo auxiliar para tirá-lo da inércia até atingir o que chamamos velocidade de sincronismo ou velocidade síncrona. Quando a máquina atinge tal velocidade sem carga, ela opera como carga resistiva drenando um determinado valor de corrente da fonte. A partir desta condição, se a corrente de excitação for reduzida o motor passa a região de operação indutiva e se a corrente for aumentada ele opera na região capacitiva podendo ser utilizado para compensação de reativos.

Para que o motor síncrono possa trabalhar como compensador de reativos, é necessário utilizar alguma estratégia de controle do valor da corrente de excitação que flui na máquina. Para instalações elétricas que possuem cargas variáveis controladores com ação proporcional e integral (PI), proporcional – integral – derivativa (PID); controle através de modulação por largura de pulso (PWM); controladores baseados em lógica *fuzzy* e controladores baseados em redes neurais artificiais têm sido utilizados (KAHRAMAN; BAYINDIR; SAGIROGLU, 2012). Independentemente da estratégia de controle utilizada é necessário encontrar uma configuração ideal do controlador para alcançar o melhor desempenho do sistema compensado. Seja esta configuração por meio de sintonia de um controle PID, ajuste das funções de pertinência de um controlador *fuzzy* ou definição de pesos e *bias*<sup>1</sup> de um controlador neural.

Existem processos difíceis de serem representados por um modelo matemático devido à complexidade da malha do processo, não permitindo uma abordagem analítica no projeto de um controle PID e resultando em um custo elevado para se obter um bom ajuste dos parâmetros do controlador. Nesta situação, o uso de técnicas de otimização torna possível encontrar uma boa solução em um tempo viável (HUANG; LAM, 1997). As heurísticas de otimização como algoritmos genéticos (AG), enxame de partículas (EP), redes neurais artificiais (RNAs) são utilizadas na sintonia de controladores PID com o objetivo de encontrar uma solução de boa qualidade dentro de um determinado espaço de busca com um menor custo de obtenção.

---

<sup>1</sup> Valor de ajuste inicial dos neurônios que é utilizado na configuração da rede neural artificial.

No projeto de um sistema de controle a definição do grau de liberdade do controlador é um fator importante, pois a escolha errada poderá trazer um impacto negativo no desempenho do sistema de controle. O grau de liberdade de um sistema de controle representa o número de funções de transferência em malha-fechada que podem ser ajustados de forma independente (ARAKI; TAGUCHI, 2003).

## 1.1: OBJETIVOS

### 1.1.1: Objetivo Geral

Desenvolver um modelo computacional que possibilite simular a operação de um motor síncrono como compensador de energia reativa em instalações que apresentem cargas variáveis, atendendo os requisitos de tempo de resposta e limite de erro estabelecidos no projeto. Em conjunto será utilizada um Algoritmo Genético para sintonizar um controlador com dois graus de liberdade responsável por controlar o funcionamento do motor síncrono.

### 1.1.2: Objetivos Específicos

- 1: Simular em um ambiente computacional o funcionamento da máquina síncrona, estabelecendo a relação entre sua corrente de excitação e o fator de potência.
- 2: Verificar a utilização da máquina síncrona como compensador de energia reativa de uma instalação elétrica.
- 3: Projetar um controlador PID com dois graus de liberdade capaz de reduzir o erro encontrado entre um valor de referência e o fator de potência de uma determinada carga simulada.
- 4: Utilizar técnicas de Inteligência Computacional para definir os melhores ajustes de sintonia do controlador PID proposto.

5: Analisar o desempenho do sistema de correção *off-line* em relação as estratégias empregadas.

6: Verificar se o sistema de compensação proposto consegue atender os requisitos definidos no projeto.

7: Verificar a utilização do modelo computacional do sistema de correção como ferramenta didática para o ensino da disciplina de máquinas elétricas.

## 1.2: JUSTIFICATIVA

A relação entre potência ativa e potência aparente conhecida como fator de potência (FP), define a eficiência da utilização da potência fornecida pela fonte que alimenta o circuito. Se o reativo for elevado a potência aparente será elevada e em consequência o FP será baixo. O excedente de reativos gera multas praticadas pelas concessionárias de energia elétrica, redução da vida útil dos equipamentos, aumento da circulação de corrente nos condutores que alimentam as cargas e ocupação desnecessária do barramento da concessionária.

Neste contexto, faz-se necessário realizar a compensação do nível de reativos para que estes estejam dentro dos padrões estabelecidos. O sistema de compensação utilizado para esta tarefa, deve ser capaz de identificar as mudanças no perfil das cargas instaladas na rede e agir com a melhor performance possível objetivando a elevação do fator de potência e consequentemente provocando um aumento da eficiência energética da instalação.

## 2: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1: REVISÃO DE LITERATURA

#### 2.1.1: Análise Bibliométrica

A seguir é apresentada uma análise dos resultados obtidos após a realização de uma pesquisa sobre correção de fator de potência utilizando o motor síncrono como compensador nas bases (SCOPUS, 2014) e (ENGINEERING VILLAGE, 2014), com último acesso pelo Portal de Periódicos da Capes em outubro de 2014. Estas bases foram escolhidas por sua representatividade e pela possibilidade de acesso via Portal de Periódicos.

##### 2.1.1.1: Base Scopus

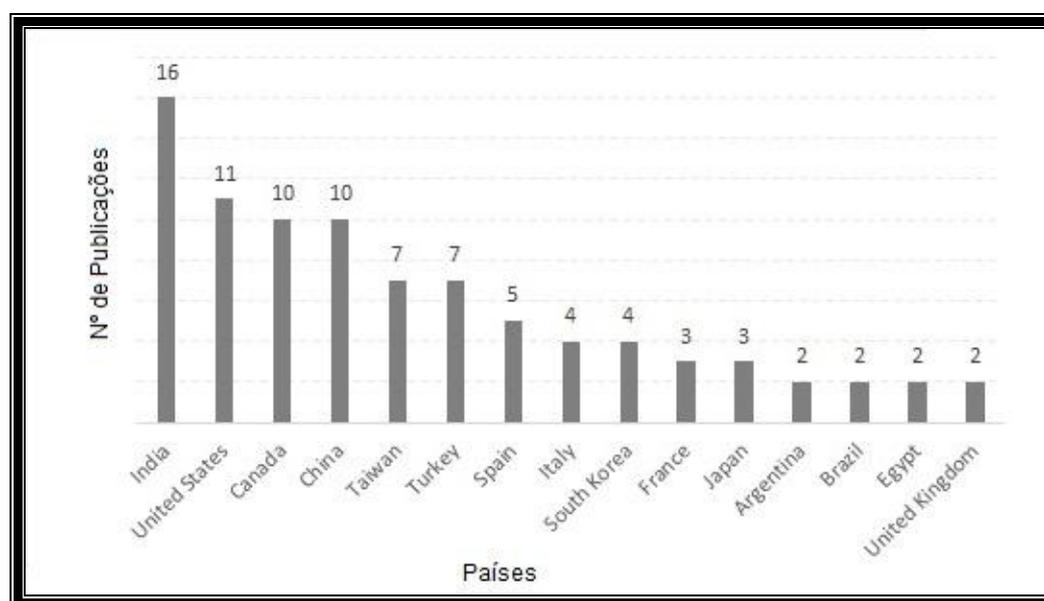
Nesta pesquisa a chave de busca utilizada foi: **(TITLE-ABS-KEY(power factor correction)) AND (synchronous motor)** retornando 297 registros com publicação mais antiga realizada em 1970 por GUPTA SR. com o tema *“Effect of power factor correction on the steady state stability of composite load”*. Este trabalho buscava analisar o efeito da melhoria do fator de potência na estabilidade de sistemas em regime estacionário com cargas compostas por motores assíncronos e síncronos ligadas ao sistema de transmissão. A tabela 1 mostra o resultado de acordo com o tipo de registro encontrado.

**Tabela 1:** Distribuição dos registros relacionados à pesquisa classificados por tipo.

Tipo de registro	Quantidade
Trabalhos em congresso	150
Artigos	116
Revisão de congresso	15
Tipo indefinido	12
Revisões	2
Livros	1
Artigos no prelo	1
<b>Total</b>	<b>297</b>

Fonte: Scopus (2014).

Foi aplicado um filtro na pesquisa para considerar apenas artigos publicados em língua inglesa onde foram encontrados 95 registros. A figura 1 mostra a publicação de trabalhos sobre o tema pesquisado de acordo com os países com maior índice de trabalhos.

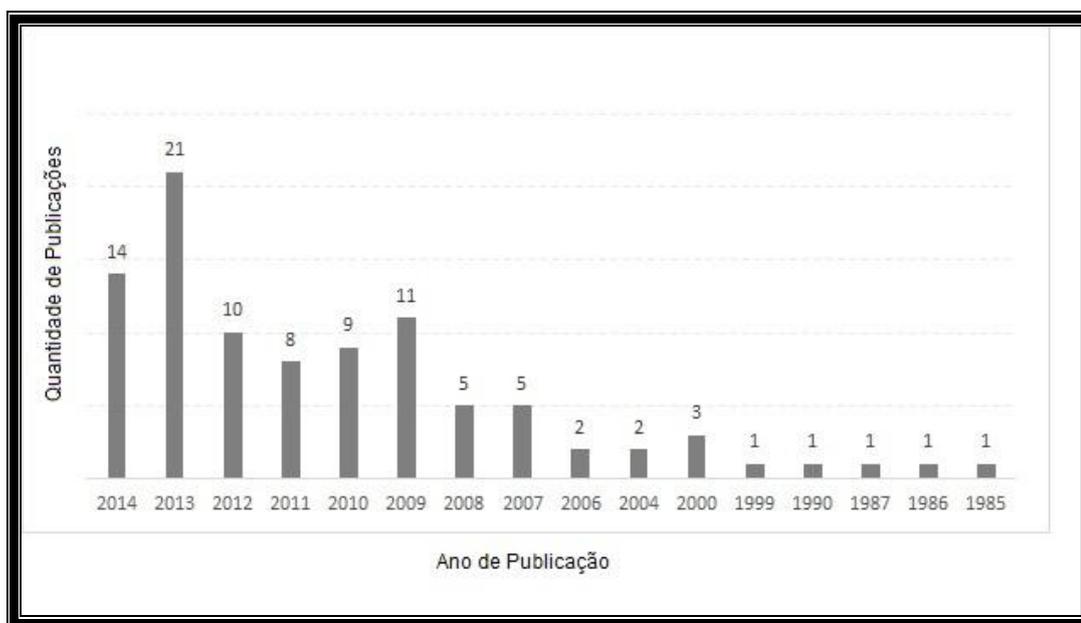
**Figura 1:** Distribuição de publicações por países.

Fonte: Scopus (2014).

Da análise da figura 1, é possível verificar que os países relacionados apresentam um total de 92,6% dos registros encontrados na base. Os asiáticos têm posição de destaque no que diz respeito à pesquisa sobre correção de fator de potência com motores síncronos, juntos possuem em torno de 46,3% do total de

registros encontrados. Outra informação importante, é a quantidade de publicações brasileiras, apenas dois artigos, representando 2,1% dos registros.

Podemos verificar na figura 2, que o ano em que ocorreu um pico de publicações de acordo com a chave de pesquisa utilizada foi 2013.



**Figura 2:** Quantitativo de publicações entre os anos de 1985 e 2014.  
Fonte: Scopus (2014)

É possível observar alguns ciclos de produção sobre o tema pesquisado nos seguintes períodos:

- 2000;
- 2007 – 2009;
- 2012 – 2014.

Depois da definição do tema geral para a busca dos primeiros artigos que deveriam ser observados, foi aplicado o filtro **AND (PID Controller)** na pesquisa, retornando cinco artigos.

#### 2.1.1.2: Base Engineering Village

Para a realização da pesquisa nesta base foi utilizada a mesma chave de busca da base SCOPUS. Nesta base, 167 registros foram encontrados com publicação mais antiga realizada em 1970 por Albrecht K. e Wever KP. com o tema “*Synchronous motor with brushless excitation and reactive power control*”. Este trabalho faz uma abordagem do uso de dispositivos eletrônicos para controle da corrente de excitação com a finalidade de efetuar a correção do fator de potência de um motor síncrono instalado em um sistema de bombeamento.

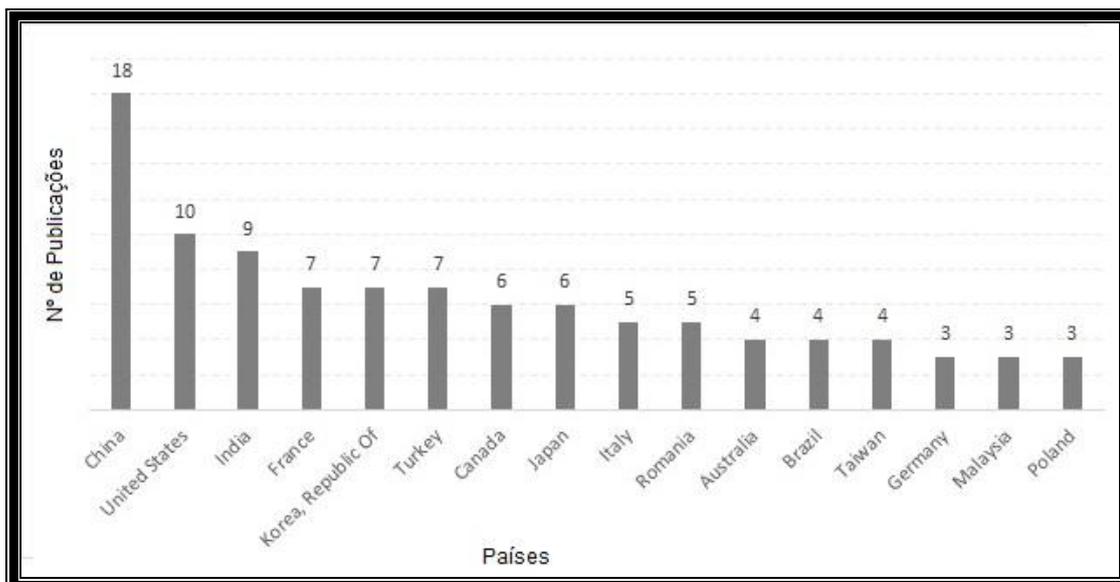
A tabela 2 mostra o resultado de acordo com os registros encontrados nesta base.

**Tabela 2:** Distribuição dos registros encontrados.

<b>Tipo de registro</b>	<b>Quantidade</b>
Trabalhos em congressos	95
Artigos em periódicos	43
Revisão de congresso	17
Outros	12
<b>Total</b>	<b>167</b>

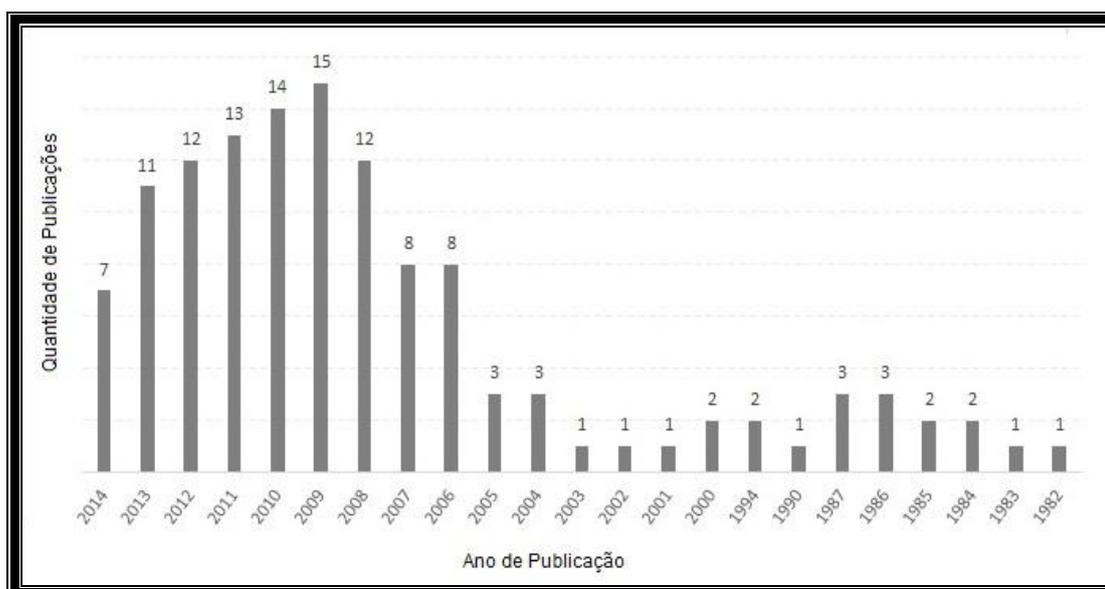
Fonte: Enginnering Village (2014)

Nesta base de dados foi aplicado o mesmo filtro utilizado na base SCOPUS, retornando 126 artigos publicados. O resultado obtido após a aplicação do filtro pode ser observado na figura 3.



**Figura 3:** Distribuição de artigos publicados por país.  
Fonte: Enginnering Village (2014).

Nos países mostrados na figura 3, as publicações de trabalhos sobre o tema pesquisado nesta base representam 80%, os países asiáticos possuem 38% dos registros e as publicações brasileiras representam 3,2% nesta base. A figura 4 mostra o número de publicações por ano.



**Figura 4:** Distribuição de publicações entre os anos de 1982 e 2014.  
Fonte: Enginnering Village (2014).

O ciclo de produção observado após análise do gráfico foi entre 2006 e 2013 com pico de produção em 2009. Seguindo o mesmo procedimento adotado para a base SCOPUS, quatro registros foram retornados na pesquisa.

## 2.2: ESTADO DA ARTE

Através da pesquisa realizada nas bases citadas, uma base de dados de artigos foi montada para formar o referencial deste trabalho. A apresentação dos trabalhos publicados será apresentada do tema mais geral para o mais específico seguindo o critério de proximidade com o tema abordado.

O controle de excitação do campo magnético de motores síncronos influencia diretamente na performance do sistema de correção de reativos em um sistema elétrico, para obter um controle eficiente é necessário que os parâmetros da máquinas sejam ótimos. Esta tarefa, na maioria das aplicações, não é simples de ser realizada pois as características do sistema mudam ao longo do tempo exigindo o melhor no menor tempo possível (BAYINDIR; SAGIROGLU; COLAK, 2009). Para aumentar a performance do controle da máquina, várias estratégias têm sido investigados com o objetivo de aumentar a eficiência do sistema

Sistemas de excitação baseados em redes neurais podem ser utilizados por sua capacidade de identificar padrões do sistema e promover boas soluções em sistemas com comportamento não linear (SESVEREN; BAYINDIR, 2013), em que é desenvolvido um estudo de caso para correção de fator de potência baseado em RNAs. Quatro algoritmos são implementados para acelerar o processo de treinamento da rede, *Incremental Back Propagation (IBP)*, *Resilient Back Propagation (RBP)*, *Batch Back Propagation (BBP)* e *Quick Back Propagation (QBP)*. Uma interface gráfica para efetuar as ações de treinamento da rede com os algoritmos propostos é desenvolvida, com o uso do software é possível verificar a possibilidade de sua aplicação como ferramenta educacional no aprendizado da correção de fator de potência com motores síncronos.

Controladores baseados em lógica *fuzzy* têm sido utilizados para controle de sistemas pela sua facilidade de implementação, não necessitarem de um modelo matemático do sistema controlado e por terem boa resposta em sistemas complexos e não lineares. Colak *et al.* (2003) obteve uma resposta rápida do controlador em

função das mudanças de ajustes requeridas pela carga instalada, além de eliminar efeitos de sub e sobre correção do fator de potência mostrando a aplicabilidade e eficiência do controlador *fuzzy* no controle de máquinas síncronas.

A inserção de harmônicos na rede elétrica, em geral, provoca redução nos sistemas de controle de máquinas AC, Cimini *et al.* (2013) descreve a correção do fator de potência de um conversor de tensão AC-CC para acionamento de um motor síncrono através de um esquema em cascata de controle de velocidade do motor. No trabalho é utilizado o controle da corrente média e da tensão de alimentação em um conversor AC-CC comercial de acionamento de motores utilizando *Discrete Time Sliding Mode Control (DTSMC)* e *Sliding Mode Observer (SMO)*.

A correção do fator de potência é realizada através de um controle vetorial de posição do motor síncrono alimentado por um inversor de dois níveis conectado a um conversor com *Sliding Mode Control (SMC)* (AYDOGMUS; DENIZ; KAYISLI, 2014). O sistema é simulado no *MATLAB® / SIMULINK®*. A análise dos resultados é feita monitorando o fator de potência final do sistema, as formas de onda de alimentação e da corrente de excitação do motor e a distorção harmônica total proporcionada pelo sistema de correção.

O problema de controle do motor síncrono relacionado com componentes que fazem parte de sua alimentação, como conversores AC-CC e CC-CA é tratado em (EL MAGRI *et al.*, 2012). Na estratégia de controle de velocidade do motor o fator de potência da máquina também é considerada a conexão com a rede elétrica e a alimentação do campo de excitação. Para atingir o controle ótimo da máquina a estratégia de controle desenvolvida é baseada no modelo não-linear de todo o sistema conversor-motor, esta estratégia é utilizada pelas incertezas da própria natureza do motor como por exemplo suas características mecânicas.

Algoritmos genéticos têm sido largamente utilizados como ferramenta de otimização em sistemas de controle por Inteligência Computacional, pela facilidade de trabalhar em espaço de busca não linear (EDSON SIMÕES DOS SANTOS, 2013). O trabalho realizado por Kahraman *et al.* (2012) é um exemplo, onde é desenvolvido uma solução para ajuste de pesos dos parâmetros de uma máquina síncrona através de um AG baseado no k-vizinho mais próximo. No trabalho o AG proposto busca os melhores pesos para os parâmetros de ajuste de excitação da máquina apresentando pequenos erros. A corrente, fator de potência, erro e corrente de excitação do motor são dependentes dos pesos atribuídos na otimização.

Uma técnica de controle de excitação do motor síncrono através de RNAs para correção do fator de potência da rede conectada ao motor é desenvolvida em (SAGIROGLU; ÇOLAK; BAYINDIR, 2006). A rede neural implementada é treinada com o algoritmo de treinamento Delta-bar-Delta. Após treinamento, os parâmetros da rede são inseridos em um microcontrolador para correção *on-line*, os resultados obtidos mostraram que problemas como sub e sobre correção e atraso na correção foram eliminados.

Bayindir, R. *et al.* (2009) propõe um método inteligente de correção de fator de potência baseado em RNAs. Quatro algoritmos de treinamento são utilizados, *Back Propagation (BP)*, *Delta-bar-Delta (DBD)*, *Extended Delta-bar-Delta (EDBD)* e *Directed Random Search (DRS)*. Primeiramente, os melhores parâmetros são obtidos dos compensadores neurais treinados com os quatro algoritmos, os parâmetros pertencentes a cada compensador obtido pelo treinamento *off-line* é inserido em um microcontrolador para correção *on-line*. Os compensadores inteligentes mostraram resultados eficientes e de baixo custo de implantação.

Controladores PID possuem estrutura simples, boa estabilidade e alta confiabilidade. Estas características fazem com que estes tipos de controladores sejam amplamente utilizados em sistemas de controle. O ponto chave na utilização do controle PID está em sua sintonia que em sistemas não lineares e variáveis no tempo torna-se difícil utilizando técnicas convencionais (ZHANG *et al.*, 2009).

O controle PID apresenta particularidades relacionadas à sua operação como por exemplo: especificações, estabilidade, projeto, aplicações do controle e performance. O trabalho discute alternativas ao controle PID e tendências de controle (ÅSTRÖM; HÄGGLUND, 2001).

Técnicas de Inteligência Computacional (IC) têm sido largamente utilizadas como ferramentas de otimização de sistemas de controle (HERREROS; BAEYENS; PERÁN, 2002), em que o controle PID é abordado como um problema multi-objetivo que requer especificações que são competitivas entre si. Um controlador bem projetado deve atender a todos os requisitos para um desempenho satisfatório. Neste trabalho é apresentado um AG para realizar a sintonia do controlador proposto.

Um drive de controle de um motor CC é apresentado com uso de exame de partículas para definir os valores de um PID é apresentado em (ALLAOUA; GASBAOUI; MEBARKI, 2009). A modelagem realizada em MATLAB® mostra que o

sistema proposto possui um custo computacional menor, menor erro em regime permanente, melhor tempo de resposta se comparado com um sistema baseado em lógica *fuzzy*.

Aspectos de sistemas *fuzzy* com dois graus de liberdade com foco em controladores PI-*fuzzy* e PID-*fuzzy* são apresentados em (PREITL et al., 2010). A metodologia de sintonia é baseada no mapeamento dos parâmetros de controladores PI e PID lineares e passados para controladores *fuzzy*.

O grau de liberdade de um sistema de controle é definido como sendo o número de funções de transferência de malha fechada que podem ser ajustadas de forma independente (ARAKI; TAGUCHI, 2003). Quando um controlador PID com um grau de liberdade (PID1L) consegue otimizar a resposta a um distúrbio que ocorre no sistema a resposta ao *set-point* é prejudicada, e vice-versa. Com a utilização de um controlador com dois graus de liberdade (PID2L) esta situação é eliminada, pois neste tipo de controlador é possível obter uma resposta ótima para os distúrbios do sistemas e para o *set-point*.

Um modelo de referência para o projeto de um controlador PID com dois graus de liberdade robusto é apresentado em (ALFARO; VILANOVA, 2013). O trabalho trata do projeto para processos instáveis baseado em procedimentos de otimização em servo controles e controles regulatórios em funções de transferências de malha fechada. As equações de sintonia são apresentadas para sistemas instáveis de primeira ordem, parâmetros de ajuste para um controlador PID convencional também é apresentado.

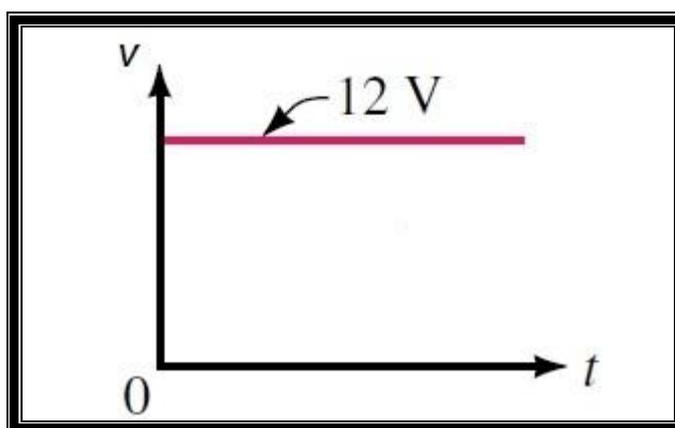
Um algoritmo de controle de um motor síncrono através de um PID2L é proposto em (SHU-QIU et al., 2007) com o objetivo de eliminar as limitações de controle que existem quando um PID1L é utilizado. O controlador proposto consegue ter um ponto de equilíbrio entre resposta a distúrbios do sistema e resposta ao *set-point*.

Em Bayindir *et al.* (2009), um controle PID para um motor síncrono operando em várias situações de trabalho e com diferentes correntes de excitação é apresentado. Em função da complexidade dos parâmetros integrativos e derivativos do controlador, a definição da parte integral do controle é realizada registrando os erros em um período de tempo especificado no projeto e multiplicados por uma média de amostragem de tempo. A parte derivativa do controle é obtida através da diferença entre erro atual e erro anterior e dividida pela amostragem de tempo. Esta

estratégia de definição dos ajustes reduziu o custo computacional do microcontrolador utilizado além de diminuir a complexidade do código.

### 2.3: PRINCÍPIOS DE CORRENTE ALTERNADA

Um circuito elétrico pode ser classificado quanto à natureza da tensão de alimentação em circuito de corrente contínua (circuito CC) ou circuito de corrente alternada (circuito CA). Em circuitos CC, a fonte de alimentação possui polaridade fixa, magnitude de tensão fornecida constante e produz correntes elétricas constantes e sem mudança na sua direção (ROBBINS; MILLER, 2012). Como é mostrado na figura 5.

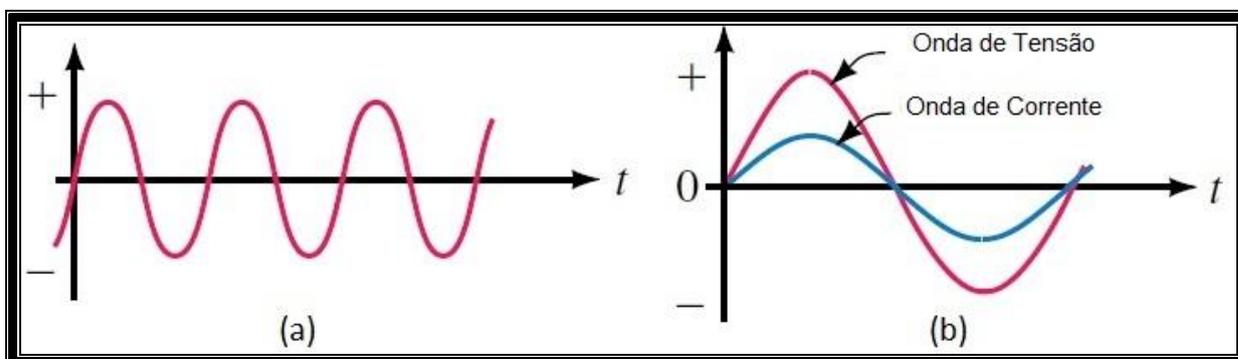


**Figura 5:** Gráfico da tensão x tempo em um circuito de CC.  
Fonte: Adaptado de Robbins e Miller (2012).

Em fontes de alimentação CA, como aquela que é encontrada nas tomadas residenciais, redes de distribuição pública de energia e linhas de transmissão. A tensão elétrica parte de zero, atinge o valor máximo positivo de tensão, decresce até zero, inverte sua polaridade, atinge um valor máximo negativo e retorna ao zero novamente (MARKUS, 2011). Uma sequência completa como descrita acima é chamada de ciclo e a forma de onda resultante é chamada de onda periódica senoidal, pois repete este padrão em intervalos regulares obedecendo a uma função seno.

A corrente elétrica produzida por uma fonte CA flui em um sentido quando a fonte assume valores positivos e quando ocorre a mudança na polarização da fonte,

a corrente elétrica flui no sentido oposto (ROBBINS; MILLER, 2012). A figura 6a mostra a forma de onda de um sinal de tensão senoidal e em 6b são mostrados as formas de onda de corrente e de tensão presentes em nossas residências.



**Figura 6:** a) Forma de onda periódica senoidal de tensão b) Corrente elétrica produzida por uma tensão senoidal

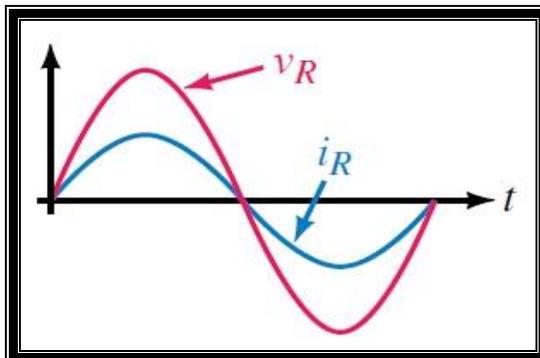
Fonte: Adaptado de Robbins e Miller (2012).

### 2.3.1: Defasagem em Circuitos CA

Defasagem é a diferença no deslocamento de fase entre duas ondas com mesma frequência. Nos circuitos elétricos CA, dependendo do tipo de carga, a onda da corrente pode estar em fase (não existe defasagem), adiantada (defasagem de  $+90^\circ$ ) ou atrasada (defasagem de  $-90^\circ$ ) em relação à tensão elétrica (MARKUS, 2011). O valor da defasagem será determinado pela natureza da carga instalada no circuito, sendo a situação ideal o caso onde não existe defasagem. As cargas elétricas existentes em um circuito podem ser divididas em três categorias de acordo com suas características elétricas predominantes. Estas cargas podem ser resistivas, indutivas ou capacitivas, cargas resistivas opõem-se à passagem da corrente elétrica, cargas indutivas promovem uma oposição as variações da corrente e cargas capacitivas opõem-se as variações ocorridas na tensão elétrica em seus terminais (FILHO, 2008).

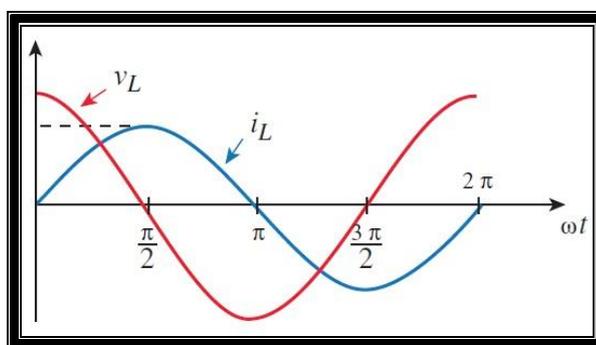
Nos circuitos elétricos formados apenas por cargas resistivas, a corrente elétrica segue as variações ocorridas na tensão, isto é, se a tensão atinge o máximo em um dado instante a corrente também atinge seu valor máximo no mesmo momento e muda seu sentido quando a tensão muda de polaridade (MARKUS, 2011). Por este comportamento em circuitos CA podemos dizer que a corrente está

em fase com a tensão, esta relação entre as duas grandezas pode ser verificada na figura 7.



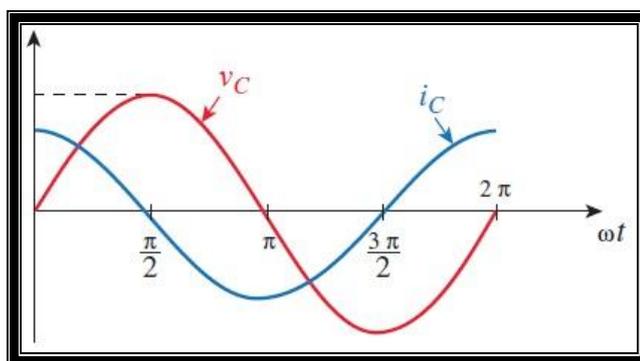
**Figura 7:** Formas de onda de tensão e corrente em fase em uma carga resistiva. Onde  $v_R$  representa a tensão no resistor e  $i_R$  representa a corrente no resistor.  
Fonte: Adaptado de Robbins e Miller (2012).

As cargas indutivas são aquelas compostas por componentes que necessitam de um campo magnético para seu funcionamento, estas cargas têm como característica a oposição as variações ocorridas na corrente elétrica que percorre seus terminais. Nos circuitos compostos apenas por elementos indutivos, quando uma tensão elétrica é aplicada em seus terminais a corrente elétrica não acompanha as variações da tensão no mesmo instante como ocorre com as cargas resistivas. Devido às características elétricas da carga a corrente sempre fica atrasada  $90^\circ$  em relação à tensão. A figura 8 mostra as formas de onda para a tensão e para a corrente nos circuitos indutivos.



**Figura 8:** Formas de onda de tensão e corrente defasadas em  $90^\circ$  nos circuitos indutivos puros. Onde  $v_L$  representa a onda da tensão no indutor e  $i_L$  representa a corrente no indutor.  
Fonte: Adaptado de Robbins e Miller (2012).

Cargas capacitivas são aquelas compostas por componentes elétricos que necessitam de um campo elétrico para seu funcionamento, as cargas capacitivas oferecem oposição as variações de tensão em seus terminais. Quando um circuito elétrico apresenta apenas componentes capacitivos a tensão não acompanha as variações ocorridas na corrente elétrica. Em função de suas características elétricas, nestas cargas a corrente sempre está adiantada  $90^\circ$  em relação à tensão nos seus terminais. Esta relação entre as duas ondas pode ser visualizada na figura 9.



**Figura 9:** Onda corrente adiantada em  $90^\circ$  em relação à onda de tensão em circuitos capacitivos puros. Onde  $V_C$  representa a onda de tensão no capacitor e  $i_C$  representa a onda de corrente no capacitor.

**Fonte:** Adaptado de Robbins e Miller (2012).

### 2.3.2: Potência Elétrica em Circuitos CA

A potência elétrica pode ser definida como a taxa de transformação de energia elétrica em uma forma qualquer de energia ou de outra forma de energia em energia elétrica (ROBBINS; MILLER, 2013). Em circuitos CC, a única relação de potência encontrada definida como produto da tensão pela corrente elétrica é chamada de potência real ou ativa. Esta potência é responsável pela realização de trabalho como, por exemplo: o brilho de uma lâmpada, a rotação do eixo de um motor elétrico, o aquecimento de um elemento resistivo etc.

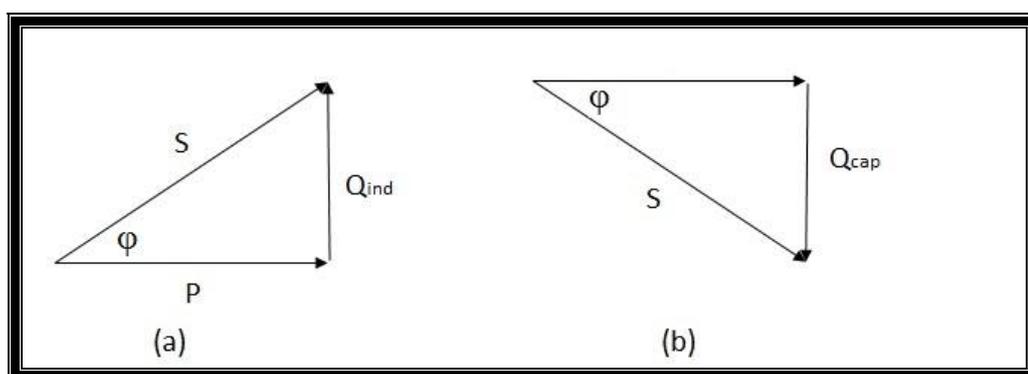
Nos circuitos CA que apresentam configurações de cargas reativas como indutores e capacitores, além desta forma de potência que efetivamente executa trabalho, outro tipo de potência elétrica também é encontrada chamada de potência reativa. Esta potência representa um fluxo de energia em um dado momento da fonte para a carga estabelecendo campo magnético ou campo elétrico e em outro

instante da carga para a fonte não contribuindo para o fluxo médio de potência no circuito (OTÁVIO MARKUS, 2001).

Embora a potência reativa não contribua para a potência média na carga, ela provoca um aumento na corrente do circuito. Esta corrente deve ser fornecida pela fonte do circuito fazendo com que todos os componentes da instalação sejam fisicamente capazes de suportar esse adicional de corrente (JOÃO MAMED FILHO, 2007).

### 2.3.3: Correção de Fator de Potência

As instalações elétricas, de modo geral, são constituídas por cargas resistivas e reativas indutivas que desenvolvem potências ativa e reativa, respectivamente. A combinação destas duas formas de potência é chamada de potência aparente e representa a potência total que a fonte deve fornecer ao circuito (MARKUS, 2011). É possível representar as três formas de potência presentes em um circuito elétrico através do triângulo de potências, a figura 10a mostra o triângulo para uma carga indutiva e a figura 10b para uma capacitiva.



**Figura 10:** a) triângulo de potências com potência reativa indutiva, b) triângulo de potências com potência reativa capacitiva.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2014)

Onde:

- **S:** representa a potência aparente do circuito em VA (Volt-Ampere);
- **P:** representa a potência ativa ou real do circuito em W (Watt);

- **Qind:** representa a potência reativa indutiva do circuito em VAR (Volt-Ampere-Reativo);
- **Qcap:** representa a potência reativa capacitiva do circuito em VAR (Volt-Ampere-Reativo);
- **Φ:** representa o ângulo de defasagem entre tensão e corrente no circuito.

Através do triângulo de potências é possível perceber que cargas indutivas e capacitivas possuem vetores de potência reativa com sentidos opostos e quanto maior for o valor da potência reativa no circuito, maior será o valor de potência aparente e conseqüentemente maior será o ângulo de defasagem entre tensão e corrente no circuito. Um dado importante que representa o percentual da potência total (S) fornecida pela fonte que efetivamente é convertido em trabalho útil através da potência ativa (P) é chamado de Fator de Potência (FP) ou *coseno φ* e pode ser representado matematicamente pela equação (1).

$$\cos \varphi = \frac{P(\text{potência ativa})}{S(\text{potência aparente})} \quad (1)$$

Segundo Colak *et al.* (2003), devido ao consumo elevado de energia reativa os equipamentos utilizados na instalação como cabos, relés, transformadores e disjuntores trabalham em regime de sobrecarga e por isso, precisam ser fisicamente resistentes à corrente excedente causando redução na eficiência do sistema elevação do custo de manutenção e operação.

Para aumentar a eficiência da instalação e diminuir os custos é necessário reduzir a quantidade de energia reativa que a fonte deve fornecer ao circuito. Para tal, são instalados equipamentos na entrada de alimentação principal do circuito ou em local próximo à carga, capazes de fornecer essa energia para os equipamentos que necessitam (MANEDE FILHO, 2008).

Este sistema de fornecimento auxiliar de energia reativa para as cargas é chamado de sistema de correção de fator de potência ou sistema de compensação de reativos e pode através do ajuste de parâmetros dos equipamentos instalados, manter o fator de potência do sistema em um determinado valor (COLAK; BAYINDIR; BAY, 2003).

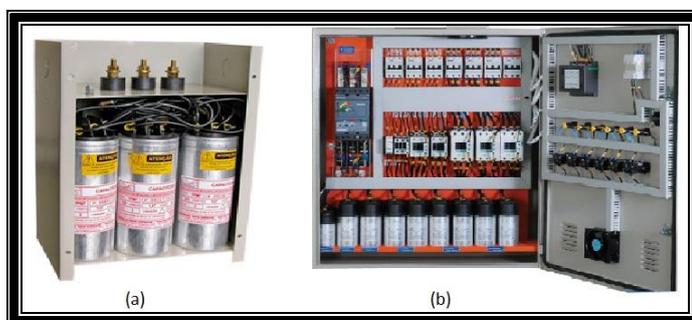
Quando a correção de fator de potência é realizada, os seguintes benefícios podem ser obtidos (BAYINDIR et al., 2009):

- Aumento na capacidade do sistema;
- Redução de perdas elétricas;
- Redução dos custos da potência reativa;
- Redução da corrente elétrica da instalação;
- Maior estabilidade do sistema;
- Redução da queda de tensão na rede.

Um sistema de correção de fator de potência pode ser constituído de (COLAK; BAYINDIR; SEFA, 2004):

- Bancos de capacitores fixos ou automáticos;
- Motores síncronos trabalhando em regime de sobre excitação.

Um banco de capacitores fixo é composto de um ou mais elementos que não podem ter seu valor alterado durante o funcionamento do circuito. Os bancos automáticos são compostos por vários elementos em que um valor de fator de potência é definido como padrão e seus elementos são chaveados por contatores ou dispositivos eletrônicos semicondutores, com a finalidade de manter o valor da energia reativa dentro do padrão estipulado (MAMEDE FILHO, 2007). A figura 11 mostra um exemplo de banco de capacitores fixo e automático.



**Figura 11:** a) Banco de capacitores fixo, b) Banco de capacitores automático.

**Fonte:** Capacitores TLA (2014).

Capacitores são sensíveis as influências de problemas relacionados à qualidade de energia elétrica no sistema, além de possuírem um tempo de resposta lento na correção, são sujeitos a subcorreção e sobre correção em função de seu chaveamento.

Motores síncronos têm sido usados para compensar potência reativa, se este estiver trabalhando em regime de super excitação de seu campo magnético, com a vantagem de possuir boa estabilidade e não injetar poluição na rede elétrica (SAGIROGLU; ÇOLAK; BAYINDIR, 2006). Se a carga instalada no sistema for constante seu circuito de excitação pode ser conectado a uma fonte CC constante, caso o sistema possuir perfil de cargas que sofrem variação ao longo do tempo de funcionamento do circuito uma fonte CC variável pode ser utilizada para adequar o funcionamento da máquina às necessidades do sistema.

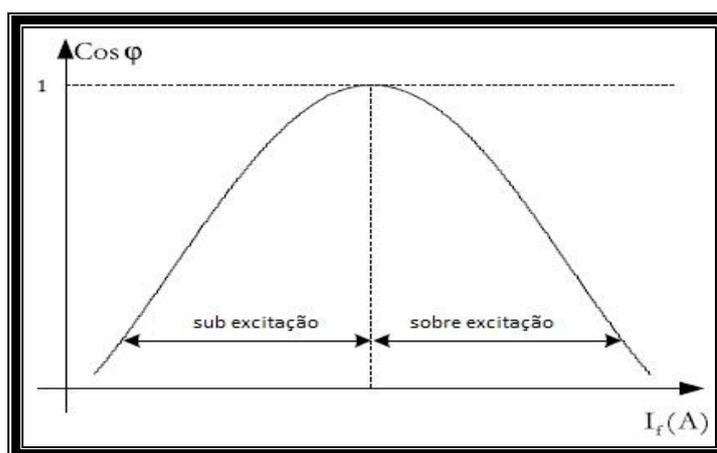
## 2.4: MÁQUINA SÍNCRONA

Uma máquina elétrica é um equipamento que realiza a conversão de energia mecânica em elétrica, e vice-versa (KOSOW, 1985). Esta conversão surge como resultado das alterações no fluxo magnético da máquina decorrentes do movimento mecânico dando origem a tensões induzidas nas bobinas da máquina. Em máquinas rotativas como o motor, tensões variáveis no tempo são geradas nas bobinas da máquina quando os campos magnéticos giram mecanicamente ao redor das bobinas ou quando as bobinas giram dentro de um campo magnético (FITZGERALD et al., 2004). No motor existe um conjunto de bobinas chamado de enrolamento de armadura que conduz corrente alternada, este enrolamento é responsável pela alimentação trifásica do motor que resultará no movimento de seu eixo. Além do enrolamento de armadura, motores síncronos apresentam um segundo enrolamento conhecido como enrolamento de campo que é percorrido por corrente contínua, este enrolamento é responsável pela determinação da região de operação do motor podendo ser com excitação normal, sub-excitação ou sobre excitação (KAHRAMAN; BAYINDIR; SAGIROGLU, 2012).

Quando motor trabalha com velocidade síncrona é possível modificar seu fator de potência através do ajuste da corrente de excitação em seu enrolamento de campo (BAYINDIR et al., 2009). Em condição de excitação normal, o motor possui

um determinado valor de corrente de excitação de campo e opera com fator de potência unitário solicitando da fonte apenas potência ativa para compensar suas perdas mecânicas.

Se a corrente de campo for maior que o valor de corrente para excitação normal, o motor passa a operar sobre excitado fornecendo potência reativa ao circuito com fator de potência adiantado entre zero e um. Caso a corrente de campo passe para um valor menor do que a corrente de excitação normal, o motor solicita potência reativa da fonte e opera na região de sub-excitação e com fator de potência atrasado entre zero e um (KAHRAMAN; BAYINDIR; SAGIROGLU, 2012). Uma forma de visualização da relação entre fator de potência e corrente de campo para uma dada potência de carga em uma máquina síncrona é a curva V do motor. A figura 12 mostra um exemplo de curva V para um motor síncrono qualquer.



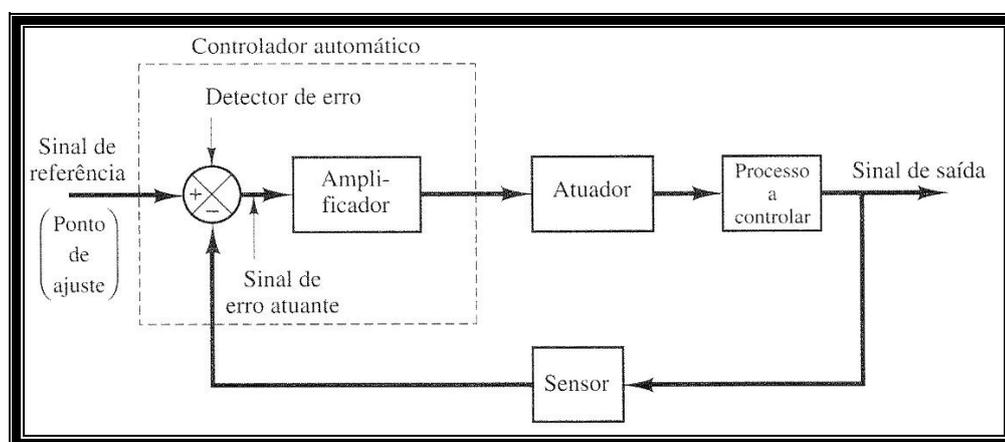
**Figura 12:** Exemplo de curva “V” determinando as regiões de operação para um motor síncrono.  
**Fonte:** Adaptado de Colak et al. (2003).

O controle da corrente de campo necessária para colocar a máquina em uma das três condições de operação pode ser feito manualmente proporcionando uma alimentação CC fixa ou variável dependendo do tipo de carga alimentada. No controle manual a corrente pode ser ajustada por um reostato ligado em série com o enrolamento de campo do motor. Neste caso, alguns problemas surgem devido ao uso do reostato como, por exemplo: atraso no tempo de resposta do sistema de correção, correção acima ou abaixo do necessário e aparecimento de arcos voltaicos nos terminais do reostato (SAGIROGLU; ÇOLAK; BAYINDIR, 2006).

Para eliminar estes problemas, técnicas de controle automático podem ser utilizadas como controle PID em Bayindir *et al.* (2009), lógica *fuzzy* (LF) em Colak *et al.* (2003) e em Colak *et al.* (2004), controle utilizando redes neurais artificiais (RNAs) (BAYINDIR; SAGIROGLU; COLAK, 2009); (SAGIROGLU; ÇOLAK; BAYINDIR, 2006), controle adaptativo (KUMAR; GAUR; MITTAL, 2014); (GARCÍA; SUEMITSU; PINTO, 2011) e através de algoritmos genéticos (AG) (KAHRAMAN; BAYINDIR; SAGIROGLU, 2012).

## 2.5: CONTROLE AUTOMÁTICO

Um sistema de controle é composto de subsistemas que devem proporcionar uma saída esperada em função de uma determinada entrada especificada em projeto (NISE; DA SILVA, 2009). Este sistema de controle deve exercer sua ação de controle com um desempenho aceitável. O sistema de controle deve comparar o valor desejado (*set-point*) com o sinal de realimentação do processo e gerar uma correção do erro encontrado objetivando eliminá-lo ou reduzi-lo a um valor aceitável dentro das definições do projeto (OGATA, 1998). O sinal de realimentação ou retroação pode ser o sinal de saída que é enviado ao sistema de controle através de um sensor ou uma função deste sinal. A figura 13 mostra a configuração básica de um sistema de controle automático de um sistema onde o sinal de saída é enviado ao controlador formando uma realimentação, este tipo de controle é geralmente chamado de sistema de controle de malha fechada.



**Figura 13:** Diagrama de blocos de um sistema de controle típico de malha fechada.  
Fonte: Ogata (1998).

No diagrama de blocos da figura 13 o controlador calcula o erro do sistema e envia este sinal atuante para um elemento atuador que é o responsável direto pela ação sobre o processo, de acordo com o sinal de controle, com a finalidade de reduzir o erro até que a saída seja igual ao sinal de referência. O sensor atua como um transdutor que converte o sinal da variável de processo para um sinal com uma variável compatível ao sistema de controle utilizado.

### 2.5.1: Ações Básicas de Controle

Um controlador automático age sobre um processo reduzindo o desvio entre o sinal de referência e o sinal de saída. A maneira pela qual o controlador gera o sinal de controle sobre o processo é chamada de ação de controle (NISE; DA SILVA, 2009). Os controladores podem ser definidos, de acordo com suas ações básicas de controle, como:

- Controladores de ação *on-off*;
- Controladores proporcionais;
- Controladores do tipo integral;
- Controladores do tipo proporcional e integral;
- Controladores do tipo proporcional e derivativo;
- Controladores do tipo proporcional, integral e derivativo.

#### 2.5.1.1: Ação de Controle *On-Off*

No controle *on-off* o sistema trabalha em apenas duas posições definidas, geralmente ligado ou desligado. Este tipo de controle apresenta simplicidade de aplicação e custo reduzido de implantação, sendo muito utilizado em sistemas industriais e em sistemas domésticos (OGATA, 2011). A equação (2) pode ser utilizada para representar o sinal de saída de um controlador *on-off* de acordo com o erro medido do sistema.

$$u(t) = \begin{cases} U_1, & \text{para } e(t) > 0 \\ U_2, & \text{para } e(t) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Em que:

- $u(t)$ : Representa o sinal de saída do controlador;
- $e(t)$ : Representa o sinal de erro atuante do sistema;
- $U_1$  e  $U_2$ : São valores constantes, sendo  $U_1$  o valor máximo e  $U_2$  o valor mínimo que em muitos casos é zero.

### 2.5.1.2: Ação de Controle Proporcional (P)

Um controlador com ação proporcional age como um amplificador do sinal de erro do sistema com ganho definido por um fator denominado ganho proporcional  $K_p$  (DORF; BISHOP, 1998). A equação (3) relaciona o sinal de saída do controlador com o sinal de erro atuante do sistema.

$$u(t) = K_p \times e(t) \quad (3)$$

Em que:

- $u(t)$ : Representa o sinal de saída do controlador;
- $e(t)$ : Representa o sinal de erro do sistema;
- $K_p$ : É o fator de ganho proporcional do controlador.

### 2.5.1.3: Ação de controle integral (I)

No controle de ação integral o valor da saída do controlador é variado de acordo com uma taxa proporcional ao sinal de erro. A ação integrativa é conhecida como controle de restabelecimento ou *reset* (BAYINDIR et al., 2009). A relação entre sinal de controle e erro atuante pode ser verificada na equação (4).

$$u(t) = K_i \times \int_0^T e(t) dt \quad (4)$$

Em que:

- $K_i$ : É uma constante ajustável.

#### 2.5.1.4: Ação de controle proporcional e integral (PI)

Quando o controlador possui apenas a ação proporcional o sistema apresenta um erro residual, com a adição da ação integrativa no controlador este erro pode ser eliminado. No controle integral a área abaixo da curva do sinal de erro, em um instante qualquer, define o sinal de saída do controlador até aquele instante específico (NISE; DA SILVA, 2009). Este tipo de ação de controle é matematicamente definido por:

$$u(t) = K_p \times e(t) + \frac{K_p}{T_i} \times \int_0^t e(t) dt \quad (5)$$

Na equação (5) representa o ganho proporcional e  $T_i$  é chamado tempo integral. A parte integrativa do controlador é ajustada pelo tempo integral e também depende do ganho proporcional, a parte proporcional do controle somente é afetada pelo ajuste do ganho proporcional do controlador. Neste controlador o inverso do tempo integral define quantas vezes por minuto o ganho proporcional é duplicado e aplicado na parte integrativa (OGATA, 2011).

#### 2.5.1.5: Ação de Controle Proporcional e Derivativo (PD)

A equação (6) pode ser utilizada para definir matematicamente a ação de controle PD:

$$u(t) = K_p \times e(t) + K_p \times T_d \times \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

Na equação (6)  $T_d$  representa o tempo derivativo e  $K_p$  o ganho proporcional do controlador. Neste tipo de controlador o valor do sinal de saída é proporcional à

taxa de variação do sinal de erro do sistema. O tempo derivativo representa o tempo de avanço que a ação derivada do erro provoca no controle proporcional dando um caráter antecipatório no controle derivativo (DORF; BISHOP, 1998). Devido sua resposta ser em função da taxa de variação do erro atuante, a ação derivativa aumenta a sensibilidade do controlador, pois ela pode gerar uma correção antes que erro atinja um valor significativo dando mais estabilidade ao sistema. Embora a ação derivativa apresente a vantagem de antecipar a correção do erro, ela também amplifica sinais de ruído e pode levar o sistema à saturação gerando resultados não satisfatórios no controle do processo.

#### 2.5.1.6: Ação de Controle Proporcional, Integral e Derivativa (PID)

O controle PID combina as três ações de controle citadas anteriormente. Esta ação de controle apresenta as vantagens das ações proporcional, integral e derivativa e pode ser representada pela equação (7):

$$u(t) = K_p \times e(t) + \frac{K_p}{T_i} \times \int_0^T e(t) dt + K_p \times T_d \times \frac{de(t)}{dt} \quad (7)$$

Os controladores PID ainda são o principal componente em sistemas de controle industrial devido à sua estrutura simples, facilidade de entendimento de seu funcionamento e desempenho robusto para uma grande faixa de aplicações (DOS SANTOS COELHO, 2009). Este tipo de controlador apresenta a característica de eliminar o erro em regime permanente através de sua ação integrativa e pode antecipar o futuro por causa da ação derivativa (HERREROS; BAEYENS; PERÁN, 2002). O desempenho de um PID é fortemente impactado pelo ajuste de seus parâmetros (ganho proporcional  $K_p$ , tempo integrativo  $T_i$  e tempo derivativo  $T_d$ ), as particularidades do sistema a ser controlado como não-linearidades e tempo de atraso podem resultar em um processo de sintonia mais complexo, nestes casos o uso de técnicas de otimização como algoritmos genéticos, redes neurais artificiais e uso de lógica *fuzzy* é possível desenvolver controladores inteligentes (ZHANG et al., 2009). O controle PID é amplamente utilizado em vários segmentos da indústria em

função de sua boa resposta, mas para que o desempenho do controlador seja satisfatório seus parâmetros devem ser sintonizados corretamente, caso contrário a performance do controlador pode ser reduzida, ou o sistema entrar em uma condição de instabilidade (PEREIRA; PINTO, 2005). a sintonia de um controlador PID por ser encarada como um problema multiobjetivo. Geralmente, as especificações do processo são competitivas entre si e uma solução viável deve realizar uma troca entre elas (HERREROS; BAEYENS; PERÁN, 2002).

#### 2.5.1.6.1: Controlador PID com Dois Graus de Liberdade (PID2L)

O grau de liberdade de um sistema de controle é definido como o número de funções de transferência de malha fechada que podem ser ajustadas de forma independente no processo (ARAKI; TAGUCHI, 2003). Nos processos em que a variável de controle ou o *set-point* permanecem constantes, uma boa rejeição a distúrbios (controle regulatório) deve ser obtida. Mas existem processos em que o *set-point* precisa sofrer alterações em função das variações do processo, neste caso é necessário uma boa resposta transiente (servo controle) (ALFARO; VILANOVA, 2013).

No presente trabalho o controle de excitação do motor síncrono se encaixa no segundo caso por ser um problema multiobjetivo e no que se refere à característica de não-linearidade da máquina, tornando inapropriado o uso de técnicas de controle linear para atingir uma alta performance (KUMAR; GAUR; MITTAL, 2014). A adição de parâmetros para sintonia em consequência do uso de um controlador PID2L requer métodos de sintonia adequados para atender as necessidades do processo (ALFARO; VILANOVA; ARRIETA, 2008). Na literatura vários métodos de sintonia de controladores PID2L são utilizados como o método baseado na sintonia analítica para um controlador em cascata realizada em Alfaro *et al.* (2008); a otimização através de enxame de partículas (EP) para sintonia de um controlador *fuzzy* (CF) com dois graus de liberdade em Bingül e Karahan (2011); em Kim (2002) a sintonia do controlador com dois graus de liberdade é realizada utilizando uma simulação do sistema imunológico do ser humano e em Kim (2004) é realizada a sintonia de um controlador de um processo de geração de energia em uma usina nuclear através de uma rede neural.

## 2.6: INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (IA)

A expressão inteligência artificial está associada, geralmente, ao desenvolvimento de sistemas especialistas. Tais sistemas são desenvolvidos com a finalidade de simular o conhecimento do ser humano sobre determinado problema, mas esta tarefa torna-se complexa quando há a necessidade de simular a experiência humana e representá-la em programas que possam ser rodados em um ambiente computacional (MENDES, 1997).

De acordo com Sanvito (1995), o comportamento inteligente é aprender lidar com o mundo, é desenvolver habilidades para encontrar soluções de problemas, é a capacidade de lidar com novidades. Alguns afirmam que a máquina pode pensar devido aos avanços tecnológicos recentes, portanto ela possui um comportamento inteligente. Esta afirmação surgiu como uma pergunta feita por Turing (1950), onde foi desenvolvido um teste para obter uma resposta para a pergunta: “máquinas podem pensar?”. Neste teste duas pessoas A e B e um computador C são colocados em locais distintos e interligados por um terminal para manter um diálogo entre eles. Diz-se que a máquina passou pelo teste Turing se A não conseguir identificar, com no mínimo 50% de precisão, qual dos outros dois é o outro ser humano. Nesta situação a máquina é considerada inteligente se ela conseguir imitar comportamentos humanos de forma convincente (SANVITO, 1995).

Luger (2005) diz que a IA pode ser definida como um ramo da ciência da computação que se dedica ao estudo dos mecanismos fundamentais do comportamento inteligente. Como ramo da ciência da computação, deve ser baseada na aplicação de princípios como a utilização de estruturas de dados, algoritmos, linguagens e técnicas de programação para representação do conhecimento. Um sistema que usa IA pode ser descrito como um agente baseado em conhecimento que consegue perceber o ambiente em que está inserido, seja ele físico ou não, tira conclusões, resolve problemas, determina ações e age neste ambiente com o objetivo de realizar as tarefas para que foi designado (TECUCI, 2012).

Conferir inteligência a um sistema computacional não é uma tarefa fácil de ser realizada. Acredita-se que um caminho para a inteligência artificial é através do paradigma que os seres humanos devem escrever apenas regras para o sistema se adapte à situação, comportamentos complexos irão surgir de aplicações paralelas e

interações com estas regras. Um exemplo desta filosofia são os Programas Evolutivos (PE) (MITCHELL; TAYLOR, 1999).

## 2.7: ALGORITMO GENÉTICO (AG)

Segundo Nascimento Júnior (2004) *apud* Santos (2013), otimização é um mecanismo para determinação de uma ação que proporciona um máximo de benefício, medido por um critério de desempenho que deve ser minimizado caso represente um custo, ou maximizado, caso represente um retorno.

Segundo Arroyo (2002), os métodos heurísticos são procedimentos para construção de uma solução inicial, ótima ou não, a partir de uma ou mais regras específicas de um dado problema de otimização. Os resultados obtidos através da aplicação de métodos heurísticos servem de ponto de partida para rotinas direcionadas a um ponto ótimo (SANTOS, 2013). Surge no contexto de estudo destas técnicas o interesse no uso do conceito de evolução biológica para resolução de problemas computacionais complexos. Pode-se entender evolução como um processo de busca que realiza uma varredura, em um conjunto de possibilidades, por sequencias de genes que possibilitem os organismos sobreviverem e reproduzirem em um determinado ambiente. Neste processo evolutivo as espécies realizam mutações e cruzamentos seguido por um processo de seleção onde os mais aptos sobrevivem e geram filhos propagando seu material genético para gerações futuras (MITCHELL; TAYLOR, 1999).

Segundo Michalewics (1996), algoritmos que imitam o processo básico de evolução natural para solução de problemas de otimização de parâmetros pertencem à classe de sistemas conhecida como Programação Evolutiva. Onde o sistema mantém uma população contendo um conjunto de possíveis soluções para o problema, possui um processo de seleção baseado na aptidão dos indivíduos e alguns operadores genéticos. Um programa evolutivo é um algoritmo probabilístico que para uma interação  $t$  qualquer existe uma população onde cada indivíduo representa uma possível solução para um determinado problema. Cada solução é avaliada para medir sua aptidão (*fitness*) segundo uma função de custo ou de retorno dependendo do problema tratado. Enquanto um critério de para não for satisfeito, uma nova interação ocorre no algoritmo gerando uma nova população

baseada no processo de seleção dos indivíduos mais aptos (etapa de seleção). Alguns indivíduos da nova população sofrem transformações (etapa de alteração) gerando, após a aplicação dos operadores genéticos, um novo conjunto de soluções para o problema tratado. Após algumas interações o programa converge, isto é, o algoritmo retorna a melhor solução encontrada. A figura 14 mostra o algoritmo básico de um programa evolutivo.

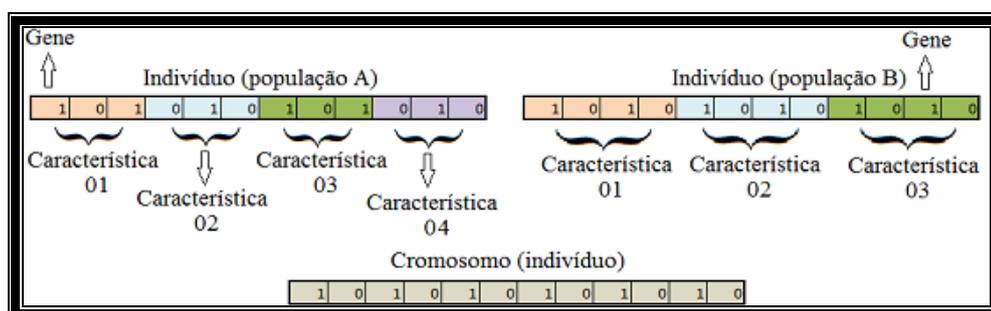
```
Pseudo-código programa evolutivo  
  
inicio algoritmo  
  t := 0  
  inicializa população P(t)  
  avalia P(t)  
  
  enquanto( critério de parada não for atendido) faça  
    t := t + 1  
    seleciona indivíduo de P(t)  
    altera indivíduo P(t)  
    avalia P(t)  
  fim enquanto  
fim algoritmo
```

**Figura 14:** Pseudo-código de um programa evolutivo básico.  
Fonte: Adaptado de Michalewics (1996).

Segundo Mitchell e Taylor (1999), a forma mais utilizada de programa evolucionário são os algoritmos genéticos (AG's). Os AGs são uma técnica de busca e otimização paralela inspirada no princípio postulado por Darwin de seleção natural (PACHECO, 1999). No processo de otimização é realizada uma busca em um determinado espaço de soluções com a finalidade de encontrar a melhor solução possível para um problema. Em problemas onde este espaço de busca é relativamente pequeno métodos exaustivos são suficientes, no entanto, para grandes espaços de busca técnicas de IA devem ser utilizadas. Dentre estas técnicas estão os AGs. Segundo Linden (2008), AG's são uma técnica de busca extremamente eficiente que varre o espaço de soluções com o objetivo de encontrar soluções próximas da ótima, quase sem interferência humana.

### 2.7.1: Estrutura Do Algoritmo Genético

Os Algoritmos Genéticos em sua forma mais simples possuem uma população, gerada de forma aleatória, de soluções candidatas para um dado problema (MITCHELL; TAYLOR, 1999). Cada solução, chamada de indivíduo ou cromossomo, é codificada de acordo com um determinado esquema de representação, esta representação pode ser uma sequência binária onde cada bit representa um gene no cromossomo, ou o cromossomo pode ser representado diretamente como um vetor de valores reais. A escolha da forma de representação do cromossomo é um ponto importante do AG, pois cada cromossomo carrega as características do problema que será otimizado. A representação deve ser escolhida para se adaptar de forma mais natural possível ao problema em questão e não o problema que deve ser adaptado à uma forma específica de representação (MICHALEWICS, 1996). A figura 15 mostra a utilização da representação binária em um AG, onde conjuntos de bits representam as características da solução de um determinado problema.



**Figura 15:** Demonstração da representação binária com um cromossomo de 12 bits.  
**Fonte:** Adaptado de Santos (2013).

Na figura 15, os indivíduos das duas populações possuem 12 bits, na população A representam quatro características diferentes e na população B representam três características diferentes. A definição do número de bits necessários para representação do cromossomo irá depender do problema tratado, da precisão adotada e de outras particularidades do modelo (SANTOS, 2013).

Em um AG, uma função de custo é necessária para mensurar a aptidão de cada cromossomo em relação ao problema a ser otimizado. Esta função de aptidão verifica a qualidade do indivíduo como candidato a possível solução do problema (MITCHELL; TAYLOR, 1999). Segundo Michalewics (1996), após a avaliação da

aptidão de cada indivíduo da população um método de seleção é aplicado no AG para escolher os candidatos mais aptos que irão transmitir suas características para a próxima população. O método de seleção pela roleta e método de seleção por torneio são duas estratégias de seleção geralmente utilizadas em experimentos com algoritmos genéticos.

O método de seleção da roleta está baseado no percentual de contribuição que a aptidão de cada indivíduo tem na avaliação total da população em uma dada geração do algoritmo. Neste método, os indivíduos com maior avaliação têm maior chance de sobreviver e transmitir suas características para a população seguinte (MICHALEWICS, 1996). No entanto, este método favorece o surgimento de um super indivíduo, pois em cada interação do algoritmo as soluções com baixa aptidão têm pouca chance de serem escolhidas para aplicação dos operadores genéticos. Isto pode causar a estagnação do algoritmo, pois mesmo estes indivíduos com baixa aptidão podem possuir características interessantes que poderiam ser aproveitadas com os operadores de *crossover* e mutação levando o AG para espaços de busca ainda não explorados (LINDEN, 2008).

No método de seleção por torneio um número de indivíduos, escolhidos aleatoriamente, participam de uma rodada de seleção, sairá vencedor da rodada aquele que possuir maior aptidão dentre os participantes do torneio. Este método reduz a ocorrência de um super indivíduo e ajuda a manter a diversidade durante a execução do AG, porém, se o número de participantes do torneio for muito elevado, o algoritmo poderá escolher sempre os mesmos indivíduos perdendo diversidade (LINDEN, 2008).

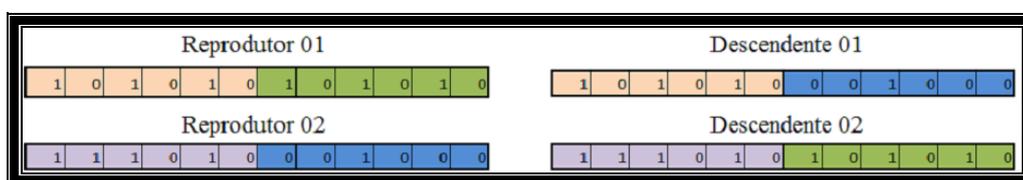
Após a etapa de seleção os indivíduos escolhidos são submetidos aos operadores genéticos como operador de *crossover* e de mutação onde um ou mais genes serão mudados conforme descrito a seguir:

**1: Operador de Crossover:** este operador realiza a combinação de dois cromossomos (chamados de pais) para produzir um novo cromossomo (filho) que irá carregar as características de cada pai. O *crossover* pode ser de um ponto, dois pontos ou por uma operação uniforme. De forma geral, o operador de *crossover* recebe um valor de probabilidade de *crossover* fixo definido pelo desenvolvedor que é comparado com um número aleatório gerado para cada cromossomo da população. Se este número aleatório for maior do que a probabilidade de aplicação

de *crossover* estabelecida o cromossomo é selecionado para a aplicação do *crossover* (ZHANG et al., 2009) e (MICHALEWICS, 1996).

**2: Operador de mutação:** é um operador genético que altera o valor de um gene no cromossomo. Este operador pode gerar um indivíduo completamente diferente na população podendo levar o AG a explorar espaços de busca ainda não visitados (ZHANG et al., 2009). O operador de mutação é aplicado na população de acordo com uma probabilidade de mutação, fixa ou variável ao longo da execução do AG, esta taxa deve ser escolhida de forma coerente pois valores altos podem transformar o AG em um método de busca completamente aleatório perdendo suas características exploratórias dos espaços de busca Linden (2008).

A figura 16 mostra a etapa de cruzamento de um AG onde dois pais são selecionados para aplicação do operador de *crossover* de um ponto. O ponto de corte pode ser escolhido aleatoriamente ou através de algum critério específico.

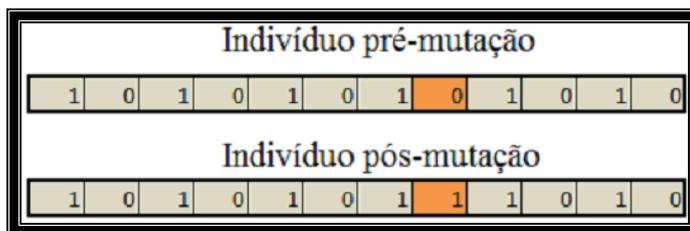


**Figura 16:** Etapa de cruzamento onde o operador de *crossover* de um ponto é aplicado para gerar dois filhos.

**Fonte:** Adaptado de Santos (2013).

Na figura 16, o descendente 01 recebe os genes à direita do ponto de corte escolhidos vindos do segundo pai e os genes à esquerda do ponto de corte vindos do primeiro pai. O descendente 02 recebe os genes em ordem contrária do descendente 01.

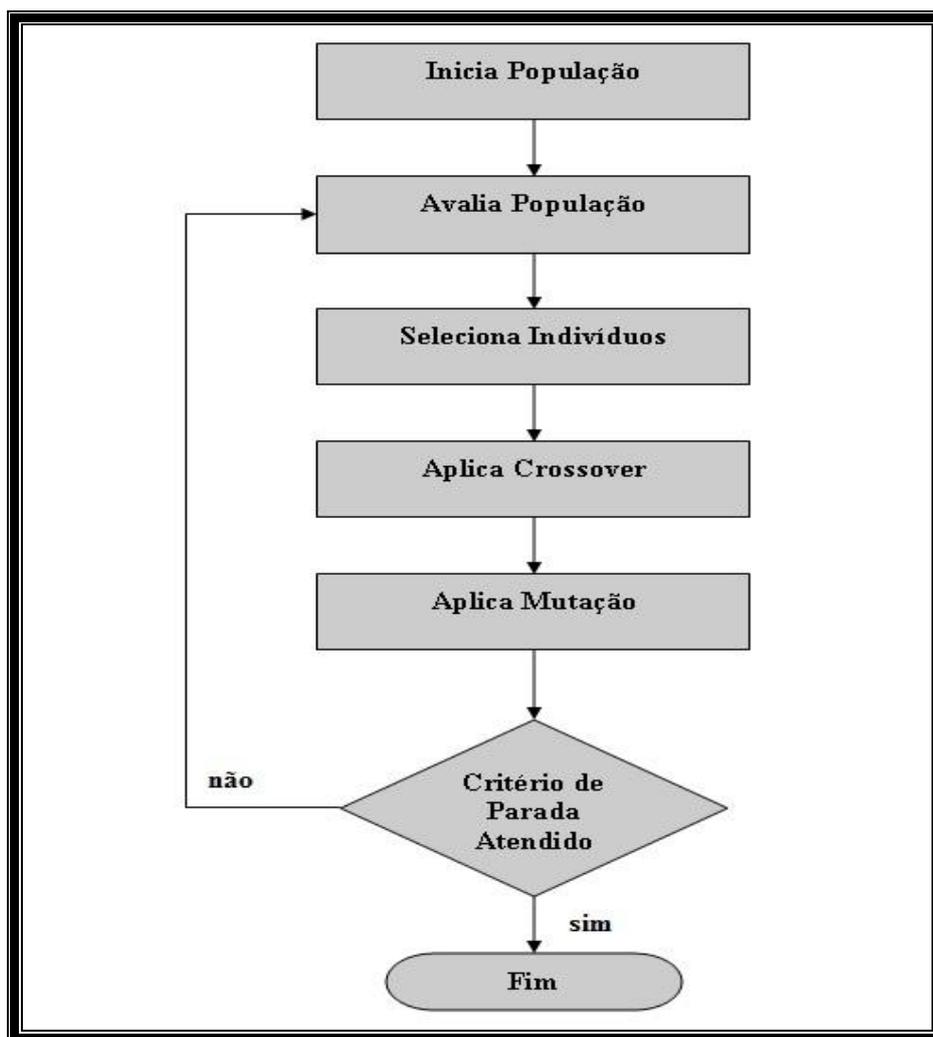
A figura 17 mostra a aplicação do operador de mutação em um cromossomo.



**Figura 17:** Aplicação do operador de mutação em um indivíduo da população.  
**Fonte:** Adaptado de Santos (2013).

Na figura 17, o operador de mutação altera o valor gene selecionado, mudando de 0 para 1 ou vice-versa. Este operador ajuda o AG explorar novos espaços de busca e, se escolhido de forma correta, contribui para o algoritmo não fique preso num ótimo local (LINDEN, 2008).

Após a etapa de mutação a população corrente é atualizada e avaliada novamente. Em seguida, se o critério de parada estabelecido no projeto não for atendido uma nova interação (geração) ocorre e os passos citados anteriormente são executados. A figura 18 mostra um fluxograma descrevendo as etapas básicas de um AG padrão proposto por (MICHALEWICS, 1996).



**Figura 18:** Fluxograma com as etapas de um AG padrão.  
Fonte: Elaborado pelo autor (2014)..

Uma outra etapa que pode ser adicionada ao algoritmo padrão do AG é a etapa de elitismo. O elitismo faz com que o AG guarde um número específico das melhores soluções da interação corrente e transfira estes indivíduos para a próxima geração. Esta técnica faz com que a melhor solução encontrada na próxima geração seja, no pior caso, pelo menos igual a melhor solução da geração atual (LINDEN, 2008).

### 3 : MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1: EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Este estudo foi conduzido no Laboratório de Conversão de Energia (LABCE) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense (IFF) *campus* Campos-Guarus. Os ensaios de partida da máquina e obtenção de curva V foram realizados com uma máquina síncrona marca Lavig, de 1800 rpm, tensão de excitação 12Vcc e corrente de excitação de 1,7A (Tabela 3). Os ensaios com a máquina síncrona foram realizados com o objetivo de criar um banco de dados que foi utilizado para montar o modelo de simulação do controlador proposto. A máquina usada (Figura 19) faz parte do kit didático de máquinas elétricas rotativas do LABCE, Minipa modelo SD-2100b para ensaios com máquinas elétricas rotativas (Figura 20).

**Tabela 3:** Configuração do motor síncrono da bancada SD-2100b.

Frequência de Operação (Hz)	Potência (KVA)	RPM	Número de Pólos	Tensão (Vac)	Tensão de Excitação (Vcc)	Corrente de Excitação (Acc)
60	1	1800	4	220 / 380	12	1,7

**Fonte:** Elaborado pelo Autor (2014).

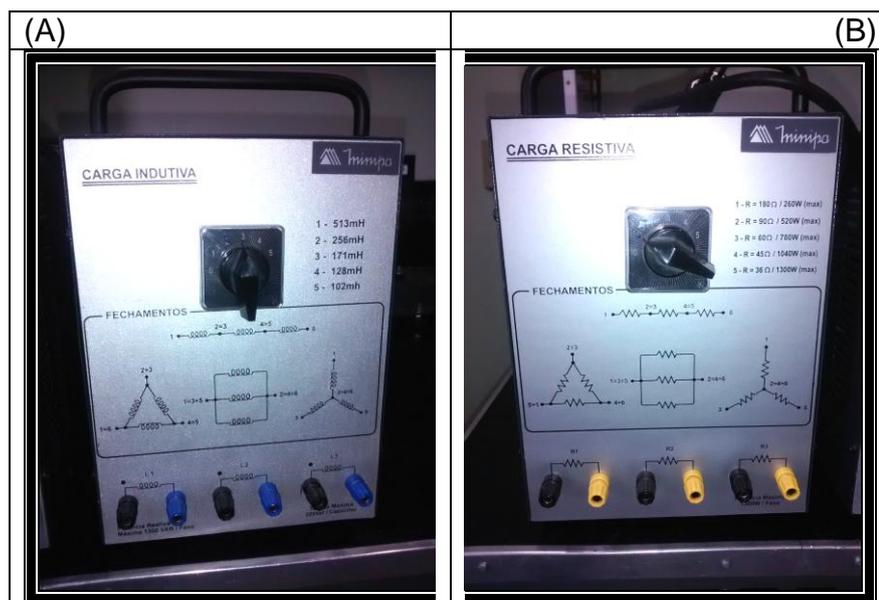
A figura 19 mostra detalhes do equipamento utilizado para ensaios.



**Figura 19:** A: motor síncrono utilizado nos ensaios em detalhe. B: bancada didática de máquinas elétricas do LABCE, onde pode ser visualizado o painel de controle (I), o motor síncrono (II), o motor assíncrono (III) e o motor de corrente contínua (IV).

Fonte: Elaborado pelo Autor (2014).

A bancada didática utilizada no desenvolvimento deste trabalho possui módulos de cargas resistivas e indutivas como pode ser observado na figura 20.



**Figura 20:** (A) módulo de carga indutiva. (B) módulo de carga resistiva.

Fonte: Elaborado Pelo Autor (2014).

Estes módulos apresentam cinco possibilidades de ajuste de seus valores e quando combinados utilizando a equação (8) podem gerar 25 configurações diferentes de cargas com fator de potência indutivo. Estas combinações foram utilizadas para formar um banco de dados que representa as possíveis cargas simuladas neste trabalho.

$$FP_{\text{Combinação } (n)} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (2 \times \pi \times f \times L)^2}} \quad (8)$$

Onde “R” representa a parte resistiva, em ohm ( $\Omega$ ), da carga, “L” é o valor da parte indutiva, em Henry (H), da carga e f é o valor da frequência, em Hertz (Hz), da rede elétrica em que a carga está instalada, no Brasil a frequência da rede elétrica é 60Hz. O módulo de carga indutiva pode ser ajustado com valores de indutância entre 0,102 e 0,513 H, enquanto que o módulo de carga resistiva pode ser ajustados com valores de resistência entre 36 e 180  $\Omega$  (Tabela 4).

**Tabela 4:** Características elétricas dos módulos de cargas da bancada SD-2100b.

Tipo de Carga	Ajuste1	Ajuste2	Ajuste3	Ajuste4	Ajuste5
Resistiva ( $\Omega$ )	36	45	60	90	180
Indutiva (mH)	102	128	171	256	513

Fonte: Elaborado pelo Autor (2104).

### 3.2: COLETA DE DADOS

Para a realização dos ensaios com a bancada didática os seguintes passos foram executados:

1: Partida da máquina síncrona até que o eixo desta atinja uma velocidade de próxima da velocidade de sincronismo, cerca de 1700rpm;

2: A partir deste momento o enrolamento de campo da máquina foi alimentado com tensão contínua para que ele pudesse alcançar a velocidade de sincronismo e possibilitasse sua operação como compensador de reativos;

3: Com o motor funcionando na velocidade de sincronismo, a corrente de excitação foi ajustada para seu valor nominal de operação para que o motor operasse como carga resistiva e FP unitário;

4: Após esta etapa, a corrente de excitação foi reduzida para valores abaixo da corrente nominal até que o menor fator de potência indutivo possível fosse atingido;

5: Em seguida, a corrente de excitação foi elevada para valores acima da corrente nominal com a finalidade de alcançar o menor FP capacitivo dentro dos limites da máquina.

Os passos citados acima foram executados com a máquina funcionando sem carga conectada em seu eixo. Esta condição de operação foi selecionada para obter uma faixa mais ampla de valores de fator de potência como descrito em Colak *et al.* (2003). Para gerar a equação de regressão da curva “V” do motor, o conjunto de dados com 24 registros de fator de potência provenientes do ensaio foi inserido no programa *MATLAB®* (MATHWORKS, 2015), que possui um conjunto de ferramentas de regressão matemática (*Curve Fitting Toolbox*). Desta maneira, foi possível obter uma equação que representasse o comportamento do fator de potência em função da corrente de excitação da máquina. A função criada pelo *MATLAB®* foi utilizada no desenvolvimento do sistema de compensação de reativos proposto neste trabalho.

### 3.3: COMPENSADOR DE REATIVOS

#### 3.3.1: Controlador PID2L

O controlador PID2L desenvolvido neste trabalho é composto de duas partes: controlador PID1 e controlador PD2. O controlador PID1 possui as ações de controle

proporcional, integral e derivativa, enquanto que o controlador PD2 possui apenas as ações de controle proporcional e derivativa. Com a adição do controlador PD2 ao controlador PID1, o sistema de controle torna-se mais robusto e confiável devido à atuação simultânea dos controladores. Com isso, ocorre um aumento do desempenho do sistema na obtenção de uma resposta adequada aos distúrbios que o sistema controlado pode apresentar (OGATA, 1998).

Para o desenvolvimento do controlador foi definido o valor do *set-point* (valor de referência), a variável de saída do controlador e a variável de processo controlada. Neste trabalho, o *set-point* escolhido foi estabelecido com base na resolução da (ANEEL, 2010), sendo este 0,95. A variável de saída escolhida foi a corrente de excitação ( $I_f$ ) que deve existir no enrolamento de campo do motor. A variável de processo escolhida foi o fator de potência do sistema, que representa a soma entre o fator de potência da carga simulada e o fator de potência do motor síncrono.

Com estes valores definidos torna-se possível comparar o valor de referência com a variável de processo e encontrar o erro existente através da equação (9). O valor do erro foi utilizado para gerar um sinal de controle que é enviado ao compensador. Os detalhes desta etapa metodológica podem ser melhor entendidos no setor de referencial teórico (p 37).

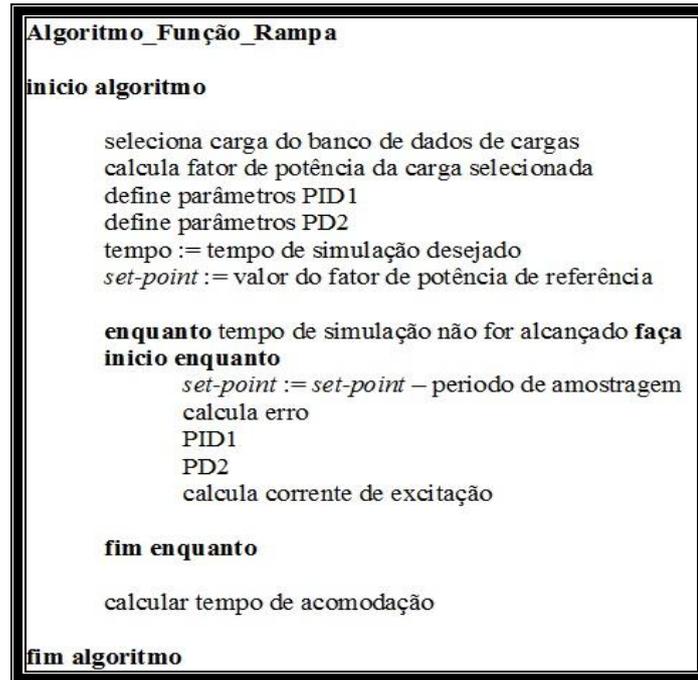
$$e = FP_{REFERENCIA} - FP_{SISTEMA} \quad (9)$$

O tempo de resposta do controlador representa o tempo decorrido entre a ocorrência de um distúrbio e o momento que o erro é estabilizado dentro do limite de 2% acima ou abaixo do valor de referência. Neste trabalho o tempo de resposta, também conhecido como tempo de acomodação, foi mensurado para duas situações distintas: os possíveis distúrbios que a carga do sistema pode apresentar; e as possíveis variações no valor do *set-point*. Para realizar esta tarefa duas funções foram criadas: *fitness\_degrau* e *fitness\_rampa*. A função *fitness\_degrau* representa os distúrbios provocados pelas variações do fator de potência no sistema e a função *fitness\_rampa* representa as variações no *set-point*. O tempo de acomodação ( $t_s$ ) que as funções retornam corresponde ao tempo que o controlador, a partir do instante que ocorre o distúrbio, leva para deixar o erro ( $e$ ) dentro de um limite de 2%

do valor do *set-point*. Como o *set-point* adotado neste trabalho foi 0,95, o valor de  $t_s$  deve ser tal que, a variável de processo atenda o seguinte requisito:  $0,93 \leq$  fator de potência do sistema  $\leq 0,97$ . Os pseudo-códigos das funções *fitness\_degrau* e *fitness\_rampa* são mostrados nas figuras 21 e 22, respectivamente.

```
Algoritmo_Função_Degrau  
  
inicio algoritmo  
  
    seleciona carga do banco de dados de cargas  
    calcula fator de potência da carga selecionada  
    define parâmetros PID1  
    define parâmetros PD2  
    tempo := tempo de simulação desejado  
    set-point := valor de fator de potência de referência  
  
    enquanto tempo de simulação não for alcançado faça  
    inicio enquanto  
        calcula erro  
        PID1  
        PD2  
        calcula corrente de excitação  
    fim enquanto  
  
    calcula tempo de resposta  
  
fim algoritmo
```

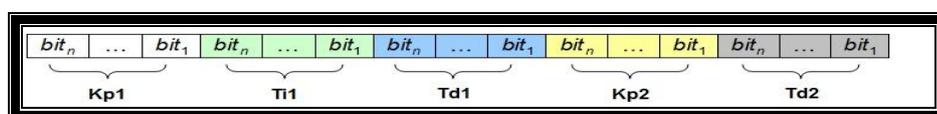
**Figura 21:** Pseudo-código mostrando a sequência de execução da função *fitness\_degrau*.  
Fonte: Elaborado pelo Autor (2014)



**Figura 22:** Pseudo-código mostrando a sequência de execução da função *fitness\_rampa*.  
Fonte: Elaborado pelo Autor (2014)

### 3.3.2: Algoritmo Genético

A implementação computacional do AG proposto neste trabalho utilizou a representação binária como forma de codificação dos indivíduos que representam possíveis soluções para o problema tratado. O AG proposto possui uma população com tamanho fixo, onde cada indivíduo que compõe esta população foi gerado aleatoriamente dentro de um intervalo estabelecido previamente. Cada indivíduo possui cinco grupos de genes que correspondem à cinco parâmetros distintos do controlador PID2L. Os três primeiros grupos de genes estão relacionados ao ganho proporcional ( $Kp1$ ), tempo integrativo ( $Ti1$ ) e tempo derivativo ( $Td1$ ) do controlador PID1 e os dois últimos grupos de genes representam o ganho proporcional ( $Kp2$ ) e o tempo derivativo ( $Td2$ ) do controlador PD2 (Figura 23).



**Figura 23:** Codificação binária dos indivíduos que representam possíveis soluções para o problema tratado.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2014)

A cada interação do AG é executada uma busca pelo espaço de soluções possíveis para o problema tratado, esta busca retorna um vetor contendo os valores que são utilizados para realizar o processo de sintonia do controlador PID2L. Cada vetor utilizado na configuração do controlador resulta em um tempo de acomodação específico. Portanto, o objetivo do AG implementado neste trabalho, é encontrar o vetor de parâmetros que quando utilizados na sintonia do controlador PID2L resulte em um tempo de acomodação que atenda os critérios definidos no projeto.

Para mensurar o tempo de acomodação correspondente à cada vetor de configuração retornado pelo AG, foi necessário criar uma função de avaliação. Esta função calcula a aptidão de cada indivíduo através dos valores de tempo de acomodação ( $t_s$ ) obtidos com as funções *fitness\_degrau* e *fitness\_rampa* (Equação 10).

$$aptidao = [| (t_s \text{ degrau} - 10) / 2 |] + [| (t_s \text{ rampa} - 10) / 2 |] \quad (10)$$

Onde  $t_s \text{ degrau}$  corresponde ao tempo de acomodação retornado pela função *fitness\_degrau* e  $t_s \text{ rampa}$  é o tempo de acomodação retornado pela função *fitness\_rampa*.

Na elaboração da função de aptidão do algoritmo genético proposto, considerou-se que uma boa solução foi encontrada quando ( $|t_s - 10| \leq 2$ ). Esta condição foi escolhida pois, no desenvolvimento deste trabalho, o valor considerado ideal para o tempo de acomodação do sistema foi 10 segundos, admitindo-se uma tolerância de  $\pm 20\%$ . Desta forma, analisando o primeiro termo da equação (10), quando  $|t_s \text{ degrau} - 10| = 2$ , será obtido o valor para este termo da equação correspondente à ( $| (t_s \text{ degrau} - 10) / 2 | = 1$ ). Para situações em que ( $|t_s \text{ degrau} - 10| > 2$ ), o valor do do primeiro termo assumirá valores que obedecem a expressão ( $| (t_s \text{ degrau} - 10) / 2 | > 1$ ) e quando a diferença ( $|t_s \text{ degrau} - 10|$ ) resultar em um valor igual a zero, teremos ( $| (t_s \text{ degrau} - 10) / 2 | = 0$ ). A mesma análise é aplicada ao segundo termo da equação (10) ( $| (t_s \text{ rampa} - 10) / 2 |$ ). Desta forma é possível identificar os indivíduos que apresentam boas soluções para o problema.

Neste trabalho, o indivíduo que alcançar aptidão igual a zero é considerado uma solução perfeita para o problema, pois neste caso as funções *fitness\_degrau* e *fitness\_rampa* retornaram valor zero, ou seja, a resposta do controlador durante a correção do erro é instantânea. Mas outras soluções são permitidas, pois valores de aptidão onde ( $0 < \text{aptidão} \leq 2$ ) são considerados ótimos indivíduos e que, certamente, atendem aos critérios de tempo de acomodação e tolerância desejados. Indivíduos que possuem aptidão com valores ( $2 < \text{aptidão} \leq 20$ ), representam indivíduos que podem atender aos critérios estabelecidos, mas não são garantia de uma boa solução, pois, neste caso, existe a possibilidade de apenas uma das funções de *fitness* retornar um valor que atenda aos critérios desejados. Os indivíduos com aptidão superior a 20 são descartados, pois representam soluções inviáveis para o problema tratado.

Dois métodos de seleção de indivíduos foram utilizados neste trabalho: o método de seleção da roleta e o método de seleção por torneio. Na seleção pelo método da roleta, as aptidões de cada indivíduo que compõe a população corrente são somadas, em seguida, foi calculado o percentual de contribuição que cada indivíduo possui na aptidão total da população. Como o problema tratado neste trabalho é de minimização, indivíduos com os menores valores de aptidão são considerados soluções melhores e possuem maiores chances de serem escolhidos pela roleta. Na seleção realizada pelo método do torneio, dois indivíduos são escolhidos para participar em cada rodada.

Foi implementado neste trabalho um AG canônico (MICHALEWICS, 1996) com a aplicação da técnica de elitismo onde 5% dos melhores indivíduos são armazenados para a próxima geração (Figura 24).

```

Algoritmo Genético

inicio algoritmo

    t := 1
    gera população inicial P
    avalia população P

    enquanto critério de parada não for atingido faça
    inicio enquanto
        t := t + 1
        seleciona indivíduo em P
        aplica crossover
        aplica mutação
        atualiza P
        avalia P atualizada
        aplica elitismo
    fim enquanto
fim algoritmo

```

**Figura 24:** Pseudo-código utilizado no algoritmo genético empregado neste trabalho.  
Fonte: Elaborado pelo Autor (2015).

Foram utilizadas quatro configurações contendo métodos de seleção e quantidade de pontos de *crossover* diferentes (Tabela 5). Para cada configuração, foi criada uma população contendo 100 indivíduos, onde cada característica do cromossomo foi gerada aleatoriamente dentro do intervalo 0 a 10, a probabilidade de *crossover* e a probabilidade de mutação foram fixadas em 60% e 1%, respectivamente e 500 interações do AG foram executadas em cada configuração.

**Tabela 5:** Parâmetros escolhidos para seleção e cruzamento de indivíduos em cada configuração de AG executada neste trabalho.

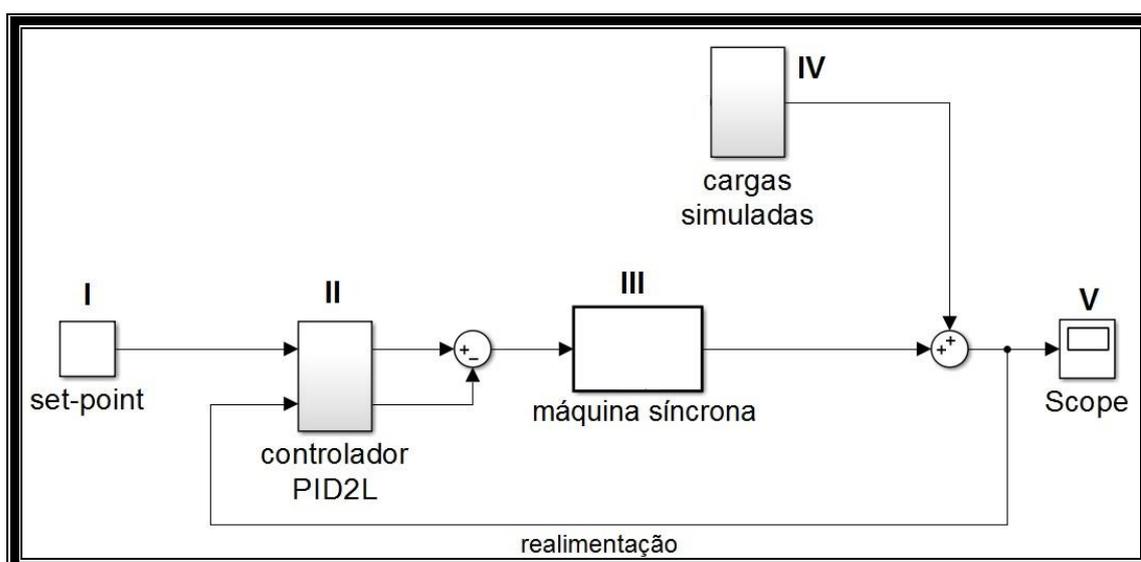
Configuração	Método de seleção	Qtde de pontos no crossover
1	Roleta	1 ponto
2	Roleta	2 pontos
3	Torneio	1 ponto
4	Torneio	2 pontos

Fonte: Elaborado pelo Autor (2015).

### 3.4: SIMULADOR

#### 3.4.1: Plataforma de Simulação

No desenvolvimento deste trabalho, utilizou-se o programa *MATLAB®* (MATHWORKS, 2015) e seu ambiente de simulação *Simulink®* para a realização dos testes do sistema de compensação de reativos proposto. Com uso do *Simulink®*, torna-se possível realizar a modelagem, simulação e análise de processos atuando como ferramenta de avaliação do desempenho de diferentes sistemas (LI E JIANG, 2011). Para que fosse possível executar a simulação do sistema foi desenvolvido um modelo utilizando um diagrama de blocos para representar os componentes que fazem do compensador de reativos proposto (Figura 25).



**Figura 25:** Diagrama de blocos do sistema de compensação de reativos, onde podem ser observados: (I) valor de referência, (II) Controlador proposto, (III) Modelo do motor síncrono, (IV) Cargas que podem ser simuladas e (V) ferramenta de visualização de gráficos do *Simulink®*.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2015).

A simulação do comportamento do sistema de compensação de reativos proposto foi executada de acordo com os seguintes passos:

1: Foi definido o tempo de 50 segundos de simulação para verificação do funcionamento do sistema;

- 2: O valor de referência estipulado foi inserido no bloco I;
- 3: O vetor de parâmetros retornado após a execução de cada configuração do AG proposto foi utilizado no bloco II para realizar a sua configuração. Desta forma, tornou-se possível mensurar o tempo de resposta que o sistema possui;
- 4: Foram escolhidos dois valores de carga, baseados no banco de dados de cargas criado na seção 3.1. No início da simulação, foi atribuído um destes valores e depois de decorridos 50% do tempo total de simulação, o valor da carga foi alterado gerando assim, um distúrbio no sistema;
- 5: Em cada rodada de simulação, o motor síncrono simulado pelo bloco III, deve realizar a correção do fator de potência que a carga apresentar. Para tal, ele recebe do controlador um valor de corrente de excitação ( $I_F$ ) e através da equação (9) definida na seção 3.3, seu fator de potência sofre uma alteração para que seja possível efetuar a correção;
- 6: Para verificação da resposta que o sistema apresenta, foi utilizado o bloco V. Com a utilização deste bloco tornou-se possível visualizar os gráficos gerados pelo modelo de simulação;
- 7: Para executar a simulação das variações no *set-point*, o passo número dois foi alterado para que o sistema gerasse uma variação decrescente no valor do *set-point*. Após esta alteração, os passos três a seis foram repetidos.

Durante a execução de cada rodada de simulação do sistema de compensação de reativos proposto neste trabalho, foi gerado um banco de dados para registrar as informações do modelo. Este banco de dados foi utilizado na elaboração de tabelas e gráficos apresentados na seção de resultados.

## 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1: RESULTADOS

#### 4.1.1: Resultados do ensaio realizado

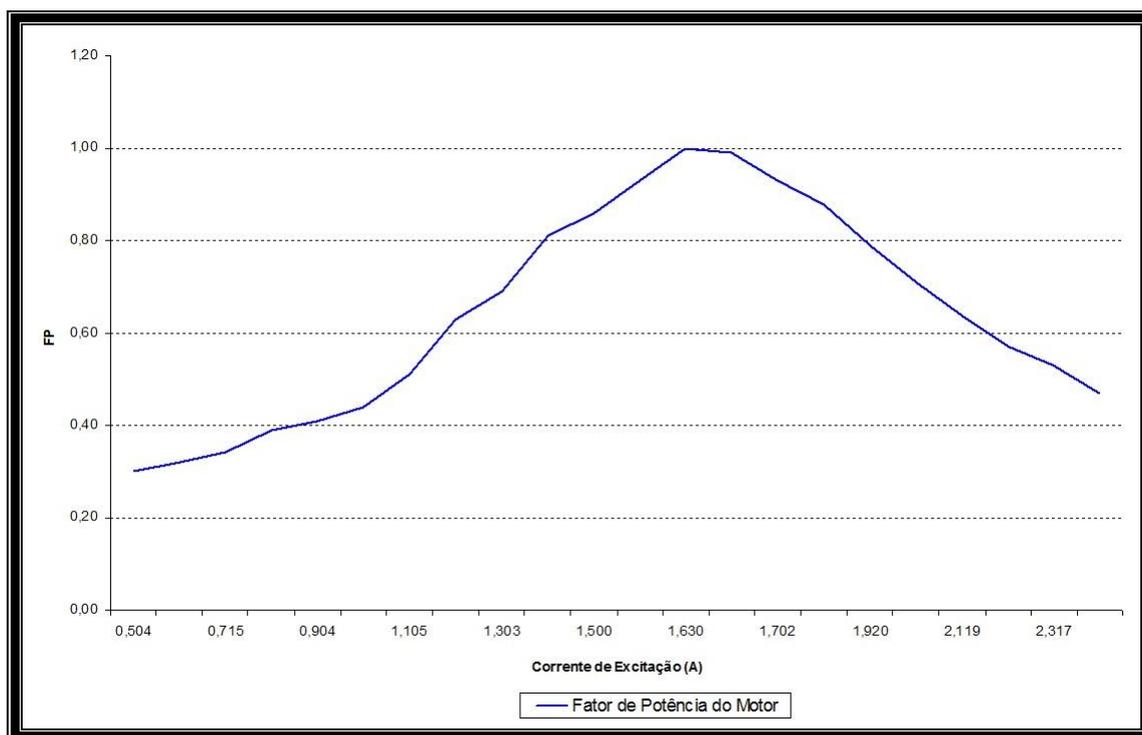
Através da utilização dos módulos de carga descritos na seção 3.1 deste trabalho, foi gerado um conjunto de 25 valores de cargas com fator de potência indutivo. Analisando o conjunto de dados, é possível perceber que quando o valor da parte indutiva da carga aumenta e o valor da parte resistiva permanece constante, o fator de potência do sistema sofre um decréscimo conforme apêndice “A”.

Os valores de fator de potência mostrados no apêndice “A” foram obtidos utilizando a equação (8). Utilizando como exemplo o fator de potência observado na combinação 1. Seu valor foi encontrado da seguinte forma:

$$FP_{Combinação\ 1} = \frac{36}{\sqrt{36^2 + (2 \times \pi \times 60 \times 0,102)^2}} = 0,68 \quad (11)$$

Para as outras combinações restantes, o mesmo procedimento foi executado. Até que o fator de potência de todas as 25 combinações fosse encontrado.

Na etapa de modelagem da máquina síncrona instalada na bancada didática utilizada neste trabalho, foi necessário desenvolver um modelo matemático que representasse a relação entre a corrente de excitação e seu fator de potência. Para tal, a curva “V” da máquina foi obtida conforme figura 26, através do ensaio realizado na seção 3.2.



**Figura 26:** Curva “V” utilizada para gerar o modelo matemático do motor síncrono utilizado no item 3.2.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2015)..

Com os dados gerados através da curva “V” do motor, foi possível utilizar o módulo de regressão matemática *Curve Fitting Tool* do *MATLAB*® para gerar a equação (11).

$$FP(I) = \sum_{n=1}^6 a_n \times \text{sen}(b_n \times (I + c_n)) \quad (12)$$

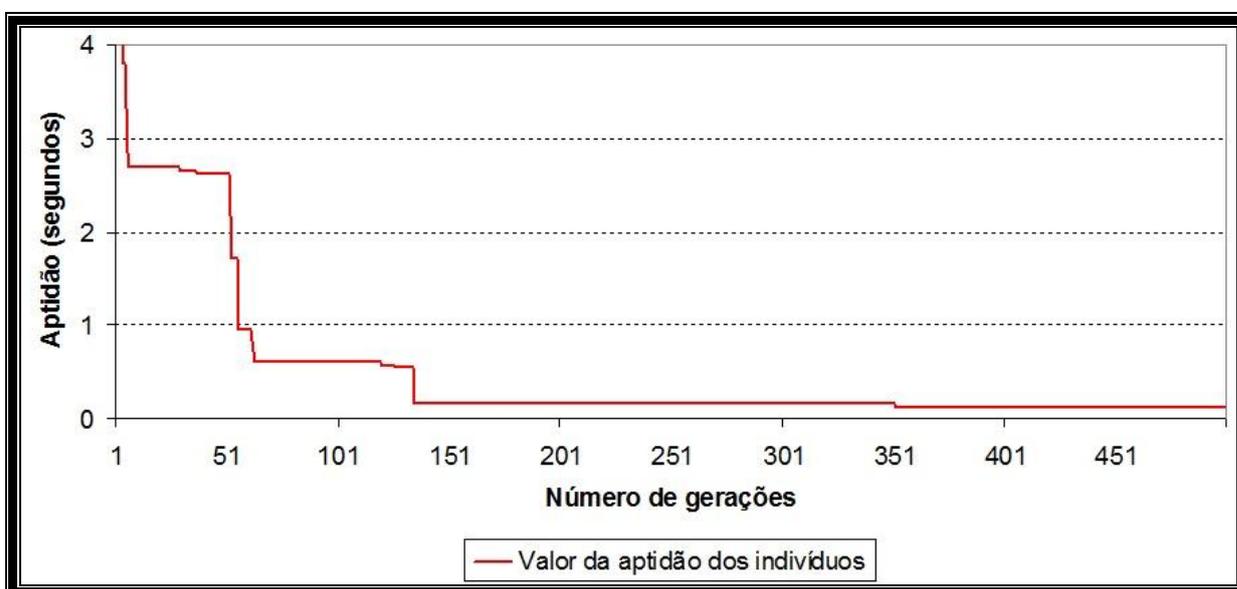
Na equação (11), os coeficientes a, b e c foram gerados automaticamente pelo *MATLAB*® através do método de soma sucessiva de senos. Esta equação foi inserida no bloco III do modelo simulado no *Simulink*®, possibilitando o cálculo do valor do fator de potência de saída da máquina em função da corrente de excitação enviada pelo controlador PID2L.

#### 4.1.2: Resultados da Sintonia do Controlador

O processo de sintonia do controlador PID2L foi realizado através da execução do AG proposto neste trabalho. Os resultados obtidos após a execução de cada configuração proposta são mostrados a seguir.

#### 4.1.2.1: Configuração 1

Após a execução do AG utilizando as opções da configuração 1, o melhor conjunto de parâmetros encontrados para o controlador PID2L foi:  $K_p1 = 0,89$ ;  $Ti1 = 9,97$ ;  $Td1 = 0,04$ ;  $K_p2 = 0,06$  e  $Td2 = 0,43$ . Quando os parâmetros encontrados são inseridos nas funções *fitness\_degrau* e *fitness\_rampa*, torna-se possível obter o tempo de acomodação  $t_s\text{ degrau} = 10,1$  segundos e o tempo  $t_s\text{ rampa} = 9,88$  segundos. Aplicando estes valores na equação (10), é retornado o valor 0,11 segundos que representa o valor da aptidão do melhor indivíduo. A evolução da aptidão dos melhores indivíduos gerados em cada interação do AG utilizando a configuração 1 pode ser vista na figura 27.



**Figura 27:** Evolução dos melhores indivíduos gerados em cada interação do AG utilizando a configuração 1.

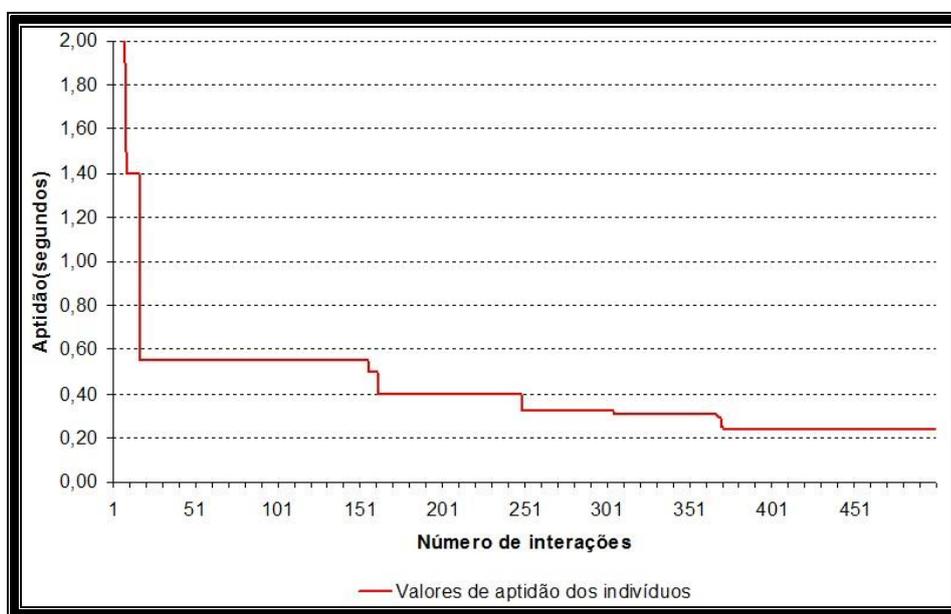
Fonte: Elaborado pelo Autor (2015).

É possível perceber no gráfico apresentado na figura 27, que no decorrer das interações do AG proposto, a aptidão dos indivíduos tende ao ponto ótimo

apresentado neste trabalho (aptidão = 0). Com a utilização da configuração 1 o algoritmo consegue obter boas soluções a partir da interação de número 351, no entanto, como o critério de parada escolhido foi quando o número máximo de gerações fosse alcançado. O último indivíduo encontrado pelo algoritmo foi escolhido.

#### 4.1.2.2: Configuração 2

Com a utilização da configuração 2 do AG proposto neste trabalho, foi possível obter o vetor de parâmetros de sintonia do controlador PID2L com os seguintes valores:  $Kp1 = 0,26$ ;  $Ti1 = 8,20$ ;  $Td1 = 0,16$ ;  $Kp2 = 0,52$  e  $Td2 = 0,03$ . Este vetor de parâmetros retorna o valor  $t_{S\text{ degrau}} = 10,10$  segundos e um tempo  $t_{S\text{ rampa}} = 9,63$  segundos. A aptidão referente ao melhor indivíduo encontrado pelo AG nesta configuração foi 0,23 segundos. A figura 28 mostra a evolução dos melhores indivíduos encontrados pelo AG após as 500 interações.



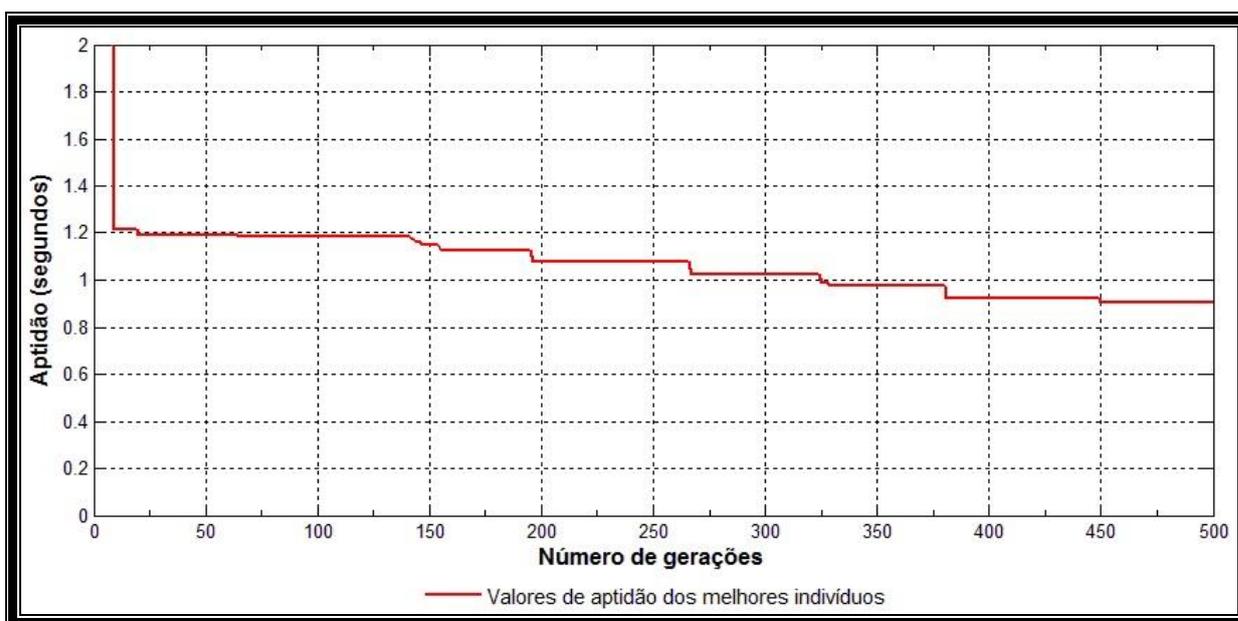
**Figura 28:** Evolução dos melhores indivíduos encontrados pelo algoritmo genético com a utilização da configuração 2.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2015).

Com a utilização da configuração 2 no AG proposto, o operador de *crossover* foi alterado para dois pontos de corte no cromossomo. Com o *crossover* de dois pontos, o AG conseguiu atingir a região de soluções ótimas em menos gerações se comparado ao AG da configuração 1. Observando a figura 28, também é possível verificar que a configuração 2 do AG apresenta menores intervalos entre as interações sem que ocorra uma evolução de indivíduos em direção ao ponto perfeito (aptidão = 0).

#### 4.1.2.3: Configuração 3

A configuração 3 do AG proposto retornou um vetor de parâmetros com os seguintes valores:  $Kp1 = 2,33$ ;  $Ti1 = 4,97$ ;  $Td1 = 0,08$ ;  $Kp2 = 4,26$  e  $Td2 = 0,00$ . Nesta configuração, a função *fitness\_degrau* apresentou um  $t_s\text{ degrau} = 9,97$  segundos e a função *fitness\_rampa*, um  $t_s\text{ rampa} = 11,78$  segundos. Com a utilização destes valores na função de aptidão, foi possível obter um *fitness* = 0,91 segundos. A figura 29 pode ser utilizada para verificar a evolução das melhores soluções encontradas pela configuração 3 do AG.



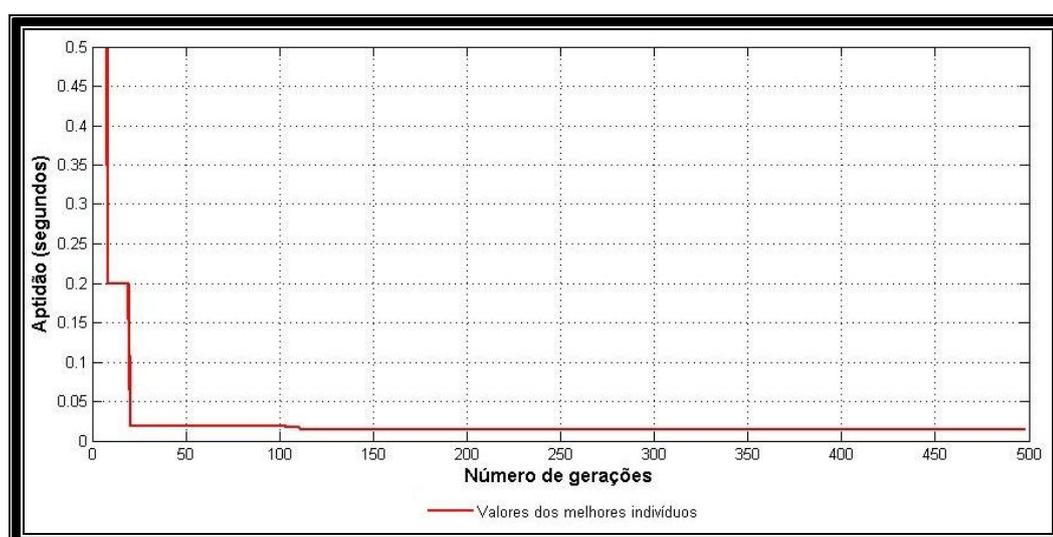
**Figura 29:** Evolução da aptidão dos melhores indivíduos encontrados durante as interações do AG utilizando a configuração 3.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2015).

Através da visualização do gráfico mostrado na figura 29, foi observado que a configuração 3 do AG alcança a região de soluções ótimas numa interação anterior às configurações utilizadas. O uso do método de seleção por torneio nesta configuração ajuda o AG a manter a transferência das características das melhores soluções da geração atual para a próxima. No entanto, esta configuração não retornou uma solução melhor que as utilizadas anteriormente. Isto pode estar relacionado ao fato do *crossover* de um ponto transmitir padrões dos indivíduos da geração atual para a próxima geração de forma menos intensa que o *crossover* de dois pontos (LINDEN, 2008).

#### 4.1.2.4: Configuração 4

Com o AG da configuração 4, os valores encontrados que compõem o vetor de parâmetros do controlador foram:  $Kp1 = 0,00$ ;  $Ti1 = 9,37$ ;  $Td1 = 0,33$ ;  $Kp2 = 0,82$  e  $Td2 = 0$ . O valor da função *fitness\_degrau* obtido com a configuração 4 do AG foi  $t_s\text{ degrau} = 10,00$  segundos e o valor retornado pela função *fitness\_rampa* foi  $t_s\text{ rampa} = 9,97$  segundos. Estes valores, quando inseridos na equação (10), resultam em uma aptidão de 0,01 segundos. A evolução das melhores soluções encontradas pelo AG da configuração 4 pode ser observada na figura 30.



**Figura 30:** Evolução das melhores soluções encontradas durante a execução do AG utilizando a configuração 4.

**Fonte:** Elaborado pelo Autor (2015).

Através da observação do gráfico acima, é possível verificar que a configuração 4 alcançou uma região de soluções próximas da perfeita em um número de gerações reduzido (geração 21). No entanto, a partir da geração 112 o algoritmo convergiu para uma região onde não houve melhoria nos valores da aptidão dos indivíduos.

O aumento no desempenho da configuração 4, pode ser justificado pelo uso em conjunto do método de seleção por torneio e do *crossover* de dois pontos. Com isso, a pressão seletiva que o método exerce sobre a população, para que as características dos melhores indivíduos sejam transmitidas as próximas gerações torna-se maior do que nas outras configurações (LINDEN, 2008).

#### 4.1.3: Resultados da Simulação

Após a execução das quatro configurações de AG propostas neste trabalho, foram obtidos os vetores de sintonia do controlador PID2L, os valores de aptidão retornados pelas configurações propostas e o tempo de resposta do controlador para os distúrbios do sistema conforme apresentado na tabela 6. Desta forma, foi possível escolher a configuração que retornou os melhores resultados em relação aos critérios desejados. De acordo com o que foi definido na seção 3.3.2, os indivíduos foram considerados ótimos quando a condição ( $0 < \text{aptidão} \leq 2$ ) fosse atendida. Neste trabalho, as quatro configurações propostas atenderam esta condição, então a configuração que retornou o menor valor de aptidão foi escolhida.

**Tabela 6:** Conjunto de valores obtidos após a execução das quatro configurações de AG.

Configuração	Parâmetros PID					Aptidão(s)	ts_degrau(s)	ts_rampa(s)
	Kp1	Ti1	Td1	Kp2	Td2			
1	0,89	9,97	0,04	0,06	0,43	0,11	10,10	9,88
2	0,26	8,20	0,16	0,52	0,03	0,23	10,10	9,63
3	2,33	4,97	0,08	4,26	0,00	0,91	11,78	9,97
4	0,00	9,37	0,33	0,82	0,00	0,01	9,97	10,00

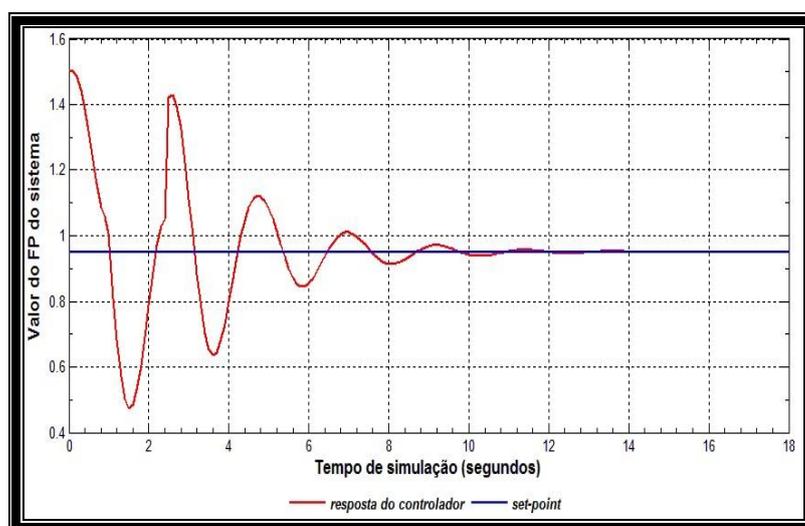
Fonte: Elaborado pelo Autor (2015).

Com base nos dados contidos na tabela 6, a configuração quatro foi escolhida para efetuar a simulação do sistema de compensação de reativos. Os parâmetros de sintonia do controlador inseridos no bloco II do modelo projetado no *Simulink*® para que os passos descritos na seção 3.4.1 fossem executados.

Neste trabalho, foi escolhido o tempo de 50 segundos como tempo de simulação. O sistema inicia com a carga configurada na combinação 1 mostrada no apêndice “A”, resultando em um fator de potência inicial de 0,53 indutivo. Foi definido valor inicial de corrente de excitação para simular a entrada da máquina síncrona na região de sincronismo, pois somente nesta situação o motor pode atuar como corretor de fator de potência. Com esta configuração inicial realizada, o fator de potência encontrado para o motor foi 0,97 indutivo e de acordo com a seção 3.3.1,  $FP_{SISTEMA} = 1,5$  e o valor do erro inicial é  $e = 0,95 - 1,5 = -0,55$ . Desta forma, o controlador PID2L deve enviar um sinal de controle, valor de corrente de excitação, ao motor para que o erro seja corrigido dentro dos critérios desejados.

Quando 50% do tempo total de simulação foi alcançado, uma combinação aleatória de carga foi escolhida para simular os distúrbios provocados pelas alterações no fator de potência da carga. Com isso, novos valores de FP do sistema e erro foram gerados, resultando em uma nova ação de correção do controlador.

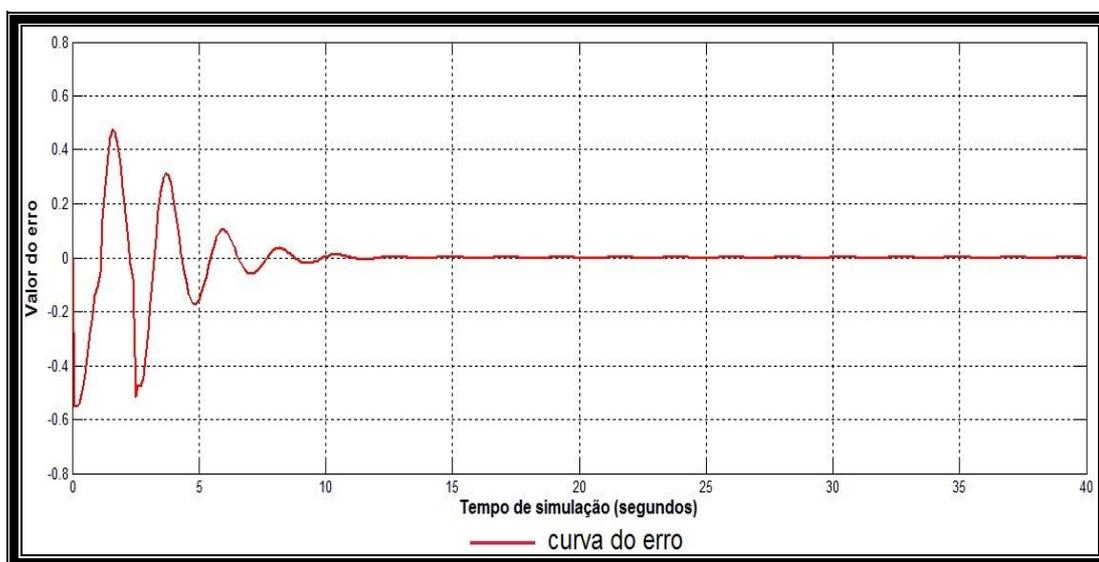
Ao final da rodada de simulação, os resultados obtidos através da plataforma de simulação podem ser visualizados nas figuras 31 a 34.



**Figura 31:** Resposta do controlador PID2L a um distúrbio gerado com a mudança no valor do fator de potência da carga.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2015).

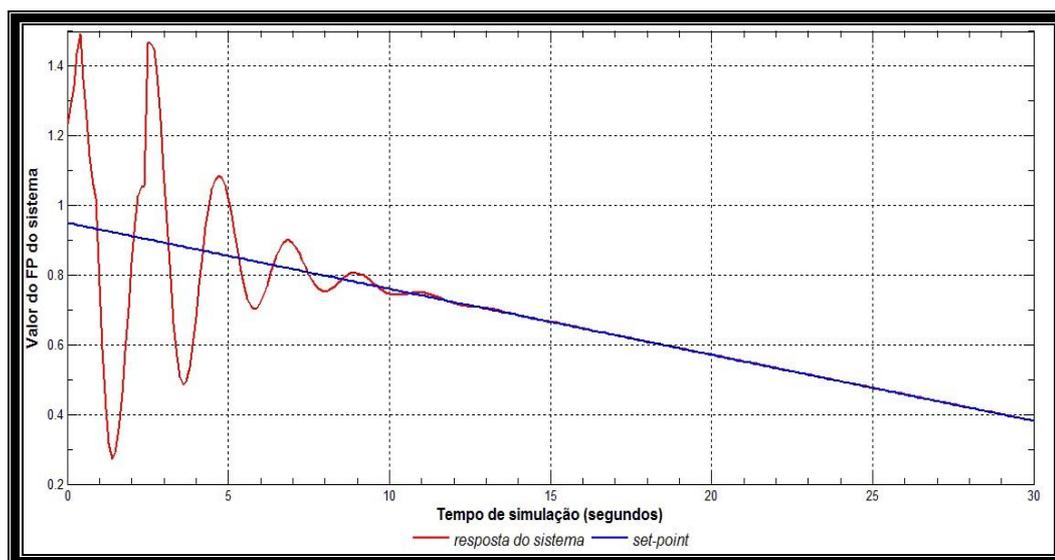
O gráfico apresentado na figura 31 representa a resposta do controlador à variação em degrau provocada pela mudança no fator de potência da carga. A utilização dos parâmetros de sintonia obtidos com a configuração quatro do AG proposto resultou no tempo de acomodação do controlador de 10,4 segundos. Este tempo atende a condição considerada ótima elaborada para este estudo. No gráfico acima, é possível verificar que a diferença entre o valor do *set-point* e a variável de processo, fator de potência do sistema, tende à zero no decorrer da simulação, como pode ser observado na figura 32. Para instantes a partir do tempo de acomodação encontrado, o sistema começa entrar numa situação de equilíbrio e a partir do instante 14 segundos, o erro pode ser considerado igual à zero.



**Figura 32:** Variação do erro do sistema em relação ao valor de referência escolhido.  
Fonte: Elaborado pelo Autor (2015).

O gráfico da figura 32 representa a curva do erro do sistema em função do tempo de simulação. Neste gráfico é possível perceber que o erro tende à zero ao longo da simulação, assumindo valores abaixo do limite de 2% do valor do *set-point* a partir do tempo de acomodação obtido. Esta situação está em concordância com o projeto do compensador de reativos descrito na seção 3.3.1, onde o erro permitido para este trabalho deve apresentar, no máximo, 2% do valor de referência.

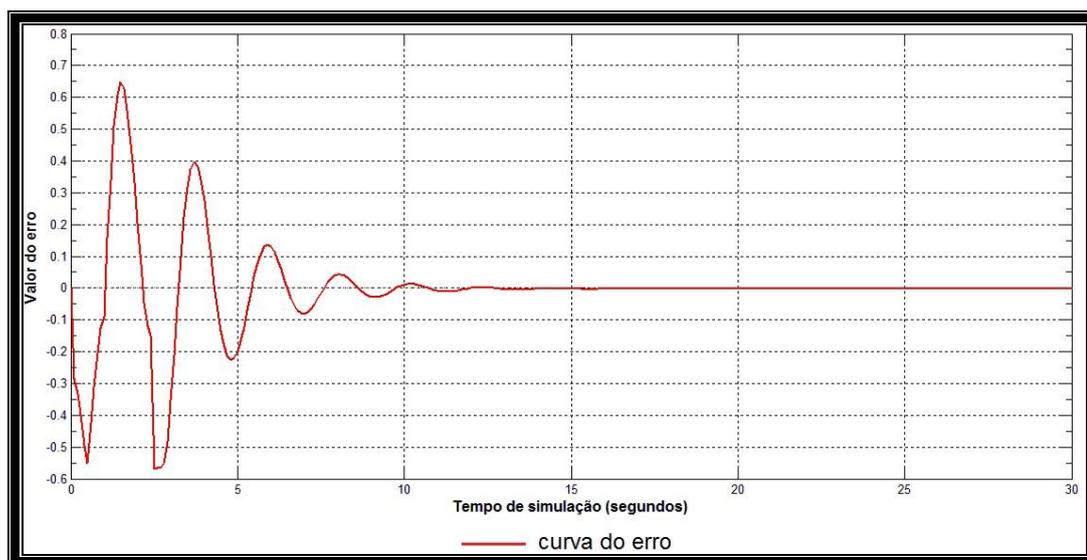
A figura 33 representa a resposta do sistema aos distúrbios provocados pelas variações no *set-point* e no fator de potência de carga.



**Figura 33:** Resposta do controlador aos distúrbios e variações no *set-point* do sistema.  
Fonte: Elaborado pelo Autor (2015).

A figura 33 mostra uma variação em rampa no *set-point*, nesta etapa da simulação o valor de referência iniciou em 0,95 e teve um decréscimo linear alcançando o valor zero ao final da simulação. Durante esta variação do *set-point*, o tempo de acomodação foi mensurado com valor 9,96 segundos. Este tempo está de acordo com as especificações definidas neste trabalho, pois quando o tempo de acomodação  $t_{s\text{rampa}} = 10$  segundos a solução é considerada perfeita. Para situações onde as soluções apresentaram um tempo de acomodação dentro do limite de tolerância estabelecido, valores 20% maiores e 20% menores que 10 segundos, foram consideradas soluções ótimas. Na figura 33, é possível perceber que a sintonia do controlador realizada com os parâmetros retornados pela configuração quatro do AG, atende os requisitos estabelecidos na seção 3.3.1 deste trabalho.

O erro do sistema, diferença entre *set-point* e variável de processo, na simulação das variações em rampa, tende à zero no decorrer do tempo. Isto mostra que o controlador sintonizado com os parâmetros retornados pela configuração quatro do AG, consegue enviar um sinal de controle para o motor síncrono em conformidade com o que foi proposto neste trabalho. A partir do tempo de acomodação, o erro assume valores abaixo de 2% do *set-point*, sendo que, a partir do instante 14 segundos o erro torna-se desprezível, pois assume valores próximos a zero conforme figura 34.



**Figura 34:** Curva do erro em função do tempo obtida durante o período de simulação do sistema de compensação de reativos.  
 Fonte: Elaborado pelo Autor (2015).

## 4.2: DISCUSSÃO

Neste trabalho, o controle dos parâmetros de excitação da máquina foi realizado por um controlador PID com dois graus de liberdade, onde outra técnica de Inteligência Computacional foi utilizada, os algoritmos genéticos. Esta técnica mostrou-se eficiente em encontrar soluções dentro de um espaço de busca. No desenvolvimento do controlador proposto, também foi necessário obter a relação entre corrente de excitação e fator de potência da máquina síncrona. Neste trabalho, utilizou um ambiente de simulação dinâmica para verificação da aplicabilidade do controlador. Analisando, além da correção em si, o tempo de resposta e o comportamento do erro ao longo do tempo de simulação.

Colak *et al.* (2003) em seu trabalho, desenvolve um sistema de correção de fator de potência baseado em um controlador *fuzzy*. Para tal, ele obteve as relações entre corrente de excitação e fator de potência e corrente de excitação e corrente da carga para a máquina utilizada através da curva “V”. Estas relações obtidas serviram de base para desenvolver o controlador.

Neste trabalho, foi desenvolvido um modelo computacional de um sistema de correção de fator de potência. O modelo desenvolvido buscou obter um sistema que representasse, de forma confiável, a máquina síncrona possibilitando seu uso no

âmbito educacional. Sesveren e Bayindir (2013), desenvolveram um controlador da máquina síncrona baseado em uma rede neural artificial, este controlador foi utilizado no desenvolvimento de um *software* didático com uma interface gráfica amigável que pudesse ser utilizado no ensino de máquinas elétricas rotativas.

Em Bayindir *et al.* (2009), os autores utilizam um controlador PID convencional para efetuar o controle dos parâmetros de excitação de uma máquina síncrona. O controlador proposto pelos autores foi sintonizado por métodos convencionais e implementado computacionalmente. Em seu trabalho, optou-se pelo desenvolvimento de um circuito elétrico onde os autores utilizaram módulos de cargas resistivas, indutivas e capacitivas para simular as variações de fator de potência de um sistema. A análise do desempenho do sistema de correção realizada pelos autores limitou-se apenas à verificação das formas de onda de corrente e tensão e ao acompanhamento da corrente total do circuito e do fator de potência da carga.

Como diferencial, no projeto desenvolvido neste trabalho optou-se pelo uso de um controlador PID2L, composto por um controlador PID atuando em conjunto com controlador PD, esta configuração proporciona maior confiabilidade ao sistema, mas aumenta a complexidade do processo de sintonia do controlador. Neste trabalho, diferentemente de Bayindir *et al.* (2009), o processo de sintonia do controlador foi realizado com o auxílio de um algoritmo genético. O uso do AG possibilitou obter parâmetros de sintonia ótimos para o controlador proposto. O diferencial encontrado na análise do desempenho do sistema de compensação de reativos desenvolvido foi a verificação da resposta do controlador aos distúrbios provocados pelas variações no *set-point* e pela mudança no fator de potência da carga, além da verificação do comportamento do erro em regime permanente do sistema.

## 5: CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1: CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado um sistema de correção de fator de potência utilizando um motor síncrono como compensador de reativos. O controle do funcionamento do motor foi efetuado por um controlador com dois graus de liberdade. O processo de sintonia efetuado durante o desenvolvimento deste controlador foi realizado com o auxílio de um AG. Os parâmetros deste AG foram escolhidos após serem avaliadas quatro configurações diferentes contendo opções de métodos de seleção e quantidade de pontos de *crossover*.

Os resultados obtidos pela configuração escolhida do AG mostraram que esta técnica de Inteligência Computacional pode ser utilizada de forma satisfatória no processo de sintonia de um controlador com dois graus de liberdade. Pois os valores obtidos para os parâmetros de configuração do controlador atenden aos critérios estabelecidos no início do trabalho como: tempo de acomodação ideal de 10 segundos com uma variação permitida de 20%. Foi possível observar que o controlador proposto conseguiu reduzir o erro em regime permanente do sistema para valores abaixo de 2% do valor de referência desejado.

O AG proposto neste trabalho mostrou-se eficiente ao encontrar soluções ótimas no espaço de busca estabelecido para o problema. Pois todas as configurações utilizadas retornaram soluções próximas daquela que foi considerada perfeita ( $|t_s - 10| = 0$ ). Isto possibilitou ao controlador proposto neste trabalho, apresentar desempenho e confiabilidade considerados satisfatórios, pois o controlador apresentou boa resposta aos distúrbios provocados pelas alterações no

fator de potência da carga, assim como uma boa resposta às alterações em rampo ocorridas no *set-point*.

Os resultados obtidos através da simulação do compensador mostraram que o modelo computacional do motor síncrono pode ser utilizado como simulador de um sistema de compensação de reativos. O motor simulado recebeu um valor de corrente de excitação enviado pelo controlador, de acordo com o necessário, para efetuar o ajuste do fator de potência do sistema até que este atingisse o valor de referência estabelecido no início do projeto. A simulação do funcionamento da máquina mostrou que o sistema obteve desempenho e confiabilidade desejados, pois em todas as situações propostas, a correção do fator de potência foi realizada de forma satisfatória.

Durante as rodadas de simulação desenvolvidas neste trabalho, foi possível observar que o modelo computacional do sistema de compensação de reativos apresenta um potencial para uso como ferramenta didática no ensino da disciplina de máquinas elétricas. O uso como ferramenta didática é viável, pois durante o desenvolvimento do modelo, buscou-se obter um modelo matemático que representasse o comportamento do motor que fosse simples e ao mesmo tempo confiável. Isto foi possível através do uso da ferramenta de regressão do *MATLAB*®, onde os dados obtidos da curva “V” do motor resultaram em uma equação de fácil entendimento.

Desta forma, o diagrama de blocos construído no *Simulink*® apresenta estrutura simples e que representa com fidelidade o comportamento real do motor síncrono existente na bancada didática do LABCE. Neste modelo, o usuário apenas precisa inserir o valor de referência para o fator de potência e o tempo de simulação desejado.

## 5.2: SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A simulação em ambiente computacional visa o desenvolvimento de um sistema físico que será desenvolvido no Laboratório de Conversão de Energia do IFF campus Campos Guarus, onde seja possível efetuar controle de torque e velocidade da máquina síncrona. Para tal, um modelo matemático com maior grau

de precisão deverá ser obtido levando em consideração características elétricas e mecânicas da máquina.

Desenvolver um sistema de correção de fator de potência utilizando uma plataforma de prototipagem *open source* como raspberryPi ou Arduino com o sistema de controle embarcado.

Aplicar outros tipos de controle inteligente como por exemplo: controlador *fuzzy* e controlador *neuro-fuzzy* para a comparação com os resultados obtidos neste trabalho.

Desenvolver um *software* com uma interface gráfica amigável para uso específico em âmbito educacional, onde os usuários possam simular o controle de máquinas elétricas através de técnicas de Inteligência Computacional.

## 6: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Condições gerais de fornecimento de energia elétrica**: resolução normativa n° 414/2010: direitos e deveres do consumidor de energia elétrica. Brasília: ANEEL, 2012. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/REN\\_414\\_2010\\_atual\\_REN\\_499\\_2012.pdf](http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/REN_414_2010_atual_REN_499_2012.pdf)>. Acesso em: 14 nov 2014.

ALFARO, V. M.; VILANOVA, R. Robust tuning of 2DoF PID controllers with filter for unstable first-order plus dead-time processes. In: . IEEE CONFERENCE ON 18, 2013, 10-13 set Sardenha-Cagliari. **Proceedings**.... Sardenha-Cagliari: ETFA, 2014. Disponível em: <[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6648035&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D6648035](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6648035&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6648035)>. Acesso em: 14 nov 2014.

ALFARO, V. M.; VILANOVA, R.; ARRIETA, O. Two-degree-of-freedom PI/PID tuning approach for smooth control on cascade control systems. In: IEEE INTERNATIONAL ON CONFERENCE, 47, 2008, 8 dez, Cancun - México. **Proceeding**..... Cancun-México: CDC, 2009. Disponível em: <[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4738796&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D4738796](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4738796&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D4738796)>. Acesso em: 14 nov 2014.

AL-HAMRANI, M. M.; VON JOUANNE, A.; WALLACE, A. Power factor correction in industrial facilities using adaptive excitation control of synchronous machines. In: PULP AND PAPER INDUSTRY TECHNICAL CONFERENCE, 2002, 17-21 jun, Toronto-Canada. **Proceedings**..... Toronto-Canada: IEEE, 2003. Disponível em: <[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1015143&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D1015143](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1015143&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D1015143)>. Acesso em: 5 maio. 2015

ALLAOUA, B.; GASBAOUI, B.; MEBARKI, B. Setting up PID DC motor speed control alteration parameters using particle swarm optimization strategy. **Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies**, Paris, v. 14, p. 19–32, jan-jun, 2009. Disponível em: <[http://lejpt.academicdirect.org/A14/019\\_032.pdf](http://lejpt.academicdirect.org/A14/019_032.pdf)>. Acesso em: 5 maio. 2015

ARAKI, M.; TAGUCHI, H. Two-degree-of-freedom PID controllers. **International Journal of Control Automation and Systems**, New York, v. 1, n.4, p. 401–411, dez, 2003. Disponível em: <<http://ijcas.com/admin/paper/files/401-411.pdf>>. Acesso em: 5 maio. 2015

ARROYO, J. E. C. **Heurísticas e metaheurísticas para otimização combinatória multiobjetivo**. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000256530>>. Acesso em: 5 maio. 2015

ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. The future of PID control. **Control Engineering Practice**, New York, v. 9, n.11, p. 1163–1175, jan-jun, 2001. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/09670661/9/11>>. Acesso em: 5 maio. 2015

AYDOGMUS, O.; DENIZ, E.; KAYISLI, K. PMSM drive fed by sliding mode controlled PFC boost converter. **Arabian Journal for Science and Engineering**, p. 1–9, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/09670661/9/11>>. Acesso em: 5 maio. 2015

BAYINDIR et al. PID controlled synchronous motor for power factor correction. In: POWER ENGINEERING, ENERGY AND ELECTRICAL DRIVES INTERNATIONAL CONFERENCE ON IEEE, 1, 2009, 18-20 mar. Coimbra - Portugal. **Anais.... Coimbra-Portugal: POWERENG**, 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/09670661/9/11>>. Acesso em: 5 maio. 2015

BAYINDIR, R.; SAGIROGLU, S.; COLAK, I. An intelligent power factor corrector for power system using artificial neural networks. **Electric Power Systems Research**, Ankara -Turquia, v. 79, n.1, p. 152–160, jan-jun, 2009. Disponível em: <[http://www.researchgate.net/publication/222164562\\_An\\_intelligent\\_power\\_factor\\_corrector\\_for\\_power\\_system\\_using\\_artificial\\_neural\\_networks](http://www.researchgate.net/publication/222164562_An_intelligent_power_factor_corrector_for_power_system_using_artificial_neural_networks)>. Acesso em: 5 maio. 2015

BAYINDIR, R.; SAGIROGLU, S.; ÇOLAK, I. An intelligent power factor corrector for power system using artificial neural networks. E **Electric Power Systems Research**, Ankara -Turquia, v. 79, n.1, p. 152–160, jan-jun, 2009. Disponível em: <[http://www.researchgate.net/publication/222164562\\_An\\_intelligent\\_power\\_factor\\_corrector\\_for\\_power\\_system\\_using\\_artificial\\_neural\\_networks](http://www.researchgate.net/publication/222164562_An_intelligent_power_factor_corrector_for_power_system_using_artificial_neural_networks)>. Acesso em: 5 maio. 2015

COLAK, I.; BAYINDIR, R.; SEFA, I. Experimental study on reactive power compensation using a fuzzy logic controlled synchronous motor. **Energy Conversion and Management**, New York, v. 45, p. 2371–2391, 2004. Disponível em: <[http://www.researchgate.net/publication/223239775\\_Experimental\\_study\\_on\\_reactive\\_power\\_compensation\\_using\\_a\\_fuzzy\\_logic\\_controlled\\_synchronous\\_motor](http://www.researchgate.net/publication/223239775_Experimental_study_on_reactive_power_compensation_using_a_fuzzy_logic_controlled_synchronous_motor)>. Acesso em: 5 maio. 2015

COLAK, I.; BAYINDIR, R.; BAY, O. F. Reactive power compensation using a fuzzy logic controlled synchronous motor. **Energy Conversion and Management**, New York, v. 44, p. 2189–2204, 2003. Disponível em: <[http://www.researchgate.net/publication/222164562\\_An\\_intelligent\\_power\\_factor\\_corrector\\_for\\_power\\_system\\_using\\_artificial\\_neural\\_networks](http://www.researchgate.net/publication/222164562_An_intelligent_power_factor_corrector_for_power_system_using_artificial_neural_networks)>. Acesso em: 5 maio. 2015

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Modern control systems solution manual**. New York: Pearson Education, 1998. Disponível em: <[http://www.cpdee.ufmg.br/~palhares/solution\\_CSL\\_Dorf\\_Bishop.pdf](http://www.cpdee.ufmg.br/~palhares/solution_CSL_Dorf_Bishop.pdf)>. Acesso em: 5 maio. 2015

ENGINEERING VILLAGE. Disponível em: <[www.engineeringvillage2.org](http://www.engineeringvillage2.org)>. Acesso em: 31 out 2014.

FITZGERALD, A. E. et al. **Máquinas elétricas**. 6. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2004.

GARCÍA, R. C.; SUEMITSU, W. I.; PINTO, J. O. P. Precise position control of a PMSM based on new adaptive PID controllers. In: ANNUAL CONFERENCE ON IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY, 37, 2011, 07-10 nov, Melbourne-Austrália. **Proceedings....** Melbourne-Austrália: IECON IEEE, 2012. Disponível em: <[https://www.ieee.org/conferences\\_events/conferences/conferencedetails/index.html?Conf\\_ID=10871](https://www.ieee.org/conferences_events/conferences/conferencedetails/index.html?Conf_ID=10871)>. Acesso em: 5 maio. 2015

HERREROS, A.; BAEYENS, E.; PERÁN, J. R. Design of PID-type controllers using multi objective genetic algorithms. **ISA Transaction**, New York, v. 41, p. 457–472, out, 2002. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019057807601025>>. Acesso em: 5 maio. 2015

HUANG, W.; LAM, H. N. Using genetic algorithms to optimize controller parameters for HVAC systems. **Energy and Buildings**, New York, v. 26, p. 277–282, 1997. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877889700008X>>. Acesso em: 5 maio. 2015

KAHRAMAN, H. T.; BAYINDIR, R.; SAGIROGLU, S. A new approach to predict the excitation current and parameter weightings of synchronous machines based on genetic algorithm-based  $k$ -NN estimator. **Energy Conversion and Management**, New York, v. 64, p. 129–138, 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890412002105>>. Acesso em: 5 maio. 2015

KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e transformadores**. São Paulo: Editora Globo, 1985.

KUMAR, V.; GAUR, P.; MITTAL, A. P. ANN based self tuned PID like adaptive controller design for high performance PMSM position control. **Expert Systems with Applications**, New York, v. 41, p. 7995–8002, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417414003819>>. Acesso em: 5 maio. 2015

LINDEN, R. **Algoritmos genéticos**. 2. ed. São Paulo: Brasport, 2008.

LUGER, G. F. **Artificial intelligence**: structures and strategies for complex problem solving. New York: Pearson Education, 2005.

MAGRI, A. El. et al. An adaptive control strategy for wound rotor synchronous machines. **International Journal of Adaptive Control and Signal Processing**, New York, v. 26, p. 821–847, 2012. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/acs.2271/abstract>>. Acesso em: 5 maio. 2015

MANEDE FILHO, João. **Instalações elétricas industriais**. 8. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2008.

MAMED FILHO, João. **Instalações elétricas industriais**. 7. ed. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos, 2007.

MARKUS, O. **Circuitos elétricos**: corrente contínua e corrente alternada, teoria e exercícios. São Paulo: Érica, 2011.

MATHWORKS. **Software mat lab**. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/>>. Acesso em: 30 mar. 2015

MENDES, R. D. Inteligência artificial : sistemas especialistas no gerenciamento da informação. **Revista Ciência da Informação**, Brasília, v. 26, n.1, jan-abr, 1997. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/acs.2271/abstract>>. Acesso em: 5 maio. 2015

MICHALEWICS, Z. **Genetic algorithms data structures evolution program**, Berlin: Springer, 1996.

MITCHELL, M.; TAYLOR, C. E. Evolutionary computation: an overview. **Annual Review of Ecology and Systematics**, p. 593–616, 1999. Disponível em: <<http://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.ecolsys.30.1.593?journalCode=ecolsys.1>>. Acesso em: 5 maio. 2015

NISE, N.; DA SILVA, F. R. **Engenharia de sistemas de controle**. Rio de Janeiro: Livro Técnico Científico, 2009.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 3.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 1998.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

OTÁVIO MARKUS. **Circuitos elétricos corrente contínua e corrente alternada**. Rio de Janeiro: Érica, 2001.

PACHECO, M. A. C. **Algoritmos genéticos**: princípios e aplicações. Rio de Janeiro. PUC, 1999.

PEREIRA, D. S.; PINTO, J. O. Genetic algorithm based system identification and PID tuning for optimum adaptive control. In: ADVANCED INTELLIGENT MECHATRONICS INTERNATIONAL CONFERENCE ON. IEEE, 2005 2 24-28 jul, Moonterey-CA-USA. **Proceedings...** Moonterey-CA-USA: IEEE/ASME. Disponível em: <[http://www.ieee.org/conferences\\_events/conferences/conferencedetails/index.html?Conf\\_ID=9772](http://www.ieee.org/conferences_events/conferences/conferencedetails/index.html?Conf_ID=9772)>. Acesso em: 5 maio. 2015

PREITL, S. et al. Tuning of 2-DOF fuzzy PI (D) controllers. Laboratory applications. In: COMPUTATIONAL INTELLIGENCE AND INFORMATICS INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON. IEEE, 11, 2010, 18-20 nov, Budapest - Hungary. **Proceedings...** Budapest - Hungary: CINI, 2011. Disponível em: <[https://www.ieee.org/conferences\\_events/conferences/conferencedetails/index.html?Conf\\_ID=18015](https://www.ieee.org/conferences_events/conferences/conferencedetails/index.html?Conf_ID=18015)>. Acesso em: 5 maio. 2015

ROBBINS, A. H.; MILLER, W. **Circuit analysis: theory and practice**. Clifton Park, NY: Cengage Learning, 2012.

ROBBINS, A.; MILLER, W. **Circuit analysis: theory and practice**. Clifton Park, NY: Cengage Learning, 2013.

SAGIROGLU; COLAK, I.; BAYINDIR, R. Power factor correction technique based on artificial neural networks. **Energy Conversion and Management**, New York, v. 47, p. 3204–3215, 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890406000616>>. Acesso em: 5 maio. 2015

SAGIROGLU, S.; ÇOLAK, I.; BAYINDIR, R. Power factor correction technique based on artificial neural networks. **Energy Conversion and Management**, New York, v. 47, p. 3204–3215, 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890406000616>>. Acesso em: 5 maio. 2015

SANTOS, L. Coelho dos. Tuning of PID controller for an automatic regulator voltage system using chaotic optimization approach. **Chaos, Solitons and Fractals**, v. 39, n. 4, p. 1504–1514, fev. 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960077907003967>>. Acesso em: 5 maio. 2015

SANTOS, Edson Simões dos. **Projeto e construção de um controlador adaptativo por realimentação de estados de um pêndulo invertido utilizando inteligência computacional**. 2013, 90f, Dissertação (Mestrado em Inteligência Computacional) - Universidade Candido Mendes, Campos dos Goytacazes, 2013.

SANTOS, Edson Simões dos. P **Projeto e construção de um controlador adaptativo por realimentação de estados de um pêndulo invertido utilizando inteligência computacional**. 2013, 90f, Dissertação (Mestrado em Inteligência Computacional) - Universidade Candido Mendes, Campos dos Goytacazes, 2013.

SANVITO, W. L. Inteligência biológica versus inteligência artificial: uma abordagem crítica. **Arquivos de Neuro-Psiquiatria**, v. 53, n.3, p. 361–368, set, 1995. Disponível em: < [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0004-282X1995000300001](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-282X1995000300001)>. Acesso em: 5 maio. 2015

SCOPUS.. Disponível em: <[www.scopus.com](http://www.scopus.com)>. Acesso em: 31 out 2014.

SESVEREN, O.; BAYINDIR, R. An Intelligent Tool for ANN Based Power Factor Correction. In: MACHINE LEARNING AND APPLICATIONS INTERNATIONAL CONFERENCE ON. IEEE, 12, 2013, 04-07 dez, Miami -FL- USA. **Proceedings...** Miami -FL- USA: ICMLA, 2013. Disponível em: <[http://www.ieee.org/conferences\\_events/conferences/conferencedetails/index.html%3FConf\\_ID%3D30870](http://www.ieee.org/conferences_events/conferences/conferencedetails/index.html%3FConf_ID%3D30870)>. Acesso em: 5 maio. 2015

SHU-QIU, G. et al. Research of PMSM controller based on 2DOF-PID algorithm. In: ELECTRICAL MACHINES AND SYSTEMS INTERNATIONAL CONFERENCE ON. IEEE, 2007, 04-07 out, Seoul - South Korea. **Proceedings...** Seoul - South Korea: ICEMS, 2008. Disponível em: <[http://www.ieee.org/conferences\\_events/conferences/conferencedetails/index.html?Conf\\_ID=12746](http://www.ieee.org/conferences_events/conferences/conferencedetails/index.html?Conf_ID=12746)>. Acesso em: 5 maio. 2015

TLA CAPACITORES. **Catálogo de produtos capacitores TLA**. Disponível em: <<http://www.tlacapacitores.com.br/produtos>>. Acesso em: 30 nov 2014.

TECUCI, G. Artificial intelligence. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics**, New York, v. 4, n.2, p 168–180, mar-abr, 2012. Disponível em: <

ZHANG, J. et al. Self-organizing genetic algorithm based tuning of PID controllers. **Information Sciences**, New York, v. 179, p. 1007–1018, 2009. <<http://www.paper.edu.cn/.../duhaifeng109470-201008-42>>. Acesso em: 5 maio. 2015

**APÊNDICE A: COMBINAÇÕES POSSÍVEIS QUE OS MÓDULOS DE CARGA UTILIZADOS NA SEÇÃO 3.1 PODEM APRESENTAR.**

**Tabela 7:** Combinações Possíveis que os Módulos de Carga Utilizados na Seção 3.1 Podem Apresentar..

Combinação	Valor de Resistência ( $\Omega$ )	Valor de Indutância (H)	Fator de Potência
1	36	0,102	0,68
2	36	0,128	0,60
3	36	0,171	0,49
4	36	0,258	0,35
5	36	0,513	0,18
6	45	0,102	0,76
7	45	0,128	0,68
8	45	0,171	0,57
9	45	0,258	0,42
10	45	0,513	0,23
11	60	0,102	0,84
12	60	0,128	0,78
13	60	0,171	0,68
14	60	0,258	0,53
15	60	0,513	0,30
16	90	0,102	0,92
17	90	0,128	0,88
18	90	0,171	0,81
19	90	0,258	0,68
20	90	0,513	0,42
21	180	0,102	0,98
22	180	0,128	0,97
23	180	0,171	0,94
24	180	0,258	0,88
25	180	0,513	0,68

Fonte: Elaborado pelo Autor (2015)