



**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-  
BRASILEIRA**

**INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (IEDS)**

**CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS**

**ALADJE ADULAI DJALÓ**

**UMA ESTRATÉGIA DE CONTROLE PARA SINCRONIZAÇÃO DE GERADORES  
SÍNCRONOS EM PARALELO**

ACARAPE  
2021

**ALADJE ADULAI DJALÓ**

**UMA ESTRATÉGIA DE CONTROLE PARA SINCRONIZAÇÃO DE GERADORES  
SÍNCRONOS EM PARALELO**

Trabalho de conclusão de curso desenvolvido na Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira do Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energias.

**Orientador:** Prof. Me. Humberto Ícaro Pinto Fontinele.

ACARAPE  
2021

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira  
Sistema de Bibliotecas da UNILAB  
Catalogação de Publicação na Fonte.

---

Djalo, Aladje Adulai.

D653e

Uma estratégia de controle para sincronização de geradores síncronos em paralelo / Aladje Adulai Djalo. - Redenção, 2021. 65f: il.

Monografia - Curso de Engenharia de Energias, Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2021.

Orientador: Prof. Me. Humberto Ícaro Pinto Fontinele.

1. Geradores Síncronos. 2. Sincronismo. 3. Controladores PID.  
I. Título

CE/UF/BSP

CDD 621.3

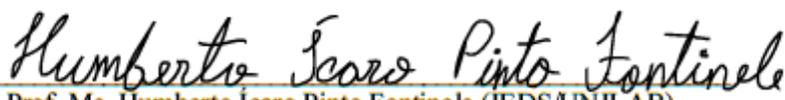
---

**UMA ESTRATÉGIA DE CONTROLE PARA SINCRONIZAÇÃO DE GERADORES  
SÍNCRONOS EM PARALELO**

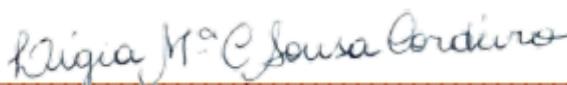
Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Energias da UNILAB como parte dos  
requisitos para obtenção do título  
Bacharel em Engenharia de Energias.

Aprovado em: 09/04/2021

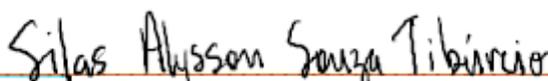
**BANCA EXAMINADORA**



Prof. Me. Humberto Ícaro Pinto Fontinele (IEDS/UNILAB)  
Presidente da Banca Examinadora



Prof.<sup>a</sup> Dra. Ligia Maria Carvalho Sousa Cordeiro  
Membro da Banca Examinadora



Prof. Me. Silas Alysson Souza Tibúrcio (UNI7)  
Membro da Banca Examinadora

## RESUMO

As usinas que alimentam os sistemas elétricos de potência são formadas por grandes grupos de geradores ligados em paralelo. Durante a operação do sistema, ocorre a constante conexão e desconexão dos geradores aos barramentos de alimentação, para equilibrar o fornecimento com a demandam, ou mesmo para rotinas de manutenção. O objetivo geral desse trabalho consiste em propor uma estratégia de controle baseada em controladores PID, para sincronização de geradores síncronos conectados em paralelo. O sistema é modelado e simulado no ambiente Simulink®, onde é realizado o acionamento de dois geradores síncronos, utilizando-se dois motores CC como máquinas primárias. Os controladores PID são projetados e sintonizados pelos métodos de Ziegler-Nichols atuando em uma malha que realiza o ajuste de velocidade e fase para que as máquinas síncronas operem em sincronismo.

**Palavras-chave:** Geradores Síncronos, Sincronismo, Controladores PID.

## **ABSTRACT**

The plants that supply the electrical power systems are formed by large groups of generators connected in parallel. During the operation of the system, there is a constant connection and disconnection of the generators to the power buses, to balance the supply with the demand, or even for maintenance routines. The general objective of this work is to propose a control strategy based on PID controllers, for synchronization of synchronous generators connected in parallel. The system is modeled and simulated in the Simulink® environment, where two synchronous generators are activated, using two DC motors as primary machines. The PID controllers are designed and tuned by the Ziegler-Nichols methods acting on a mesh that performs the speed and phase adjustment so that the synchronous machines operate in synchronism.

**Keywords:** Synchronous Generators, Synchronism, PID Controllers.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: (a) rotor de polos lisos. (b) rotor de polos salientes.	22
Figura 2: Modelo elementar de máquinas síncronas.	23
Figura 3: Circuito equivalente, por fase, do gerador síncrono.	25
Figura 4: Diagrama fasorial com FP unitário.	27
Figura 5: (a) diagrama fasorial para carga indutiva, (b) diagrama fasorial para carga capacitiva.	27
Figura 6: Ligação de gerador em paralelo com barramento infinito.	30
Figura 7: Sequência de fase de dois geradores.	31
Figura 8: Método de lâmpadas para verificação de sincronismo e sequência de fase.	32
Figura 9: Modelo elementar de Máquina CC.	35
Figura 10: Circuito equivalente simplificado de motor cc.	36
Figura 11: Controlador PID atuando em uma planta.	41
Figura 12: Desempenho em regime transitório e permanente.	42
Figura 13: Curva de resposta em forma de S.	44
Figura 14: Oscilação $c(t)$ sustentada, com período Crítico $P_{Cr}$ .	45
Figura 15: Acionamento de Gerador Síncrono por um Motor cc.	47
Figura 16 : Sincronismo dos Geradores 1 e 2.	49
Figura 17: Malha de controle de velocidade.	50
Figura 18: Velocidade do Gerador 1.	52
Figura 19: Velocidade de eixo do Gerador 1, com ampliação no eixo das ordenadas.	52
Figura 20: Diferença de tensão entre fases.	53
Figura 21: Saída função detectora de cruzamento de zeros.	54
Figura 22: Velocidade do Gerador 1.	55
Figura 23: Velocidade Gerador 1 com ampliação da escala das ordenadas	55
Figura 24: Velocidade do Gerador 2.	56
Figura 25: Tensão de linha do Gerador 1.	58
Figura 26: Tensão de linha do Gerador 2.	58
Figura 27: Erro de regime permanente da velocidade dos geradores.	60
Figura 28: Erro de regime permanente da velocidade dos geradores com ampliação da escala das ordenadas.	60



## LISTA DE SIGLAS

IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
PID	Proporcional Integral Derivativo.
SIN	Sistema Interligado Nacional.
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.
SEP	Sistema Elétrico de Potência.
LKT	Lei de Kirchhoff das Tensões.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros de Ziegler-Nichols, primeiro método. ....	44
Tabela 2: Parâmetros de Ziegler-Nichols, segundo método.....	45
Tabela 3: Ganhos dos controladores PID. ....	51
Tabela 4: Tempo de acionamento das chaves. ....	54
Tabela 5: Parâmetros de desempenho do controle de velocidade do Gerador 1, em regime transitório.....	56
Tabela 6: Parâmetros de desempenho do controle de velocidade do Gerador 2, em regime transitório.....	56
Tabela 7: Parâmetros dos geradores síncronos.....	65
Tabela 8: Parâmetros dos motores CC. ....	65
Tabela 9: Osciloscópios.....	65

## LISTA DE SÍMBOLOS

$V$	Volt
$E_{ef}$	Força eletromotriz eficaz.
$e$	Força eletromotriz induzida.
$\omega$	Velocidade angular.
$\Phi$	Fluxo total por polo.
$N$	Número de espiras.
$e_{max}$	Força eletromotriz induzida máxima.
$\omega_s$	Velocidade angular síncrona da máquina.
$f$	Frequência.
$E_A$	Tensão interna.
$\varphi$	Fluxo magnético.
$K$	Constante de aspectos cosntrutivos da máquina.
$V_\phi$	Tensão de terminal.
$V_f$	Tensão de excitação de campo.
$L_f$	Indutância de campo.
$R_f$	Resistencia de campo.
$I_f$	Corrente de campo.
$jX_S$	Reatância síncrona.
$R_A$	Resistência de armadura.
$-jX_{iA}$	Reação de armadura.
$-jX_A i_A$	Autoindutância.
$X_S$	Reatância síncrona.
$V'_\phi$	Tensão terminal defasada.
$\delta$	Ângulo de defasagem entre tensão terminal e tensão interna.
$E'_A$	Tensão interna.
$\theta$	Ângulo de defasagem da corrente em relação à tensão terminal.
$I'_A$	Corrente de armadura incrementada.
$V_{L_A}$	Queda de tensão no bobinamento de armadura.
$L_A$	Indutância de armadura.
$V_T$	Tensão de terminal do gerador.
$G(s)$	Função de transferência de gerador síncrono.
$T$	Torque eletromagnético;

$T_L$	Torque da carga;
$B$	Coefficiente de amortecimento;
$J$	Momento de inércia.
$\omega_{(s)}$	Velocidade da máquina no domínio da frequência.
$V_a$	Tensão média da armadura.
$V_S$	Tensão de entrada.
$K_p$	Constante proporcional.
$K_i$	Constante integradora.
$K_d$	Constante derivativa.
$u(t)$	Sinal de entrada.
$e(t)$	Erro atuante.
$T_i$	Tempo integrativo.
$T_d$	Tempo derivativo.
$y(t)$	Amplitude do sinal de saída.
$r(t)$	Sinal de referência.
$t_s$	Tempo de subida.
$M_o$	Máximo sobressinal.
$P_{Cr}$	Período crítico.
$K_{Cr}$	Ganho crítico.

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.3 MOTIVAÇÃO	17
1.4 METODOLOGIA	18
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
2 PARALELISMO DE MÁQUINAS SÍNCRONAS	20
2.1 MÁQUINA SÍNCRONA	21
2.1.1 A estrutura da máquina síncrona	21
2.1.2 Princípio de funcionamento	22
2.1.3 Circuito equivalente	24
2.1.4 Controle carga-frequência	25
2.1.5 Controle de reativo	26
2.1.6 Modelo da máquina síncrona no domínio da frequência	28
2.2 PARALELISMO DE MÁQUINAS SÍNCRONAS	30
2.3 SISTEMA ELÉTRICO INTERLIGADO	33
3 MÁQUINA CC	34
3.1 ESTRUTURA, PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO E CONFIGURAÇÕES	34
3.2 MODELO DA MÁQUINA CC NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	37
4 CONTROLADOR PID	39
4.1 AÇÃO DE CONTROLE PROPORCIONAL, DERIVATIVO E INTEGRAL	40
4.2 CRITÉRIOS DE DESEMPENHO DE CONTROLE NO DOMÍNIO DE TEMPO	41
4.2.1 Tempo de Subida - $T_r$	42
4.2.2 Máximo Sobressinal	42
4.2.3 Tempo de Pico	43
4.2.4 Tempo de Acomodação	43

4.2.5 Erro de Estado Permanente	43
4.3 MÉTODOS DE SINTONIA PARA CONTROLADOR PID	43
4.3.1 Primeiro Método de Ziegler-Nichols	43
4.3.2 Segundo Método de Ziegler-Nichols	44
5 SIMULAÇÃO	46
5.1 SIMULAÇÃO DO ACIONAMENTO DOS GERADORES	46
5.2 SIMULAÇÃO DO SINCRONISMO DOS GERADORES	48
5.3 MALHA DE CONTROLE DE VELOCIDADE E AJUSTE DE FASE	50
6 RESULTADOS	50
6.1 DESEMPENHO DE REGIME TRANSITÓRIO	51
6.1.1 Análise de velocidade	51
6.1.2 Análise da Tensão gerada	57
6.2 DESEMPENHO EM REGIME PERMANENTE	59
7 CONCLUSÃO	61
7.1 RESUMO DAS CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO	61
7.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
7.3 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.	61
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
APÊNDICE I- CARACTERÍSTICAS DA PLANTA	65

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país enorme em termos territoriais e, segundo a IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), em 2020 o país alcançou uma população de mais de 211 milhões de pessoas. Com esse porte, o país necessita ter um sistema elétrico eficiente, para suprir a crescente demanda de energia elétrica. O país possui um sistema nacional integralizado com o intuito de garantir fornecimento de energia elétrica para toda a população.

O sistema elétrico é caracterizado pela conexão de várias usinas à diversos centros de consumo. As usinas são formadas por geradores conectados em paralelo, fornecendo um barramento de tensão e frequência constantes. Um barramento com um grande número de geradores sincronizados pode ser modelado com precisão como barramento infinito, que é um sistema cuja tensão e a frequência são constantes, independentemente do número de geradores conectados ao barramento e do estado de operação dessas máquinas. Essa suposição é válida quando se considera que a quantidade de energia gerada localmente é desprezível quando comparada com a quantidade de energia disponível na rede.

A máquina síncrona é considerada o melhor equipamento para converter energia mecânica em energia elétrica alternada. Por esse motivo, a maior parte dos sistemas elétricos de potência no mundo utilizam máquinas síncronas para geração de energia, seja através de turbinas a água ou a vapor, ou mesmo através de máquinas de combustão e turbinas eólicas. Outro aspecto positivo é que o comportamento eletromecânico da maioria das máquinas síncronas é praticamente o mesmo, independentemente de sua aplicação. Além desses motivos, o gerador síncrono também é amplamente utilizado em sistemas elétricos de potência pelo fato de permitir facilmente o controle da frequência, tensão e quantidade de reativos gerados. (KRAUSE, 2002, apud MIRANDA, 2018).

Para que um grupo de geradores síncronos possam operar em paralelo é necessário sincronizá-los, ou seja, ajustar os parâmetros de sincronismos (frequência, tensão, fase e sequência de fase). O foco principal desse trabalho é simular um sistema de controle para a operação de geradores síncronos em paralelo, que seja capaz de manter o sincronismo apesar de possíveis variações de carga.

Para garantir que os parâmetros de sincronismo permaneçam dentro de uma faixa segura de velocidade, se faz necessário implementar alguma estratégia de controle que adote o conjugado da fonte primária de excitação de armadura de motor CC como variável controlada.

Nesse trabalho é proposto a simulação de um sistema de controle digital baseado em PID, para sincronizar dois geradores síncronos conectados em paralelo. A proposta é controlar

a sincronização de dois geradores acionadas por motores CC, em configuração de excitação independente.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um sistema de controle capaz de sincronizar geradores síncronos em paralelismo, que seja capaz de manter o sincronismo mesmo com variação de carga no barramento entre os geradores. Esse trabalho não aborda sistemas de proteção ou de comando para conexão de geradores em paralelo.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para se alcançar o objetivo geral foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Definir uma estratégia de controle para sincronização de geradores síncronos em paralelo com um barramento infinito;
- Definir os modelos matemáticos para os elementos que compõem o sistema de controle;
- Simular o sistema de controle no Simulink® utilizando dois geradores conectados em paralelo.
- Sintonizar os controladores PID, utilizando o método Ziegler-Nichols;
- Realizar ajuste fino e analisar a eficiência dos controladores para diferentes condições de carga;

## 1.3 MOTIVAÇÃO

O controle automático é essencial em qualquer campo da engenharia industrial. Ele é intrínseco a qualquer operação industrial que visa segurança ou otimização de sistemas. Com o objetivo de implementar uma estratégia de controle para sincronização de geradores síncronos em paralelo. Esse trabalho traz uma abordagem bibliográfica sobre sistemas de paralelismo de geradores síncronos e os sistemas elétricos interligados, que é uma das principais áreas de atuação do engenheiro de energias. O processo de sincronismo e conexão automática de geradores síncronos em paralelo permite implementar grandes sistemas elétricos de potência ajustar os parâmetros de sincronismo adequadamente e a execução dessa tarefa com maior eficiência, para atender as necessidades e níveis de precisão exigidos em projetos de engenharia.

## 1.4 METODOLOGIA

A realização do presente trabalho baseou-se em pesquisas bibliográficas para definir e desenvolver os objetivos da pesquisa, além da utilização de softwares para elaborar simulações computacionais.

O trabalho consiste na definição de uma estratégia de controle para paralelismo de geradores conectados a barramento infinito e simulação da planta de controle. A simulação é feita no ambiente Simulink®, desenvolvida pela companhia MathWorks. Ela combina programação textual e gráfica para modelagem, simulação e análise do sistema proposto.

A simulação consiste em acionar dois geradores síncronos através de dois motores CC. A velocidade do Gerador 1 é regulada para uma velocidade fixa, através de uma malha de controle PID, enquanto que o Gerador 2 tem a velocidade controlada por duas malhas de controle, uma para regulação de velocidade para a mesma velocidade de referência do gerador 1, e outra para realizar ajuste fino de velocidade para regular o ângulo de fase dos dois geradores. A saída da segunda malha de controle se soma a saída da primeira malha de controle do Gerador 1, permitindo adicionar pequenas variações na velocidade, com o intuito de sincronizar a fase entre os dois geradores. A planta do sistema é apresentada no capítulo 6. Dos geradores síncronos são monitoradas as variáveis de controle, (velocidade do roto e a corrente excitação). O sinal de velocidade é a realimentação de uma malha de controlador PID que tem um valor fixo de velocidade de referência, enquanto a variável manipulada é a tensão de excitação do bobinamento de armadura do motor CC, e a excitação de campo deste é mantida constante.

## 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho é dividido em 7 capítulos, incluindo a introdução. Esses capítulos estão organizados em uma sequência que facilita a compreensão do leitor, conforme descrito a seguir:

- No capítulo 2 discute-se o conceito das condições necessárias para estabelecer paralelismo e o sincronismo entre máquinas síncronas, além de descrever os princípios de funcionamento e a modelagem matemática dessa máquina.
- No capítulo 3 aborda-se a estrutura, os princípios de funcionamento, a modelagem matemática e os métodos de acionamento de motores de corrente contínua.
- No capítulo 4 aborda-se uma breve apresentação dos aspectos e características de um controlador PID. Nesse capítulo são abordados também os critérios de

desempenho de sistemas de controle no domínio do tempo e o método adotado para sintonizar as malhas de controles que compõem o sistema a ser implementado e as ações de controle dos controladores PID.

- No capítulo 5 detalha-se a implementação da simulação do sistema de controle proposto.
- No capítulo 6 apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos, tanto para o regime transiente quanto para o regime estacionário.
- Por fim, no Capítulo 7 são relatadas as conclusões obtidas sobre o trabalho, acompanhadas de sugestões para trabalhos futuros.

## 2 PARALELISMO DE MÁQUINAS SÍNCRONAS

O gerador síncrono funciona como uma fonte de energia elétrica em corrente alternada. Para suprir grandes cargas é necessário um conjunto de geradores ligados em paralelo, de modo a se ter potência adequada para suprir a demanda.

Quando muitos geradores síncronos, são interligados em paralelo operando com a mesma tensão nominal, frequência e ângulo de fase, e que os mesmos não variam, independentemente da potência requisitada para o consumo, o sistema passa a funcionar como um barramento infinito ideal, compartilhando o fornecimento da carga gerada. As principais vantagens de operação de grupo de geradores em paralelo são:

- **Confiabilidade:** é a vantagem principal. Com essa configuração, em casos de necessidade de manutenção de uma ou algumas máquinas, as demais ainda estarão disponíveis para fornecer a potência necessária (MENDES DE OLIVEIRA, MARCOS CORDEIRO JUNIOR, *et al.*, 2010).
- **Eficiência:** quando uma máquina não está operando a plena carga, esta não consegue alcançar a eficiência máxima, elevando o custo de geração. Quando a configuração é composta por vários geradores em paralelo, é possível atender uma vasta faixa de demanda de carga, mantendo o sistema energeticamente eficiente, pois a redução da geração se dá através do desligamento de um determinado número de geradores, em vez do ajuste das máquinas para operarem muito abaixo da plena carga (MENDES DE OLIVEIRA, MARCOS CORDEIRO JUNIOR, *et al.*, 2010).
- **Planejamento:** quando a demanda média do sistema aumenta, há necessidade de aumentar a capacidade de geração para acompanhar o crescimento da demanda, e isso é feito através da ligação de mais geradores no barramento. Para colocar dois ou mais geradores operando em paralelo é necessário sincronizá-los.
- **A interconexão de sistemas elétricos de potência viabiliza o atendimento de grande demanda por energia, especialmente quando os centros de consumo estão localizados a grandes distâncias geográficas, pois quando as instalações de geração de energia elétrica não são conectadas eletricamente, há a necessidade de interconectar sistemas elétricos conforme a demanda. Para isso é necessário conectar os diversos subsistemas em paralelo.**

Para que vários sistemas possam fornecer energia simultaneamente e compartilhar esse fornecimento para uma determinada carga, é necessário que esses subsistemas operem em paralelo no mesmo barramento, ou seja, no mesmo ponto comum de acoplamento. Portanto, o paralelismo de SEP consiste em conectar a saída de dois ou mais barramentos ou unidades de geração de eletricidade no mesmo ponto elétrico (NEVES, 2016).

A princípio não existe nenhum impedimento em realizar o paralelismo se as condições de paralelismo forem atendidas pelas unidades geradoras, para aumentar a capacidade de suprir demandas energéticas, aumentar a confiabilidade e a flexibilidade de operação do sistema como todo.

## 2.1 MÁQUINA SÍNCRONA

A máquina síncrona é um alternador, ou seja, máquina de corrente alternada (CA) capaz de converter energia mecânica de uma fonte primária em energia elétrica, quando opera como gerador. Já quando opera como motor, realiza o processo contrário, convertendo energia elétrica em mecânica.

### 2.1.1 A Estrutura da Máquina Síncrona

As máquinas síncronas são caracterizadas por operar, em regime permanente com o rotor sincronizado com o campo magnético criado pelo estator. Essas máquinas são constituídas essencialmente por dois conjuntos de peças, o estator e rotor, ambos construídos de chapas de aço de baixa relutância magnética (CHAPMAN, 2013).

O estator é a porção externa da máquina, que tem formato cilíndrico, com ranhuras uniformemente espaçadas, onde são colocadas as bobinas, associadas para formar um sistema elétrico polifásico.

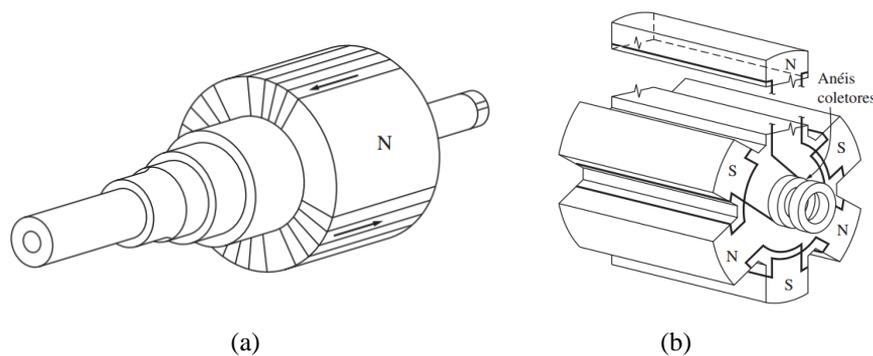
Já o rotor pode assumir dois tipos, conforme sua construção física, os de polos lisos e os de polos salientes. O primeiro tipo é um cilindro liso formado por chapas finas, fabricado em aço elétrico, onde são feitas ranhuras nas quais são alojadas bobinas monofásicas, em que os dois terminais são ligados à anéis deslizantes, chamados de anéis coletores, que entram em contato com escovas de grafite, que por sua vez são conectadas a terminais acessíveis externamente a máquina (JOSÉ, 2016). As suas bobinas formam um número reduzido de polos magnéticos. Este tipo de rotor tem aplicações em que a máquina primária oferece altas velocidade de rotação para o eixo da máquina principal, como por exemplo, turbinas vapor e motores a diesel.

O segundo tipo é o rotor de polos salientes, que possui um número mais elevado de polos que o rotor de polos lisos, eles são aplicados quando a máquina primária não é um acionador de alta velocidade, como por exemplo, turbinas de hidrelétricas e eólicas (KOSOW, 1982).

Quando a máquina primária é um acionador de baixa velocidade, como no caso de turbinas hidráulicas, requer-se que o gerador possua muitos polos, portanto rotores de polos salientes se tornam mais adaptados a essa situação (KOSOW, 1982). Os polos salientes comportam pernas radiais uniformemente espaçados onde são enroladas bobinas que, quando energizadas, formam eletroímãs com norte e sul em sequência. O bobinamento do rotor é também chamado de bobinamento de campo, que é excitado em corrente contínua, para que a máquina produza um conjugado efetivo constante ou gere uma tensão de perfil senoidal.

Na Figura 1 (a) e 1 (b) são apresentados os dois tipos de rotor, o de polos lisos e de polos salientes, respectivamente.

Figura 1: (a) rotor de polos lisos. (b) rotor de polos salientes.



Fonte (CHAPMAN, 2013).

Nas máquinas CA (síncronas e assíncronas), o enrolamento de armadura está no estator, enquanto que o enrolamento de campo encontra-se no rotor, acoplado à anéis coletores que entram em contato com as escovas e que por sua vez são ligadas a uma fonte CC através de terminais externos, para fornecimento da corrente de magnetização do enrolamento de campo, formando um eletroímã que, ao girar, induz uma força eletromotriz de perfil senoidal no enrolamento de armadura (FITGRALD e KINGSLEY'S, 2014).

### 2.1.2 Princípio de funcionamento

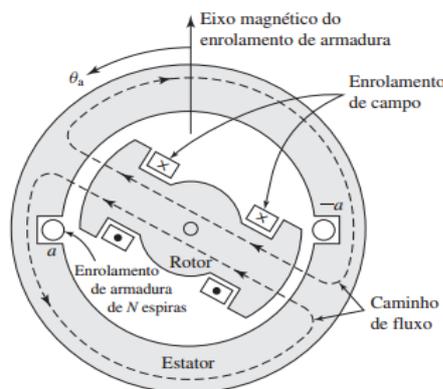
As máquinas síncronas são popularmente usadas como geradores devido às vantagens que ela oferece para esta aplicação, em relação às outras máquinas rotativas, devido a sua capacidade de manter a frequência da corrente alternada fixa, independente da carga que o

gerador está alimentando, desde que o conjugado fornecido ao eixo seja regulado conforme a carga elétrica demandada nos terminais da máquina.

A grande maioria dos geradores de energia elétrica, espalhados pelo mundo, são síncronos, alimentando redes de transmissão que compõem sistemas elétricos de potência (SEP), com tensão e frequência constante. Também são usados em sistemas ilhados, para suprir certa carga em horários de ponta ou, em casos de emergência, sem acesso ao SIN (FITGRALD e KINGSLEY'S, 2014).

Na Figura 2 é mostrada o esquema elementar simples de máquina síncrona monofásica, com dois polos no rotor. Através de anéis deslizantes tem-se acesso aos terminais da bobina do rotor, que é alimentado com corrente contínua. Para operar a máquina como gerador, através de uma fonte primária de torque aciona-se o rotor até a velocidade síncrona, permitindo que o fluxo magnético produzido pela corrente de excitação no rotor induza uma tensão senoidal no estator, conforme a lei de Faraday. Portanto, a frequência de giro do rotor define frequência da tensão gerada pela máquina (FITGRALD e KINGSLEY'S, 2014).

Figura 2: Modelo elementar de máquinas síncronas.



Fonte: (FITGRALD e KINGSLEY'S, 2014).

O giro do rotor excitado produz um campo magnético girante, que por sua vez induz uma força eletromotriz na armadura, com amplitude que pode ser calculada segundo a Equação 1.

$$e = \omega N \Phi \text{sen}(\omega t + \theta) \tag{1}$$

em que:

$\omega$ : velocidade angular da máquina, em radianos por segundo;

$\Phi$ : o fluxo total por polo, em webers;

$N$ : número de espiras;

Quando a parcela  $\text{sen}(\omega t)$  tem valor unitário a FEM induzida alcança o seu valor máximo, cujo seu valor eficaz é  $\frac{e_{\text{máx}}}{\sqrt{2}}$ .

A velocidade síncrona é comumente representada como  $\omega_s$ , que é alcançada em regime permanente, quando o rotor está em sincronia com o campo girante. Essa velocidade é dada pela Equação 2.

$$\omega_s = \frac{120f}{p} \quad (2)$$

Em que  $f$  representa a frequência elétrica, em  $Hz$ , da tensão gerada, e  $p$  corresponde à número de polos da máquina. Essa equação é muito importante para os objetivos traçados nesse trabalho, pois a velocidade da máquina define a frequência gerada, que é uma das variáveis a ser controlado em tarefas de paralelismo de geradores com outros sistemas elétricos.

### 2.1.3 Circuito equivalente

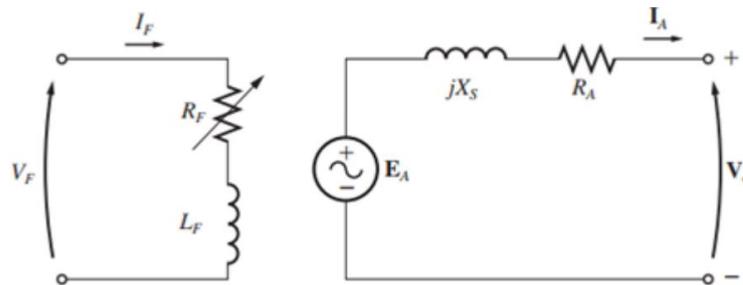
Em condição sem carga, a tensão interna, também chamada de tensão gerada,  $E_A$ , induzida pelo fluxo  $\varphi$  do enrolamento de campo é dada pela Equação 3.

$$E_A = K\varphi\omega \quad (3)$$

Em que  $K$  é uma constante que representa os aspectos construtivos da máquina e velocidade de rotação  $\omega$  do gerador em rad/s. A tensão  $E_A$  é a tensão gerada, que é produzida em uma fase do gerador síncrono. Entretanto, essa tensão  $E_A$  não é aquela que aparece nos terminais do gerador quando este está conectado a uma carga ou a um sistema elétrico, devido à queda de tensão que ocorre na resistência  $R_A$  e reatância síncrona  $jX_S$  da armadura. Quando a máquina funciona a vazio, a tensão interna é igual à tensão de saída, que também é chamado de tensão terminal  $V_\phi$ , de uma fase, pois não há corrente de armadura circulando na máquina (CHAPMAN, 2013).

Na Figura 3 é ilustrado o circuito, por fase, de um gerador síncrono, se as cargas do gerador não estiverem equilibradas, então técnicas de análise mais sofisticadas serão necessárias (CHAPMAN, 2013), o que não é objetivo deste trabalho. No circuito elétrico da esquerda é representado o circuito de campo e no da direita, o circuito de armadura. A tensão CC de excitação do campo  $V_f$  produz a corrente de campo  $I_f$ , no bobinamento de campo que possui, permitindo alterar o nível de tensão gerada. No lado esquerdo, a reatância síncrona  $jX_S$  e a resistência  $R_A$  são pertencentes ao circuito de armadura, sendo o valor da tensão terminal  $V_\phi$  dependente da tensão  $E_A$  gerada.

Figura 3: Circuito equivalente, por fase, do gerador síncrono.



Fonte (CHAPMAN, 2013).

Na condição de operação síncrona, a corrente e o fluxo concatenado nas bobinas de armadura também irão variar no tempo, de forma senoidal, na mesma frequência (FITGRALD e KINGSLEY'S, 2014). Porém, considerando os efeitos de distorção do campo magnético causados pela corrente que flui no estator, chamado de reação de armadura, e representado por  $-jXI_A$ , e a autoindutância das bobinas de armadura,  $-jX_A I_A$ , a tensão interna gerada  $E_A$  não será igual a tensão terminal da máquina  $V_\phi$ . Portanto, a tensão de terminal da máquina,  $V_\phi$ , pode ser calculada pela Equação 4. A reatância síncrona  $X_S = X + X_A$  é a combinação da autoindutância e os efeitos da reação de armadura da máquina, que são ambos representados por reatâncias (CHAPMAN, 2013). Porém, não são apenas os efeitos da reação de armadura e de autoindutância que fazem com que a tensão interna gerada varie em relação a tensão terminal do gerador, mas também os efeitos do tipo de carga (indutiva ou capacitiva), conforme mostrado na Equação 4.

$$V_\phi = E_A - jX_S I_A - R_A I_A \quad (4)$$

### 2.1.4 Controle carga-frequência

A Equação 3 conjugada com a Equação 2 mostra a relação direta e linear que existem entre a frequência elétrica e a velocidade de rotação do rotor. Na Equação 4 é possível notar também que a reação de armadura influencia na variação da tensão gerada, tornando essa diferente da tensão terminal. Por meio da teoria dos campos girantes é possível modelar a relação entre o conjugado produzido ou relutante da máquina e parâmetros como corrente de campo, corrente de armadura, reatância síncrona, constante de projeto, entre outros.

O aumento ou diminuição de carga nos terminais do gerador influencia de forma direta na velocidade do rotor e a tensão terminal da máquina. Isso se dá pela proporcionalidade direta entre tensão interna gerada,  $E_A$ , e o fluxo magnético total  $\phi$ , circulante na máquina, e pela

dependência do fluxo total da corrente de campo que flui no circuito no enrolamento do rotor e da corrente armadura circulante no estator da máquina. Quando a máquina opera em regime permanente, deseja-se manter a frequência constante, mesmo com variação da potência da carga.

O sistema automático de excitação da máquina é composto por um controlador, designado regulador automático de tensão. A função básica de um regulador automático de tensão é ajustar continuamente a tensão interna ou força eletromotriz da máquina síncrona, de modo a manter sua tensão terminal a mais próxima possível do valor desejado, corrigindo quaisquer desvios ocasionados por alterações ou perturbações na rede elétrica à qual a máquina está ligada (OLIVEIRA, 2000).

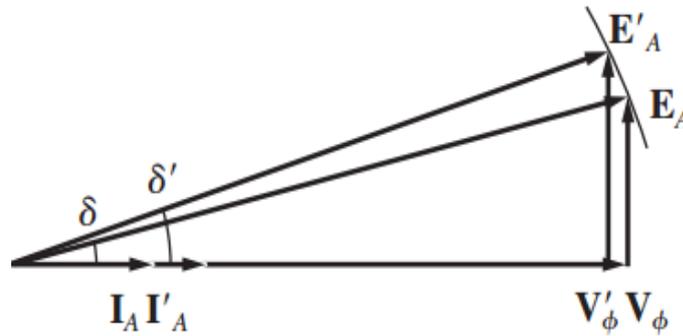
### **2.1.5 Controle de reativo**

A potência aparente nos terminais de um gerador possui duas parcelas, que variam de acordo com o tipo de carga, uma chamada de potência ativa e a outra de potência reativa.

Considerando o gerador síncrono operando isolado ou em paralelo com outro gerador, a sua frequência e tensões de terminal são influenciados pela carga conectada a este sistema, pois o conjugado relutante da máquina depende do fluxo magnético total que circula no ferro da máquina, que por sua vez é influenciado pela corrente de armadura. A variação o fator de potência (FP) da carga, ou seja, a variação da potência ativa ou/e reativa demandada pela carga, altera o valor da corrente de armadura  $I_A$  da carga (MIRANDA, 2018).

Nota-se que, no diagrama apresentado na Figura 4, nas condições em que  $I_A$  é nula,  $V_\phi$  e  $E_A$  são iguais, ao se variar a potência ativa da carga, e conseqüentemente, a corrente de armadura do gerador, verifica-se variação na amplitude da tensão de terminal  $V_\phi$  para  $V'_\phi$  e defasagem do mesmo em relação a tensão gerada  $E_A$  em um ângulo de  $\delta$  graus, porém com  $E_A$  igual a  $E'_A$ , ou seja, têm a mesma magnitude (raio).

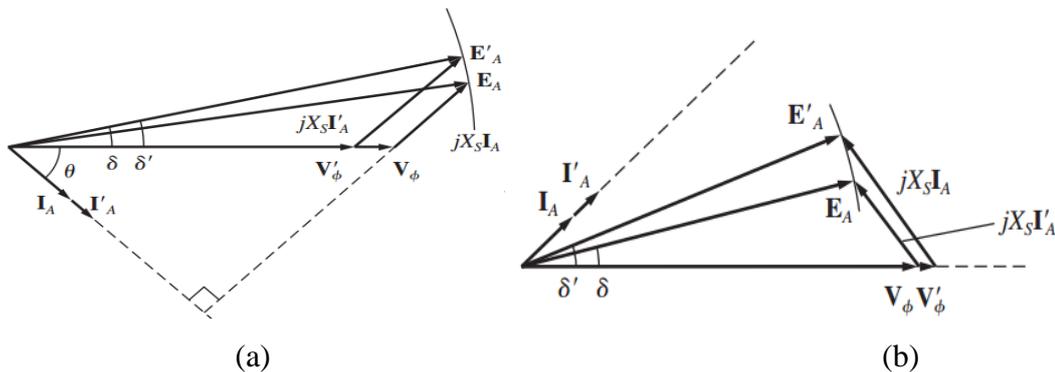
Figura 4: Diagrama fasorial com FP unitário.



Fonte (CHAPMAN, 2013).

A parcela da potência reativa pode assumir duas naturezas, indutiva ou capacitiva. Na Figura 5 (a) e 5 (b), verifica-se um defasamento atrasado de  $I_A$  em relação a  $V_\phi$ , decorrente de carga indutiva, e defasamento adiantado, decorrente de carga capacitiva, com dado ângulo  $\theta$ , respectivamente.

Figura 5: (a) diagrama fasorial para carga indutiva, (b) diagrama fasorial para carga capacitiva.



Fonte (CHAPMAN, 2013).

Para cargas com fator de potência diferente de 1, o tipo de carga influencia tanto no fator de potência do gerador quanto na amplitude de  $V_\phi$  como de  $E_A$ . No diagrama da Figura 5 (a), o atraso de  $I_A$  em relação à  $V_\phi$ , causado pela carga indutiva, e o incremento de  $I'_A$ , provocam a diminuição de  $V_\phi$  para  $V'_\phi$ , o aumento de  $E_A$  para a  $E'_A$  e de  $jX_S I_A$  para  $jX_S I'_A$ . Efeitos opostos ocorrem no diagrama apresentado na Figura 5 (b), para carga capacitiva.

Também pode-se notar que para fator de potência indutivo aumenta-se a corrente de campo para aumentar  $E_A$ , assim como a tensão de saída  $V_\phi$ , enquanto que para fator de potência capacitivo, o efeito é contrário, ou seja, o aumento de corrente de campo provoca a diminuição de  $E_A$ , assim como a tensão de saída  $V_\phi$ .

De acordo com a Equação 3 a tensão gerada varia com a velocidade de rotação do rotor e o fluxo magnético produzido pelo bobinamento de campo. Em aplicações de paralelismo

pretende-se manter a frequência constante, logo a velocidade não deve ser variada. Portanto, quando um gerador síncrono alimenta uma carga, a corrente de campo, que produz o fluxo magnético, é a variável que permite controlar a potência reativa gerada pela máquina.

### 2.1.6 Modelo da máquina síncrona no domínio da frequência

As equações utilizadas para a modelagem do sistema de controle usualmente são representadas no domínio da frequência. Nessa pesquisa as simulações são realizadas no software Matlab<sup>®</sup>, utilizando a ferramenta Simulink<sup>®</sup>, que adota diagrama de blocos com equações de modelagem no domínio da frequência. Por esse motivo adotou-se o modelo da máquina síncrona no domínio da frequência.

A lei de Faraday indica que a variação de fluxo magnético induz campo elétrico e vice versa. Uma consequência dessa lei é o surgimento de uma tensão induzida em uma bobina concentrada, quando submetida a um campo magnético variante no tempo, conforme mostrado na Equação 5.

$$E = \frac{d\lambda}{dt} \quad (5)$$

Onde  $\lambda$  é o fluxo concatenado na bobina. O fluxo magnético concatenado pode ser calculado em termo da corrente necessária para se produzir determinada indutância, como mostrado na Equação 6:

$$L = \frac{\lambda}{i} \quad (6)$$

Substituindo a Equação 5 na Equação 6, obtém-se a Equação 7:

$$E = L \frac{di}{dt} \quad (7)$$

Também surge tensão induzida no rotor da máquina, conforme mostrado na Equação 8, em que  $E_A$  é a tensão induzida na armadura, devido ao fluxo produzido pelo campo e indutância multa armadura-campo é dada por  $L_f$ .

$$E_A = L_{Af} \frac{dI_f}{dt} \quad (8)$$

Da mesma forma é possível calcular a queda de tensão,  $V_{L_A}$ , devido a reatância da armadura, em função da corrente de armadura, através da Equação 9:

$$V_{L_A} = jX_S I_A = L_A \frac{dI_A}{dt} \quad (9)$$

Substituindo as Equações 6 e 7 na Equação 4 e considerando a tensão de fase como a tensão de terminal do gerador ( $V_\phi = V_T$ ), e que a máquina está operando a vazio, obtém-se a Equação 10.

$$L_{Af} \frac{dI_f}{dt} = V_T + L_A \frac{dI_A}{dt} + R_A I_A \quad (10)$$

Aplicando transformada de Laplace na Equação 10, obtém-se a Equação 11.

$$L_{Af} s I_f(s) = V_T(s) + L_A s I_A(s) + R_A I_A(s) \quad (11)$$

A indutância mutua entre armadura e campo  $L_{Af}$  e a indutância do enrolamento de armadura  $L_A$  não variam com o tempo, pois as bobinas são estáticas em relação a corrente que as excita, assim como  $R_A$  não varia no tempo pois é desconsiderada a influência da temperatura na resistência, visto que essa variação é muito lenta quando comparada com a variação das outras variáveis (MIRANDA, 2018).

Como a corrente de campo depende da tensão aplicada no enrolamento do rotor e da impedância campo, enquanto que a corrente de armadura depende da carga  $Z_L$  conectada nos terminais do gerador síncrono e da tensão induzida na armadura (MIRANDA, 2018). A corrente de campo é dada pela Equação 12.

$$I_f = \frac{V_f}{R_f + L_f} \quad (12)$$

A corrente de armadura é dependente da a impedância da bobina da armadura, e é dada pela Equação 13.

$$I_A = \frac{V_T}{Z_L} \quad (13)$$

Substituindo as Equações 12 e 13 na Equação 11, obtém-se a Equação 14.

$$L_{Af} s \frac{V_f}{R_f + L_f}(s) = V_T(s) + L_A s \frac{V_T}{Z_L}(s) + R_A \frac{V_T}{Z_L}(s) \quad (14)$$

A partir da a Equação 14 se obtém-se a função de transferência  $G(s)$  do gerador síncrono (Equação 15), que representa a relação entre a tensão de saída  $V_T$  e a tensão de campo  $V_f$ .

$$G(s) = \frac{V_T(s)}{V_f(s)} = \frac{\frac{L_{Af} Z_L}{R_f L_A} s}{s + \frac{R_A + Z_L}{L_A}} \quad (15)$$

## 2.2 PARALELISMO DE MÁQUINAS SÍNCRONAS

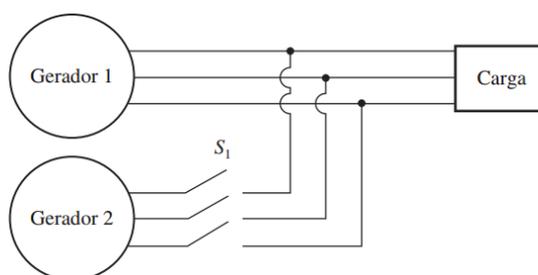
Um sistema elétrico de potência funciona como muitos geradores operando em paralelo. Para que dois ou mais geradores sejam conectados em paralelo é necessário sincronizá-los. O conceito de sincronismo abordado nessa seção considera uma máquina trifásica, embora o raciocínio seja aplicável a geradores monofásicos e bifásicos, ou até mesmo com número de fases múltiplos de 3, desde que as considerações e os cálculos sejam feitos pelo número de fases existentes na máquina (KOSOW, 1982).

Para que a sincronização entre um ou mais geradores síncronos e a rede ocorra de forma eficiente, é necessário que todas as seguintes condições sejam satisfeitas.

1. As tensões eficazes nos terminais do gerador e no barramento da rede devem ser idênticas ou bem próximas;
2. A frequência da tensão de ambos tem que ser igual;
3. As fases e a sequência de fase delas têm que ser iguais.

Na Figura 6 é ilustrado o Gerador 1 com tensão eficaz terminal  $E_{ef1}$  conectado a uma carga. Pretende-se ligar o Gerador 2 com tensão eficaz terminal  $E_{ef2}$  ao barramento trifásico, mas para isso a chave  $S_1$  só deverá ser fechada quando as condições de sincronismo forem satisfeitas.

Figura 6: Ligação de gerador em paralelo com barramento infinito.



Fonte: (CHAPMAN, 2013).

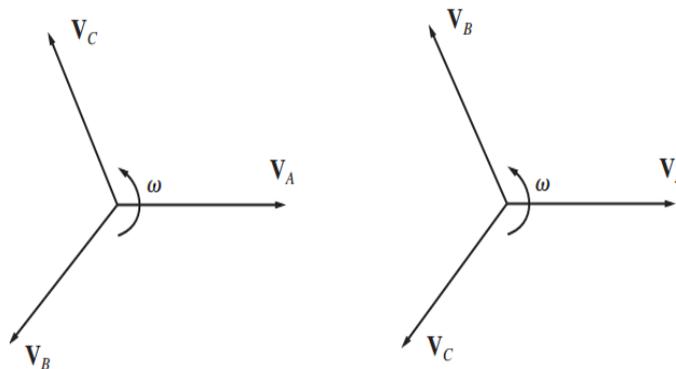
A primeira condição a ser satisfeita é a igualdade entre tensões de terminal dos dois geradores, portanto,  $E_{ef1} = E_{ef2}$ . Satisfeita esta condição, deve-se observar a frequência de ambas.

Na prática, a frequência do Gerador 2 tem que ser ligeiramente superior que a frequência Gerador 1, pois ocorrerão grandes transitórios de potência até que a velocidade se estabilize com frequência de referência (CHAPMAN, 2013). Quando o Gerador 2 está com uma frequência menor do que o Gerador 1, ele passa a consumir energia do sistema, funcionando como motor, portanto essa situação de ve ser evitada.

Logo que as frequências se tornarem aproximadamente iguais, a o ângulo de fase entre as tensões dos dois sistemas se alterará muito vagarosamente, porque o barramento entregará ou receberá potência fazendo com que o gerador volte aos parâmetros preestabelecidos. As variações da fase da tensão gerada são monitoradas e, quando os ângulos de fase forem iguais, a chave que conecta os dois sistemas pode ser fechada (CHAPMAN, 2013).

A condição 3 exige que as tensões nos terminais dos geradores estejam em fase e sigam a mesma sequência. Na Figura 7 é mostrado o diagrama fasorial de tensões de dois geradores com sincronismo da fase A, porém com sequenciamento de fases distintos.

Figura 7: Sequência de fase de dois geradores.

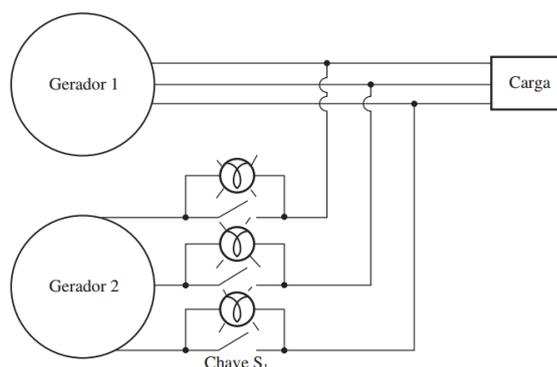


Fonte (CHAPMAN, 2013).

A sequência de fase do primeiro diagrama é no sentido ACB, e a sequência no segundo diagrama é no sentido ABC. Supondo que a primeira sequência corresponde ao do Gerador 1 e a segunda ao Gerador 2, nessas condições, se os dois geradores forem ligados, correntes muito elevadas circularão nas fases B e C, pois existirá um curto entre essas fases, o que pode causar danos severos aos geradores. No entanto, o enrolamento da fase A não sofrerá nenhum dano, pois, sabendo que a velocidade angular  $\omega$ , dos dois geradores é a mesma e, portanto, a fase A do Gerador 1 permanecerá em sincronismo com a fase A do Gerador 2. Eis a importância dessa condição para paralelismo de geradores.

Para práticas didáticas, tradicionalmente usa-se o método das lâmpadas para identificar a sequência de fase e o sincronismo entre geradores. O método consiste em ligar três lâmpadas como mostrado na Figura 8.

Figura 8: Método de lâmpadas para verificação de sincronismo e sequência de fase.



Fonte (CHAPMAN, 2013).

Assim, se o período em que todas as lâmpadas estão ligadas ou todas desligadas for igual, significa que os dois geradores seguem a mesma sequência de fase. Quando as três lâmpadas estiverem apagadas, a diferença de tensão entre elas é zero, e isso significa que os dois sistemas estão em fase. Esse esquema simples funciona, mas não é muito preciso, o que o torna viável apenas para aplicações didáticas (CHAPMAN, 2013).

Como evolução ao método de sincronização por meio de lâmpadas, foi desenvolvido um equipamento chamado de “sincronoscópio de ponteiro polarizado”. Basicamente o instrumento possui um ponteiro girante que, depende da diferença de frequência entre fases dos sistemas, gira no sentido horário ou anti-horário, indicando a defasagem angular entre a tensão dos dois sistemas, e possuindo uma posição central que indica a equalização de frequências (SILVA, 2007).

Com o passar do tempo e o constante desenvolvimento tecnológico da eletrônica analógica e digital, este princípio de funcionamento se tornou ultrapassado do ponto de vista tecnológico. Por isso, nos sincronizadores atuais utilizam-se microcontroladores para a execução dessa tarefa com maior eficiência, para atender as necessidades e níveis de precisão exigidos em projetos de engenharia moderna (SILVA, 2007).

Uma sincronização automática deve permitir ajustar os parâmetros de sincronismo adequadamente. Uma má sincronização pode causar distúrbios no sistema de energia, além de graves danos ao gerador e ao sistema de elétrico, danificando o gerador devido a esforços mecânicos causadas por rápidas acelerações e desacelerações. Além disto, causa correntes elevadas, que podem gerar danos aos transformadores, linhas de transmissão e ao próprio gerador. Na falta de esquemas de proteção, essas falhas podem se propagar na rede e prejudicar outros geradores, resultando em um processo em cadeia que pode culminar em um apagão (MAHMOOD, AZAM, *et al.*, 2019).

## 2.3 SISTEMA ELÉTRICO INTERLIGADO

Cada país tem suas especificações do padrão do sistema elétrico de potência. Na Guiné-Bissau e no Brasil, por exemplo, a frequência da rede elétrica é de 60Hz, porém, em alguns países europeus e orientais, como França e Japão, adota-se a frequência de 50Hz como padrão. Além da frequência, a tensão de fornecimento de energia elétrica tem que ser padronizada. Geralmente se adota o padrão de 110V ou 220V nas redes de distribuição secundária. Raramente o fornecimento de energia elétrica é de 230V e 240V, como no caso de França e Nigéria (SADIKU, MUSA e ALEXANDER, 2014). No entanto o que define o nível de tensão é o comprimento da linha ou a porção do sistema (transmissão e distribuição).

O Brasil possui um dos sistemas elétricos mais complexos do mundo. Com um vasto território, de 8.511.000 km<sup>2</sup>, a necessidade de garantir a disponibilidade de energia elétrica para toda a população não é uma tarefa fácil. Isso é possível pela interconexão de subsistemas elétricos por meio de uma malha de transmissão, que propicia a transferência de energia entre subsistemas.

O Sistema Interligado Nacional (SIN) é constituído por quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte. O sistema integrado permite a obtenção de ganhos sinérgicos e explora a diversidade entre os regimes hidrológicos das bacias (ANEEL, 2014).

Em 1998, o Brasil ainda era um país com uma quantidade significativa de sistemas elétricos desconectados isolados do SIN, o que dificultava uma operação eficiente do sistema de geração de energia nas bacias hidrográficas espalhadas ao redor do país. Por isto, com o intuito de ampliar a confiabilidade de geração de energia elétrica, otimizar os recursos energéticos e homogeneizar os mercados, o SIN foi criado, sendo este responsável pelo fornecimento da energia demandada pelo país (VASCOCELOS, 2017).

A agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) define o SIN como um “conjunto de instalações e de equipamentos que possibilitam o suprimento de energia elétrica para as diversas regiões do país, interligadas eletricamente, conforme regulamentação aplicável”.

O SIN é vantajoso para um país como o Brasil, porque propicia a transferência de energia entre os subsistemas das diferentes regiões do país, respeitando a sazonalidade das bacias hidrológicas que compõem a maior parte da capacidade instalada de geração de energia no país. O sistema possibilita que haja intercâmbio de energia de pontos com produção insuficiente e pontos com produção favorável (VASCOCELOS, 2017).

### 3 MÁQUINA CC

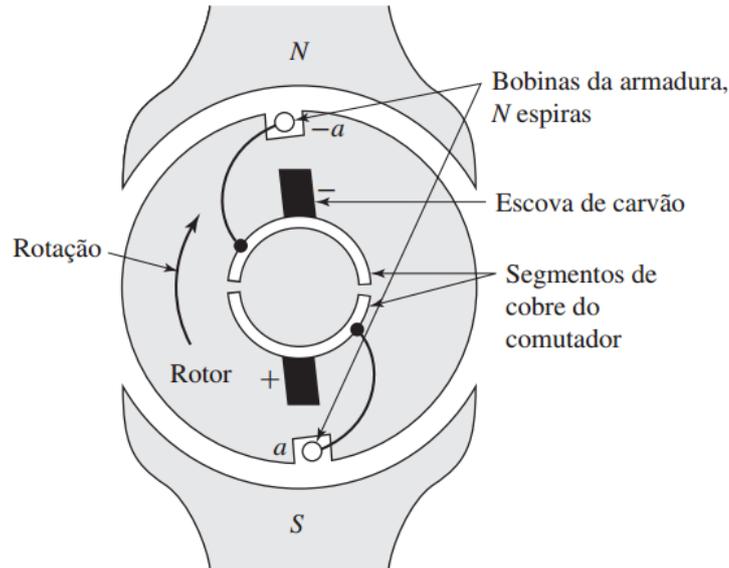
Para o entendimento da dinâmica de controle de velocidade da máquina de corrente contínua, que neste projeto é adotada como fonte primária de torque para os geradores síncronos, é importante antes conhecer sua estrutura geral, seus princípios básicos de funcionamento, suas possíveis configuração de ligação elétrica, e como essas configurações influencia na dinâmica de operação desta máquina.

#### 3.1 ESTRUTURA, PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO E CONFIGURAÇÕES

Na máquina CC, diferentemente das máquinas de indução e síncronas, as bobinas de campo e de armadura encontram-se no estator e no rotor, respectivamente. As bobinas de armadura, são acessíveis externamente à máquina através de um mecanismo de contato mecânico, por meio de um conjunto formado por anéis coletores e escovas. Tanto o bobinamento de campo quanto o de armadura são alimentados por corrente contínua, que é fornecida através de fonte externa, também acessíveis externamente.

Na Figura 9 é ilustrada uma vista frontal de corte, que mostra tanto o rotor quanto o estator representando o modelo elementar da maquina CC, com representação de dois polos no estator e uma bobina no rotor. Em uma das extremidades do eixo da máquina estão os anéis coletores, isolados entre si. O comutador, localizado no rotor é responsável por realizar a inversão do sentido das correntes que circulam no enrolamento de armadura, através de escovas de carvão e anéis coletores, compondo assim um sistema mecânico de retificação de CA para CC.

Figura 9: Modelo elementar de Máquina CC.



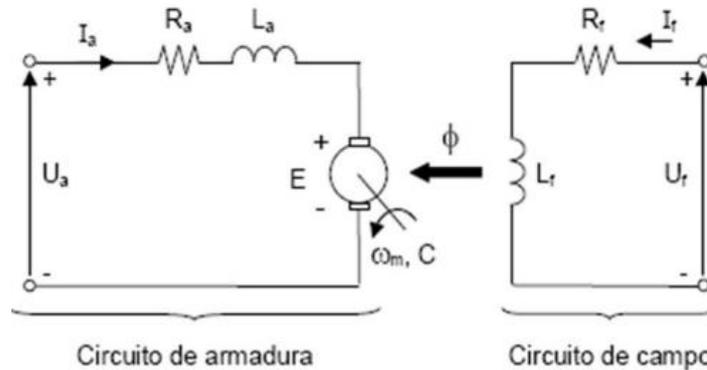
Fonte (FITGRALD e KINGSLEY'S, 2014).

A corrente contínua no enrolamento de campo de uma máquina CC cria uma distribuição estacionária de fluxo magnético, em relação ao estator. De modo similar, o efeito do comutador é tal que, quando uma corrente contínua flui através das escovas, a armadura cria uma distribuição de fluxo magnético que também é fixa no espaço e cujo eixo, determinado pelo projeto da máquina e pela posição das escovas, é normalmente perpendicular ao eixo do fluxo de campo (FITGRALD e KINGSLEY'S, 2014).

A interação da distribuição do fluxo de campo e armadura cria o conjugado da máquina. Se a máquina estiver atuando como gerador, esse conjugado opõe-se à rotação, já se estiver atuando como motor, o conjugado eletromecânico atua no sentido da rotação (FITGRALD e KINGSLEY'S, 2014).

O circuito equivalente simplificado de motor CC é mostrado na Figura 10, em que a queda de tensão nas escovas é incorporada na resistência de campo  $R_F$ .

Figura 10: Circuito equivalente simplificado de motor cc.



Fonte (SANTOS, 2017).

A principal vantagem dessas máquinas é a variedade de tipos de configurações possíveis para a excitação de campo, permitindo controle de velocidade (paralelo) e independente, torque (série) e ambos os dois ao mesmo tempo (paralelo/série) (CHAPMAN, 2013).

Nesse trabalho escolheu-se a configuração independente, em que o circuito de campo e de armadura são alimentados a partir de fontes independentes de tensão. Assim, se a tensão  $V_A$  for incrementada, a corrente de armadura  $I_A$  aumenta, à medida que a corrente de armadura aumenta o conjugado induzido também aumenta, fazendo a velocidade do eixo da máquina aumentar (CHAPMAN, 2013).

O circuito equivalente simplificado de motor CC, mostrado na Figura 10, representa a configuração de excitação independente. A equação da lei de Kirchhoff das tensões (LKT) para o circuito de armadura é dada pela Equação 16:

$$U_a = E + I_A R_A + L_a \frac{di_a}{dt} \quad (16)$$

Essa configuração apresenta uma boa regulação de velocidade pois quando se aumenta a carga até ultrapassar a capacidade do conjugado da máquina no eixo de um motor CC independente, o conjugado interno excederá o conjugado induzido da máquina e o motor começará a perder velocidade. Quando isso acontece, a tensão interna gerada diminui e, conseqüentemente, a corrente de armadura do motor  $I_A$  aumenta. Ao aumentar a corrente de armadura, o conjugado induzido cresce até ficar maior que o conjugado de interno (CHAPMAN, 2013).

### 3.2 MODELO DA MÁQUINA CC NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

A dinâmica de um motor de corrente contínua pode ser derivada das equações elétricas do circuito e mecânicas do movimento (SANTOS, 2017). Aplicando a lei de Kirchhoff ao circuito da armadura apresentado na Figura 10, obtemos a relação apresentada na Equação 17.

$$U_a = E + l_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a \quad (17)$$

Existe uma relação eletromecânica diretamente proporcional da corrente de armadura e a velocidade angular, com relação ao torque ou conjugado gerado e a tensão gerada respectivamente (SANTOS, 2017) conforme é descrito nas Equações 18 e 19.

$$\tau_{ind} = k\phi i_a \quad (18)$$

$$E_A = k\phi\omega \quad (19)$$

Das equações acima é possível explicar a relação entre  $E_A$  e  $\tau_{ind}$ , porque a diminuição de fluxo  $\phi$  causa uma queda instantânea na tensão gerada interna, o que leva a um grande aumento de corrente de armadura na máquina, e resulta no crescimento do conjugado induzido (SANTOS, 2017) em regime permanente de operação, o conjugado induzido se iguala com o conjugado interno. Assim, pode-se definir a dinâmica do movimento do eixo do motor pela Equação 20.

$$Jm \frac{d\omega}{dt} + b\omega = k\phi i_a \quad (20)$$

A partir da Equação 19 pode-se reescrever a Equação 17 na forma da Equação 21.

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a = U_a - k\phi\omega \quad (21)$$

Desta forma se obtêm uma expressão que relaciona a entrada elétrica do circuito, a tensão  $U_a$ , e a saída mecânica do circuito, a posição do eixo do rotor do motor,  $\theta$ , substituindo  $\frac{d\theta}{dt} = \omega$ , e aplicando-a nas Equações 20 e 21, obtêm-se as equações 22 e 23, respectivamente.

$$J_m \frac{d^2\theta}{dt^2} + b \frac{d\theta}{dt} = k\phi i_a \quad (22)$$

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a = U_a - k\phi \frac{d\theta}{dt} \quad (23)$$

Aplicando transformada de Laplace nas Equações 22 e 23, considerando condições iniciais nulas, obtém-se as Equações 24 e 25:

$$J_m s^2 \theta(S) + bs\theta(S) = LI(S) \quad (24)$$

$$LsI(S) + RI(S) = U(S) - Ks\theta(S) \quad (25)$$

Substituindo  $I(S)$  da Equação 24 na Equação 25, tem-se:

$$\left[ \frac{J_m s^2 \theta(S) + bs\theta(S)}{K} \right] (Ls + R) = U(S) - Ks\theta(S) \quad (26)$$

Fazendo todas as simplificações algébricas necessárias, encontra-se a equação que representa o modelo matemático de um motor de corrente contínua que relaciona a tensão de entrada do circuito a velocidade do eixo do rotor conforme mostrado na Equação 27.

$$\frac{v(S)}{U(S)} = \frac{K}{J_m L s^2 + (J_m R + bL)s + (bR + k^2)} \quad (27)$$

#### 4 CONTROLADOR PID

Um sistema de controle é a interconexão de componentes, formando uma configuração de planta que proporciona uma saída desejada. A base de análise de um sistema é providenciada pela teoria de sistemas lineares se passar por processo de linearização, que assume uma relação de causa e efeito para os componentes (SANTOS, 2017).

Qualquer sistema de controle deve ser estável e sua resposta à um dado estímulo de entrada, desde que o estímulo de entrada seja constante e finito. A resposta que o sistema apresenta após o instante de aplicação do estímulo de entrada até o momento em que essa saída se estabiliza em um certo valor, pode ser dividida em duas fases: transitória e regime permanente. A resposta transitória é um período que decorre desde a aplicação de uma nova entrada ao sistema, até o momento em que sua saída se acomoda em faixa estreita em relação a um valor de referência (BEZERRA, 2007). E o regime permanente é a resposta do sistema após a acomodação da saída.

Os sistemas controle são implementados através de controladores, que são responsáveis por comparar o valor real da saída da planta com a entrada de referência, e fornecer uma ação de controle que reduzirá o erro entre o valor de referência e o valor real a zero, ou a mais próximo de zero possível (OGATA, 2010).

Neste trabalho implementou-se uma malha de controle PID, em configuração paralelo, para controlar o sinal de referência da tensão e corrente de excitação de armadura da máquina CC. A corrente de armadura define o conjugado produzido pelo motor CC, que aciona o gerador síncrono. Logo, existe uma relação direta entre a corrente de excitação da armadura e o nível e a frequência da tensão gerada.

Embora o objetivo desse trabalho não seja estudar as especificidades dos controladores PID, é importante compreender as ações de controle básicas desse tipo de controlador, para um melhor entendimento da sua aplicação.

O controlador PID é um dos controladores típicos mais conhecidos e usados na prática, letras P, I e D fazem referência os termos proporcional-integral-derivativo esse tipo de controlador é frequentemente empregados no controle de processos industriais de diferentes naturezas física (Bezerra 2007). Ele é composto pela soma de três parcelas de realimentação: uma proporcional do erro, uma integral do erro e uma derivativa do erro, e cada uma é definida por uma constante de ganho:  $K_p$ ,  $K_i$ , e  $K_d$  respectivamente. Na literatura existem vários métodos para a determinação desses constantes, para se obter um determinado comportamento desejado para o sistema controlado.

#### 4.1 AÇÃO DE CONTROLE PROPORCIONAL, DERIVATIVO E INTEGRAL

Na ação de controle da parcela proporcional, a relação entre a saída de um dado sinal  $u(t)$  e o erro atuante  $e(t)$  é dada pela Equação 28.

$$u(t) = K_p e(t) \quad (28)$$

A ação desse ganho é diretamente proporcional a saída. Portanto, a transformada de Laplace da Equação 28 é dada pela Equação 29:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (29)$$

Para a ação de controle integral, o valor da saída,  $u(t)$  do controlador é modificado a uma taxa de variação proporcional ao sinal de erro atuante  $e(t)$  aproximando o erro ao sinal de referência, como pode ser visto na Equação 30.

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t) \quad (30)$$

Integrando nos dois lados teremos a relação da Equação 31.

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (31)$$

A transformada de Laplace da equação 31 é dada pela Equação 32

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (32)$$

A ação de controle derivativo corresponde a aplicação de um sinal de controle,  $u(t)$ , proporcional a derivada do sinal de erro atuante no sistema, como é mostrado na Equação 33.

$$u(t) = T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (33)$$

Em que  $T_d$  é o tempo derivativo. A função de transferência dessa ação de controle é dada pela Equação 34.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = T_d(s) \quad (34)$$

Observa-se que este tipo de função de transferência implica em um ganho que cresce com o aumento da frequência, fato este que deixa o sistema extremamente sensível a ruídos de alta frequência (BEZERRA, 2007).

Portanto, a ação de controle proporcional-integral-derivativo paralelo é dada pela Equação 35.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt + K_d T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (35)$$

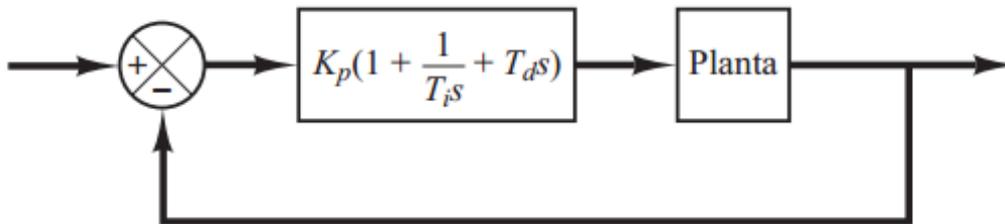
A função de transferência do controlador PID paralelo é dada pela Equação 36.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (36)$$

Em que  $T_i$  é o tempo integrativo. O diagrama de blocos de um controlador proporcional-integral-derivativo paralelo é mostrado na Figura 11.

Na Figura 11 é ilustrada malha de controle PID atuando em uma planta. Trata-se de um sistema de controle em malha fechada, onde o primeiro bloco corresponde ao somador do valor de referência como o negativo do erro proveniente da malha de realimentação. O segundo bloco é o controlador PID, seguido do bloco da planta. Muitos métodos de sintonia de controladores PID requerem um modelo matemático para a planta controlada.

Figura 11: Controlador PID atuando em uma planta.



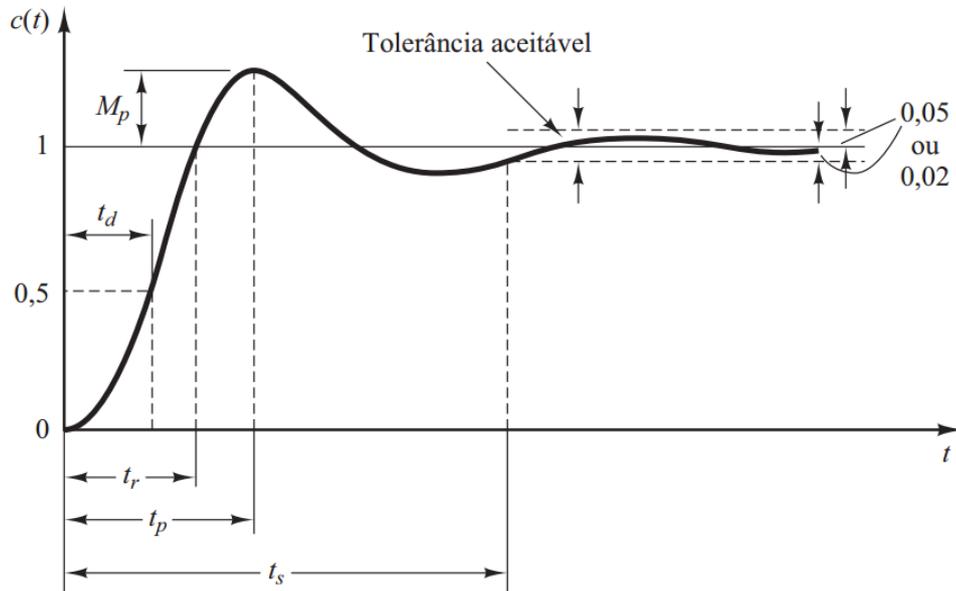
Fonte: (OGATA, 2010).

Quando o modelo matemático da planta é desconhecido, é necessário aplicar algum método experimental, como o de Ziegler-Nichols. Nesse trabalho a planta dos geradores é desconhecido isso é adotado o segundo método de Ziegler-Nichols.

#### 4.2 CRITÉRIOS DE DESEMPENHO DE CONTROLE NO DOMÍNIO DE TEMPO

Classicamente, desempenhos no transitório e em regime permanente têm sido usados para especificar precisão e velocidade de resposta de sistemas, assim como outros critérios de desempenho de sistemas (GARCIA, 2014). Geralmente, a resposta ao degrau é empregue para a avaliação de desempenho de sistemas no domínio do tempo. A seguir serão discutidos alguns parâmetros de avaliação de resposta ao degrau do sistema de controle, conforme é mostrado na Figura 12.

Figura 12: Desempenho em regime transitório e permanente.



Fonte: (OGATA, 2010).

#### 4.2.1 Tempo de Subida - $T_r$

O tempo de subida  $t_r$  é definido como o tempo transcorrido do instante de excitação do sistema até o instante em que a saída alcança pela primeira vez o valor de referência. O tempo de subida é um indicativo de quão rápido reage o sistema a aplicação de um degrau em sua entrada. Muitas vezes, a redução excessiva do tempo de subida de um sistema, a partir da sintonia dos parâmetros de um controlador, pode provocar o aparecimento de um alto sobressinal. Isto explica-se intuitivamente pelo fato de o sistema ser "acelerado" de tal maneira que é difícil de "freia-lo", o que leva a saída a ultrapassar de maneira significativa o valor da entrada (SILVA, 2000).

#### 4.2.2 Máximo Sobressinal

Supondo que o valor da saída ultrapasse o valor da referência, o máximo sobressinal  $M_p$  é definido como o valor do pico máximo da curva de resposta no período transitório, geralmente referenciado em termo percentual. Se a saída não ultrapassa o valor da entrada, o sobressinal máximo é, por definição, igual a zero (SILVA, 2000). Portanto, o sobressinal é calculado, em termos percentuais, pela Equação 37.

$$M_p = \frac{M_p}{c(\infty)} \times 100\% \quad (37)$$

### 4.2.3 Tempo de Pico

É o tempo necessário para a resposta do sistema atingir o primeiro pico sobressinal, que no gráfico é representado como  $t_p$ . Ele é inversamente proporcional a frequência natural não amortecida do sistema.

### 4.2.4 Tempo de Acomodação

O tempo de acomodação  $t_s$  é o tempo necessário para que a resposta entre e permaneça dentro de uma faixa percentual admissível em torno do valor de referência. Em regime permanente, usualmente é adotada uma faixa percentual de 3 ou de 5%. Se o sistema for de segunda ordem ou de ordem maior, antes da resposta atingir a acomodação, ela oscila como sinal senoidal multiplicado com uma exponencial decrescente até estabilizar-se dentro de uma dada faixa desde que o sistema seja estável. Isso acontece um pouco antes do sistema entrar em regime permanente (SILVA, 2000), isso pode ser observado na Figura 12.

### 4.2.5 Erro de Estado Permanente

Em regime permanente almeja-se que o valor de saída do sistema seja igualado ao valor de referência. Geralmente isso não acontece na prática, havendo sempre um erro entre os dois, o que é chamado de erro de estado permanente. O sistema de controle buscará manter esse erro constante, corrigindo-o sempre que haja perturbações externas para o sistema (SILVA, 2000).

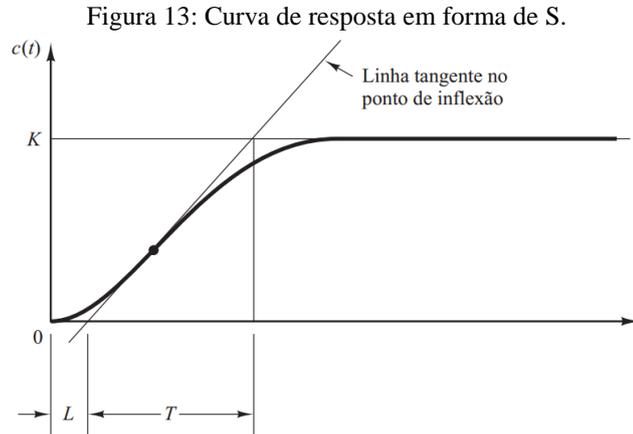
## 4.3 MÉTODOS DE SINTONIA PARA CONTROLADOR PID

O processo de selecionar parâmetros do controlador que garantam dada especificação de desempenho é conhecido como sintonia do controlador (OGATA, 2010). Existem vários métodos de sintonia de controladores PID. Neste trabalho adotou-se método de Ziegler-Nichols, que consiste basicamente em determinar os ganhos dos controladores PID experimentalmente ou por simulações dinâmicas da planta. Esse método é dividido em dois, que são conhecidas como: o primeiro método e segundo método, que são descritos a seguir:

### 4.3.1 Primeiro Método de Ziegler-Nichols

O primeiro método é aplicável quando a função de transferência da planta a ser controlada possui polos negativos, que leva o sistema a uma resposta estável para uma entrada em degrau finito. Neste caso a saída tem aspecto de uma curva em forma de S, como é mostrado na Figura 13. Nesse gráfico, os parâmetros analisadas são o atraso  $L$  e a constante de tempo  $T$ .

O atraso e a constante de tempo são determinados desenhando-se uma linha tangente no ponto de inflexão da curva com o formato em S e determinando-se a intersecção da linha tangente com o eixo dos tempos e a linha  $c(t) = K$  (OGATA, 2010) como é mostrado na Figura 13.



Fonte: (OGATA, 2010).

Com a determinação do atraso e a constante de tempo, pode-se estimar os valores de  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$ , conforme a Tabela 1, sugerida por Ziegler-Nichols. Os resultados encontrados são apenas estimativas dos valores mais próximos da sintonia otimizada do controlador. Com isso podem-se calcular os valores de  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$ .

Tabela 1: Parâmetros de Ziegler-Nichols, primeiro método.

Tipo de controlador	$K_p$	$K_i = \frac{1}{T_i s}$	$K_d = T_d s$
P	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
PI	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{2}$	$0,5L$

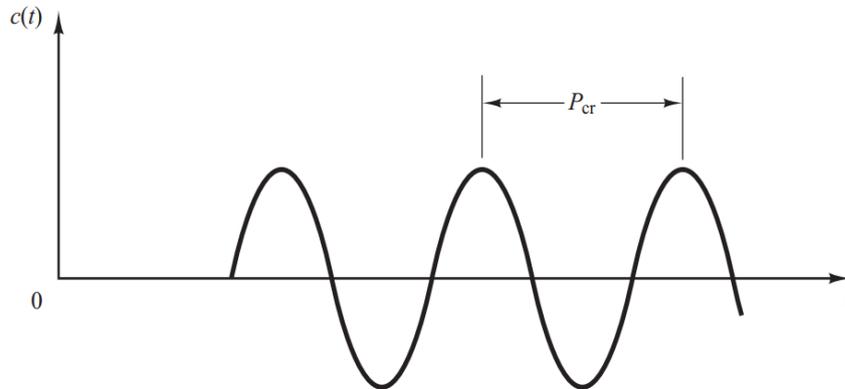
Fonte: (OGATA, 2010).

#### 4.3.2 Segundo Método de Ziegler-Nichols

O segundo método é aplicado à sistemas cujos polos positivos ou complexos, de ordem múltipla ou não, ou seja, representam sistemas que são instáveis ou muito oscilatórios. Este método consiste em definir os parâmetros  $T_i = \infty$ ,  $T_d = 0$ , e variar o ganho proporcional de zero até um ganho crítico  $K_{Cr}$ , na qual a saída exibe uma oscilação sustentada pela primeira vez (OGATA, 2010), como apresentado na Figura 14. A partir do gráfico, é extraído o período

crítico  $P_{Cr}$ . Com as variáveis  $K_{Cr}$  e  $P_{Cr}$  determinados, pode-se ajustar os parâmetros do controlador PID, conforme a Tabela 2.

Figura 14: Oscilação  $c(t)$  sustentada, com período Crítico  $P_{Cr}$ .



Fonte: (OGATA, 2010).

Tabela 2: Parâmetros de Ziegler-Nichols, segundo método.

Tipo de controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0,5K_{Cr}$	$\infty$	0
PI	$0,45K_{Cr}$	$\frac{1}{0,2}P_{Cr}$	0
PID	$0,6K_{Cr}$	$0,5P_{Cr}$	$0,125P_{Cr}$

Fonte: (OGATA, 2010).

Os métodos de Ziegler-Nichols não são muito precisos, mas conseguem atingir níveis razoáveis de sintonia e são bastante úteis para sintonia de malhas de controle para plantas desconhecidas, no entanto pode-se encontrar valores mais satisfatórios pelo método de tentativa e erro.

## 5 SIMULAÇÃO

O método de paralelismo de geradores proposto nesse trabalho é simulado no *software* Matlab<sup>®</sup> através do ambiente Simulink<sup>®</sup>. Para melhor entendimento da simulação, ela é dividida em duas partes:

1) Acionamento e regulação de velocidade de um gerador síncrono através um motor CC como fonte primária de torque;

2) Acionamento de um segundo gerador, através de um segundo motor CC, cuja velocidade é controlada para se alcançar o sincronismo com o primeiro gerador, criando assim condição para que ambos possam ser conectados em paralelo.

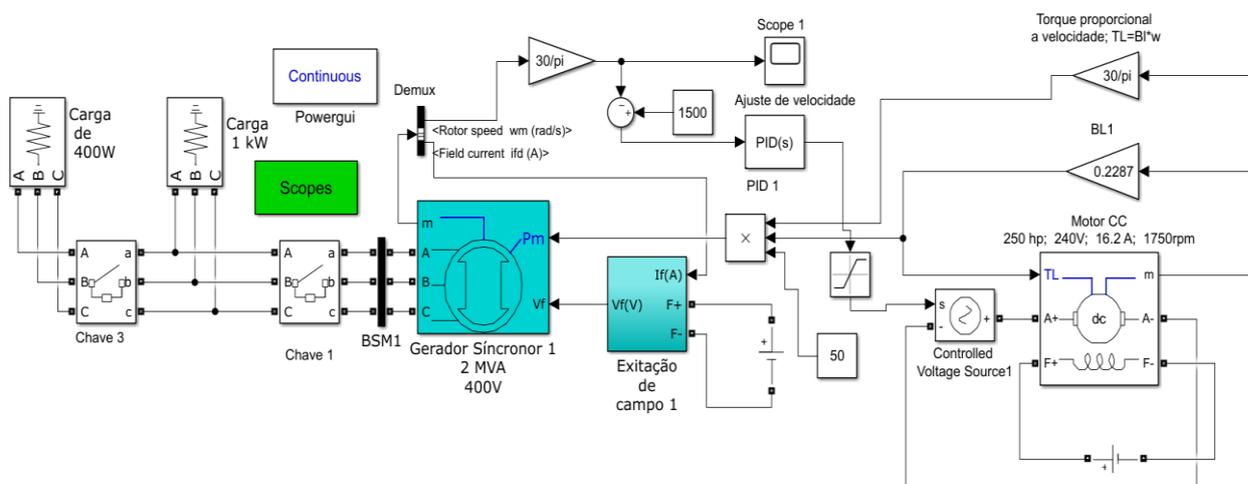
O objetivo da simulação é regular a velocidade de um gerador síncrono, buscando garantir uma tensão gerada com frequência fixa, mesmo com variação de carga nos terminais, e a regulação de velocidade de um segundo gerador, através de duas malhas de controle, uma para regular para a velocidade de referência e a segunda para ajustar o ângulo de fase deste gerador com o Gerador1.

### 5.1 SIMULAÇÃO DO ACIONAMENTO DOS GERADORES

Na Figura 15 é mostrada a simulação de um gerador síncrono de 2 MVA, 50 Hz, 400 V de tensão linha e velocidade nominal de 1500 rpm, acionado por um motor CC de 250 hp com 0.19 MVA para fator de potência unitário e velocidade nominal de 1750 rpm. O bloco de excitação do bobinamento de campo do gerador é alimentado com uma tensão fixa de 20 V. O gerador alimenta duas cargas, uma de 1 KW e outra de 400 W. A primeira carga é programada para ser conectada ao barramento trifásico da máquina após o gerador atingir o regime permanente por meio de uma chave trifásica, e a outra carga é ligada em seguida.

O bobinamento de campo do motor CC é alimentado por uma fonte fixa de 300 V, a armadura é alimentada por um amplificador de potência controlado através de controlador PID, em caso prático, o amplificador pode ser implementado através de um *conversor Boost*, que busca regular a velocidade de eixo do gerador para uma dada velocidade de referência. O bloco Demux, responsável por desmembrar um sinal composto em sinais separados, é utilizado para fornecer os sinais de referência de velocidade e corrente de campo para alimentar o bobinamento de armadura motor CC e excitação de campo do gerador, respectivamente. A partir do sinal de leitura da velocidade do motor é contabilizado torque proporcional a velocidade do motor, que é fornecido ao eixo do gerador. O bloco BMS1 permite medições de tensão e corrente trifásicas nos terminais do gerador.

Figura 15: Acionamento de Gerador Síncrono por um Motor cc.



Fonte: Autor.

Há uma tendência de queda de velocidade do motor quando ocorre a entrada de cargas no barramento dos dois geradores, pois no instante zero, os geradores já estão com velocidade síncrona. 1 segundo após a partida do gerador, ocorre a entrada de uma carga de 1 KW e no instante 5 s a entrada de uma carga de 400 W.

A entrada e saída de cargas alteram o conjugado eletromecânico relutante, requerendo controle do conjugado fornecido no eixo da máquina para se manter a velocidade da máquina dentro da faixa desejada. A regulação de velocidade é realizada através de um controlador PID que entrega o sinal de entrada para o controlador de tensão, responsável por realizar a excitação da armadura do motor CC, permitindo assim regular o conjugado, de modo a levar a velocidade do motor para uma velocidade desejada. Como o eixo do motor CC está acoplado ao eixo do gerador, essa malha de controle permite compensar o conjugado eletromecânico relutante do gerador, de modo a manter a frequência e tensão terminal do gerador mais próximos dos valores desejados. O erro entre a velocidade real do gerador e a velocidade de referência é o sinal de entrada do controlador PID, que cujo sinal de saída é a entrada do controlador de tensão que excita a armadura da máquina CC. O modelo simulado não prevê um rendimento para o acoplamento mecânico, mas em casos reais esses acoplamentos consomem energia mecânica entregue pela fonte primária.

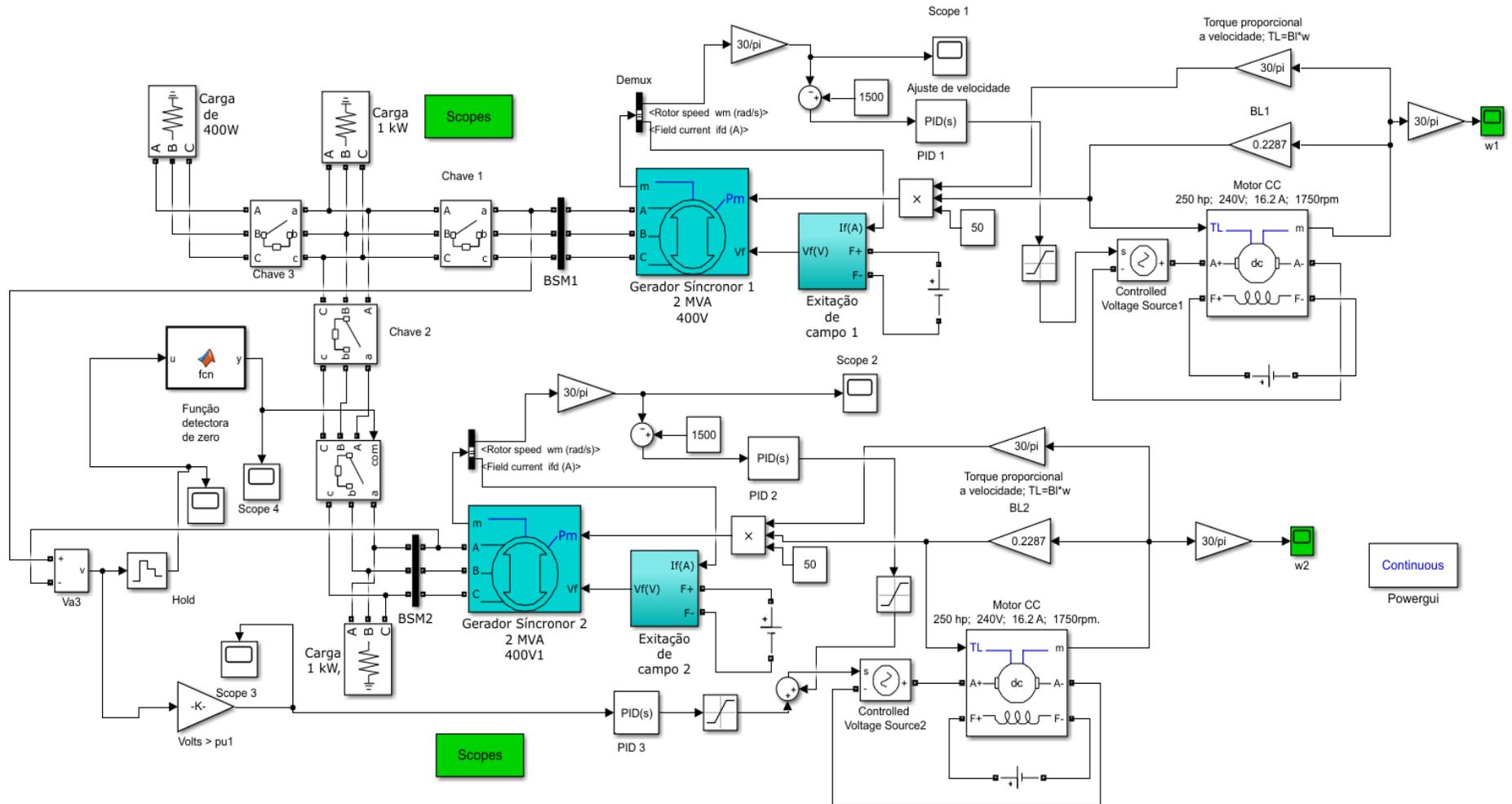
Após o acionamento do Gerador 1, o Gerador 2, operando com carga de 1 KW, é sincronizado com o Gerador 1 e em seguida conectado ao barramento, passando a alimentar solidariamente todas as cargas conectadas ao barramento. Os geradores operam subexcitados para que o conjugado eletromecânico relutante não ultrapasse a capacidade de carga dos

motores CC. Além disso, o sinal mecânico é multiplicado por 50 para suprir com o déficit de torque entregue pela fonte primária.

## 5.2 SIMULAÇÃO DO SINCRONISMO DOS GERADORES

Na Figura 16 é apresentada a planta de controle de velocidade dos dois geradores, regulados para operarem em velocidade síncrona, de 1500 rpm. Para conectar os dois geradores em paralelo, além de garantir a mesma velocidade para ambos, os dois devem estar com mesma sequência de fase e com defasamento angular zero ou o mais próximo possível de zero. Para isso é implementado um terceiro controlador PID para ajustar a velocidade do segundo gerador, gerando um sinal adicional ao sinal de controle de regulação de velocidade deste, para que a velocidade possa ser sutilmente ajustada até que este entre em fase com o Gerador 1. O modelo dos geradores prevê a partida destes já com velocidade inicial de 1500 rpm.

Figura 16 : Sincronismo dos Geradores 1 e 2.



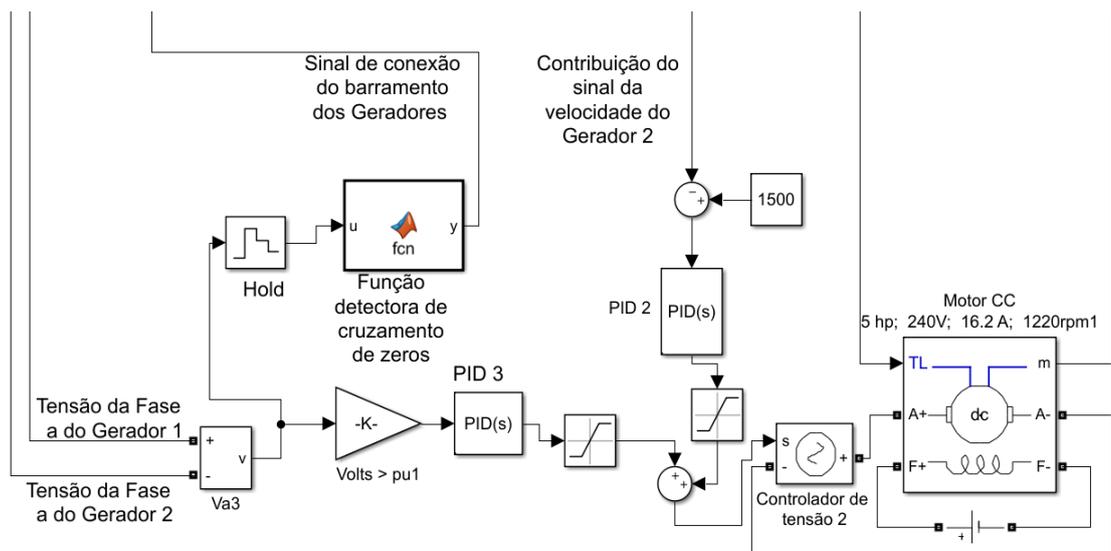
Fonte: Autor.

### 5.3 MALHA DE CONTROLE DE VELOCIDADE E AJUSTE DE FASE

O diagrama de blocos de acionamento de um motor CC em sistema de controle de malha fechada é mostrado na Figura 17. Nessa malha de controle, o bloco controlador de tensão de armadura do motor recebe o sinal que sai do controlador PID 3, sinal esse que corresponde à diferença de tensão entre as fases “a” dos Geradores 1 e 2. O mesmo sinal é discretizado pelo bloco “Hold”, que alimenta o bloco da “Função detectora de cruzamento de zeros”, que tem a função de gerar o sinal de comendo para que a chave que permite a conexão dos dois geradores.

O sinal de erro entre a velocidade de referência e a velocidade real do motor CC é o sinal de entrada do controlador PID 2, responsável por controlar a velocidade do segundo motor CC. O controlador vai atuar no sentido de regular a velocidade do motor CC, enquanto que o PID 3 realiza o ajuste de fase.

Figura 17: Malha de controle de velocidade.



Fonte: Autor.

As simulações apresentadas nesse capítulo refletem a estratégia de controle propostas nesse trabalho e permitem gerar os resultados esperados que são detalhados no capítulo 6.

## 6 RESULTADOS

Após a sintonia dos três controladores PID, utilizando o 2º método de Ziegler-Nichols, obtiveram-se os valores que são apresentados na Tabela 3, como os parâmetros dos controladores de regulação de velocidade, tanto para o Gerador 1 quanto para o Gerador 2 e para o controlador de regulação de fase.

Tabela 3: Ganhos dos controladores PID.

<b>Ganho</b>	<b>Controladores de regulação de velocidade</b>	<b>Controlador de regulação de fase</b>
$K_p$	1.29565	1.08
$K_i$	15.5996	52.21
$K_d$	0.07565	0.00478

Fonte: Autor.

Após a sintonia dos controladores PID é possível avaliar o desempenho da planta de controle em regime permanente.

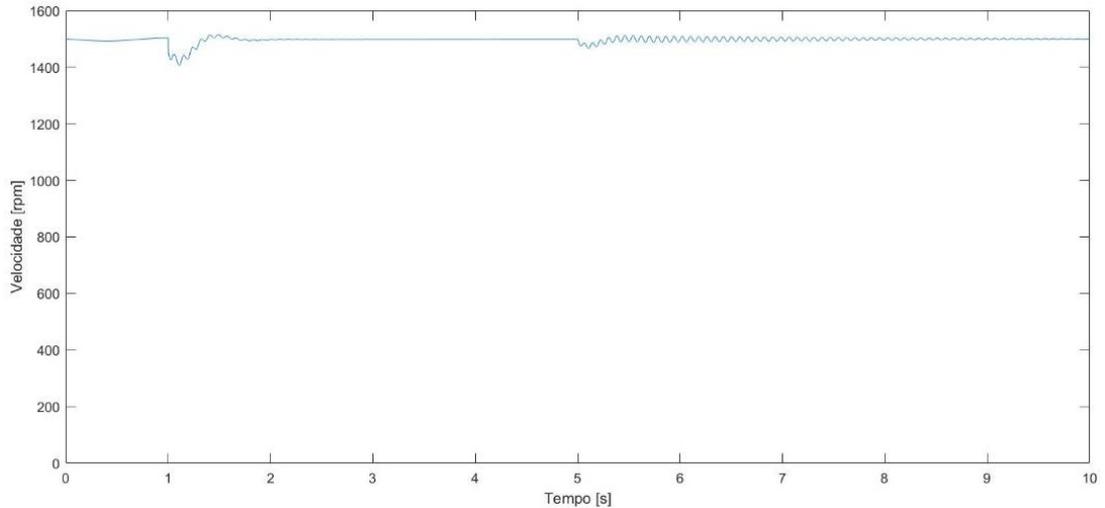
### 6.1 DESEMPENHO DE REGIME TRANSITÓRIO

O desempenho de regime transitórios consiste em avaliar o comportamento do sistema antes que o mesmo atinja a estabilidade. Os parâmetros de avaliação desse regime são: tempo de subida, tempo de pico, o máximo sobre sinal e o tempo de acomodação. Estes parâmetros estão devidamente conceituados na secção 4.2.

#### 6.1.1 Análise de velocidade

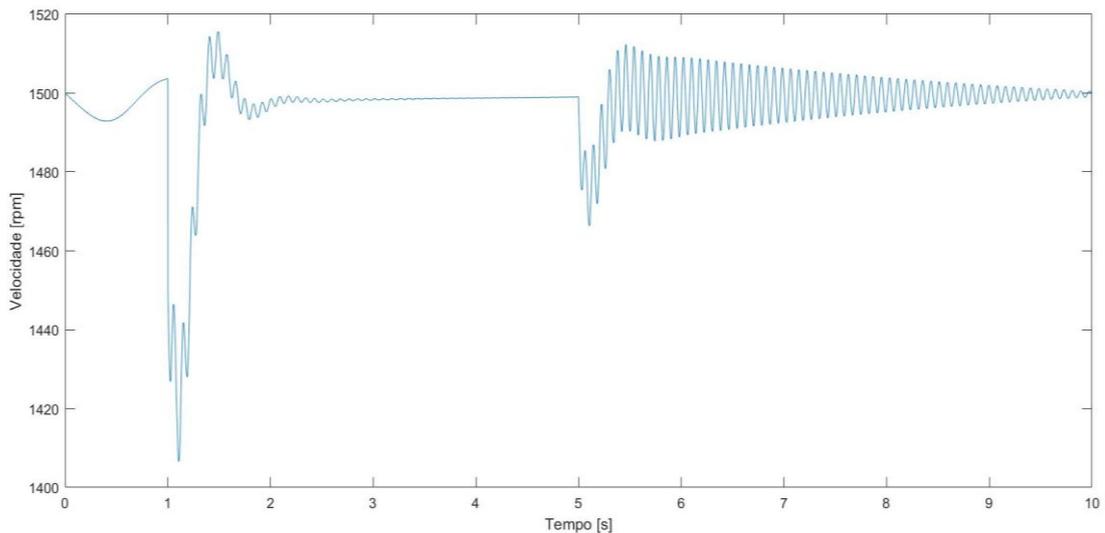
Na primeira condição de carga, o Gerador 1 é acionado a vazio e após 1 segundo a carga de 1 KW é conectada ao seu barramento, 4 segundos depois é conectada outra carga, dessa vez de 400 W. Na Figura 18 é mostrado o gráfico da evolução da velocidade do Gerador 1 nas duas condições de carga, com o Gerador 2 desconectados do barramento. Um gráfico com ampliação no eixo das ordenadas é apresentado na Figura 19.

Figura 18: Velocidade do Gerador 1.



Fonte: Autor.

Figura 19: Velocidade de eixo do Gerador 1, com ampliação no eixo das ordenadas.



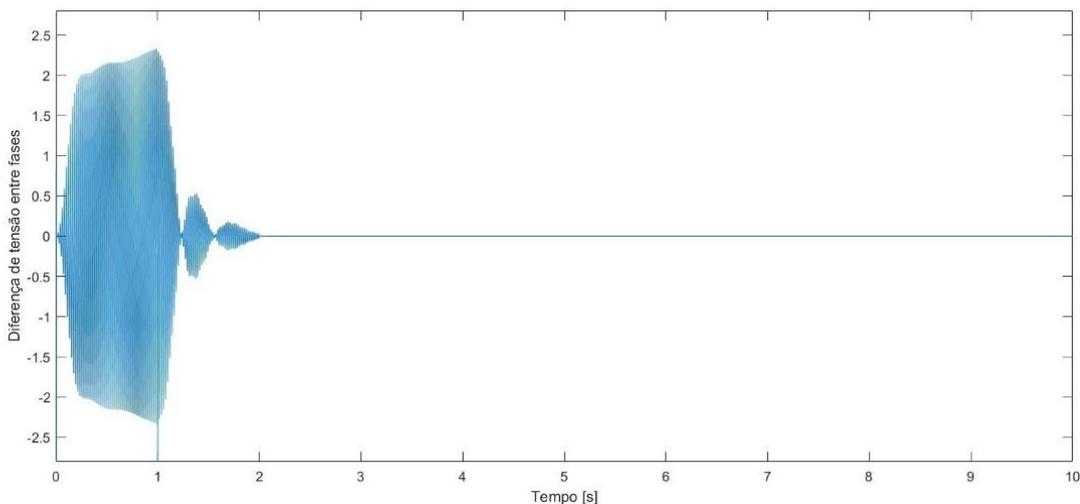
Fonte: Autor.

A conexão da primeira carga gera uma perturbação na velocidade do gerador, no entanto os controladores PID agem sobre ele forçando a velocidade retornar ao valor de referência pré-estabelecido. Logo após 1 s outra carga de 1K W é conectada ao barramento trifásico do gerador, porém a ação dos controladores demora mais para estabilizar o sistema, porque o torque ainda disponível no motor CC já não é suficiente para corrigir rapidamente a velocidade do gerador.

Em um momento seguinte, o segundo gerador é sincronizado e conectado ao barramento, no contribuir com a energia total fornecida ao barramento, permitindo assim que a ambos os geradores operem com maior folga em sua capacidade de geração de energia elétrica.

Na Figura 20 é mostrado o comportamento do sinal de entrada do controlador PID da malha de controle de ajuste de fases, que consiste do valor, em PU, da diferença de tensão entre as fases a dos dois geradores. No instante da partida verifica-se que a diferença do ângulo de fase entre os dois barramentos é 0 e vai aumentando com o tempo. Isso acontece porque os dois, apesar de terem partido com a mesma velocidade, 1500 rpm, abastecem cargas diferentes, o que gera conjugados eletromagnéticos relutantes distintos, afetando assim a velocidade de ambos em taxas diferentes, o que resulta também na alteração da tensão gerada e, conseqüentemente, o ângulo de fase. Após a entrada da carga de 1 kW, ocorre uma súbita alteração do ângulo de fase do Gerador 1, resultado da elevação do conjugado eletromecânico, mas depois um certo período, os dois geradores entram em fase devido à atuação dos controladores PID e a Chave F é fechada, mas os dois barramentos são conectados em paralelo só no instante  $t = 5$  s pela Chave 2. Na Tabela 4 é apresentado o tempo de fechamento de cada chave.

Figura 20: Diferença de tensão entre fases dos geradores.

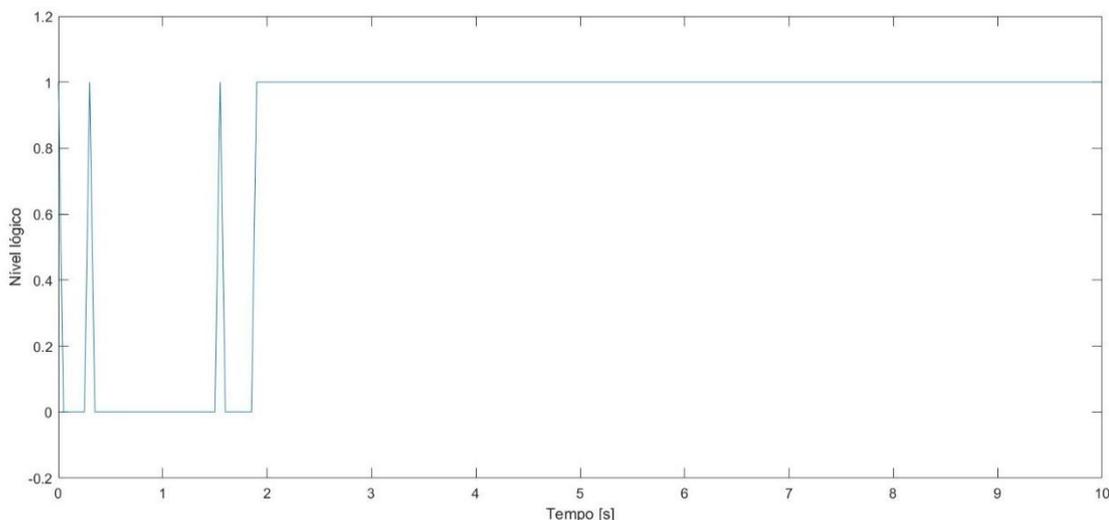


Fonte: Autor.

Na Figura 21 é possível observar a ação do bloco “Função detectora de cruzamento de zeros”. Ela recebe um sinal discretizado pelo bloco “Hold”, que é responsável por segurar por 0.01 ms o sinal que vem do bloco de comparação das tensões das fases “a” dos dois geradores, portanto o bloco de “Função de cruzamento de zeros” é responsável por comandar a chave de conexão do Gerador 2 ao barramento. Quando a diferença de tensão de linha entre os dois geradores é maior do que 0,1 Volts o sinal de saída do bloco de “função de zeros” assume nível lógico 0, mantendo a chave de conexão aberta. Se essa diferença for menor ou igual do 0,1, o sinal de saída assume nível lógico 1, fechando a conexão do gerador 2 ao barramento, a chave 3 trifásica está entre a chave da Função e o barramento do Gerador 1 para conectar os dois

barramentos em instantes pré-programados. A função *Hold* é necessária para evitar que cruzamentos por zero temporários resultem em fechamento indesejado da chave 2.

Figura 21: Saída função detectora de cruzamento de zeros.



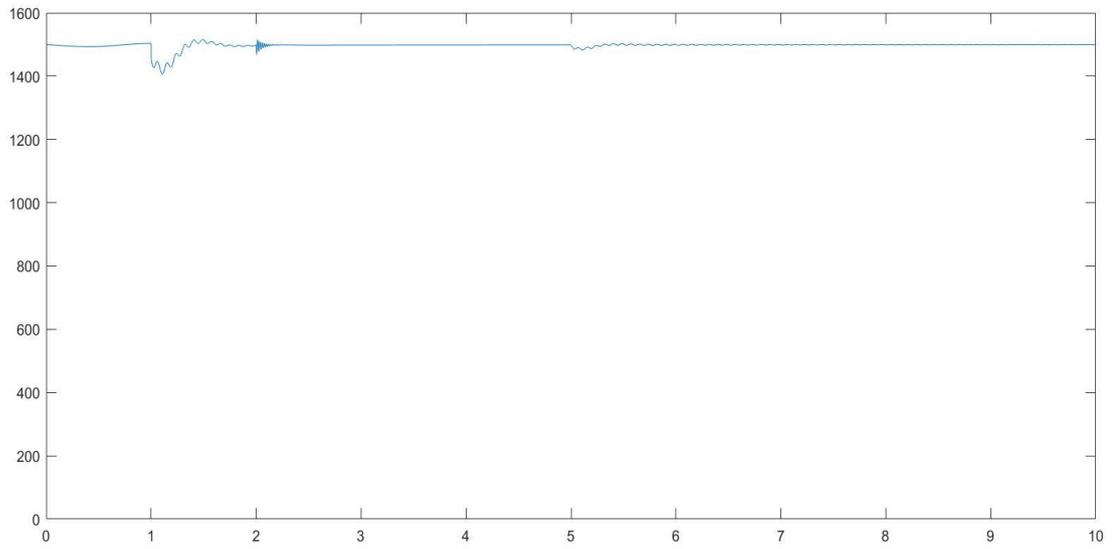
Fonte: Autor.

Tabela 4: Tempo de acionamento das chaves.

	Tempo (s)
Chave 1	1
Chave 2	2
Chave 3	5
Chave F	0,3

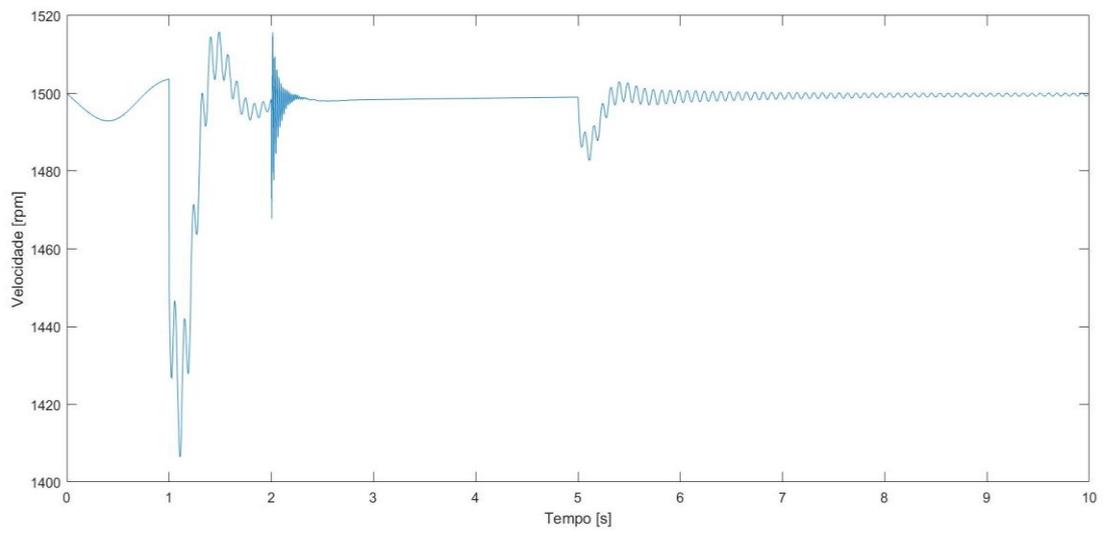
Na Figura 22 e 23 são mostrados os comportamentos das velocidades dos dois geradores. Na Figura 24, que também mostra a velocidade do eixo do Gerador 1, porém em uma escala ampliada, que é partido a vazio, verifica-se uma pequena queda de velocidade nos instantes iniciais, que é corrigida pela ação do controlador PID 1 (ver a Figura 16). Percebe-se também a atuação do controlador PID 1 no instante de entrada do Gerador 2, após decorrido 2 s. A entrada do Gerador 2 gera uma perturbação no sistema, pois nos instantes iniciais o Gerador 2 acaba assumindo a carga do barramento, antes do Gerador 1 conseguir alcançar a sua velocidade e continuar a injetar energia. Nota-se que agora, a perturbação gerada pela carga de 400 W é corrigida mais rapidamente que na condição de abastecimento de energia aos barramento apenas pelo gerador 1, como pode ser notado ao comparar a curva de velocidade dessa figura com curva apresentada na Figura 18.

Figura 22: Velocidade do Gerador 1.



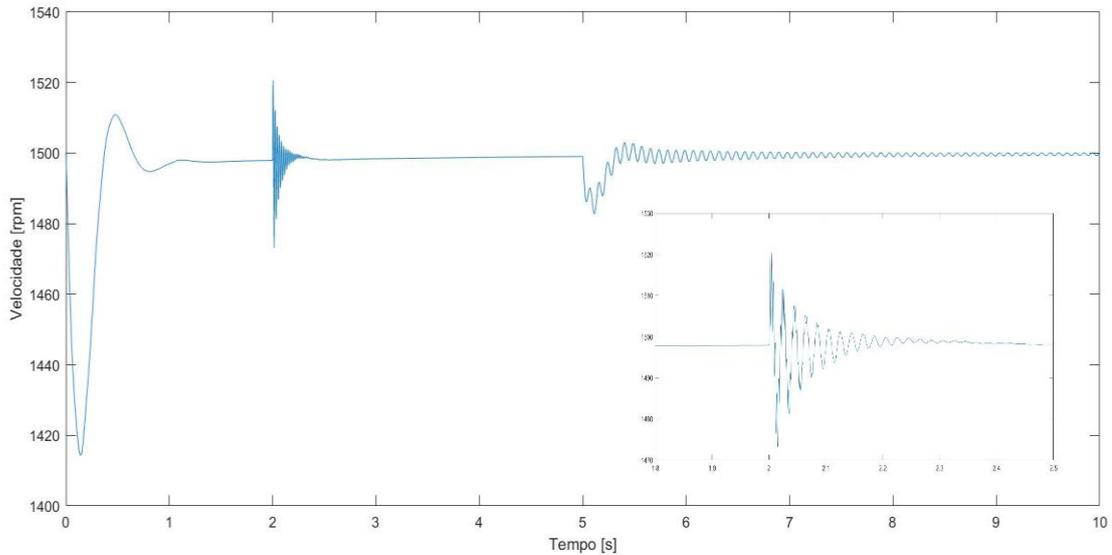
Fonte: Autor.

Figura 23: Velocidade Gerador 1 com ampliação da escala das ordenadas.



Fonte: Autor.

Figura 24: Velocidade do Gerador 2.



Fonte: Autor.

O comportamento da velocidade dos geradores mostra que ação dos controladores PID consegue corrigir e estabilizar rapidamente as velocidades para próximo da velocidade de referência, o que permite concluir que a sintonia dos controladores foi satisfatória.

A análise de especificações das características das respostas transitórias do sistema de controle a uma entrada em degrau unitário, os indicadores de desempenho dos controladores são apresentados na Tabela 5 e 6 nas duas diferentes condições de carregamento, assim como para o transitório causado pela entrada do segundo gerador.

Tabela 5: Parâmetros de desempenho do controle de velocidade do Gerador 1, em regime transitório.

Parâmetro	1ª condição de carga	Conexão do G2	2ª condição de carga
Tempo de subida (s)	0,768	0,009	0,309
Tempo de pico (s)	1,0	0,015	0,359
Tempo de acomodação (s)	1,22	0,500	0,504
Máximo sobre sinal (%)	0,245	1,012	0,200

Fonte: Autor.

Tabela 6: Parâmetros de desempenho do controle de velocidade do Gerador 2, em regime transitório.

Parâmetro	1ª condição de carga	Conexão do G2	2ª condição de carga
Tempo de subida (s)	0,373	0,020	0,308
Tempo de pico (s)	0,476	0,002	0,405
Tempo de acomodação (s)	0,325	0,018	0,128
Máximo sobre sinal (%)	0,728	1,323	0,200

Fonte: Autor.

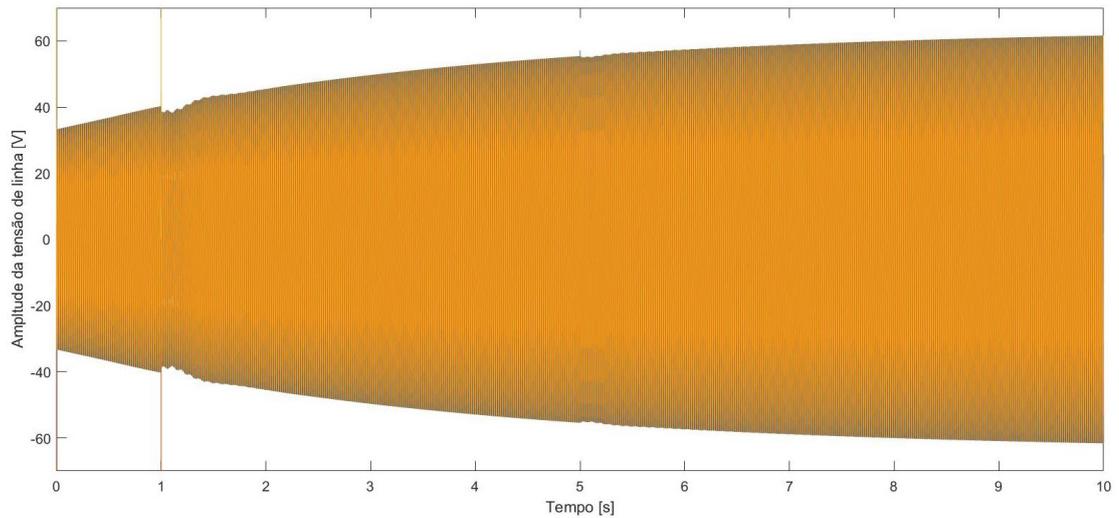
### **6.1.2 Análise da Tensão gerada**

Quando as cargas supridas pelo Gerador 1 geram conjugado eletromagnético relutante superior a capacidade de conjugado da máquina primária, a regulação de velocidade não é possível, mesmo que o controlador PID esteja corretamente sintonizado. Essa deficiência pode resultar nos seguintes problemas como regulação de velocidade muito lenta ou até mesmo a incapacidade de regulação da velocidade, o que pode levar a parada rotação da máquina.

Como os motores CC utilizados na simulação são máquinas de baixa potência, e, portanto, baixo conjugado máximo, para evitar as condições supra mencionadas, optou-se por trabalhar com os geradores em condição de subexcitação, limitando assim o conjugado relutante a valores compatíveis com o conjugado máximo disponível nos motores CC.

A tensão de linha dos geradores se estabilizou em 62 V. Na Figura 25 e 26 são apresentados os gráficos de tensões de linha do Gerador 1 e 2. Nota-se que, após a partida do Gerador 1, os controladores PID atuaram no sentido de regular a tensão. Com a conexão da primeira carga, de 1 KW, em 5 s, não se verifica queda significativa da tensão gerada, no entanto, a conexão do segundo gerador um segundo após a sua partida provocou queda mais acentuada da tensão, e aumento de corrente, comportamento já esperado.

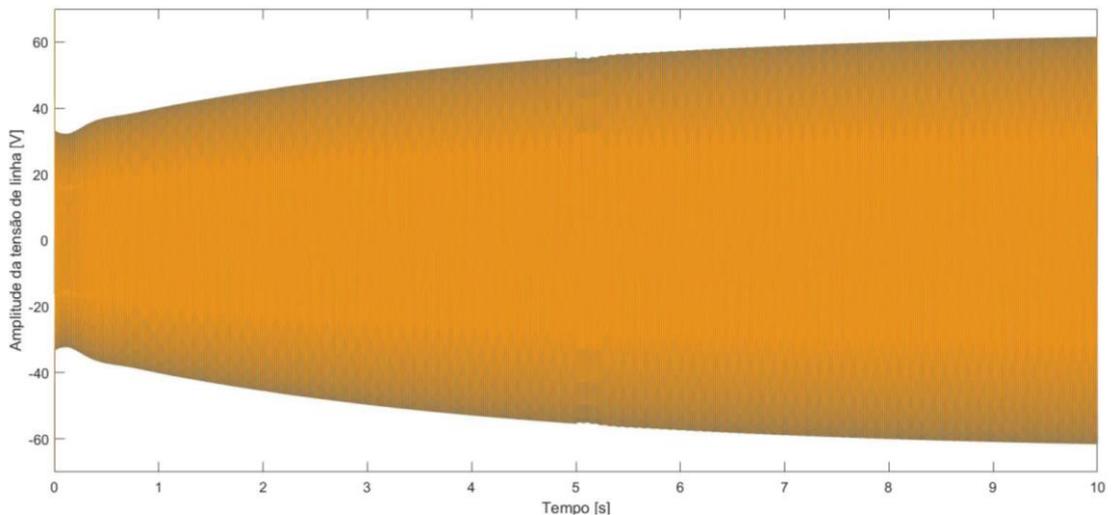
Figura 25: Tensão de linha do Gerador 1.



Fonte: Autor.

Com a partida do Gerador 2 com carga, verifica-se queda de tensão nos instantes iniciais, devido ao conjugado relutante provocado pela corrente demanda pela carga, que é corrigida pela atuação dos controladores PID 2 e 3, elevando a tensão até o valor de referência.

Figura 26: Tensão de linha do Gerador 2.



Fonte: Autor.

Verifica-se também que o aumento de carga nos terminais de um gerador síncrono provoca o aumento de corrente na armadura do gerador, que por sua vez provoca o crescimento do conjugado eletromagnético relutante. Nas condições simuladas, a queda de tensão é mínima, pois a carga é muito pequena quando comparada com a potência nominal do gerador, 2 MVA.

No instante da conexão do Gerador 2 a corrente de armadura do mesmo aumenta rapidamente, o que gera transições dos dois geradores, e resulta em forças contra eletromotrizes que freiam as duas máquinas.

O gerador que fornece potência tende a cair de velocidade, logo é necessário compensar o conjugado relutante com mais força no eixo da máquina, enquanto o que consome potência tende a aumentar de velocidade. A ação dos controladores PID causa alteração nos conjugados das máquinas primárias, alterando também as velocidades e, conseqüentemente, as tensões geradas, no sentido de regular essas variáveis para faixa desejável.

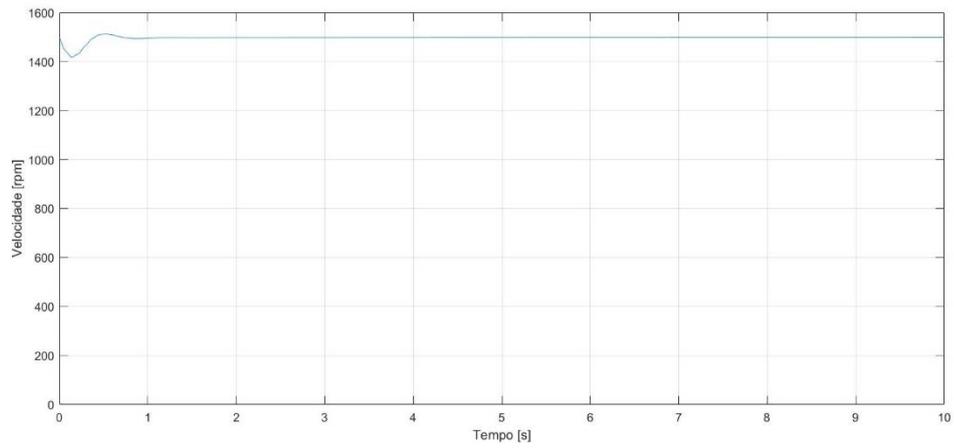
Antes do estabelecimento do paralelismo, o Gerador 2 está com maior velocidade de rotação, enquanto que o Gerador 1 ainda não atingiu a estabilidade da velocidade devido à instabilidade causada pela conexão da carga de 1 KW. Durante o regime transitório, a partir da conexão do Gerador 2, o mesmo acaba fornecendo energia do Gerador 1, por isso ocorre a queda de velocidade desta máquina, já que durante o transitório o Gerador 1 passa a ser uma carga para o Gerador 2, até que se alcance a estabilidade. Durante esse período, os controladores atuam no sentido de zerar o erro de estado permanente entre as fases e velocidade.

## 6.2 DESEMPENHO EM REGIME PERMANENTE

O regime permanente é alcançado pelo sistema logo após os geradores atingirem a estabilidade. O parâmetro de avaliação de desempenho de controle nesse estágio é o erro de regime permanente, que indica a capacidade do sistema em alcançar o valor de referência.

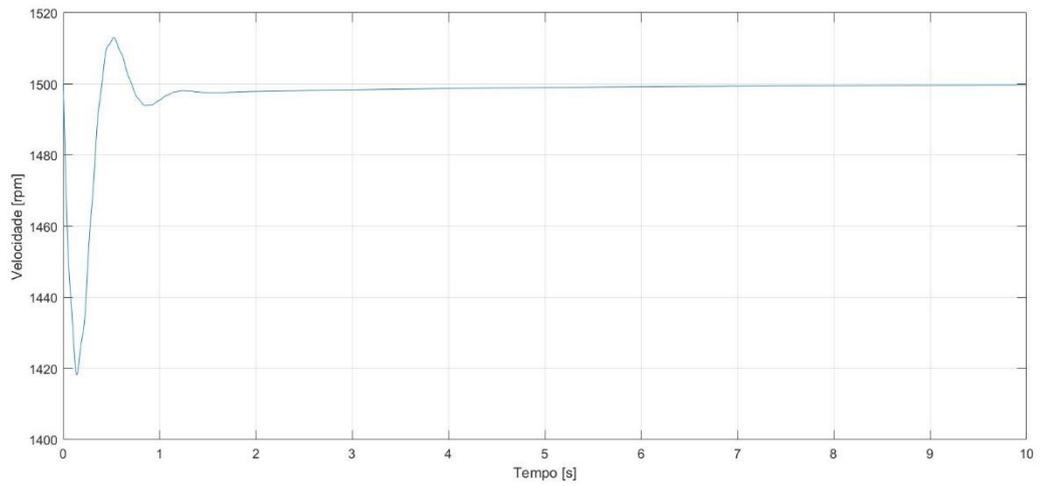
Para determinar o erro de regime permanente, após alcançar estabilidade a vazio, conectou-se uma carga de 1 KW aos terminais dos geradores, permitindo que o mesmo siga abastecendo essa carga por um longo período de tempo. Na Figura 27 é apresentado o comportamento da máquina nessa condição, e na Figura 28 mostra-se uma ênfase ao transitório apresentado na Figura 27. Com isso verifica-se que os controladores PID atuaram e estabilizaram a velocidade da máquina na velocidade de referência, zerando o erro de regime permanente.

Figura 27: Erro de regime permanente da velocidade dos geradores.



Fonte: Autor.

Figura 28: Erro de regime permanente da velocidade dos geradores com ampliação da escala das ordenadas.



Fonte: Autor.

## 7 CONCLUSÃO

### 7.1 RESUMO DAS CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO

O presente trabalho traz contribuições no campo de controle clássico aplicado a sincronismo de geradores síncronos, incluindo uma revisão bibliográfica sobre geradores síncronos, máquinas CC e paralelismo de geradores. O sincronismo dos geradores foi realizado utilizando controladores PID que foram sintonizados com métodos de Ziegler-Nicholls.

Posteriormente apresentou-se a simulação da planta de controle proposta, para sincronização de geradores síncronos, utilizando o ambiente Simulink<sup>®</sup>. Com os resultados obtidos foi possível discutir a dinâmica de operação das máquinas síncronas conectadas a um barramento infinito e o desempenho da planta de controle.

### 7.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Resultados satisfatórios foram alcançados. A simulação mostra que o método de controle proposto é eficiente para estabelecer um paralelismo seguro entre os geradores, apesar de possíveis variações de carga no barramento. Os controladores PID mostram-se eficientes na regulação de velocidade dos motores CC, mantendo os geradores dentro de uma faixa desejável de velocidade.

### 7.3 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.

Nesse trabalho conseguiu-se propor um método de controle eficiente e simular uma planta de controle para realizar paralelismo de geradores síncronos em diferentes condições de carga. Porém, o escopo desse trabalho pode ser ampliado em trabalhos futuros. Seguem algumas propostas para trabalhos futuros:

- Implementação do sincronizador simulado nesta pesquisa em bancada;
- Inclusão do modelo de conversor *Boost* e do gerador de PWM;
- Avaliação dos critérios de desempenho dos controladores no domínio da frequência.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL. [www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br). **ANEEL**, 2014. Disponível em: <[https://www.aneel.gov.br/busca?p\\_p\\_id=101&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=maximized&p\\_p\\_mode=view&\\_101\\_struts\\_action=%2Fasset\\_publisher%2Fview\\_content&\\_101\\_returnToFullPageURL=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Fbusca%3Fp\\_auth%3D5xqpYXgr%26p\\_p\\_id%3D3%26p\\_p\\_lifecycle](https://www.aneel.gov.br/busca?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&_101_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content&_101_returnToFullPageURL=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Fbusca%3Fp_auth%3D5xqpYXgr%26p_p_id%3D3%26p_p_lifecycle)>. Acesso em: 22 abr. 2020.

ARDUINO. [arduino.cc/](http://arduino.cc/). **arduino.cc**, 2021. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>>. Acesso em: 13 mar. 2021.

ARDUINO.CC. [Arduino.cc](http://Arduino.cc). **Arduino**, 2020. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>>. Acesso em: 25 maio 2020.

BEZERRA, J. H. **Estudo de Sistema de Controle Usando o Controlador PID em Processos Industriais**. 2007. 35 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, Campinas: 2007.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Tradução de Anatólio Laschuk. 5ª ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

FITGRALD; KINGSLEY'S. **Máquinas Elétricas**. Tradução de Anatólio Laschuk. 7ª ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

GARCIA, José Davilo Ghirello. **Crerios de Avaliao de Desempenho para Controladores Aplicados a Mancais Magnéticos**. 2014, 47 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ – 2014.

GOMES, S. C. P. **Lugar Geometrico das Raizes Incremental e suas Aplicaoes na Sintonia de Controladores PID**. 2009, 34 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos)- Escola de Engenharia de Mauá do centro Universitário do Intituto do Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, SP, 2009.

HALLIDAY, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Fisica- Eletromagnetismo**. 8ª. ed. Rio de Janeiro: Performa, 2010.

JOSÉ. Produção: José Roberto Cardoso. Intérpretes: **Instalações Elétricas - Aula 09 - Máquinas síncronas I**. [S.l.]: Univesp - Universidade Virtual do Estado de São Paulo. 2016.

KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. Tradução de Felipe Luis Daniello e Soares Antonio. 4a ed. ed. Porto Alegre: Globo, v. 1, 1982.

LEAL, Claudia de Faria. **Estudo e Parametrização de um Conversor ca/cc para o Controle da Velocidade de Rotação de Motores de Corrente Contínua**. 2016.11 f. Trabalho de Conclusão de Curso- Instituto Federal de Ciências e Tecnologia de Minas Gerais, Campos Formiga/MG, 2016.

MAHMOOD, M. et al. **Design and Implementation of an Automatic Synchronizing and Protection Relay through Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL) Simulation**. Pakistan Institute of Engineering and Applied Sciences, Islamabad, p. 6, jun. 2019.

McROBERTS, M. **Arduino Básico**. São Paulo, SP – Brasil: Novatec Editora Ltda, 2011.

MENDES de Oliveira, L. et al. **Paralelismo e Sincronismo**. CURITIBA: UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, 25; 2010.

MIRANDA, Maicon de. **Desenvolvimento de um Sistema para o Controle de Excitação de Campo de um Gerador Síncrono**. 2018.10 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria Cacho eira do Sul, RS, Brasil, 2018.

SMIDT, André Crepaldi Geiger. **Implementação de uma Plataforma de Robótica Controlada Remotamente Utilizando o Arduino**. 2018,15 f. Trabalho de Conclusão de Curso- UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, São carlos/SP, Brasil, 2013.

NASCIMENTO, Rayane Paula do. **Estratégia de Controle de Tensão para um Sistema de Geração Fotovoltaica com Conversor *boost* e Conversor de Frequência Monofásico de Ponte Completa**. 2018,13 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energias)- UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-BRASILEIRA, Acarape/CE, Brasil, 2018.

NEVES, Marcello da Silva. **Desenvolvimento e implementação de métodos de sincronismo aplicados a sistemas de geração distribuída**. 2016,5 f. Trabalho de Conclusão de Curso- UFRJ/Escola Politécnica, São Carlos/SP – Rio de Janeiro 2016.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. Tradução de Heloísa Coimbra de Souza. 5<sup>a</sup>. ed. São paulo: Pearson Prentice Hall, v. 1, 2010.

OLIVAIRA, Fernando Hevelton Duarte. **Levantamento do modelo matemático do sistema de excitação de um gerador síncrono**. 2000,11 f. Dissertação de mestrado (Engenharia elétrica) - Universidade Federal de santa Catarina, Florianópolis/SC – 2000.

RASHID, M. H. **Eletronica de potencia: Circuitos, Dispositivos e Aplicações**. São Paulo: Makon Books, 1999.

ROSSI, M. C. **Esquema de Sincronismo Automático em Geradores Sincronos Distribuídos**. 2015, 22 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica)- Escola de Engenharia de são carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo: USP, 2015.

SADIKU; MUSA, S. M.; ALEXANDER, C. K. **Análise de Circuitos Elétricos com Aplicações**. Porto Alegre: AMGH, 2014.

SANTOS, Tallis Mendonça. **Controle de Velocidade de um Motor de Corrente Contínua por Realimentação de Estados Observados**. 2017,34 f. Trabalho de conclusão de curso- Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro preto – 2014.SILVA, E. B. D. M. **Sincronizador microcontrolado**. Fortaleza: Intituto Federal do Ceará- IFCE, 2007. 11 p.

SILVA, J. M. G. D. **Desempenho de Sistemas de Controle**, Porto alegre, 03 abr. 2000. 1. Disponível em: <<http://www.ece.ufrgs.br/~jmgomes/pid/Apostila/apostila/node12.html>>. Acesso em: 25 maio 2020.

SILVA, Eduardo Bezerra de Menezes Macedo E. **Sincronizador Microcontrolado**. 2007.11 f. Trabalho de Conclusão de Curso- Centro Federal de Educação Tecnológica do Ceará, Fortaleza/CE, 2007.

VASCOCELOS, Fillipe Matos de. **Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica** / Fillipe Matos de Vasconcelos. – Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2017.

## APÊNDICE I- CARACTERÍSTICAS DA PLANTA

Nas tabelas I e II são apresentados os parâmetros dos geradores síncronos e dos motores CC.

Tabela 7: Parâmetros dos geradores síncronos.

<b>Parâmetros</b>	
Máquina	Gerador síncrono
Potência Nominal	2 MVA
Frequência	50 Hz
Tensão nominal	400 V
Resistência de armadura	0.00076 $\Omega$
Tensão de excitação	20 V
Tensão de saída	62V

Tabela 8: Parâmetros dos motores CC.

<b>Parâmetros</b>	
Máquina	cc
Potência	250 Hp
Frequência	50 Hz
Tensão nominal	500 V
Tensão de armadura	300 V
Velocidade nominal	1750 rpm
Velocidade de referência	1500 rpm

A seguir são apresentados os osciloscópios (*Scope*) que cujos sinais de medição foram objetos dos resultados discutidos no trabalho, no entanto vale salientar que os osciloscópios da medição das tensões geradas não estão explícitas na planta, mas sim embutidos nos blocos BSM e apresentados na cor verde.

Tabela 9: Osciloscópios.

Osciloscópio 1	Velocidade do Gerador 1
Osciloscópio 2	Velocidade do Gerador 2
Osciloscópio 3	Diferença de tensão entre os geradores
Osciloscópio F	Sinal de cruzamento de zeros

O código do bloco da função detectora de cruzamento de zeros é apresentado a seguir, porém o bloco *Hold* multiplica o sinal de saída por 10000, por isso a condição lógica do código leva a chave F para nível lógico 1, se a diferença tensão dos dois geradores for menor do que 10000.

```
function y = fcn(u)
y=0;
if abs(u)<=10000
    y=1;
end
```