LUIZ HENRIQUE DAMATO KORNRUMPF

ALGORITMOS DE TRATAMENTO DE CURVAS PARA DETERMINAÇÃO DE
PARÂMETROS DE GERADORES SÍNCRONOS ATRAVÉS DO ENSAIO DE
RESPOSTA EM FREQUÊNCIA UTILIZANDO METODOLOGIA COM INVERSOR
DE FREQUÊNCIA

SÃO PAULO

2017

LUIZ HENRIQUE DAMATO KORNRUMPF

ALGORITMOS DE TRATAMENTO DE CURVAS PARA DETERMINAÇÃO DE
PARÂMETROS DE GERADORES SÍNCRONOS ATRAVÉS DO ENSAIO DE
RESPOSTA EM FREQUÊNCIA UTILIZANDO METODOLOGIA COM INVERSOR
DE FREQUÊNCIA.

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título de
Mestre em Ciências

Área de Concentração: Sistemas de
Potência

Orientador: Prof. Dr. Silvio Ikuyo Nabeta

SÃO PAULO

2017

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Kornrumpf, Luiz Henrique Damato

ALGORITMOS DE TRATAMENTO DE CURVAS PARA DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE GERADORES SÍNCRONOS ATRAVÉS DO ENSAIO DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA UTILIZANDO METODOLOGIA COM INVERSOR DE FREQUÊNCIA / L. H. D. Kornrumpf -- versão corr. -- São Paulo, 2017.

74 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.Máquinas Síncronas 2.Máquinas Elétricas 3.Ensaio Elétricos
4.Redes Neurais I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, pela oportunidade, pela força e bênçãos concedida durante as batalhas.

A minha esposa, pelo suporte, carinho e motivação e companheirismo nos momentos mais difíceis.

A meus pais pela base educacional proporcionada.

Ao professor Dr. Silvio Ikuyo Nabeta pela orientação, pela paciência, pelas longas conversas, pela troca de experiências e pela motivação.

Aos professores Fabio Pereira e Cleber Dias pelo suporte em suas áreas de especialidade.

Somente um principiante que não sabe nada sobre ciência diria que a ciência descarta a fé. Se você realmente estudar a ciência, ela certamente o levará para mais perto de Deus.

James Clerk Maxwell

RESUMO

O ensaio de resposta em frequência em geradores síncronos vem ganhando espaço nas últimas décadas, porém o alto custo dos equipamentos empregados para realização do ensaio ainda é um empecilho, tanto para fabricantes como para consumidores finais. Este trabalho tem por objetivo complementar trabalhos anteriores, através do uso de redes neurais artificiais para identificação de padrões em ensaios realizados com equipamentos de baixo custo e baixa resolução. Através das redes neurais artificiais utilizadas é possível estimar novos pontos de ensaio sem que seja necessário um novo ensaio ou até mesmo um ensaio com equipamentos mais caros. Através de uma combinação de algoritmos de tratamento de dados, é possível a aproximação de modelos ensaiados com modelos teóricos e através desses resultados obter parâmetros elétricos dos geradores síncronos.

Palavras-chave— Ensaio de resposta em frequência, geradores síncronos, redução de custo, algoritmos de tratamento de dados, redes neurais artificiais.

ABSTRACT

The frequency response test on synchronous generators has been increasing in recent decades, but the high cost of equipment used for conducting the test is still a stumbling block for both manufacturers and end-consumers. This dissertation aims to complement previous work, through the use of artificial neural networks to identify patterns in tests conducted with low-cost and low-resolution equipment. Through the artificial neural networks used it is possible to estimate a new set of test points without retesting is necessary or even a more expensive assay equipments. Through a combination of data processing algorithms, the approach tested models with theoretical models is possible and through these results to obtain electrical parameters of synchronous generators.

Keywords— Frequency response test, synchronous generator, cost reduction, data processing algorithms, artificial neural network.

LISTA DE SÍMBOLOS

$i_{a,b,c}$	Corrente na fase A, B ou C
i_{fd}	Corrente de campo
$E_{a,b,c}$	Tensão na fase A, B ou C
$\Psi_{a,b,c}$	Fluxo concatenado na fase A, B e C
$\Psi_{jd,jq}$	Fluxo concatenado de amortecimento de eixo direto ou de quadratura
R_a	Resistência enrolamento de armadura
R_{fd}	Resistência enrolamento de campo
$X_{aa,bb,cc}$	Reatância própria na fase A, b ou C
$X_{ffd,fd}$	Reatância própria de campo
$X_{jkd,jd}$	Reatância própria de amortecimento de eixo direto ou de quadratura
$X_{jkd,jq}$	Reatância própria de amortecimento de eixo direto ou de quadratura
$X_{fkd,jdfd}$	Reatância mútua entre campo – amortecedor de eixo direto
$X_{fkq,jqfd}$	Reatância mútua entre campo – amortecedor de eixo de quadratura
$X_{jdkq,jqkd}$	Reatância mútua entre amortecedor de eixo direto – eixo de quadratura
$X_{d,q}$	Reatância permanente de eixo direto, quadratura
$X'd$	Reatância transitória de eixo direto
$X'q$	Reatância transitória de eixo de quadratura
$X''d$	Reatância subtransitória de eixo direto
$X''q$	Reatância subtransitória de eixo de quadratura
$T'd0$	Constante de tempo transitória de eixo direto em aberto
$T'd$	Constante de tempo transitória de eixo direto
$T'q0$	Constante de tempo transitória de eixo de quadratura em aberto
$T'q$	Constante de tempo transitória de eixo de quadratura
$T''d0$	Constante de tempo subtransitória de eixo direto em aberto
$T''d$	Constante de tempo subtransitória de eixo direto
$T''q0$	Constante de tempo subtransitória de eixo de quadratura em aberto
$T''q$	Constante de tempo subtransitória de eixo de quadratura
$Z_d(s)$	Impedância operacional de eixo direto
$Z_q(s)$	Impedância operacional de eixo de quadratura

ω	Velocidade angular (rad/s)
f	Frequência
V_{arm}	Tensão de armadura
I_{arm}	Corrente de armadura

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Vista superior gerador síncrono.....	17
Figura 2.2 – Empilhamento núcleo estatórico.....	18
Figura 2.3 – Enrolamento estatórico do tipo bobina inserido na ranhura.....	19
Figura 2.4 – Rotor de pólos salientes.....	19
Figura 2.5 – Orientação segundo eixos abc e dq.....	22
Figura 2.6 – Corrente de curto circuito na fase A(i_a) e no enrolamento de campo (i_{fd})..	24
Figura 2.7 – Corrente de curto circuito na fase a(i_a), após curto trifásico brusco.....	25
Figura 2.8 – Curva de decaimento da tensão da máquina síncrona após rejeição de carga (eixo d).....	27
Figura 2.9 – Curva de decaimento da tensão da máquina síncrona após rejeição de carga (eixo q).....	28
Figura 2.10 – Diagrama de Bode $L_d(s)$	33
Figura 2.11 – Neurônio biológico.....	37
Figura 2.12 – Processo de sinapse.....	37
Figura 2.13 – Neurônio artificial.....	38
Figura 2.14 – Função de ativação tangente hiperbólica.....	39
Figura 2.15 – Perceptron multicamadas.....	40
Figura 2.16 – Fase de treinamento da rede Perceptron multicamada.....	41
Figura 3.1 – Configuração do arranjo de bancada.....	44
Figura 3.2 – Arranjo de bancada (Souza, 2011).....	45
Figura 3.3 – Alinhamento segundo o eixo direto.....	45
Figura 3.4 – Diagrama de Bode $L_d(s)$ – (IEEE-115, 2009).....	47
Figura 3.5 – Diagrama de Bode $L_q(s)$ – (IEEE-115, 2009).....	48
Figura 3.6 – Fluxograma do processo de otimização.....	53
Figura 3.7 – Rede neural criada.....	55
Figura 3.8 – Curva da indutância de eixo direto.....	60
Figura 3.9 – Rede neural criada.....	61
Figura 3.10 – Curva de indutância de eixo direto.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Medições realizadas por (Souza, 2011).....	48
Tabela 3.2 – Dados destinados ao treinamento da rede.....	50
Tabela 3.3 – Dados para verificação do treinamento da rede neural.....	51
Tabela 3.4 – Dados destinados ao treinamento da rede normalizados.....	52
Tabela 3.5 – Dados para verificação do treinamento da rede neural normalizados...	54
Tabela 3.6 – 1ª série de interações da rede.....	55
Tabela 3.7 – 2ª série de interações da rede.....	55
Tabela 3.8 – 3ª série de interações da rede.....	56
Tabela 3.9 – 4ª série de interações da rede.....	57
Tabela 3.10 – 5ª série de interações da rede.....	57
Tabela 3.11 – Novos pontos de frequência e novos valores de L_d	58
Tabela 3.12 – Constantes de tempo.....	60
Tabela 3.13 – $L'd$ e $L''d$	61
Tabela 3.14 – 1ª série de interações da rede.....	61
Tabela 3.15 – 2ª série de interações da rede.....	62
Tabela 3.16 – 3ª série de interações da rede.....	62
Tabela 3.17 – 4ª série de interações da rede.....	63
Tabela 3.18 – 5ª série de interações da rede.....	63
Tabela 3.19 – Novos pontos de frequência e novos valores de L_d	64
Tabela 3.20 – Constantes de tempo.....	67
Tabela 3.21 – $L'd$ e $L''d$	67
Tabela 3.22 – Comparação entre métodos.....	67

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	15
1.2	OBJETIVO.....	16
1.3	JUSTIFICATIVA.....	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1	INTRODUÇÃO.....	18
2.2	MÁQUINA SÍNCRONA	18
2.2.1	GERADOR SÍNCRONO	19
2.2.2	O ESTATOR	19
2.2.3	O ROTOR.....	21
2.2.4	REATÂNCIAS E CONSTANTES DE TEMPO.....	22
2.2.5	EQUACIONAMENTO ELÉTRICO DO GERADOR SÍNCRONO.....	22
2.2.6	TRANSFORMADA DQ0 OU TRANSFORMADA DE PARK.....	24
2.2.7	ENSAIOS TRADICIONAIS.....	25
2.2.8	ENSAIOS EM FREQUÊNCIA.....	31
2.2.9	IMPEDÂNCIA OPERACIONAL.....	33
2.2.10	LINHA DO TEMPO	35
2.3	REDES NEURAIS	38
2.3.1	NEURÔNIO REAL (BIOLÓGICO)	38
2.3.2	NEURÔNIO ARTIFICIAL.....	40
2.3.3	FUNÇÕES DE ATIVAÇÃO	41
2.3.4	PROCESSO DE TREINAMENTO.....	41
2.3.5	REDE PERCEPTRON MULTICAMADAS.....	42
2.4	TÉCNICAS DE AJUSTE DE CURVA	43
2.5	ESTADO-DA-ARTE	44
3	METODOLOGIA PROPOSTA	45
3.1	INTRODUÇÃO.....	45
3.1.1	EQUIPAMENTOS EMPREGADOS	45
3.1.2	ALINHAMENTO SEGUNDO O EIXO DIRETO	47
3.2	DADOS RESULTANTES DO ENSAIO	50
3.3	OTIMIZAÇÃO DA REDE NEURAL	52

3.4	MÉTODOLOGIA PARA ESTABELECE O PADRÃO ENTRE FREQUÊNCIAS E LD INDUTÂNCIA DE EIXO DIRETO.....	54
3.4.1	REDE PERCEPTRON MULTICAMADAS COM ALGORITMO DE TREINAMENTO ATRAVÉS DO MÉTODO DE LEVENBERG-MARQUARDT, CENÁRIO 1	56
3.4.2	REDE PERCEPTRON MULTICAMADAS COM ALGORITMO DE TREINAMENTO ATRAVÉS DO MÉTODO DE LEVENBERG-MARQUARDT, CENÁRIO 2	62
4	<u>CONCLUSÕES.....</u>	70
4.1	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	70
5	<u>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....</u>	71

1 Introdução

1.1 Definição do problema

O Brasil possui uma matriz energética composta em sua grande maioria por hidrogeradores, 66% do total instalado (BIG, 2016). Sendo este composto em sua maior parte por máquinas síncronas, isto dito, torna-se inegável a importância de tais máquinas para os mais de 200 milhões de Brasileiros (Estimativa IBGE, 2015).

Decorridos quase dois séculos do princípio nos estudos de máquinas elétrica, é possível afirmar que esta tecnologia se encontra bem embasada e amplamente estudada, Blondel (1913), Adkins (1957).

Como resultado do avanço tecnológico, capacidade e velocidade de processamento de dados, através das últimas décadas, é possível nos dias atuais o desenvolvimento de modelos mais complexos, que buscam representar com maior fidelidade o funcionamento em diversos pontos de operação de uma máquina síncrona e com isso melhorar a estabilidade de sua operação e garantir, no caso de geradores síncronos, que estes possam operar com maior confiabilidade. Confiabilidade esta que, nos dias atuais, não é vista só como questão de sobrevivência e conforto, mas que é regulada por rigorosos contratos que garantem o fornecimento ininterrupto de tais “serviços”.

Na busca da convergência dos itens citados acima, diversos estudos foram e são realizados nessa área, tanto em busca de modelos mais detalhados da máquina síncrona, maior número de ramos em paralelo, tanto na parte de aquisição de dados comportamentais da máquina, quanto na operação normal ou em condições de operação com características particulares. É particularmente na parte de simulação de modelos mais detalhados onde os avanços tecnológicos, velocidade e capacidade de processamento de informações, que estão localizados os principais avanços nas áreas citadas.

Independentemente do tipo de operação a que a máquina síncrona será submetida, seja ela uma operação conectada a uma rede de transmissão interligada, seja ela de pequenas proporções ou de grandes proporções como o SIN (Sistema Interligado Nacional), ou operação isolada onde o consumidor encontra-se diretamente

conectado com a fonte geradora. É importante que cada informação possível de ser obtida da operação da máquina, seja analisada e que ações mitigatórias sejam rapidamente implementadas garantindo a estabilidade do sistema a qual está fazendo parte.

Devido ao elevado custo, a prototipagem de máquinas de grande porte torna-se inviável, sendo que em muitos casos o protótipo torna-se o produto final. Por essa razão a simulação através de modelos que reproduzam com fidelidade o funcionamento da máquina síncrona é indispensável, tanto nas fases de projeto quanto na operação.

Através dos tradicionais ensaios aplicados às máquinas é possível o levantamento das curvas de saturação em vazio e de curto-circuito e através destes é possível o cálculo de diversos parâmetros que serão usados nos modelos equivalentes das máquinas, mas que possuem características da operação em regime permanente.

Determinados ensaios, como o curto-circuito trifásico abrupto, devido ao estresse magnético, quando aplicado em máquinas com determinado tempo de operação podem apresentar risco à máquina ao serem realizados.

Nesse cenário, os ensaios estáticos, como o ensaio de resposta em frequência, SSFRT (Standstill frequency response test), onde um sinal de baixa amplitude com uma banda de frequência que varia na ordem de mili-hertz até algumas centenas de hertz, IEEE115 (2009) é aplicado a uma série de configurações dos enrolamentos de campo e armadura da máquina, que tem seu rotor posicionado segundo orientação do eixo que deseja-se realizar as medições e depois bloqueado para que mantenha a posição. Como resultado, e através dos dados obtidos, é possível o desenvolvimento de modelos de ordem superior bem como observação de diversos pontos de operação da máquina.

Segundo Minnich (1986), são necessários cuidados especiais por conta do rotor parado e da baixa potência dos sinais aplicados que pode resultar em relações de não linearidade.

1.2 Objetivo

Dentre os diversos tipos de ensaios e metodologias para ensaiar as máquinas síncronas, esse trabalho tem por objetivo obter as reatâncias de eixo direto, utilizando os dados obtidos por Souza (2011), através de um arranjo de bancada de baixo custo

por meio de um inversor de frequência utilizando um algoritmos de ajuste de curva baseado em redes neurais e algoritmo genético visando um algoritmo robusto capaz de compensar os resultados obtidos através do ensaio, estes que são influenciados pela adaptação de baixo custo utilizada em sua realização.

1.3 Justificativa

Por não oferecer estresse magnético à máquina síncrona e ainda fornecer reatâncias, tanto no eixo direto, tanto no regime permanente como nos regimes transitórios e subtransitórios, o ensaio estático de resposta em frequência é de fundamental interesse tanto para fabricantes de geradores síncronos quanto para proprietários de usinas. O algoritmo de ajuste de curva, principal foco deste trabalho, é de fundamental importância para ajustar os parâmetros obtidos através do ensaio quando comparados com ensaios tradicionais, estes que serão descritos ao longo do texto.

2 Fundamentação teórica e revisão de literatura

2.1 Introdução

A revisão de literatura realizada para a produção deste trabalho teve como principal objetivo fundamentar os principais tópicos que serão tratados no decorrer desta obra. Estudos relacionados à área das máquinas síncronas vêm sendo desenvolvidos desde o começo do século passado (BLONDEL, 1913). Desde de então uma incessante busca por modelos que podem representar tanto a máquina síncrona, como seu funcionamento em diversas condições de operação têm sido tema de diversos trabalhos nessa área.

2.2 Máquina Síncrona

Máquina síncrona é aquela que tem sua velocidade constante e definida por sua configuração e frequência da rede na qual está conectada, isso significa que depois de construída a máquina síncrona somente poderá operar na rotação para qual foi projetada, o conjugado magnético necessário para que a máquina funcione somente ocorrerá na rotação síncrona. Segundo Del Toro,

$$NN = \frac{120 * f}{n} \quad (2.1)$$

Onde:

NN = Rotação Nominal em rpm (velocidade constante de operação)

f = frequência da rede (Hz)

n = número de polos.

As máquinas síncronas podem funcionar como gerador, transformando energia mecânica proveniente do eixo da turbina em energia elétrica e podem funcionar como

motores, transformando energia elétrica em energia mecânica entregue através do eixo funcionando então como uma bomba, um motor, etc.

2.2.1 Gerador síncrono

O gerador síncrono, fig. 2.1, é constituído por suas partes ativas estator e rotor, partes essas que participam diretamente no processo de conversão da energia mecânica em energia elétrica e também por partes que não participam diretamente do processo de conversão de energia, mas que desempenham papel indispensável para seu funcionamento como eixo, cruzetas, mancais e sistemas de refrigeração.

Figura 2.1 – Vista superior gerador síncrono

Fonte: Autor

No gerador síncrono a conversão de energia dá-se quando uma corrente contínua I_f alimenta o enrolamento de campo, este presente no rotor da máquina, e produz um fluxo magnético estacionário que através da energia mecânica através do eixo induz um fluxo magnético variável ϕ no enrolamento do estator, que recebe a nomenclatura de enrolamento de armadura ou induzido.

2.2.2 O Estator

O estator do gerador síncrono é composto por uma estrutura de aço que tem por finalidade o suporte do núcleo ferro magnético e enrolamento de armadura, bem como transmitir os esforços e torques provenientes da operação do gerador síncrono para o ponto de ancoragem da carcaça no local de instalação.

O núcleo ferromagnético, figura 2.2, é composto por chapas de aço-silício, que após serem estampadas, lixadas e envernizadas são empilhadas em forma espiral contínua de forma a reduzir a indução por correntes parasitas.

No processo de estampagem das chapas no diâmetro externo destas chapas, são estampadas ranhuras que tem a finalidade da conexão com a carcaça. Essas ranhuras são responsáveis por garantir uma folga necessária para a expansão do núcleo durante a operação da máquina e evitar que o núcleo ferromagnético sofra desalinhamento das chapas.

Figura 2.2 – Estator.

Fonte: Autor

No diâmetro interno das chapas são estampadas ranhuras, ranhuras estas onde são instalados o enrolamento de armadura. O enrolamento de armadura pode ser composto por barras ou bobinas com condutores devidamente isolados como mostra a figura 2.3.

Figura 2.3 – Enrolamento estático do tipo barra inserido na ranhura.

Fonte: Autor

2.2.3 O rotor

O rotor do gerador síncrono, figura 2.4, é composto pelo eixo, uma estrutura de aço denominada hub ou aranha um núcleo ferromagnético e polos salientes.

O eixo tem a função de transmitir a energia mecânica proveniente da turbina até o rotor. A estrutura de aço intermediária, hub ou aranha, é responsável por suportar a contração do núcleo ferromagnético quando o rotor se encontra em repouso. Quando em movimento, devido as forças centrífugas, o núcleo ferromagnético do rotor tende a expandir-se.

Figura 2.4 – Rotor de polos salientes

Fonte: Autor

O núcleo ferromagnético do rotor é constituído de chapas de aço empilhadas em espiral e prensadas por tirantes que garante a sua circularidade quando em operação. Determinados tipos de cargas provocam a ocorrências de harmônicas no rotor e essas são responsáveis por indução de correntes parasitas. (NICKLE, 1926)

Os polos salientes são compostos por um núcleo isolado de chapas laminadas e prensadas pelas placas de pressão. O enrolamento polar é composto por barras de cobre instaladas em camada simples isoladas entre si.

O enrolamento amortecedor fica alojado na sapata polar, parte frontal do polo, e é responsável por amortecer torques oscilatórios devidos a operação do gerador síncrono. (ADKINS, 1957)

2.2.4 Reatâncias e constantes de tempo

Reatância são entes matemáticos, com finalidade de modelar o comportamento elétrico do gerador em regime normal de operação ou na situação de ocorrência de falha.

Constantes de tempo são os períodos de cada comportamento durante a falha.

- Período subtransitário: Instantes iniciais da falha, correntes e torques elevados, influência do enrolamento amortecedor. É pratica comum usar valores de reatâncias acima do normal para minimização de correntes e torques de falha.
- Período transitório: Período intermediário, correntes e torques ainda elevados, influência dos polos. É pratica comum usar valores de reatâncias abaixo do normal para sensibilizar a proteção e aumentar a estabilidade dinâmica.
- Período permanente: Fim do regime transitório, correntes e torques estabilizados, influência do enrolamento do estator e entreferro. É pratica comum usar valores de reatâncias abaixo do normal para sensibilizar a proteção e aumentar a estabilidade.

2.2.5 Equacionamento elétrico do gerador síncrono

Obedecendo a convenção do gerador na montagem das equações do estator considerando fluxos e correntes elétricas. (CONCORDIA, 1951)

Para o enrolamento da armadura:

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_a & 0 \\ 0 & 0 & R_a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -i_a \\ -i_b \\ -i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Para o enrolamento de campo e para o enrolamento amortecedor:

$$\begin{bmatrix} e_{fd} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{fd} & 0 & 0 \\ 0 & R_{jkd} & 0 \\ 0 & 0 & R_{jkq} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_{fd} \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{fd} \\ \psi_{jd} \\ \psi_{jq} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \\ e_{fd} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \\ \psi_{fd} \\ \psi_{jd} \\ \psi_{jq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{fd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{jkd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{jkq} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -i_a \\ -i_b \\ -i_c \\ i_{fd} \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Onde “jk” representam a resistência do enrolamento, quando “j” igual a “k”, e resistência do anel de curto do enrolamento amortecedor, quando “j” diferente de “k”. As tensões nos enrolamentos amortecedores é considerada nula por estes estarem todos conectados entre si pelo anel de curto.

Por serem os enrolamentos da armadura idênticos a resistência considera no equacionamento (2.2) é a mesma nas 3 fases.

Exprimem-se das definições de indutância própria e mútua os fluxos concatenados dos enrolamentos do gerador em uma representação matricial em (2.5).

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \\ \psi_{fd} \\ \psi_{jd} \\ \psi_{jq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{aa} & X_{ab} & X_{ac} & X_{afd} & X_{akd} & X_{akq} \\ X_{ba} & X_{bb} & X_{bc} & X_{bfd} & X_{bkd} & X_{bkq} \\ X_{ca} & X_{cb} & X_{cc} & X_{cfd} & X_{ckd} & X_{ckq} \\ X_{fad} & X_{fbd} & X_{fcd} & X_{ffd} & X_{fkd} & X_{fkq} \\ X_{jad} & X_{jbd} & X_{jcd} & X_{jdfd} & X_{jdkd} & X_{jdkq} \\ X_{jaq} & X_{jab} & X_{jac} & X_{jqfd} & X_{jqkd} & X_{jqkq} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -i_a \\ -i_b \\ -i_c \\ i_{fd} \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Onde X_{aa} , X_{bb} e X_{cc} são as reatâncias próprias das fases a, b e c em função da posição do rotor, as reatâncias mútuas entre as fases a, b e c são dadas por X_{ab} , X_{ba} , X_{ac} , e seus pares simétricos. De mesmo modo as reatâncias próprias e mútuas entre enrolamento do rotor e do estator são dadas por representações do tipo X_{ffd} e X_{jdfd} , respectivamente reatância própria do enrolamento do rotor e para reatância mútua entre o enrolamento do rotor e o enrolamento amortecedor de eixo d.

2.2.6 Transformada dq0 ou transformada de Park

As equações tratadas no subcapítulo anterior descrevem o comportamento elétrico do gerador síncrono, no entanto por possuírem termos que variam com o ângulo de posicionamento do rotor, e este varia com o tempo, resultam em uma complicada manipulação matemática. Soluciona-se isso através da transformação das grandezas do enrolamento estatórico em um referencial dq fixo no rotor, figura 2.5. (PARK, 1928)

Figura 2.5 – Orientação segundo eixos abc e dq

Fonte: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/89715/245030.pdf?sequence=1>

Temos então, correntes da armadura, fluxos e tensões da armadura transformados em dois grupos de variáveis ortogonais, um grupo alinhado com o eixo magnético do enrolamento rotórico, eixo direto, e o outro grupo atrasado em 90° elétricos em relação ao primeiro eixo chamado de eixo em quadratura.

Utilizando uma variável genérica W e utilizando a transformada de Park para transformação das fases a, b e c para as do eixo d, q tem-se (CONCORDIA, 1951):

$$\begin{bmatrix} W_d \\ W_q \\ W_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3}\cos\theta & \frac{2}{3}\cos(\theta - 120^\circ) & \frac{2}{3}\cos(\theta + 120^\circ) \\ -\frac{2}{3}\sin\theta & -\frac{2}{3}\sin(\theta - 120^\circ) & -\frac{2}{3}\sin(\theta + 120^\circ) \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} W_a \\ W_b \\ W_c \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Aplicando a transformada (2.6) em (2.2) e (2.3), tem-se:

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \\ e_0 \\ e_{fd} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \\ \psi_{fd} \\ \psi_{jd} \\ \psi_{jq} \end{bmatrix} - \frac{d\theta}{dt} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{fd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{jkd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{jqd} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -i_d \\ -i_q \\ -i_0 \\ i_{fd} \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Dessa forma temos a tensão da armadura referenciada aos eixos direto e de quadratura segundo o deslocamento do rotor em função do tempo.

2.2.7 Ensaios tradicionais

2.2.7.1 Ensaio de curto circuito trifásico brusco

Este é um dos ensaios mais antigos aplicados a máquinas síncronas para obtenção dos parâmetros elétricos de máquinas síncronas seja em regime permanente, transitório ou subtransitório no entanto só é possível obtenção de parâmetros relativos ao eixo direto da máquina.

Coloca-se o gerador em vazio, subexcitado e em velocidade síncrona (IEEE 115, 2009), então curto circuita-se as três fases do enrolamento de armadura simultaneamente e registra-se o comportamento das correntes de fase. Variando a

excitação do gerador é possível verificar os efeitos da saturação eletromagnética nos parâmetros.

As correntes que surgem no enrolamento de armadura são responsáveis pela força magnetomotriz (F_a), que se opõem à força magnetomotriz original (F_f). A corrente de campo tende a se elevar, como uma forma de manter o fluxo concatenado, e estas correntes criam uma nova força magnetomotriz que se soma com F_f , o que ajuda na neutralização da desmagnetização resultante de F_a .

Figura 2.6 Corrente de curto circuito na fase A (i_a) e no enrolamento de campo (i_{fd})

Fonte: Lierena, 2011

Como é possível observar na figura 2.6, ocorre o decaimento da corrente i_a e da corrente i_{fd} após o curto nos terminais do gerador.

Através dos valores de pico de corrente tanto para o enrolamento da armadura, corrente alternada (CA), obtido através da metade da diferença, quanto para as correntes de campo, corrente contínua (CC), obtido através da metade da soma das envoltórias superiores e inferiores (IEEE-115, 2009).

Juan (2009), sugere a utilização da média entre as envoltórias das três fases, enquanto Bortoni (1998), propõem a utilização de todos os pontos da curva resultante do ensaio.

Figure 2.7 Corrente de curto circuito na fase a (i_a), após curto trifásico brusco

Fonte: Lierena, 2011

Ao subtrairmos a componente permanente I_s da onda de corrente alternada, temos uma componente exponencial (transitória) I' com constante de tempo $T'd$, e uma componente exponencial, componente subtransitória I'' , com constante de tempo $T''d$ o que resulta na equação:

$$I(t) = I_s + I' e^{-t/T'd} + I'' e^{-t/T''d} \quad (2.8)$$

Onde:

- I_s – Corrente eficaz de curto em regime permanente;
- I' – Valor eficaz inicial da componente alternada transitória da corrente de curto;
- I'' – Valor eficaz inicial da componente alternada subtransitória da corrente de curto circuito.

Então segundo (IEEE-115, 2009) as reatâncias de eixo direto X_d , $X'd$, $X''d$ podem ser calculadas por:

$$x_d = V/I_s \quad (2.9)$$

$$x_{d'} = V/(I_s + I') \quad (2.10)$$

$$x''_d = V / (I_s + I' + I'') \quad (2.11)$$

$$I(t) = V \left(\frac{1}{x_d} + \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-t/T'd} + \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) e^{-t/T''d} \right) \quad (2.12)$$

Onde V é o valor eficaz da tensão em vazio do gerador síncrono antes do curto.

Na componente contínua, as correntes podem possuir amplitudes diferentes e, com um comportamento exponencial decrescem até zero com a mesma constante de tempo T_a , conforme a expressão:

$$I_{dc} = \left(\sqrt{2} V_{fd} \cos \alpha / x''_d \right) e^{-t/T_a} \quad (2.13)$$

Onde α é o ângulo de defasagem entre tensão e corrente no instante do curto e as constantes de tempo são os tempos necessários para que as componentes transitórias e subtransitórias atinjam 1/e vezes seu valor inicial.

As desvantagens inerentes à realização desse ensaio são o fato de a máquina ser submetida a um estresse eletromecânico elevado devido às correntes a que os enrolamentos são submetidos, além de não ser possível a obtenção de parâmetros no eixo de quadratura.

2.2.7.2 Ensaio de rejeição de carga

Através do ensaio de rejeição de carga é possível obter parâmetros tanto no eixo direto quanto no eixo de quadratura, para tanto basta analisar, no momento do ensaio o alinhamento do fluxo magnético entre estator e rotor.

Para o eixo direto o gerador síncrono deve estar ligado à rede fornecendo potencia reativa, indutiva ou capacitiva, com potencia ativa igual a zero ou ainda conectado a uma carga reativa pura. Com isso o fluxo magnético existente no estator estará no eixo direto apenas. Para o gerador subexcitado os parâmetros encontrados não serão influenciados pela saturação magnética (JUAN, 2009). Então repentinamente desconecta-se o gerador, admite-se a corrente de armadura i_{d0} nesse instante. Com a queda da tensão nos terminais e a corrente de campo os parâmetros X_d , X'_d , X''_d ,

$T'd_0$ e $T''d_0$ são obtidos, lembrando que as constantes de tempo são do gerador em circuito aberto.

Figure 2.8 Curva de decaimento da tensão da máquina síncrona após rejeição de carga (eixo d)

Fonte: Lierena,2011

A figura 2.8 mostra a curva de decaimento da tensão após a rejeição de carga, sendo esta capacitiva, enquanto que em cargas indutivas a tensão seria elevada. Os parâmetros para o eixo direto são obtidos segundo:

$$x_d = C/I_{d0} \quad (2.14)$$

$$x'_d = B/I_{d0} \quad (2.15)$$

$$x''_d = A/I_{d0} \quad (2.16)$$

Onde I_{d0} é a corrente de eixo direto, no momento do desligamento do gerador da fonte, enquanto que os valores de A, B e C são obtidos da curva da figura 2.8, assim como as constantes de tempo.

Para os parâmetros do eixo q, deve-se ajustar a potência reativa para que o valor absoluto do ângulo entre tensão terminal e corrente de armadura seja o mesmo do

ângulo de carga. Dessa maneira teremos a corrente de armadura alinhada com o eixo q. Então o disjuntor é acionado e as corrente, são medidas.

Figure 2.9 Curva de decaimento da tensão da máquina síncrona após rejeição de carga (eixo q)

Fonte: Lierena, 2011

Da figura 2.4 é possível obter os parâmetros para X_q e X''_q pelas seguintes expressões:

$$x_q = \frac{\sqrt{A^2 - C^2}}{I_{q0}} \quad (2.17)$$

$$x''_q = \frac{\sqrt{A^2 - C^2} - \sqrt{B^2 - C^2}}{I_{q0}} \quad (2.18)$$

Através desse ensaio não é possível encontrar as constantes de tempo de eixo em quadratura T'_{q0} , T''_{q0} .

Dada a dificuldade de se ajustar a uma condição ideal para o levantamento dos parâmetros no eixo em quadratura, é costume realizar o ensaio com eixo arbitrário (JUAN, 2009), monitorando a variação do ângulo de carga, para posterior separação da tensão terminal e corrente de armadura.

Como vantagens para esse ensaio, podemos estimar parâmetros em ambos os eixos diferente do ensaio tratado no item 2.2.7.1 deste trabalho onde só era possível obter parâmetros no eixo direto.

Como desvantagens, temos a dificuldade em manter-se a tensão de excitação constante, bem com a obtenção do ângulo de carga.

2.2.8 Ensaio em Frequência

2.2.8.1 Princípio

Através da evolução da teoria do duplo-eixo e a busca por modelos cada vez mais completos e complexos o que favorece a criação de sistemas de proteção mais eficientes e com maior confiabilidade, novos ramos de estudos foram criados.

Os circuitos equivalentes utilizados até então eram de certa forma simples e cheios de limitações. Muitas vezes apenas o eixo direto era representado, sendo dificultoso a utilização no eixo em quadratura o que leva a adoção de valores baseados em cálculos e que não representavam a realidade com exatidão.

Em um trabalho que compilou estudos de mais de 3 décadas, Dandeno (1980), aponta que dada a complexidade de alguns sistemas era necessária a utilização de modelos de ordens superiores, o que não era possível de ser obtido em métodos convencionais.

Segundo Dandeno (1980), ao longo da década de 70 começam a surgir estudos que estudam a reação dos enrolamentos da máquina à aplicação de pequenos sinais de frequência variável nas máquinas.

No início da década de 80, diversos trabalhos foram publicados dissertando sobre o tema. Coultres (1981), apresentou diferentes possibilidades de configuração dos enrolamentos. A temperatura também foi uma preocupação, bem como a forma de se medir as correntes. Seu trabalho contemplou frequências entre 0,001Hz e 1000Hz com maior concentração de pontos entre os milésimos e centésimos de Hz. Hurley (1981), aplicou seus resultados em um modelo para estudar o comportamento de uma máquina quando era manobrada na rede.

Minnich (1986), atenta para os efeitos que os baixos níveis de tensão no ensaio podem produzir, a falta da rotação e consequentes deslocamentos em função da força centrípeta.

2.2.8.2 Ensaio de resposta em frequência com rotor em repouso

O SSFRT (Stand Still Frequency Response Test) consiste de um método onde é possível estimar os parâmetros do gerador síncrono, tanto no eixo direto quanto no eixo em quadratura, estando o rotor em repouso através da aplicação de sinais de baixa potência aplicados à máquina síncrona o que diminui o risco da realização do ensaio em geradores já com certa idade de funcionamento, já que não são impostos a situação de estresse magnético como no ensaio de curto circuito brusco. A determinação de parâmetros ocorre através das funções de transferência obtidas no ensaio. (BORTONI, 1998)

Um gerador de funções é usado para gerar tensões senoidais que variam de 0,001Hz até 1000Hz e através de um sistema de aquisição de dados, tensões e correntes são obtidas. Os parâmetros do gerador são obtidos por meio das Indutâncias operacionais $L_d(s)$ e $L_q(s)$. Após o ensaio é necessário utilizar metodologias de ajuste de curva para que seja possível igualar as constantes de tempo com as respostas medidas. As metodologias de ajuste de curva serão estudadas em profundidade no decorrer deste trabalho.

2.2.8.3 Ensaio de resposta em frequência em tempo real

No ensaio de resposta em frequência em tempo real o gerador síncrono é colocado em operação com valores nominais, com alta impedância o que garante a estabilidade do sistema. Aplica-se então sinais senoidais à excitação da máquina e diversos parâmetros são monitorados. Com auxílio de parâmetros calculados da máquina e uma técnica de minimização de diferenças os parâmetros do modelo são obtidos. (L.A. AGUIRRE, 2007)

2.2.9 Impedância operacional

Segundo Concordia (1951) através das impedâncias operacionais é possível representar a máquina de maneira alternativa, evitando assim relacionar as grandezas rotóricas como correntes de campo e amortecimento.

Após desenvolvimento matemático utilizando a teoria do duplo-eixo chegamos até as seguintes equações:

$$\psi_d = G(s)e_{fd} - L_d(s)i_d \quad (2.19)$$

$$\psi_q = -L_q(s)i_q \quad (2.20)$$

$G(s)$, $L_d(s)$ e $L_q(s)$, representam funções de transferência:

$$L_d(s) = \frac{\psi_d}{i_d} \Big|_{e_{fd}=0} \quad (2.21)$$

$$L_q(s) = \frac{\psi_q}{i_q} \quad (2.22)$$

$$G(s) = \frac{\psi_d}{e_{fd}} \Big|_{i_d=0} \quad (2.23)$$

Por necessitar do fluxo concatenado essa formulação não é muito aplicável, então segundo IEEE 115 (2009) temos algumas funções de transferência adicionais e as impedâncias operacionais:

$$Z_d(s) = R + sL_d(s) = \frac{e_d}{i_d} \Big|_{e_{fd}=0} \quad (2.24)$$

$$Z_q(s) = R + sL_q(s) = -\frac{e_q}{i_q} \quad (2.25)$$

$$G(s) = \left. \frac{e_d}{s e_{fd}} \right|_{i_d=0} \quad (2.26)$$

$$sG(s) = \left. \frac{i_{fd}}{i_d} \right|_{e_{fd}=0} \quad (2.27)$$

$$Z_{afo} = \left. \frac{e_{fd}}{i_d} \right|_{i_{fd}=0} \quad (2.28)$$

$$Z_{fao} = \left. \frac{e_d}{i_{fd}} \right|_{i_d=0} \quad (2.29)$$

Agora temos relações que são dependentes de grandezas que podem ser medidas nos enrolamentos de armadura e campo. As impedâncias operacionais de eixo direto e de quadratura agora dependem de suas tensões e correntes e função da frequência. Segundo Adkins (1957) as equações (3.12), (3.13) e (3.14) relacionam as indutâncias operacionais com transitórios e subtransitórios.

$$L_d(s) = \frac{(1 + T'_{d0}s)(1 + T''_{d0}s)}{(1 + T'_{d0}s)(1 + T''_{d0}s)} L_d \quad (2.30)$$

$$L_q(s) = \frac{(1 + T'''_{q0}s)}{(1 + T'''_{q0}s)} L_q \quad (2.31)$$

$$G(s) = \frac{(1 + T_{kd}s)}{(1 + T'_{d0}s)(1 + T''_{d0}s)} \frac{L_{ad}}{R_{fd}} \quad (2.32)$$

Adotando-se o equacionamento apresentado por Adkins (1957) é possível trabalhar com os polos e zeros da função e o diagrama de Bode. Como é possível identificar através da figura 2.8 é possível obter o gráfico com resultados do ensaio e então obter os polos e zeros da função relacionados aos trechos do diagrama

Figure 2.10 Diagrama de bode $L_d(s)$

Fonte: Souza, 2011

Do diagrama é possível notar que o primeiro patamar representa a indutância de eixo direto em regime permanente (L_d , em baixas frequências), o segundo patamar representa a indutância de eixo direto em regime transitório (L'_d , em frequências médias) e o terceiro e último patamar representa a indutância de eixo direto em regime sub-transitório (L''_d , em frequências altas).

$$L'_d = L_d \frac{T'_d}{T_{d0}} \quad (2.33)$$

$$L''_d = L'_d \frac{T''_d}{T'_{d0}} \quad (2.34)$$

2.2.10 Linha do tempo

Ao publicar um estudo sobre a decomposição das forças magneto-motrizes com componentes nos eixos direto e de quadratura, Blondel (1913), foi um dos responsáveis pelo início dos estudos das máquinas de polos salientes.

Seguindo os caminhos de Blondel, Doherty e Nickle (1926), usaram seu trabalho como base e assim exploraram as componentes harmônicas presentes nas tensões de

armadura em máquinas operando em regime permanente, fato que até então não havia sido explorado.

Doherty e Nickle (1926) propõem equacionar as formas de onda de maneira decompostas em componentes estacionárias como uma forma de solução para as amplitudes pulsantes, resultantes da permeância variável no tempo devido às velocidades relativas ao rotor das componentes harmônicas. Quando operando em regime permanente existe uma sincronia entre o campo da componente fundamental e a rotação do rotor, então essa componente é vista estacionária e de amplitude fixa diferente das componentes harmônicas que possuem velocidades e sentidos de rotação diferentes.

Ao final da década 20, Park e Robertson (1928), desenvolveram um amplo estudo dos temas abordados até então na área e, como resultado de seu trabalho classificaram as reatâncias em 3 (três) grupos básicos: reatâncias inerentes à sequência de fase, reatâncias inerentes ao regime temporal e por fim reatâncias inerentes ao posicionamento do rotor cada qual com suas características particulares.

Na sequência, Park (1929 e 1933), após uma compilação de estudos anteriores, propõem um equacionamento fundamental onde tensões, fluxos concatenados, correntes e rotação da máquina são relacionados, equacionamento este realizado utilizando-se a teoria do duplo-eixo e que pode ser transposto para componentes de fase. Desprezar efeitos de histerese e saturação além de considerar forma de onda senoidal da armadura (ausência de harmônicas), foram algumas das premissas adotadas para tal e com isso uma generalização no tratamento de máquinas de diferentes características foi criada. Diferentes pontos de operação bem como modos de operação são alvos do estudo de Park.

Na sequência, em busca de modelos mais fieis das máquinas síncronas, Rankin (1945), direcionou seus estudos para modelos completos das máquinas. Modelos esses que em determinadas situações são necessários para a análise de particularidades no comportamento de máquinas síncronas.

Ainda em 1945 a AIEE (American Institute of Electrical Engineers), que através da fusão com o IRE (Institute of Radio Engineers) em 1963, passa a se chamar IEEE (Institute of Electrical and electronics Engineers) criou o que pode chamar-se da primeira versão da hoje chamada IEEE-115 (Test Procedures For Synchronous Machines), que estabelece critérios de ensaio para máquinas síncronas.

Mason (1949) foi responsável pelos primeiros estudos na área de proteção de máquinas síncronas. Concordia (1951) publica uma extensa descrição teórica dedicada as máquinas síncronas.

Adkins (1957) publica um trabalho sobre a aplicação da teoria do duplo-eixo de maneira mais generalista aplicada a qualquer tipo de máquina elétrica.

Em 1964 a IEC (international Electrotechnical Commission) publica a IEC 60034-4 (Methods for Determining Synchronous Machine quantities from tests), metodologia para determinação de parâmetros através de ensaios.

Canay (1969) publicou um trabalho onde descreveu as discrepâncias entre modelos matemáticos de máquinas e ensaios reais de máquinas elétricas.

Dandeno (1980) publica uma compilação de trabalhos do período de 1945 até 1980 falando sobre a importância da determinação de parâmetros elétricos para o estudo da estabilidade da máquina síncrona.

Coultes (1981) realiza estudos através do ensaio de resposta em frequência com máquina parada. Seu trabalho aborda diferentes possibilidades de grupos de ligação, conseguindo com isso medir com precisão as resistências dos enrolamentos. Coultes também como estabelece a importância em se manter a temperatura da máquina constante durante a execução do teste.

Hurley (1981) vai além das proposições de Coultes e aplica o modelo, de 2ª ordem, obtido através do ensaio estático em frequência no estudo de manobras da máquina síncrona quando conectada na rede.

2.3 Redes Neurais

O estudo das redes neurais tem base no funcionamento do cérebro humano, por esse ser capaz de processar informações de forma única, sendo capaz de estabelecer padrões em diversas áreas e situações com velocidade superior ao mais rápido computador existente. (HAYKIN, 2001)

Através da experiência adquirida com o crescimento do indivíduo, o cérebro humano é capaz de ponderar atitudes e/ou tomadas de decisão, baseada em uma série de pré-conceitos que foram registrados em sua memória, através desse foi estabelecido um padrão de aprendizagem e ponderação.

As redes neurais começaram a ser estudadas em 1943, quando McCulloch & Pitts, publicam um trabalho onde pela primeira vez acontece a modelagem matemática de um neurônio real. Em 1949, através de observações neurofisiológicas, Hebb desenvolveu o primeiro método de treinamento para uma rede neural artificial.

Nas décadas de 50 e 60 diversos trabalhos foram publicados na área, até que 1969 Minsky & Papert publicam um livro onde demonstram a limitação das redes neurais artificiais de camada única. Essa publicação gerou um período escasso de trabalhos sobre esse tema. O tema volta à tona no final da década de 80, com a publicação de um livro por Rumelhart, Hinton e Williams onde estes demonstram o ajuste de pesos em uma rede multicamada. Desde então diversos trabalhos vêm sendo publicados em diversas áreas.

A rede neural pode ser definida como um modelo computacional que copia o cérebro humano. São compostas de unidades de processamento chamadas de neurônios artificiais, que assim como os neurônios reais possuem diversas conexões entre neurônios que são representadas por entidades matemáticas. (SILVA, 2010)

2.3.1 Neurônio Real (biológico)

O papel do neurônio no sistema nervoso central do corpo do indivíduo é o de conduzir impulsos, estímulos elétricos, de maneira paralela com o objetivo de produzir determinada funcionalidade.

Figura 2.11 – Neurônio biológico

Fonte: https://petcivilufjf.files.wordpress.com/2013/07/fig1-1_rna.jpg

Os dendritos são responsáveis por captar os estímulos elétricos que vem de outros neurônios. As informações são processadas no núcleo celular e este decide se a informação será disparada através do axônio a outro neurônio.

Figura 2.12 – Processo de sinapse

Fonte: <http://2.bp.blogspot.com/-dS8rQPOLVwc/UoPlvp5FAsI/AAAAAAAAACF4/yN-yEdqbLeE/s1600/Estrutura+de+um+neur%25C3%25B4nio.gif>

Através de reações químicas iniciadas pelos neurônios, chamadas sinapse, as informações são transmitidas de um neurônio a outro. Uma grande malha de neurônios operando de maneira paralela é o mecanismo responsável pelo controle

das demais entidades que compõem o corpo humano, bem como pelos pensamentos e memória.

2.3.2 Neurônio Artificial

Os neurônios artificiais foram desenvolvidos a partir da análise do modelo de neurônio biológico citado no item anterior. Estes quando empregados em redes neurais são capazes de coletar os sinais de suas entradas e através de sua função operacional produzir uma resposta baseada no processo de ativação que será visto adiante.

Figura 2.13 – Neurônio artificial

Fonte: Haykin, 2010

Através da observação da figura 2.13, temos as entradas representadas pelas variáveis $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, que são os sinais recebidos pela rede provenientes do objeto de estudo. É normal a normalização dos dados segundo a função de ativação que será vista adiante. Os pesos sinápticos, representados por $\{W_1, W_2, \dots, W_n\}$ são responsáveis pela quantificação das variáveis de entrada. O somador linear $\{\Sigma\}$ é responsável pelo sinal de ativação seguindo o critério imposto pela ponderação dos valores de entrada. O limiar de ativação $\{\theta\}$ estabelece um patamar para o sinal de ativação então o potencial de ativação $\{u\}$ através dos sinais recebidos estabelece um sinal excitatório ou inibitório. A função de ativação $\{g.\}$ estabelece os limites do sinal de saída do neurônio e o sinal de saída $\{y\}$ apresenta o resultado produzido pelo neurônio. (HAYKIN, 2001)

2.3.3 Funções de ativação

Existem diversas funções de ativação, porém neste trabalho optou-se pelo uso da função tangente hiperbólica onde o resultado de saída assume valores entre -1 e 1.

$$g(u) = \frac{1 - e^{-\beta u}}{1 + e^{-\beta u}} \quad (2.35)$$

Sendo β responsável pela inclinação da função tangente hiperbólica.

Figura 2.14 - Função de ativação tangente hiperbólica

Fonte: Haykin, 2010

2.3.4 Processo de treinamento

Um dos fatores mais relevantes das redes neurais é a capacidade de apreender o comportamento de um sistema, quando são apresentadas a rede um conjunto de entradas e saídas desse sistema. Após o processo de aprendizagem a rede é capaz de generalizar o comportamento desse sistema desde que o intervalo de dados seja respeitado.

Os algoritmos de aprendizado são definidos como processos ordenados, que visam o ajuste dos pesos sinápticos e limiares do conjunto de neurônios que compõem a rede. (Silva, 2010)

Esse processo de aprendizado pode ser feito de diversas maneiras, destacam-se entre elas o treinamento supervisionado e o treinamento não supervisionado. No treinamento supervisionado o sistema é apresentado a rede com entradas e suas respectivas saídas. Este ainda pode ser dividido em um subgrupo, aprendizado com reforço, onde o a rede busca constantemente uma comparação entre os dados de entrada e saída. No treinamento não supervisionado o sistema é apresentado a rede somente com entradas.

2.3.5 Rede Perceptron Multicamadas

Neste trabalho optou-se por trabalhar com redes do tipo Perceptron Multicamadas devido a capacidade que está possui no reconhecimento de padrões e aproximação universal de funções. (Silva, 2010)

Estas são caracterizadas por possuírem ao menos uma camada intermediária entre as camadas de entrada e saída. Seu princípio de funcionamento como pode ser visto na figura 2.15, estabelece que cada sinal proveniente da entrada será propagado um a um para a próxima camada até a camada de saída em um único sentido.

Figura 2.15 – Perceptron multicamadas

Fonte: Haykin, 2010

2.3.5.1 Processo de treinamento Perceptron multicamadas

O processo de treinamento da rede é supervisionado e utiliza algoritmos de retropropagação de erros. Conforme pode ser observado na fig. 2.16, em um primeiro instante a propagação da rede obedece ao sentido entrada para saída, então as respostas obtidas pela rede são comparadas com as respostas conhecidas do

sistema. Então a rede estabelece o desvio entre a saída produzida por ela e a saída do sistema previamente conhecida. Esse desvio é então utilizado no sentido saída para entrada modificando todos os pesos sinápticos e limiares de ativação. O processo é repetido diversas vezes até a redução do desvio ao nível desejado. (Silva, 2010)

Figura 2.16 – Fase de treinamento da rede Perceptron multicamada

Fonte: Haykin, 2010

2.4 Técnicas de ajuste de curva

Parte necessária na estimação de parâmetros dos geradores síncronos quando o ensaio de resposta em frequência é aplicado, as técnicas de ajuste de curva vêm ganhando maior espaço entre os trabalhos na área nas últimas décadas. Através das técnicas de ajuste de curvas é possível a obtenção de funções de transferência das indutâncias operacionais resultantes dos dados obtidos nos ensaios.

A técnica dos mínimos quadrados foi utilizada em diversos trabalhos (KYRIAKIDES, 2004), (LE, 2002). Esta penaliza igualmente os erros das medições.

Sousa, (2011) utiliza uma rotina de algoritmo genético (GA) com base na teoria dos mínimos quadrados. Lui, (1993) utiliza um método onde o sistema de ponderação tem pesos diferentes para diferentes pontos medidos.

Lierena, (2011) utilizou diversas metodologias: Levy, Gauss-Newton, Levenberg-Marquardt e método híbrido, e comparou os resultados obtidos em cada uma das diferentes metodologias.

Expansões por séries ortogonais, série de Fourier, foram usadas por Rico, Heydt, Keyhani, Agrawal e Selim, (2001)

Usando redes Neurais, Tsai, Keyhani, Demcko e Selin (1995), buscaram uma nova metodologia na obtenção de parâmetros, já que estas podem ser treinadas quando organizadas em certos padrões. O estudo mostrou que a rede pode prever a não linearidade dos parâmetros por conta da saturação.

Existem muitas outras metodologias que foram aplicadas na obtenção de parâmetros, vale citar a metodologia usando o método dos elementos finitos, que pode ser usada em qualquer fase do projeto, dependendo apenas do modelo de simulação e todas suas variáveis corretamente organizadas.

2.5 Estado-da-Arte

O interesse no ensaio de resposta em frequência vem crescendo significativamente nas últimas décadas e diversos trabalhos vem sendo publicados sobre o tema.

Bortoni (1998) propõem um procedimento alternativo ao ensaio de resposta em frequência tradicional com possibilidade de aplicação para geradores de grande porte, já que sua aplicação em máquina de elevado número de polos tem complexidade elevada.

Sousa (2011) propõem uma metodologia com utilização de um inversor de frequência comercial como gerador de sinais e equipamentos “simples” de laboratório para aquisição dos dados, usando uma metodologia de ajuste de curvas baseada em algoritmo genético e o método dos mínimos quadrados.

Tsai (1995) e Huang (2009) propõem metodologias do ensaio de resposta em frequência com a máquina em operação. Com isso os efeitos da magnetização e força por conta do giro do rotor podem ser contemplados. Ambos os modelos são considerados válidos quando comparados com resultados obtidos através de ensaios tradicionais.

Lierena (2011), propõem diversos modelos de ajuste de curva para obtenção de parâmetros do gerador síncrono e ao final do trabalho realiza uma comparação entre os diferentes métodos e elege o método híbrido como aquele que apresenta resultados que melhor se aproximam dos ensaios tradicionais.

3 Metodologia Proposta

3.1 Introdução

Pretende-se através desse trabalho apresentar uma metodologia de estimativa de parâmetros, indutâncias operacionais, em máquinas síncronas usando como base o trabalho publicado por Souza em 2011, onde alternativamente ao proposto pela IEEE 115 (2009) propõem-se o uso de equipamentos de baixo custo buscando uma maior viabilidade para uso do ensaio de resposta em frequência. Como forma de mitigar os efeitos decorrentes da parte experimental, com a finalidade de estimar os parâmetros do gerador síncrono, diversas técnicas matemáticas e computacionais são empregadas.

3.1.1 Equipamentos empregados

Para realização do ensaio e obtenção do digrama de Bode através do ensaio em frequência foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Inverso de frequência: inversor de frequência de uso comercial com a finalidade de redução de custos na realização do ensaio;
- Filtro passa-baixa: em função do uso de um equipamento adaptado para o ensaio foi necessário a introdução de um filtro passa-baixa para que harmônicos fossem tratados
- Instrumentos: Foram utilizados instrumentos típicos de laboratório necessários a obtenção de tensões e correntes.
- Máquina Síncrona: foi utilizada uma máquina de 2kVA de potência, $n_n = 1800\text{rpm}$, 60Hz e conectada em duplo-estrela com tensão e corrente nominais nessa configuração: 230V e 5A.

Figura 3.1 Configuração do arranjo de bancada

Fonte: Souza, 2011

O ensaio foi realizado com intervalo de frequência de 0,7 até 120Hz, sendo que o limite inferior foi assim definido segundo resolução mínima do inversor de frequência utilizado.

- V_{inv} representa o inversor de frequência e encontra-se conectado às fases “a” e “b”, ficando a fase “c” em aberto.
- L_f e C_f são componentes que representam o filtro que têm por finalidade solucionar o problema das harmônicas.
- I_{arm} e V_{arm} representam os pontos de medição de corrente e tensão de armadura respectivamente.
- L_a , L_b e L_c representam os 3 enrolamentos da máquina, lembrando que a fase c não foi utilizada.

Figura 3.2 - arranjo de bancada

Fonte: SOUSA, 2011

3.1.2 Alinhamento segundo o eixo direto

Antes de iniciar o ensaio é necessário que o rotor da máquina seja alinhado segundo o eixo direto, para tanto é necessário aplicar uma tensão entre os terminais das fases a e b do gerador síncrono e então medira a tensão nos terminais do enrolamento de campo.

Figura 3.3 Alinhamento segundo o eixo direto

Fonte: IEEE 115, 2009

O rotor estará alinhado segundo o eixo direto quando a tensão induzida no enrolamento de campo for máxima, então devemos travar o rotor.

3.1.2.1 Medições

Após o rotor travado e através dos valores de tensões e correntes medidos, a partir da resposta em frequência obtida do ensaio calculam-se as indutâncias de eixo direto da máquina.

$$Z_{arm} = \frac{V_{arm}}{I_{arm}} \quad (3.1)$$

Para a impedância de eixo direto é necessário considerar apenas uma bobina do enrolamento então:

$$Z_d = \frac{Z_{arm}}{2} \quad (3.2)$$

Então deve-se calcular a resistência de cada bobina. Aplica-se tensão contínua nos terminais e levanta-se a curva tensão-corrente. Mais uma vez é necessário considerar a resistência de apenas uma bobina, que é obtida pelo coeficiente angular da reta obtida. Não foi considerado variação de temperatura do enrolamento durante a realização do ensaio.

A reatância de eixo direto obtêm-se por:

$$Z_d = \sqrt{R_a^2 + X_d^2} \quad (3.3)$$

$$X_d = \sqrt{Z_d^2 - R_a^2} \quad (3.4)$$

e a indutância por:

$$X_d = \omega L_d \quad (3.5)$$

$$L_d = \frac{X_d}{\omega} \quad (3.6)$$

Onde $\omega = 2\pi f$ (rad/s).

Varrendo as frequências de 0.7 até 120Hz obteremos um conjunto de indutâncias de eixo direto relacionadas a um conjunto de frequências. Ao representarmos isso em um diagrama de bode.

Figure 3.4 Diagrama de Bode $L_d(s)$

Fonte: IEEE-115, 2009

Ao comparar-se a curva resultante do ensaio com o diagrama de bode apresentado na figura 2.8 não podemos identificar os patamares. Então com ferramentas de ajustes de curva que serão vistas no próximo item deste trabalho buscaremos encontrar os polos e zeros das funções de transferência.

A estimativa de parâmetros segundo o eixo de quadratura é feita de maneira semelhante a apresentada para o eixo direto.

$$Z_q = \sqrt{R_a^2 + X_q^2} \quad (3.7)$$

$$X_q = \sqrt{Z_q^2 - R_a^2} \quad (3.8)$$

e a indutância por:

$$X_q = \omega L_q \quad (3.9)$$

$$L_q = \frac{X_q}{\omega} \quad (3.10)$$

Onde $\omega = 2\pi f$ (rad/s).

Figure 3.5 - Diagrama de Bode $L_q(s)$

Fonte: IEEE-115, 2009

3.2 Dados resultantes do ensaio

A tabela 3.1 apresenta um sumário dos dados obtidos no ensaio juntamente com os valores calculados segundo as equações 3.1 a 3.6

Tabela 3.1 – Medições realizadas por (Souza, 2011)

freq	V_{arm}	I_{arm}	Z_{arm}	Z_d	R_a	X_d	L_d
0.70	5.53	1.74	3.18	1.59	1.41	0.73	165.74
0.90	7.55	2.29	3.30	1.65	1.41	0.85	150.28
1.10	9.64	2.93	3.29	1.65	1.41	0.85	121.99
1.30	11.60	3.51	3.30	1.65	1.41	0.86	104.97
1.50	13.60	4.14	3.29	1.64	1.41	0.84	88.93
1.70	15.40	4.74	3.25	1.62	1.41	0.81	75.11
1.90	17.30	5.32	3.25	1.63	1.41	0.81	67.45
2.50	4.01	1.14	3.52	1.76	1.41	1.05	66.71
3.00	5.02	1.45	3.46	1.73	1.41	1.00	53.08

4.00	6.73	1.93	3.49	1.74	1.41	1.03	40.67
5.00	8.12	2.30	3.53	1.77	1.41	1.06	33.70
6.00	9.31	2.61	3.57	1.78	1.41	1.09	28.88
7.00	10.40	2.87	3.62	1.81	1.41	1.14	25.80
8.00	11.40	3.08	3.70	1.85	1.41	1.20	23.79
9.00	12.40	3.26	3.80	1.90	1.41	1.28	22.52
10.00	13.20	3.42	3.86	1.93	1.41	1.32	20.93
12.00	9.36	2.33	4.02	2.01	1.41	1.43	18.94
14.00	10.90	2.50	4.36	2.18	1.41	1.66	18.88
16.00	11.80	2.61	4.52	2.26	1.41	1.77	17.56
18.00	12.80	2.72	4.71	2.35	1.41	1.88	16.64
20.00	14.10	2.82	5.00	2.50	1.41	2.06	16.41
22.00	14.80	2.88	5.14	2.57	1.41	2.15	15.53
24.00	15.80	2.95	5.36	2.68	1.41	2.28	15.09
26.00	17.00	2.99	5.69	2.84	1.41	2.47	15.10
28.00	18.10	3.03	5.97	2.99	1.41	2.63	14.96
30.00	4.28	0.70	6.11	3.06	1.41	2.71	14.44
40.00	5.57	0.74	7.53	3.76	1.41	3.49	13.88
50.00	6.81	0.77	8.84	4.42	1.41	4.19	13.42
60.00	7.84	0.78	10.05	5.03	1.41	4.82	12.72
70.00	8.90	0.79	11.27	5.63	1.41	5.45	12.45
80.00	9.48	0.80	11.85	5.93	1.41	5.75	11.42
90.00	10.20	0.81	12.59	6.30	1.41	6.14	10.92
100.00	11.80	0.84	14.05	7.02	1.41	6.88	10.96
110.00	12.30	0.84	14.64	7.32	1.41	7.18	10.36
120.00	13.00	0.85	15.29	7.65	1.41	7.52	9.98

A IEEE115 (2009), norma que regulamenta o ensaio estático de resposta em frequência, estabelece que ocorram ao menos 10 medições por década de frequência na faixa de frequências que vai de 0,01 Hz até 200 Hz e ao menos 40 medições na faixa de frequência que vai de 0,001 Hz até 0,01 Hz. Devido a utilização do inversor de frequência no ensaio, não foi possível a obtenção de valores de frequência abaixo da faixa de frequência de 0,7 Hz.

A originalidade deste trabalho está na utilização de um algoritmo de rede neural para estabelecer um padrão entre os valores de frequência e L_d , indutância operacional, obtidos no ensaio, para que dessa maneira possam ser gerados mais pontos de ensaio e com isso melhorar o processo de ajuste de curva e obtenção de parâmetros de indutância operacional.

3.3 Otimização da rede neural

Com objetivo de melhorar a performance da rede neural e prevenir a memorização dos dados de treinamento, *overfitting*, neste trabalho foi desenvolvido um algoritmo de otimização para processo de construção da rede neural.

Segundo Haykin (2001), a utilização de diversas camadas ocultas em redes neurais pode não ser vantajoso para o processo de treinamento, então no desenvolvimento deste trabalho foram propostos dois cenários. Para ambos os cenários e ambas situações foram estabelecidos critérios de controle para a otimização. Para o treinamento da rede utilizou-se 88% dos dados da massa de dados e para validação da rede foram utilizados 12% dos dados presentes na massa de dados, ambos escolhidos aleatoriamente. Para validação da rede treinada foi calculado o erro quadrático mínimo estabelecido entre os valores obtidos pela rede treinada e os dados de validação. Vale ressaltar de cada rede passou apenas por uma rada de interações. A rede utilizada para o processo de otimização foi a MLP (Perceptron multi camada) com algoritmo de retropropagação de erro segundo algoritmo de Levenberg-Marquardt.

- **Cenário 1:** No cenário 1, a rede neural é composta pela camada de entrada, 3 camadas ocultas intermediárias e 1 camada de saída. O número de neurônios das camadas intermediárias foi otimizado utilizando-se um processo de otimização do software Matlab® baseado em algoritmo genético. Duas situações foram testadas. Na situação 1, o número máximo de neurônios nas camadas ocultas foi de 100 neurônios e o mínimo de 1 neurônio. Na situação 2 o número máximo de neurônios nas camadas ocultas foi de 50 neurônios e o mínimo de 1 neurônio.
- **Cenário 2:** No cenário 2, a rede neural é composta pela camada de entrada, 2 camadas ocultas intermediárias e 1 camada de saída. O número de neurônios

das camadas intermediárias foi otimizado utilizando-se o mesmo processo estabelecido no cenário 1. Duas situações foram testadas. Na situação 1, o número máximo de neurônios nas camadas ocultas foi de 100 neurônios e o mínimo de 1 neurônio. Na situação 2 o número máximo de neurônios nas camadas ocultas foi de 50 neurônios e o mínimo de 1 neurônio.

Figura 3.6 – Fluxograma do processo de otimização

Fonte: Autor

O Processo de otimização mostrou que a configuração de rede que obteve os melhores resultados é a rede pertencente ao cenário 2, com duas camadas ocultas e máximo de 50 neurônios por camadas. O algoritmo estabeleceu que o número ótimo de neurônios da primeira camada deveria ser igual a 30 e para segunda camada oculta de 48. Os resultados do processo de otimização são mostrados na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Resultados obtidos com o processo de otimização da rede.

Cenário	Número de camadas ocultas	Número máximo de neurônios por camada oculta	Erro
1	3	100	14.513
1	3	50	10.231
2	2	100	2.321
2	2	50	1.321

3.4 Metodologia para estabelecer o padrão entre frequências e Ld indutância de eixo direto

Para usar a rede neural para estabelecer um padrão comportamental entre frequência e Ld, indutância de eixo direto, devemos definir as entradas e saídas da rede neural. Definiu-se que os valores de frequência seriam utilizados como entrada e que os valores de Ld (indutância operacional) seriam utilizados como saída.

O ensaio realizado por Sousa, obteve um total de 35 pontos de medição, desses 35 pontos de medição obtidos foram separados 31 pontos, tabela 3.3, que serão usados para o treinamento da rede. Os 4 pontos, tabela 3.4, de medição restantes escolhidos aleatoriamente dentre os 35 pontos, serão destinados a validação da rede após a etapa de treinamento.

Tabela 3.3 – Dados destinados ao treinamento da rede.

Ponto de medição	Frequência (Hz)	Ld (mH)
1º ponto de medição	0.7	165.74
2º ponto de medição	0.9	150.28
3º ponto de medição	1.1	121.99
4º ponto de medição	1.3	104.97
5º ponto de medição	1.5	88.93
7º ponto de medição	1.9	67.45
8º ponto de medição	2.5	66.71
9º ponto de medição	3	53.08

10° ponto de medição	4	40.67
12° ponto de medição	6	28.88
13° ponto de medição	7	25.80
14° ponto de medição	8	23.79
15° ponto de medição	9	22.52
16° ponto de medição	10	20.93
17° ponto de medição	12	18.94
18° ponto de medição	14	18.88
19° ponto de medição	16	17.56
21° ponto de medição	20	16.41
22° ponto de medição	22	15.53
23° ponto de medição	24	15.09
24° ponto de medição	26	15.10
25° ponto de medição	28	14.96
26° ponto de medição	30	14.44
27° ponto de medição	40	13.88
28° ponto de medição	50	13.42
29° ponto de medição	60	12.72
30° ponto de medição	70	12.45
32° ponto de medição	90	10.92
33° ponto de medição	100	10.96
34° ponto de medição	110	10.36
35° ponto de medição	120	9.98

Tabela 3.4 – Dados para verificação do treinamento da rede neural.

Ponto de medição	Frequência (Hz)	Ld (mH)
6° ponto de medição	1.7	75.11
11° ponto de medição	5	33.7
20° ponto de medição	18	16.64
31° ponto de medição	80	11.42

Após realizada a separação dos dados é necessário que os mesmos sejam normalizados segundo a função de ativação escolhida para a rede. A função de ativação do tipo tangente hiperbólica trabalha com um intervalo de dados que varia entre -1 e 1.

3.4.1 Rede Perceptron multicamadas com algoritmo de treinamento através do método de Levenberg-Marquardt, cenário 1

Após a normalização dos dados com auxílio do software Matlab® configurou-se uma rede neural do tipo Perceptron multicamada com 3 camadas ocultas, sendo 78 neurônios na primeira camada oculta, 60 neurônios na segunda camada oculta, 40 neurônios na terceira camada oculta e 1 neurônio na camada de saída, conforme pode ser visto na figura 3.6.

Figura 3.7 – rede neural criada

Fonte: Autor

Para o processo de treinamento da rede foram definidas 1000 interações. Para cada treinamento realizado a rede era testada, forneciam-se os valores de frequência do conjunto de quatro medições que foram deixados de fora e então comparavam-se os valores obtidos de Ld com os valores do grupo de quatro medições.

Após as primeiras 1000 interações os resultados obtidos estão apresentados na tabela 3.5.

Tabela 3.5 – 1ª série de interações da rede

Pontos de medição	Frequência (Hz)	Ld (mH) – ensaio	Ld (mH) – estimado pela rede	Desvio (%)
-------------------	-----------------	------------------	------------------------------	------------

6º ponto de medição	1.7	75.52	74.89	0.83
11º ponto de medição	5	33.80	34.02	0.65
20º ponto de medição	18	16.65	16.81	0.95
31º ponto de medição	80	11.44	11.64	1.74

Uma nova série de 1000 interações foi realizada e os resultados são apresentados na tabela 3.6.

Tabela 3.6 – 2ª série de interações da rede.

Pontos de medição	Frequência (Hz)	Ld (mH) – ensaio	Ld (mH) – estimado pela rede	Desvio (%)
6º ponto de medição	1.7	75.52	75.57	0.05
11º ponto de medição	5	33.80	37.41	10.66
20º ponto de medição	18	16.65	17.01	2.16
31º ponto de medição	80	11.44	11.68	2.02

É possível notar que após a 2ª série de interações houve um aumento no desvio dos pontos de medição 11, 20 e 31. Uma nova série de interações faz-se então necessária e seus resultados são apresentados na tabela 3.7.

Tabela 3.7 – 3ª série de interações da rede.

Pontos de medição	Frequência (Hz)	Ld (mH) – ensaio	Ld (mH) – estimado pela rede	Desvio (%)
-------------------	-----------------	------------------	------------------------------	------------

6º ponto de medição	1.7	75.52	75.72	0.26
11º ponto de medição	5	33.80	40.18	18.87
20º ponto de medição	18	16.65	16.98	2.00
31º ponto de medição	80	11.44	11.67	1.97

Os resultados observados após a 3ª série de interações também mostram uma elevação no desvio, só que agora de todos os pontos, uma 4ª série de interações é realizada e os resultados são apresentados na tabela 3.8.

Tabela 3.8 - 4ª série de interações da rede.

Pontos de medição	Frequência (Hz)	Ld (mH) – ensaio	Ld (mH) – estimado pela rede	Desvio (%)
6º ponto de medição	1.7	75.52	75.86	0.45
11º ponto de medição	5	33.80	33.25	1.61
20º ponto de medição	18	16.65	16.61	0.25
31º ponto de medição	80	11.44	11.72	2.37

Uma nova série de interações é realizada e os resultados estão presentes na tabela 3.9.

Tabela 3.9 – 5ª séries de interações

Pontos de medição	Frequência (Hz)	Ld (mH) – ensaio	Ld (mH) – estimado pela rede	Desvio (%)
-------------------	-----------------	------------------	------------------------------	------------

6º ponto de medição	1.7	75.52	75.93	0.54
11º ponto de medição	5	33.80	36.76	8.76
20º ponto de medição	18	16.65	16.77	0.69
31º ponto de medição	80	11.44	11.33	1.00

Dentre as 5 interações, tabelas de 3.6 até 3.9, a que mostrou melhores resultados foi a tabela 3.6. Com o treinamento da rede representada na tabela 3.6 obteve-se por realizar a simulação para os novos pontos de frequências. A tabela 3.10 mostra os novos pontos de frequência, sua normalização, os resultados obtidos para Ld e a desnormalização da variável Ld.

Tabela 3.10 – Novos pontos de frequência e novos valores de Ld

Novos valores de Frequência	Frequência normalizada	Valores de Ld obtidos através da rede neural (normalizados)	Valores de Ld desnormalizados
0.7	0	0.99	166.62
0.8	0.0008	0.991	165.32
0.9	0.001	0.900	151.02
1	0.002	0.790	133.74
1.1	0.003	0.719	122.60
1.2	0.004	0.663	113.83
1.3	0.005	0.609	105.48
1.4	0.005	0.557	97.256
1.5	0.006	0.506	89.388
1.6	0.007	0.461	82.245
1.7	0.008	0.422	76.147
1.8	0.009	0.391	71.306
1.9	0.01005	0.369	67.823

2	0.0108	0.355	65.690
2.1	0.011	0.350	64.801
2.2	0.012	0.350	64.928
2.3	0.013	0.355	65.697
2.4	0.014	0.361	66.572
2.5	0.015	0.363	66.926
2.6	0.015	0.358	66.201
2.8	0.017	0.325	60.908
3	0.019	0.276	53.273
3.2	0.020	0.239	47.463
3.4	0.022	0.219	44.351
3.6	0.024	0.209	42.824
3.8	0.025	0.203	41.821
4	0.027	0.196	40.805
4.2	0.029	0.189	39.622
4.4	0.031	0.180	38.293
4.6	0.032	0.171	36.895
4.8	0.034	0.162	35.502
5	0.036	0.154	34.166
6	0.044	0.121	28.971
7	0.052	0.101	25.870
8	0.061	0.088	23.846
9	0.069	0.078	22.297
10	0.077	0.070	20.970
12	0.094	0.057	18.972
14	0.111	0.052	18.142
16	0.128	0.048	17.575
18	0.145	0.041	16.410
20	0.161	0.035	15.597
22	0.178	0.034	15.295
24	0.195	0.032	15.097
26	0.212	0.032	15.110
28	0.228	0.031	14.966

30	0.245	0.028	14.390
40	0.329	0.024	13.883
50	0.413	0.021	13.341
60	0.497	0.018	12.795
70	0.580	0.009	11.417
80	0.664	0.006	10.997
90	0.748	0.005	10.851
100	0.832	0.006	10.951
110	0.916	0.002	10.394
120	1	6.94284E-09	9.968

Após obtidos os novos valores de L_d , utilizou-se a equação 2.30 para calcular L_d segundo os diversos pontos de frequência, que foram utilizados como entrada da rede neural.

Tanto os valores de L_d obtidos pela equação 2.30, quanto os valores de L_d obtidos pela rede neural foram submetidos a um processo de linearização de dados, esse processo é necessário para que se possa calcular o desvio quadrático entre eles.

Após a obtenção do desvio para os diversos pontos de frequência, foi realizado a somatória dos mesmos.

Com o auxílio de uma rotina evolucionária do software Microsoft Excel®, foi realizada a minimização dessa somatória de desvios onde as variantes para tal minimização eram os valores de constante de tempo da equação 2.30, dessa maneira é realizado o ajuste de curva da indutância de eixo direto L_d e assim determinadas as constantes de tempo bem como os valores de L_d' e L_d'' . O gráfico da figura 3.7 mostra o resultado do ajuste de curva.

Figura 3.8 – Curva de Indutância de eixo direto

Fonte: Autor

A tabela 3.11 e 3.12 apresentam os valores de constante de tempo bem como os valores de L_d' e L_d'' .

Tabela 3.11 – Constantes de tempo

$T'd$	0.016
$T''d$	0.0042
$T'd0$	0.077
$T''d0$	0.0093

Tabela 3.12 – $L'd$ e $L''d$

$L'd$	19.95
$L''d$	8.92

3.4.2 Rede Perceptron multicamadas com algoritmo de treinamento através do método de Levenberg-Marquardt, cenário 2

Com auxílio do software Matlab® configurou-se uma segunda rede neural do tipo Perceptron multicamada com uma primeira camada oculta de 30 neurônios, uma segunda camada oculta com 48 neurônios e 1 neurônio na camada de saída, conforme pode ser visto na figura 3.8

Figura 3.9 – rede neural criada

Fonte: Autor

Para o processo de treinamento da rede foram definidas 1000 interações, assim como foi feito com a primeira rede. Para cada treinamento realizado a rede era testada,

forneciam-se os valores de frequência do conjunto de quatro medições que foram deixados de fora e então comparavam-se os valores obtidos de Ld com os valores do grupo de quatro medições.

Após as primeiras 1000 interações os resultados obtidos estão apresentados na tabela 3.13.

Tabela 3.13 – 1ª série de interações da rede

Pontos de medição	Frequência (Hz)	Ld (mH) – ensaio	Ld (mH) – estimado pela rede	Desvio (%)
6º ponto de medição	1.7	75.526	77.786	2.991
11º ponto de medição	5	33.805	32.679	3.329
20º ponto de medição	18	16.655	20.376	22.344
31º ponto de medição	80	11.448	11.787	2.958

Uma nova série de 1000 interações foi realizada e os resultados são apresentados na tabela 3.13.

Tabela 3.14 – 2ª série de interações da rede.

Pontos de medição	Frequência (Hz)	Ld (mH) – ensaio	Ld (mH) – estimado pela rede	Desvio (%)
6º ponto de medição	1.7	75.526	80.880	7.09
11º ponto de medição	5	33.805	84.190	149.05
20º ponto de medição	18	16.655	22.444	34.76
31º ponto de medição	80	11.448	10.860	5.14

É possível notar que após a 2ª série de interações houve um aumento no desvio dos pontos de medição 11, 20 e 31. Uma nova série de interações faz-se então necessária e seus resultados são apresentados na tabela 3.14.

Tabela 3.15 – 3ª série de interações da rede.

Pontos de medição	Frequência (Hz)	Ld (mH) – ensaio	Ld (mH) – estimado pela rede	Desvio (%)
6º ponto de medição	1.7	75.526	82.9204	9.79
11º ponto de medição	5	33.805	42.0931	24.52
20º ponto de medição	18	16.655	19.9168	19.58
31º ponto de medição	80	11.448	11.8278	3.31

Os resultados observados após a 3ª série de interações também mostram uma elevação no desvio, só que agora de todos os pontos, uma 4ª série de interações é realizada e os resultados são apresentados na tabela 3.15.

Tabela 3.16 - 4ª série de interações da rede.

Pontos de medição	Frequência (Hz)	Ld (mH) – ensaio	Ld (mH) – estimado pela rede	Desvio (%)
6º ponto de medição	1.7	75.526	80.8867	7.10
11º ponto de medição	5	33.805	31.5063	6.80
20º ponto de medição	18	16.655	19.8534	19.20

31° ponto de medição	80	11.448	10.8425	5.30
----------------------	----	--------	---------	------

Uma nova série de interações é realizada e os resultados estão presentes na tabela 3.16.

Tabela 3.17 – 5ª séries de interações

Pontos de medição	Frequência (Hz)	Ld (mH) – ensaio	Ld (mH) – estimado pela rede	Desvio (%)
6° ponto de medição	1.7	75.526	96.0078	27.12
11° ponto de medição	5	33.805	30.5092	9.75
20° ponto de medição	18	16.655	19.6513	17.99
31° ponto de medição	80	11.448	10.8448	5.28

Dentre as 5 interações, tabelas de 3.13 até 3.17, a que mostrou melhores resultados foi a tabela 3.17. Com o treinamento da rede representada na tabela 3.17 obteve-se por realizar a simulação para os novos pontos de frequências. A tabela 3.18 mostra os novos pontos de frequência, sua normalização, os resultados obtidos para Ld e a desnormalização da variável Ld.

Tabela 3.18 – Novos pontos de frequência e novos valores de Ld

Novos valores de Frequência	Frequência normalizada	Valores de Ld obtidos através da rede neural (normalizados)	Valores de Ld desnormalizados
0.7	0	0.9999	166.622
0.8	0.00083	0.9917	165.326
0.9	0.00167	0.9004	151.024

1	0.00251	0.7901	133.743
1.1	0.00335	0.7190	122.607
1.2	0.00419	0.6630	113.834
1.3	0.00502	0.6097	105.486
1.4	0.00586	0.5571	97.2564
1.5	0.00670	0.5069	89.3882
1.6	0.00754	0.4613	82.2454
1.7	0.00838	0.4224	76.1472
1.8	0.00922	0.3915	71.3069
1.9	0.01005	0.3693	67.8233
2	0.01089	0.3556	65.6907
2.1	0.01173	0.3500	64.8013
2.2	0.01257	0.3508	64.9286
2.3	0.01341	0.3557	65.6970
2.4	0.01424	0.3613	66.5724
2.5	0.01508	0.3635	66.9262
2.6	0.01592	0.3589	66.2014
2.8	0.01760	0.3251	60.9084
3	0.01927	0.2764	53.2734
3.2	0.02095	0.2393	47.4637
3.4	0.02263	0.2194	44.3515
3.6	0.02430	0.2097	42.8245
3.8	0.02598	0.2033	41.8210
4	0.02766	0.1968	40.8057
4.2	0.02933	0.1892	39.6225
4.4	0.03101	0.1808	38.2938
4.6	0.03269	0.1718	36.8957
4.8	0.03436	0.1629	35.5021
5	0.03604	0.1544	34.1662
6	0.04442	0.1213	28.9710
7	0.05280	0.1015	25.8704
8	0.06119	0.0885	23.8467
9	0.06957	0.0787	22.2975

10	0.07795	0.0702	20.9705
12	0.09471	0.0574	18.9724
14	0.11148	0.0521	18.1425
16	0.12824	0.0485	17.5756
18	0.14501	0.0411	16.4100
20	0.16177	0.0359	15.5979
22	0.17854	0.0340	15.2959
24	0.19530	0.0327	15.0978
26	0.21207	0.0328	15.1105
28	0.22883	0.0319	14.9664
30	0.24559	0.0282	14.3906
40	0.32942	0.0249	13.8838
50	0.41324	0.0215	13.3411
60	0.49706	0.0180	12.7955
70	0.58088	0.0092	11.4175
80	0.66471	0.0065	10.9973
90	0.74853	0.0056	10.8515
100	0.83235	0.0062	10.9511
110	0.91617	0.0027	10.3948
120	1	6.94284E-09	9.96833

Após obtidos os novos valores de L_d , utilizou-se a equação 2.30 para calcular L_d segundo os diversos pontos de frequência, que foram utilizados como entrada da rede neural.

Tanto os valores de L_d obtidos pela equação 2.30, quanto os valores de L_d obtidos pela rede neural foram submetidos a um processo de linearização de dados, esse processo é necessário para que se possa calcular o desvio quadrático entre eles.

Após a obtenção do desvio para os diversos pontos de frequência, foi realizado a somatória dos mesmos.

Com o auxílio de uma rotina evolucionária do software Microsoft Excel®, foi realizada a minimização dessa somatória de desvios onde as variantes para tal minimização eram os valores de constante de tempo da equação 2.30, dessa maneira é realizado o ajuste de curva da indutância de eixo direto L_d e assim determinadas as constantes

de tempo bem como os valores de L_d' e L_d'' . O gráfico da figura 3.9 mostra o resultado do ajuste de curva.

Figura 3.10 – Curva de Indutância de eixo direto

Fonte: Autor

A tabela 3.20 e 3.21 apresentam os valores de constante de tempo bem como os valores de L_d' e L_d'' .

Tabela 3.20 – Constantes de tempo

$T'd$	0.01
$T''d$	0.0042
$T'd0$	0.057
$T''d0$	0.0094

Tabela 3.21 – $L'd$ e $L''d$

$L'd$	16.36
$L''d$	7.31

Tabela 3.22 – Comparação entre métodos

Método	$T'd0(s)$	$T'd(s)$	$T''d0(s)$	$T''d(s)$
Ensaio de Curto-Circuito Trifásico Abrupto	0,0692	0,0120	0,0083	0,0060
Ensaio Estático de Resposta em Frequência com ajuste de curva	0,057	0,01	0,0094	0,0042

4 Conclusões

O trabalho realizado ocupou-se com o desenvolvimento de uma metodologia que compensa a utilização de instrumentos de baixo custo para realização do ensaio de resposta em frequência através de ferramentas matemáticas e computacionais.

Mesmo com uma massa de dados considerada pequena para o uso de redes neurais, foi possível estabelecer a relação existente entre frequência e indutâncias no eixo direto. Através desta relação foi possível simular novos pontos de ensaio sem a necessidade de um novo ensaio.

Adicionalmente foi proposto nesse trabalho um algoritmo de otimização do número de neurônios nas camadas ocultas intermediárias. Através desse processo de otimização foi possível utilizar uma rede otimizada para o problema proposto, reduzindo o tempo de treinamento e testes para definição da melhor topologia para a rede neural. A primeira rede neural, apresentada no capítulo 3, mostrou ser menos efetiva, quando comparada com a segunda rede neural definida no capítulo 3.

Ao analisarmos a figura 3.10 é possível observar o patamar, semelhante ao descrito pelo diagrama de Bode da figura 2.10, criado pela generalização resultante da rede neural e que não foi observado na figura 3.8, resultado da primeira estrutura de rede neural proposta no trabalho. Utilizando os pontos obtidos com a rede neural o ajuste de curva proposto nesse trabalho atingiu resultados que, quando comparados com ensaios consagrados apresentam taxa de erro inferior a 15% como pode ser visto na tabela 3.22.

4.1 Desenvolvimentos Futuros

Recomenda-se a aplicação da metodologia, em medições realizadas utilizando o inversor de frequência para a configuração segundo o eixo em quadratura. Adicionalmente sugere-se o teste utilizando diferentes tipos de rede neural, bem como diferentes topologias de rede neural.

5 Referência Bibliográfica

ADKINS, B. **The general theory of electrical machines**. London: Chapman and Hall, 1957.

BLONDEL, A. E. **Synchronous motors and converters: theory and methods of calculation and tests**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1913.

BORTONI, E. C. **Modelagem de máquinas síncronas de polos salientes empregando técnicas de resposta em frequência**. 1998. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

BORTONI, E. C. **A standstill frequency response method for large salient pole synchronous machines**. IEEE transactions on energy conversion, New York, v. 19, n. 4, 2004.

CANAY, I. M. **Discrepancies of rotor quantities and exact equivalent diagrams**. IEEE transactions on power apparatus and systems, New York, v. PAS-88, n. 7, 1969.

CANAY, I. M. **Determination of the model parameters of machines from the reactances operators $X_d(p)$, $X_q(p)$** . IEEE transactions on energy conversion, New York, v. 8, n. 2, 1993.

CONCORDIA, C. **Synchronous machines: theory and performance**. London: John Wiley & Sons, 1951.

COULTES, M. E.; WATSON, W. **Synchronous machine models by standstill frequency response tests**. IEEE transactions on power apparatus and systems, New York, v. PAS-100, n. 4, 1981.

DANDENO, P. L. et al. **Supplementary definitions and associated test methods for obtaining parameters for synchronous machine stability study simulations**. IEEE transactions on power apparatus and systems, New York, v. PAS-99, n. 4, 1980.

DANDENO P.L. et al. **Experience with standstill frequency response testing and analysis of salient pole synchronous machines**. IEEE transactions on energy conversion, New York, v. 14, n. 4, 1999.

DE MELLO, F. P.; HANNET L. N.; WILLIS J.R. **Determination of synchronous machine stator and field leakage inductances from standstill frequency response tests**. IEEE transactions on power systems, New York, v. 3, n. 4, 1988.

DOHERTY, R.E.; NICKLE C.A. **Synchronous Machines I - An Extension of Blondel's Two-Reaction Theory**. AIEE transactions, New York, 1926.

FERREIRA, D. W. **Estudo de métodos para a determinação de parâmetros de máquinas síncronas usando o método dos elementos finitos**. 2005. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

HUANG, J. **Online synchronous machine parameter extraction from small-signal injection techniques**. IEEE transactions on energy conversion, New York, v. 14, n. 4, 2009.

HURLEY, J. D.; SCHWENK, H. R. **Standstill frequency response modeling and evaluation by field tests on a 645 MVA turbine generator**. IEEE transactions on power apparatus and systems, New York, v. PAS-100, n. 2, 1981.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60034-4**: methods for determining synchronous machine quantities from tests. Geneva, 1985.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 115-2009**: test procedures for synchronous machines. New York, 2010.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 1100**: guide for synchronous generator modeling practices and applications in power system stability analyses. New York, 1995.

JORDÃO, R. G. **Máquinas Síncronas**. São Paulo: Editora da USP, 1980.

MINNICH, S.H. **Small signals, large signals and saturation in generator modeling**. IEEE transactions on energy conversion, New York, v. EC-1, n. 1, 1986.

MITCHELL, T. **Machine learning**. McGraw-Hill, 1987.

PARK, R. H.; ROBERTSON, B. L. **The reactances of synchronous machines**. AIEE transactions, New York, 1928.

PARK, R. H. **Two-reaction theory of synchronous machines: generalized method of analysis - part I**. AIEE transactions, New York, 1929.

PARK, R. H. **Two-reaction theory of synchronous machines - II**. AIEE transactions, New York, 1933.

PEREIRA, F. H.; PIRES, C. L. NABETA, S. I. **Optimal theoretical placement of rectifier substations on DC traction systems**. IET Electrical Systems in Transportation. Aceito para publicação, 2011.

RANKIN, A.W. **The direct- and quadrature axis equivalent circuits of the synchronous machines**. AIEE transactions, New York, 1945.

SAUNDERS, R. M. **Standstill frequency-response methods and salient-poles machines**. IEEE transactions on energy conversion, New York, v. 14, n. 4, 1999.

TSAI, H. et al. **On-line synchronous machine parameter estimation from small disturbance operating data**. IEEE transactions on energy conversion, New York, v. 10, n. 1, 1995.

WALL, M. **A C++ library of genetic algorithm components**, Mechanical Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology, 1996

WALTON, A.; CROFT J. S. **The modelling of synchronous machines**. IEEE proceedings, New York, 1989 (?).

WALTON, A. **A systematic method for the determination of the parameters of synchronous machines from the results of frequency response tests**. IEEE transactions on energy conversion, New York, v. 15, n. 2, 2000.

SOUSA, M. **Determinação de parâmetros de máquinas síncronas pelos ensaio de resposta em frequência: Proposta de metodologia com inversor de frequência**, São Paulo, 2011

NUNES, M. **Estudo compartilhado sobre métodos de identificação para levantamento e modelos a partir de dados de resposta em frequência**, Rio de Janeiro, 2006

LIERENA, M. **Identificação de parâmetros de geradores síncronos usando métodos de ajuste de curvas e ensaio em frequência**, Campinas, 2011

SUNI, J., **Sobre a determinação de geradores síncronos para estudos de comportamento dinâmico de sistemas elétricos**, Campinas, 2009

TSAL, H. **Development of a neural network based saturation model for synchronous generator analysis**, IEEE Transaction on Energy Conversion, 1995

Big 2016 acesso em 03/08/2016, http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/_capacidadebrasil/Combustivel.cfm

HAYKIN, S. **Redes Neurais – Princípios e práticas**, 2ª edição, Bookman, 2001

Da Silva, I. N., Flauzino R. A., Spatti D. H., **Rede neurais artificiais para engenharia**, Artliber, São Paulo, 2010.