

Fundamentos de Energia Elétrica

Guia do 5º Trabalho Laboratorial

Máquina Síncrona

Ligada à Rede

Laboratório de Máquinas Elétricas

2023/24 P1

Índice

1. Objetivos.....	3
2. Máquina ligada à rede elétrica	3
3. Lista de material	7
Grupo Máquina de Corrente Contínua – Máquina Síncrona	7
Módulos de bancada	8
Sistema de fogos girantes	8
Multímetro Digital INTEGRA 1232	8
4. Ensaios da Máquina Síncrona	9
Manobra da Máquina de corrente contínua	9
Manobra da Máquina Síncrona	11
Ensaio da Máquina Síncrona ligada à rede	12
Condução do ensaio	12

1. Objetivos

Neste trabalho pretende-se estudar a Máquina Síncrona em regime permanente (funcionamento gerador), ligada a uma rede elétrica, e determinar várias curvas características.

2. Máquina ligada à rede elétrica

Idealmente, no instante de ligação da Máquina Síncrona (gerador) à rede, deveriam verificar-se as seguintes condições:

1. Iguais amplitudes das tensões nas fases do gerador (estator) e das tensões nas fases da rede ($|\mathbf{V}|=|\mathbf{V}_s|=|\mathbf{V}_{rede}|$).
2. Iguais sequências das fases do gerador e das fases da rede.
3. Iguais frequências das tensões nas fases do gerador e das tensões da rede ($\omega = p \cdot \omega_{rotor} = 2\pi f_{rede}$).
4. Desfasagens nulas entre as tensões do gerador e as tensões da rede.

Na prática é impossível garantir estas condições, pelo que a manobra de sincronização do gerador síncrono com a rede tem como objetivo minimizar as diferenças entre as grandezas no estator do gerador e as grandezas da rede, minimizando assim a magnitude dos regimes transitórios na ligação do gerador à rede.

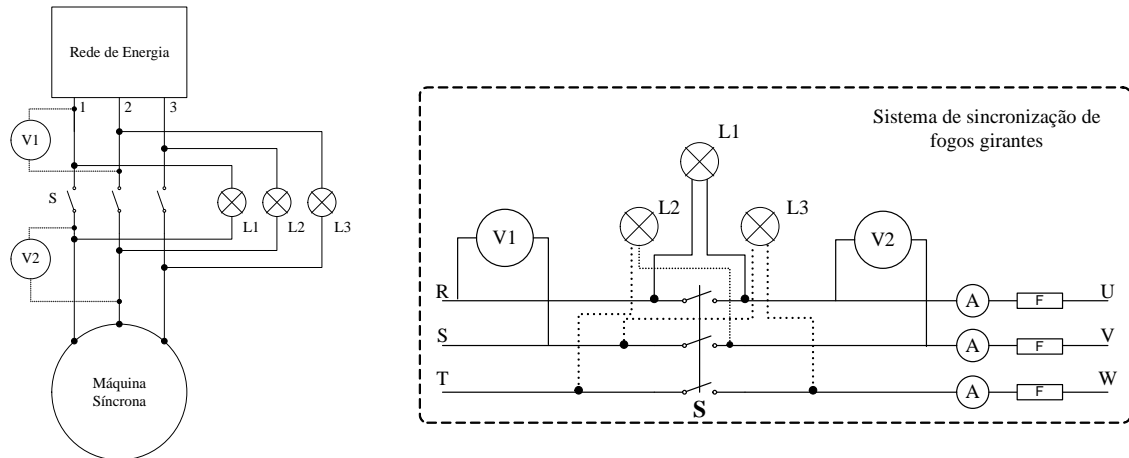


Figura 1: Montagem de fogos girantes.

Para efetuar a manobra de sincronização, utiliza-se uma montagem auxiliar, designada por montagem de fogos girantes (Fig. 1). Esta montagem consiste em três lâmpadas, uma ligada entre terminais correspondentes a uma mesma fase e as outras duas ligadas entre terminais diferentes das outras duas fases. As lâmpadas acendem e apagam com uma frequência igual à diferença de frequências entre as grandezas do gerador e da rede, mas não em simultâneo. Acendem e apagam sucessivamente, sendo o sentido da sucessão dependente do sentido da diferença das frequências (Fig. 2). Aparece assim um sistema fogos girantes, que roda no sentido direto ou no sentido inverso consoante a frequência do gerador é superior (inferior) ou inferior (superior) à rede.

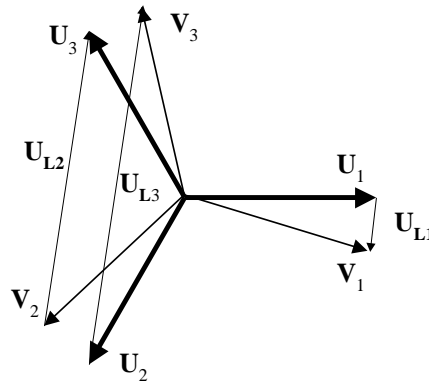


Figura 2: Estrelas no sistema de fogos girantes: U correspondem às tensões da rede, V às do gerador (estator).

O instante conveniente para o paralelo é aquele em que está apagada a lâmpada que liga terminais correspondentes a uma mesma fase – lâmpada piloto, sendo nessa altura os fluxos luminosos das outras duas lâmpadas iguais (mas inferiores ao máximo). Normalmente, as três lâmpadas são dispostas em triângulo, sendo colocada superiormente a lâmpada ligada entre terminais correspondentes à mesma fase (L1).

Se a sequência de fases num conjunto de terminais (terminais U) for diferente (inversa) da sequência de fases no outro conjunto de terminais (terminais V), as três lâmpadas acendem e apagam simultaneamente.

Manobra de sincronização e ligação à rede

Os passos da manobra de sincronização são os seguintes:

1. Estando a máquina motriz (Máquina de Corrente Contínua, no caso do grupo de máquinas utilizado) a rodar, ajusta-se a sua velocidade de rotação, ω_{rotor} ($N_{\text{rotor}} = \omega_{\text{rotor}} \cdot 60 / 2\pi$), até esta atingir um valor próximo do sincronismo com a rede elétrica, $\omega_{\text{sinc}} = 2\pi f / p$ ($f = 50$ Hz, $N_{\text{sinc}} = 1500$ rpm).
2. Regula-se a corrente de excitação da Máquina Síncrona, para que as tensões nas fases do estator tenham amplitudes (valores eficazes) próximas das amplitudes das tensões da rede.
3. Verifica-se, utilizando a montagem de fogos girantes (Fig. 1 e Fig. 8), que a sequência de fases do gerador e da rede são iguais (os fogos *giram* no sentido horário ou anti-horário; se a sequência de fases for diferente, os fogos acendem e apagam todos em simultâneo).
4. Novamente, ajusta-se a velocidade de rotação do grupo (ajuste fino), para minimizar a diferença entre a frequência das tensões do gerador e a frequência das tensões da rede. Esta diferença é tanto mais pequena quanto mais lenta for a variação de luminosidade das lâmpadas na montagem de fogos girantes.
5. Quando, na montagem de fogos girantes, a lâmpada ligada entre terminais correspondentes a uma mesma fase (L1) estiver apagada e as lâmpadas ligadas entre terminais correspondentes a fases diferentes (L2, L3) estiverem acesas, comuta-se o interruptor S, efetuando assim o paralelo.

Quando o gerador se encontra ligado a uma rede elétrica com potência de curto-circuito muito superior à potência posta em jogo pelo gerador (potência injetada na rede ou absorvida da rede), a rede impõe o valor eficaz e frequência das tensões no estator e, por conseguinte, a sua velocidade.

Curvas características da Máquina Síncrona ligada à rede

Quando o gerador se encontrar ligado à rede, esta impõe o valor eficaz e a frequência das tensões aos terminais do estator e, consequentemente, a velocidade de rotação (proporcional à frequência). Assim, só é possível variar a potência trocada com a rede atuando no binário fornecido pela máquina motriz. Consoante o valor da corrente de excitação e consequente força eletromotriz, podem obter-se duas situações, como se ilustra na Fig. 3.

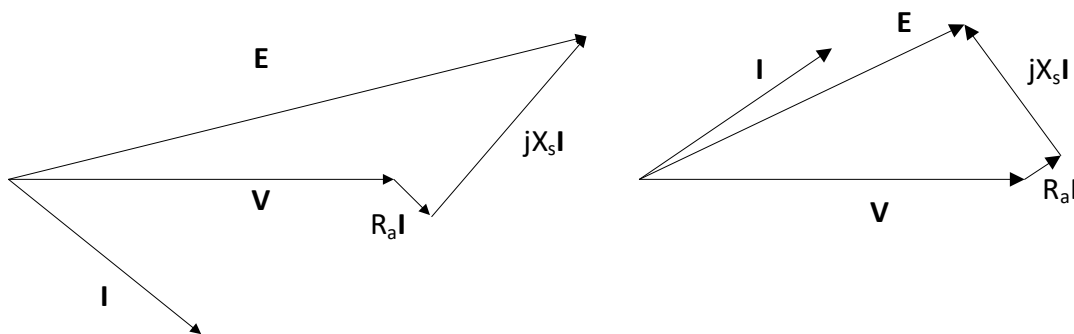


Figura 3: Diagramas vetoriais.

Na Figura 3.a, a força eletromotriz tem uma amplitude significativamente superior à da tensão aos terminais do gerador. A corrente encontra-se em atraso relativamente à tensão aos terminais, o que significa que o gerador fornece potência reativa à rede. Na figura 3.b, a força eletromotriz tem uma amplitude inferior à da tensão aos terminais do gerador, o que corresponde a uma corrente em avanço em relação à tensão da rede. Neste caso, a máquina absorve potência reativa da rede.

Variação da potência no veio com corrente de excitação constante

Sendo a velocidade de rotação constante a amplitude da f.e.m. $|\mathbf{E}|$ depende apenas da corrente de excitação I_f . Nestas condições, a potência ativa é determinada pelo valor do ângulo de potência δ , obedecendo à equação:

$$P_g = 3 \frac{VE}{X_s} \sin \delta \approx P_{mec} \quad (3)$$

O diagrama vetorial, quando $|\mathbf{E}|=|\mathbf{V}|$ encontra-se representado na figura 4. Neste caso, a potência reativa é negativa, isto é, a máquina absorve potência reativa da rede.

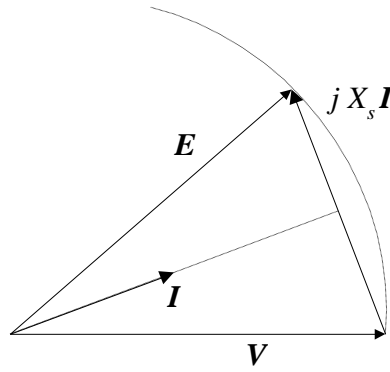


Figura 4: Diagrama vetorial para amplitudes iguais da f.e.m e da tensão da rede.

Variação da corrente de excitação com potência no veio constante

Quando se atua apenas na corrente de excitação e a potência mecânica disponibilizada no veio é mantida constante, a potência ativa gerada mantém-se também aproximadamente constante. Considerando a expressão (3), tem-se que $E \cdot \sin\delta = c^{te}$. Esta situação corresponde a uma reta paralela à amplitude complexa \mathbf{V} (Fig. 5). Por outro lado, como a tensão aos terminais do gerador (tensão da rede) e a potência ativa (aproximadamente igual à potência no veio) se mantêm constantes, e sendo

$$P_g = 3VI \cdot \cos\varphi \approx P_{mec} \quad (4)$$

Pode concluir-se que $I \cos\varphi = c^{te}$. Esta situação corresponde a uma reta perpendicular a \mathbf{V} , Fig. 5.

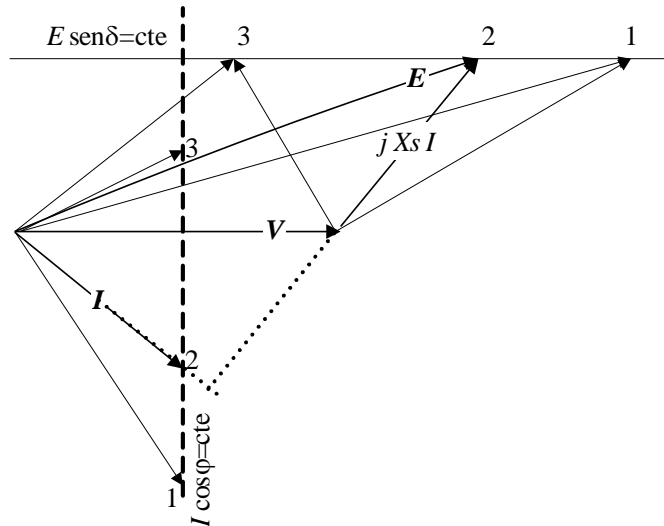


Figura 5: Andamento de \mathbf{I} e \mathbf{E} quando se varia a excitação da máquina.

Quando se diminui a corrente de excitação ($1 \rightarrow 2$), a amplitude da f.e.m. diminui ($|\mathbf{E}_1| \rightarrow |\mathbf{E}_2|$), mas $E \sin\delta$ mantém-se constante como consequência da potência activa se manter constante.

Assim, a extremidade do fasor E descreverá uma trajetória assente sobre uma reta, ver figura 5. O fasor da corrente também descreverá uma trajetória assente sobre uma reta ($I \cdot \cos\varphi = c^{te}$). A amplitude da corrente diminuirá numa primeira fase, atingirá o mínimo (correspondente a fator de potência unitário) e depois começará a aumentar novamente. Se se representar a amplitude da corrente I em função da corrente de excitação I_f , o gráfico descreverá uma curva em forma de V. Para correntes de excitação baixas, a potência reativa Q é negativa. O mínimo da curva em V corresponde a potência reativa nula (fator de potência unitário). A corrente de excitação elevada corresponde uma potência reativa positiva.

Note-se que, se a corrente de excitação (e, por conseguinte, a amplitude da f.e.m., $|E|$) for demasiado baixa, o ângulo de potência δ será elevado, de forma a manter a relação $E \cdot \sin\delta = c^{te}$. No limite, este ângulo pode aproximar-se de 90° e causar a perda de sincronismo da máquina, a qual se manifesta através de velocidade de rotação oscilatória.

3. Lista de material

Grupo Máquina de Corrente Contínua – Máquina Síncrona

O grupo de máquinas a ensaiar neste trabalho é o mesmo do trabalho anterior (grupo Máquina de Corrente Contínua – Máquina Síncrona, grupo de máquinas cor de laranja entre as bancadas).



Figura 6: Elementos do grupo Máquina de Corrente Contínua – Máquina Síncrona: Máquina Síncrona (1), Máquina de Corrente Contínua (3), acoplamento dos veios das máquinas (2), gerador taquimétrico (4), terminais acessíveis do gerador taquimétrico (5).

Módulos de bancada

Os módulos de bancada a utilizar, os quais correspondem aos terminais acessíveis da MCC e MS e retificador trifásico (os mesmos do trabalho anterior), deverão encontrar-se no lado direito da bancada.

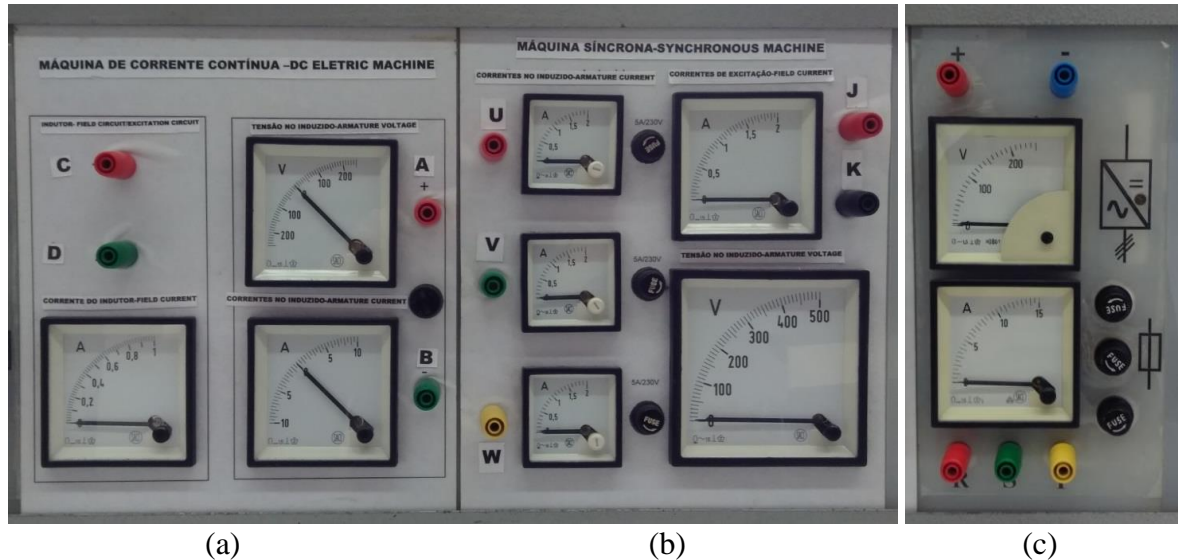


Figura 7: Terminais. (a) Máquina de Corrente Contínua; (b) Máquina Síncrona; (c) retificador trifásico.

Sistema de fogos girantes

No ensaio da Máquina Síncrona ligada à rede, é utilizado para sincronização da MS com a rede, antes da ligação da máquina à rede.



Figura 8: Sistema de fogos girantes.

Multímetro Digital INTEGRA 1232

Deverá ser utilizado nos ensaios da Máquina de Síncrona ligada à rede. Este dispositivo será utilizado para medir o valor eficaz das tensões e correntes do estator da MS, bem como a potência gerada e injetada na rede.

4. Ensaaios da Máquina Síncrona

Neste trabalho a Máquina de Corrente Contínua desempenha a função de máquina motriz (funcionamento motor), fornecendo potência mecânica à Máquina Síncrona (funcionamento gerador) através do seu veio, o qual se encontra acoplado ao veio do gerador síncrono (as duas máquinas rodam à mesma velocidade). Assim, a MCC converte energia elétrica em energia mecânica e, por sua vez, a MS converte essa energia mecânica em energia elétrica. Na Fig. 9, encontra-se representada a função de cada máquina do grupo.

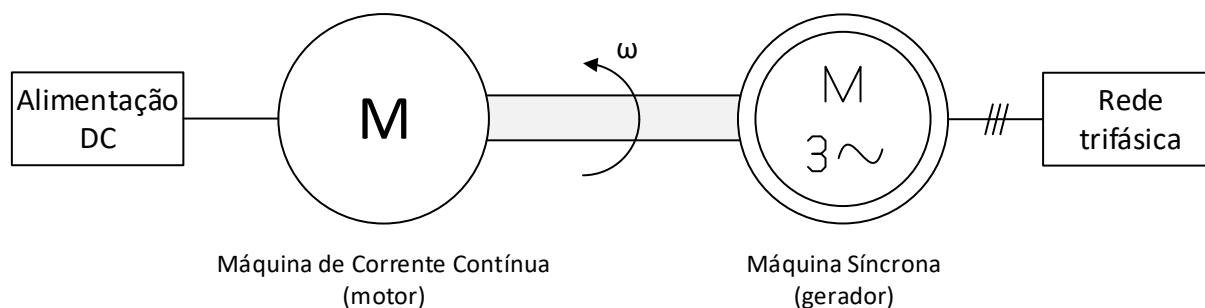


Figura 9: Representação das funções da Máquina de Corrente Contínua (funcionamento motor) e da Máquina Síncrona (funcionamento gerador).

Manobra da Máquina de corrente contínua

A Máquina de Corrente Contínua é composta por dois circuitos elétricos (indutor e induzido), encontrando-se os terminais acessíveis da MCC utilizada reunidos num módulo de bancada (Fig. 10).

O circuito de excitação ou indutor (terminais C e D), é um circuito destinado a criar campo magnético, e encontra-se no estator. Este circuito é alimentado a partir da rede de tensão contínua existente no laboratório, à qual é disponibilizada acesso em dois terminais. Ao ligar estes dois terminais aos terminais do indutor da MCC, a corrente de excitação deverá tomar um valor de cerca de 0,5 A (em regime permanente).

Por razões de segurança, a corrente no indutor (excitação) da MCC não deve ser interrompida com a MCC em funcionamento, devido ao risco de embalamento (aceleração descontrolada da máquina e consequente velocidade excessiva). Por este motivo, não existem fusíveis intercalados no circuito que alimenta o indutor, e este circuito deverá ser ligado em primeiro lugar e desligado em último lugar.

O circuito do induzido (terminais A e B) é o circuito principal da máquina, onde a potência em jogo é a mais significativa, encontrando-se no rotor. Este circuito é alimentado através de um autotransformador com regulação de tensão em carga, cuja saída alimenta um retificador trifásico (Fig. 10). Os valores de tensão e corrente no induzido não deverão ultrapassar, respetivamente, 210 V e 9 A.

Na Figura 10, ilustra-se o esquema de ligações para alimentação do indutor e do induzido da MCC.

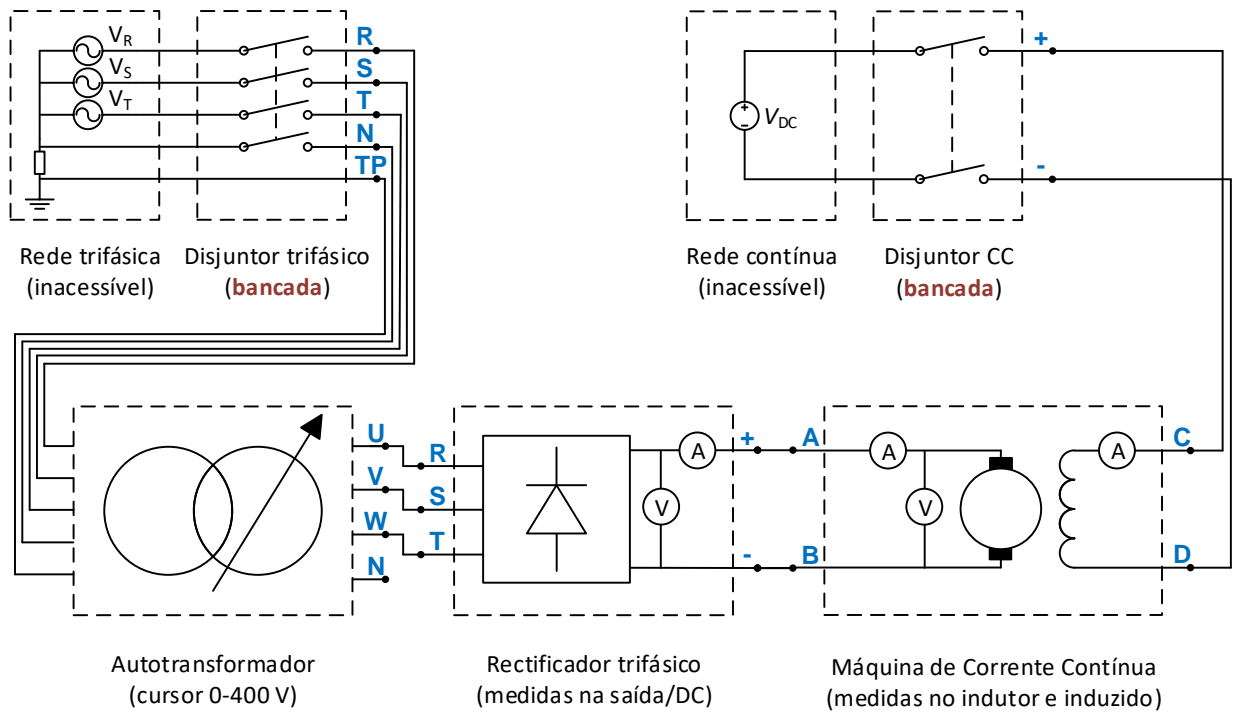


Figura 10: Esquema de ligações para alimentação dos circuitos indutor e induzido da Máquina de Corrente Contínua.

Neste trabalho a corrente de excitação da MCC é mantida constante. Assim, a velocidade de rotação, ω , é aproximadamente proporcional à tensão de alimentação do induzido (tensão na saída do retificador, V_{AB}),

$$\left. \begin{aligned} V_{AB} &= E + R_a I_a \approx E \quad (R_a I_a \ll E) \\ E &= k\phi\omega \\ \phi &\propto I_f = V_{DC}/R_f \text{ (reg. permanente)} \\ V_{DC} &= c^{te} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \omega = \frac{E}{k\phi} \approx \frac{V_{AB}}{k\phi} \propto V_{AB},$$

razão pela qual se atua no cursor do autotransformador (variando da tensão à entrada do retificador, terminais R, S e T e, por conseguinte, a tensão à saída do retificador, V_{AB}) para ajustar a velocidade do grupo¹.

A corrente no induzido é proporcional ao binário desenvolvido no veio, uma vez que

$$P_{mec} = T\omega = \eta V_{AB} I_a, \quad \eta = \frac{P_{mec}}{P_{AB}} \Rightarrow I_a \propto T.$$

O gerador taquimétrico instalado no veio da MCC permite a medição da velocidade de rotação através de dois terminais (Fig. 10). Os trabalhos serão realizados à velocidade nominal do grupo (1500 rpm), à qual corresponde o valor de tensão (contínua) de 30 V à saída do gerador taquimétrico (0,02 V/rpm).

¹ Note que, nestas expressões, E se refere à força electromotriz da MCC e não à f.e.m. da MS (cf. expressão (2)).

Manobra da Máquina Síncrona

Tal como a Máquina de Corrente Contínua, a Máquina Síncrona é constituída por um indutor e um induzido, encontrando-se os terminais correspondentes num módulo de bancada (Fig. 7). O indutor é um enrolamento colocado no rotor (terminais J e K) e o induzido é constituído por três enrolamentos (três fases) colocados no estator (acessíveis através dos terminais U, V e W). No módulo da MS, encontra-se montado um amperímetro para leitura da corrente no indutor (excitação), um voltímetro para leitura da tensão (composta) no induzido e três amperímetros para leitura das correntes nas fases do induzido (estator).

O circuito do indutor da MS é alimentado com corrente contínua ajustável, utilizando-se para esse efeito uma fonte de alimentação independente (Fig. 11), cujo cursor permite variar a tensão de saída. O induzido da MS é ligado à rede (por intermédio do interruptor S). Os valores de tensão (composta) e corrente no induzido não deverão ultrapassar, respetivamente, 500 V e 2 A.

Na Figura 12, ilustra-se o esquema de ligações para alimentação do indutor e do induzido da MS.

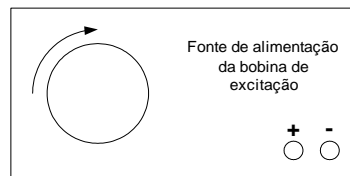


Figura 11: Excitação da máquina síncrona.

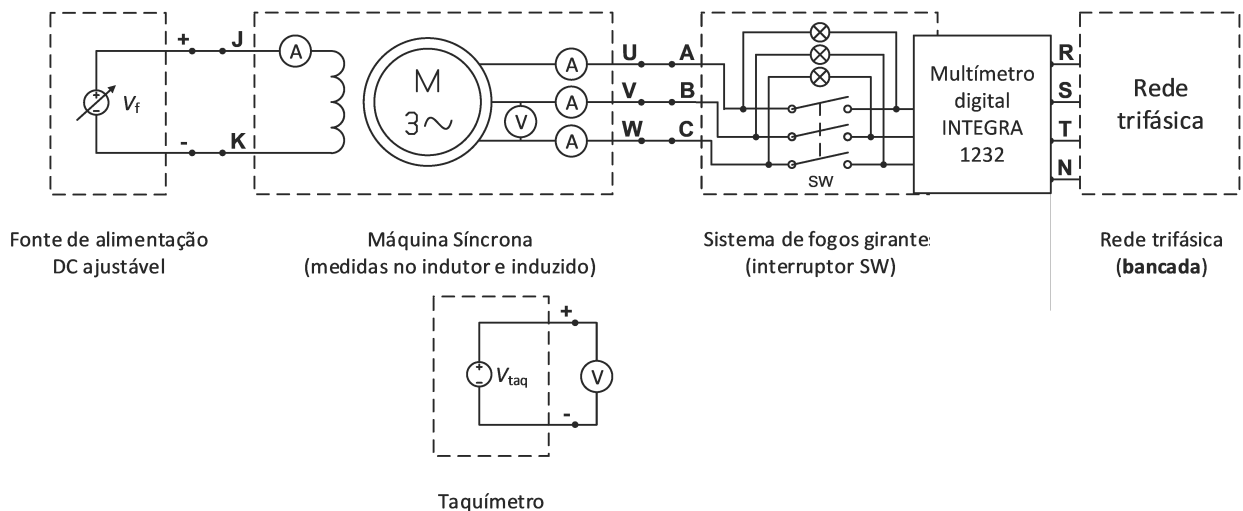


Figura 12: Esquema de ligações para alimentação dos circuitos do indutor e do induzido da Máquina Síncrona.

Ensaio da Máquina Síncrona ligada à rede

Os ensaios da MS ligada à rede começam pelo seu acionamento, sincronização e ligação à rede de energia do laboratório (por esta ordem). Com a MS ligada à rede, obtém-se a característica de potência ativa gerada com corrente de excitação constante e potência no veio variável, $P_g=f(P_{mec})$. Em seguida, obtêm-se características com corrente de excitação variável e potência no veio constante ($P_g=f(I_f)$, $Q_g=f(I_f)$ e $I=f(I_f)$).

Condução do ensaio

(acionamento da Máquina Síncrona)

- 1) Assegure-se de que o cursor do autotransformador trifásico se encontra na posição zero e que o interruptor do sistema de fogos girantes se encontra na posição OFF (desligado)
- 2) **Ligue o disjuntor da rede de tensão contínua (bancada).**
- 3) Ligue o disjuntor trifásico (bancada).
- 4) Arranque a Máquina de Corrente Contínua, aumentando progressivamente a sua velocidade até atingir um valor próximo do nominal (1500 rpm, 30 V no taquímetro).
- 5) Ligue a fonte que alimenta a excitação da Máquina Síncrona. Aumente progressivamente a tensão (composta) no induzido da MS até atingir cerca de 400 V.

(sincronização da MS com a rede e ligação à rede)

- 6) Atuando no cursor do autotransformador, faça um ajuste fino da velocidade de forma a obter um valor de velocidade de rotação dos gogos girantes suficientemente baixo, com qualquer uma das lâmpadas do sistema de fogos girantes a demorar alguns segundos (2-3) entre acender e apagar completamente.
- 7) Quando, no sistema de fogos girantes, a lâmpada superior estiver apagada (lâmpadas inferiores acesas), comute o interruptor de forma a ligar a Máquina Síncrona à rede (posição ON). Se houver indícios de funcionamento anormal do sistema após a comutação do interruptor, deverá chamar o docente, sem alterar nenhuma das ligações efetuadas, posições de interruptores ou disjuntores.

*(obtenção das características $P_g=f(P_{mot})$ e $Q_g=f(P_{mot})$ com **corrente I_f constante**)*

- 8) Ajuste a corrente de excitação da MS (I_f) para o valor de **1,0 A**.
- 9) Ajuste a MCC de forma a variar a potência mecânica que esta disponibiliza à MS, fazendo variar a corrente na saída do retificador/induzido da MCC (I_{DC}) em intervalos de 1 A, de 0 a 7 A
 - Se a MS perder o sincronismo com a rede aumente a corrente de excitação.
 - Registe os valores pedidos na tabela do relatório (folha A)

(obtenção das características $I=f(I_f)$, $P_g=f(I_f)$ e $Q_g=f(I_f)$ com **potência mecânica fornecida P_{mot} constante**)

- 10) Ajuste a potência ativa gerada pela MS de forma a reduzi-la para o mínimo (P_g próximo de zero). Atuando no cursor da fonte independente, ajuste a excitação da MS numa gama alargada (de 0 a 1,6 A, com intervalos de 0,2 A).
- Registe os valores pedidos na tabela correspondente do relatório (folha **B**)
 - Repita os ensaios para os restantes valores de P_g (250 e 500 W)

(desligação da MS da rede e finalização dos ensaios)

- 11) Para desligar a MS da rede elétrica, as correntes no induzido (estator) deverão ser o mais reduzidas possível (idealmente, seriam nulas).
- i) Ajuste a corrente de excitação da MS para um valor de cerca de 1,0 A.
 - ii) Atuando no autotransformador, minimize as correntes nas fases do induzido (estator) da MS (deverá ser possível reduzir as correntes até cerca de 0,7 A).
 - iii) Atuando novamente na fonte independente, minimize mais uma vez estas correntes.
 - iv) As correntes deverão agora ter um valor reduzido (inferior a 0,1 A); em caso contrário, volte ao início deste processo.
 - v) Comutando o interruptor do sistema de fogos girantes para a posição OFF (aberto), desligue a MS da rede.
- 12) Com a MS desligada da rede, atue no cursor do autotransformador de forma a parar as máquinas (redução da tensão aplicada até zero).
- 13) Desligue o disjuntor trifásico.
- 14) Desligue o disjuntor da rede de tensão contínua.