

MARINHA DO BRASIL
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO PARA OFICIAL DE MÁQUINAS – APMA.2

PEDRO FELIX DE GÓES NETO

**GERAÇÃO DE ENERGIA A BORDO: excitação de geradores e análise de caso
sobre black-out**

RIO DE JANEIRO

2018

PEDRO FELIX DE GÓES NETO

**GERAÇÃO DE ENERGIA A BORDO: excitação de geradores e análise de caso
sobre black-out**

Monografia apresentada como Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Aperfeiçoamento para Oficiais de Máquinas do Centro de Instrução Almirante Graça Aranha, como parte dos requisitos para obtenção do Certificado de Competência Regra III/2 de acordo com a Convenção STCW 78 Emendada.

Orientador: OSM Ramessés Cesar da Silva Ramos

RIO DE JANEIRO

2018

PEDRO FELIX DE GÓES NETO

**GERAÇÃO DE ENERGIA A BORDO: excitação de geradores e análise de caso
sobre black-out**

Monografia apresentada como Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Aperfeiçoamento para Oficiais de Máquinas do Centro de Instrução Almirante Graça Aranha, como parte dos requisitos para obtenção do Certificado de Competência Regra III/2 de acordo com a Convenção STCW 78 Emendada.

Data da Aprovação: ____/____/____

Orientador: OSM Ramessés Cesar da Silva Ramos

Assinatura do Orientador

NOTA FINAL: _____

Assinatura do Aluno

Dedico este trabalho a todos que nunca perderam a confiança em mim, por mais que minhas decisões parecessem incompreensíveis. A conclusão deste curso é a última e mais cabal prova de que este caminho, por mais tortuoso que tenha sido, valeu a pena.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais antes de tudo, pelo exemplo e os valores dados, e as oportunidades com que me presentearam às custas de muito trabalho.

Aos amigos, poucos, mas verdadeiros. A todos que fizeram parte importante do meu passado e contribuíram de forma ou outra para quem sou hoje.

E à minha querida Monica, sempre dedicada e persistente por mais que muitas vezes estejamos distantes um do outro.

"É de toda importância, não só o que fazem os homens, mas que tipo de homens o fazem. Dentre todas as obras do homem, a mais importante é sem dúvida ele próprio."

John Stuart Mill

RESUMO

O sistema de geração de energia elétrica a bordo é sem dúvida um dos mais essenciais componentes de uma embarcação, e sua importância cresce cada vez mais em conjunto com a expansão da automatização e a popularização da propulsão Diesel-elétrica. Porém, a formação e treinamento de oficiais de máquinas não acompanhou esta mudança de maneira satisfatória, e apesar de a maioria dos maquinistas competentes serem capazes de lidarem com avarias e manutenção de conjuntos geradores, existe uma carência generalizada de conhecimento relativo a aspectos mais profundos de seu funcionamento. Neste trabalho, após uma breve revisão sobre sistemas geradores de maneira geral, nos aprofundaremos sobre um componente essencial para a geração: o conjunto excitatriz-regulador de tensão, que possibilitam o início da captação de tensão. Após isto, concluiremos utilizando um exemplo real de blackout, no qual tanto a causa quanto a demora na conclusão da investigação a respeito do ocorrido foram ocasionadas pela falta de instrução a respeito deste aspecto em particular.

Palavras-chave: Geradores. Energia Elétrica. Excitatrizes. Blackout.

ABSTRACT

The on-board power generation system is undoubtedly one of the most essential components of a vessel, and its importance is growing with the expansion of automation and the popularization of diesel-electric propulsion. However, the training and education of engineer officers did not follow this change satisfactorily, and although most competent engineers are capable of dealing with failures and maintenance of generator sets, there is a general lack of knowledge concerning deeper aspects of its functioning. In this work, after a brief review of generator systems in general, we will delve into an essential component for electrical generation: the excitatory-voltage regulator set, which enable the starting of the voltage pick-up. After this, we will conclude by using a real example of blackout, in which both the cause and the delay in completing the investigation regarding the occurrence were caused by the lack of instruction regarding this particular aspect.

Keywords: Generators. Electric energy. Excitators. Blackout

LISTA DE ILUSTRAÇÕES/FIGURAS

Figura 1:	Gerador elementar	13
Figura 2:	Varição angular da tensão	14
Figura 3:	Retificação com apenas um diodo	15
Figura 4:	Retificação de onda completa por ponte	16
Figura 5:	Onda retificada com capacitores	16
Figura 6:	Funcionamento do tiristor	17
Figura 7:	Diagrama lógico de controle e excitação	19
Figura 8:	Diagrama de um gerador tipo Shunt	21
Figura 9	Visão em corte de um gerador	23
Figura 10	Diagrama de um gerador tipo Shunt com Boost	24
Figura 11	Diagrama de gerador com Boost retro-alimentado	25
Figura 12	Diagrama Simplificado do sistema de força	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Corrente Alternada
AHTS	Anchor Handling, Tug and Supply
AVR	Regulador de Voltagem Autônomo
DC	Corrente Direta
GMDSS	Global Maritime Distress and Safety System

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Ânodo
A	Amperes
g	Gate
k	Cátodo
N	Norte
S	Sul
V	Volts
θ	Período

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 FUNCIONAMENTO BÁSICO DE UM GERADOR	13
3 RETIFICAÇÃO DE TENSÃO	15
4 EXCITAÇÃO DE GERADORES	19
4.1 Tipos de excitadores	20
4.2 Gerador auto excitado tipo shunt	21
4.3 Gerador tipo shunt+boost	23
4.4 Alimentação do AVR	26
5 ESTUDO DE CASO SOBRE BLACK-OUT	28
5.1 Pré-análise	28
5.2 Investigação	29
5.3 Conclusão da análise	31
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

Desde a transição da propulsão à vela para a mecânica, a energia elétrica sempre foi componente indispensável no funcionamento de todos os navios, e sua geração e distribuição é um dos elementos que norteiam o projeto de toda embarcação. Inicialmente utilizada apenas para iluminação e funções menores, a eletricidade ao longo do tempo se tornou a força motriz principal a ser empregada pelos diversos equipamentos, começando com bombas e ventiladores até chegar ao patamar atual, onde já é responsável pela propulsão de muitos navios.

De acordo com este crescimento, a responsabilidade do maquinista em manter e operar tais sistemas aumentou também, além de suas necessidades de treinamento. Além disto, sistemas elétricos não exibem a mesma tolerância à manutenção imprópria dos sistemas mecânicos, e cuidados maiores são necessários durante seu manejo a fim de evitar acidentes. Todos estes fatores, combinados à demora da maioria dos países membros da IMO em adequar seus centros de ensino marítimo à nova realidade dos sistemas de bordo contribuíram para criar um clima de despreparo e mistificação em boa parte da Marinha Mercante mundial.

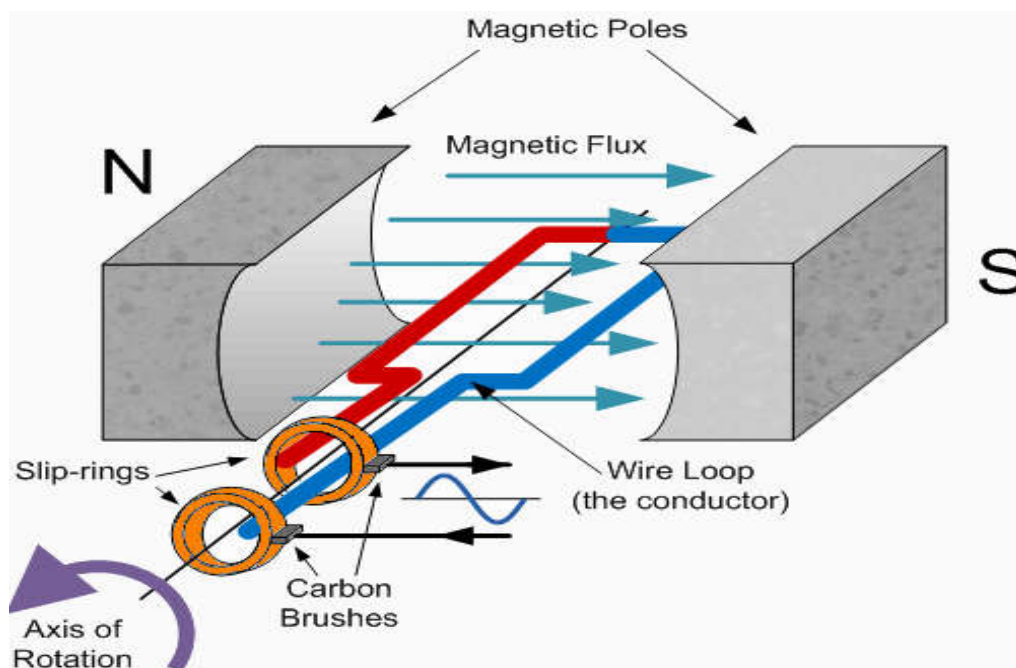
Felizmente tal quadro é facilmente reversível, sendo de grande auxílio a exploração didática de pequenos elementos essenciais, porém muito ignorados, que, uma vez apresentados ao maquinista em aprendizado, tornam-se parte integral de sua compreensão sobre todo o sistema. Tal exploração é o objetivo deste trabalho, escrito de maneira simples de modo a se tornar compreensível para iniciantes e até leigos, ao explicarmos como funcionam os conjuntos excitadores, e analisarmos um caso de falha dos mesmos.

2 FUNCIONAMENTO BÁSICO DE UM GERADOR

Geradores são máquinas que transformam energia mecânica em energia elétrica através da diferença entre os campos magnéticos de dois elementos. Estes dois elementos são rotor (dinâmico) e estator (estático). Fontes de energia mecânica variam largamente, podendo ser turbinas (a gás, vapor, água ou vento), motores a combustão interna e até mesmo força muscular em exemplares menores. Os geradores dividem-se também de acordo com a modulação da corrente (quantidade de elétrons deslocados) gerada, podendo ser ela direta (DC) ou alternada (AC). Adequando-se à atual realidade da Marinha Mercante, neste trabalho trataremos apenas de geradores AC.

Para a explicação do princípio de funcionamento básico usaremos um gerador elementar AC excitado por ímã permanente, como demonstrado na figura abaixo:

Figura 1 – Gerador Elementar



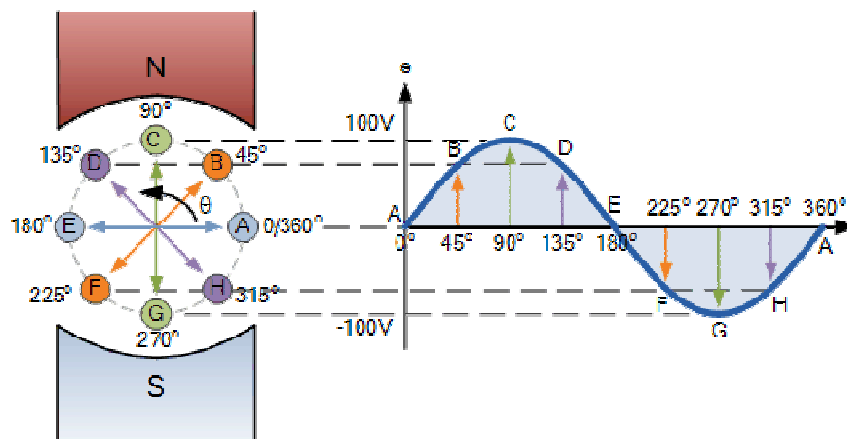
Fonte: <https://www.quora.com/What-is-the-difference-between-electric-motor-and-electric-generator>

A espira plana é o elemento condutor e é imersa em um campo magnético uniforme produzido pelos ímãs e percorrida por uma corrente contínua induzida pelo campo.

O campo magnético dos ímãs é composto por diversas linhas de força, que exercem influência sobre o material que compõe a espira plana. Ao ser girada por uma força externa, a resistência do material ao magnetismo faz com que os elétrons da espira condutora, caso esta esteja em circuito fechado, se desloquem, gerando assim a corrente elétrica. A corrente varia de acordo com a velocidade do condutor e a intensidade do campo magnético.

Os anéis coletores (“slip-rings”, na figura) transmitem a corrente gerada ao restante do circuito, onde será consumida pelas cargas ligadas à rede. Esta corrente é variável ao longo da rotação das espiras, por isto sendo denominada alternada, e sua variação é descrita por uma função senóide como demonstrado abaixo:

Figura 2 – Variação angular da tensão



Fonte: <https://www.electronics-tutorials.ws/accircuits/sinusoidal-waveform.html>

Como demonstrado na figura, a tensão (nome comum dada à força eletromotriz gerada) é maior quando a espira está paralela ao campo, e atinge zero quando perfeitamente perpendicular. Ao continuar sua rotação, a corrente torna-se negativa e repete a mesma tendência. Ao se tornar negativa, a corrente flui no sentido contrário; aos olhos de um leigo isto parece inacreditável, pois os equipamentos que usam AC não retificada apresentam funcionamento constante, como por exemplo lâmpadas incandescentes. Isto na realidade é uma ilusão

A variação ocorre, porém não é percebida pelos nossos olhos pois esta variação ocorre em altíssima frequência. Ao observarmos a mesma lâmpada em uma filmagem em câmera lenta pode se observar a luz aumentando e diminuindo.

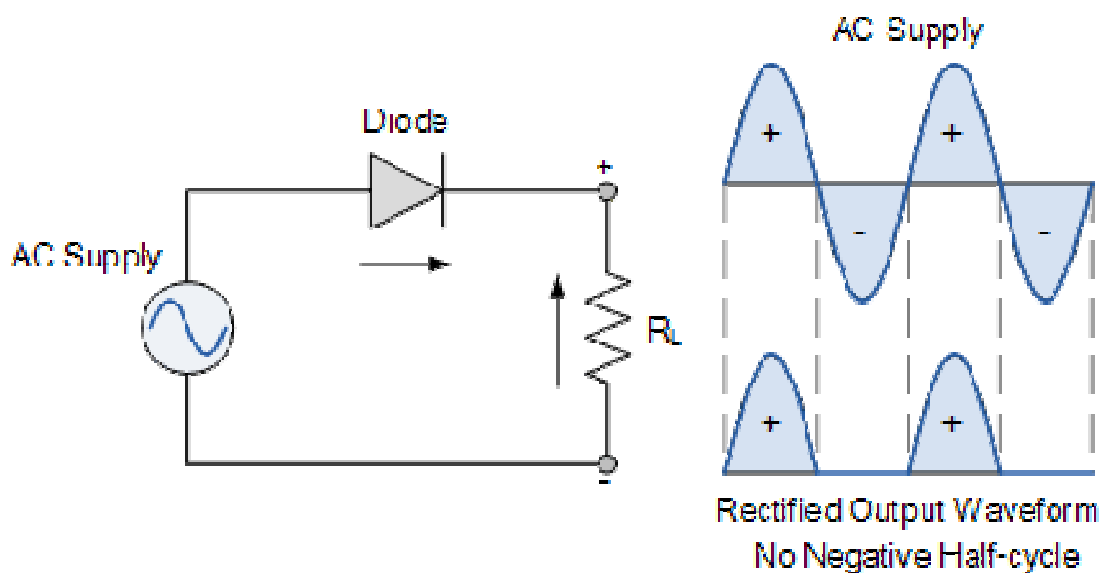
3 RETIFICAÇÃO DE TENSÃO

Apesar da geração em AC ser o método dominante em embarcações modernas e transmissão doméstica, grande parte dos equipamentos usados no mundo, incluindo praticamente a totalidade dos equipamentos eletrônicos, utiliza DC. Isto é possível através da retificação.

A retificação é o processo pelo qual, através de dispositivos adicionados ao circuito, a variação senóide da transmissão em AC é reduzida, visando torná-la o mais constante possível. Para esta finalidade, o componente básico mais utilizado é o diodo.

Um diodo é um componente eletrônico de dois terminais que conduz corrente principalmente em uma direção (condutância assimétrica); tem baixa resistência (idealmente zero, mas na prática com uma pequena queda de 0,3 a 0,7 V na tensão) em uma direção e alta resistência (idealmente infinita) na outra. Ou seja, o diodo conduz somente em uma direção; ao ser instalado em um circuito AC, com seu polo positivo (cátodo) ligado ao polo positivo da alimentação, a corrente no circuito assume a seguinte função:

Figura 3 – Retificação com apenas um diodo

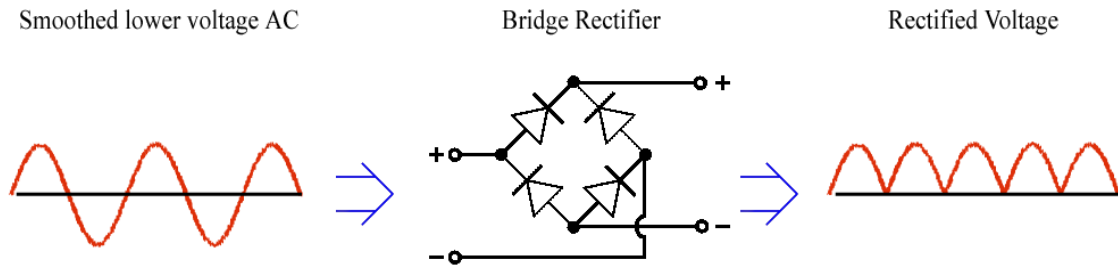


Fonte: <https://www.electronics-tutorials.ws/power/single-phase-rectification.html>

Nota-se que a fase negativa da corrente foi totalmente cancelada; porém, esta retificação seria inconveniente à maioria dos equipamentos devido a sua

intermitência. Podemos corrigir isto ainda utilizando os diodos como componentes básicos, numa estrutura conhecida como ponte retificadora.

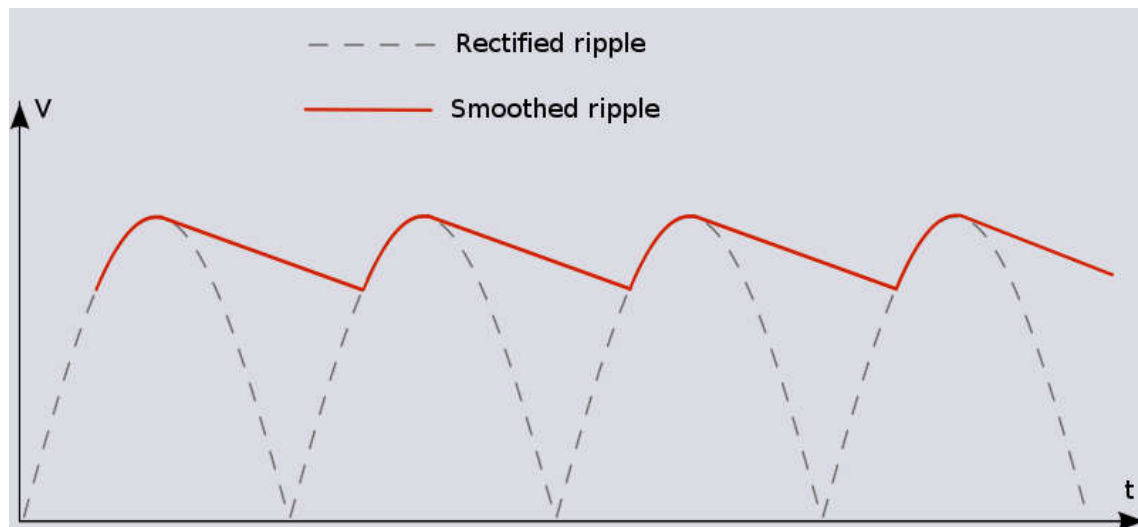
Figura 4 – Retificação de onda completa por ponte



Fonte: <https://electronics.stackexchange.com/questions/356528/bridge-rectifier-output-higher-than-input>

O resultado assim obtido é muito mais adequado, podendo ser melhorado ainda mais adicionando-se capacitores ao circuito, capazes de armazenar corrente durante o aumento de tensão e descarregá-la durante a queda:

Figura 5 – Onda retificada com capacitores

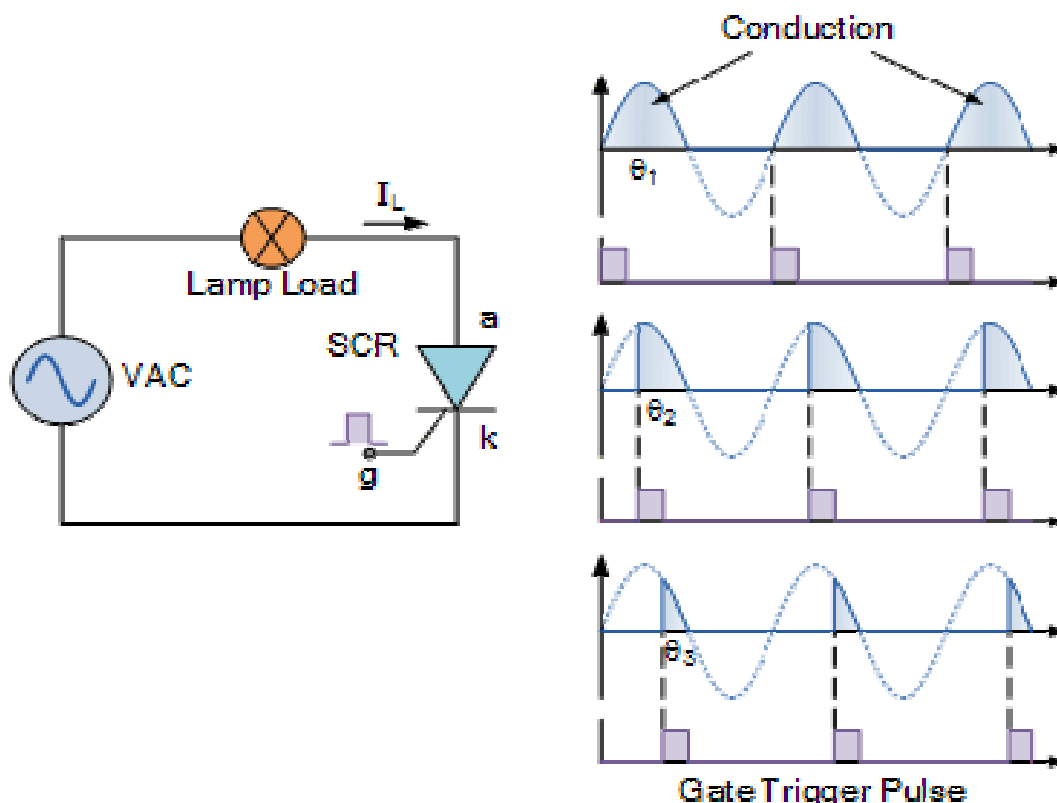


Fonte: <https://electronics.stackexchange.com/questions/285847/why-is-dc-sqrt2-higher-than-ac-after-rectifying>

Existe também outro tipo de diodos, além do diodo básico visto acima, que é muito utilizado em geradores. Trata-se do tiristor. O tiristor é um semicondutor que, assim como o diodo, transmite tensão somente em uma direção, do seu cátodo para o ânodo. Porém, enquanto o diodo possui dois terminais permite a passagem de

qualquer tensão aplica em seu cátodo, o tiristor possui um terceiro terminal, denominado “gate”, que ao ser acionado habilita sua passagem de tensão. Vejamos isto na prática a seguir:

Figura 6 – Funcionamento do tiristor



Fonte: <https://www.electronics-tutorials.ws/power/thyristor.html>

No início de cada meio ciclo positivo, o tiristor está “OFF”. Na aplicação do pulso de gate, o tiristor é acionado para a condução e permanece totalmente “ligado” durante a duração do ciclo positivo. Se o tiristor for acionado no início do meio-ciclo (θ_1), a carga (uma lâmpada) será “ON” para o ciclo positivo total da forma de onda CA (CA retificada de meia onda).

À medida que a aplicação do pulso do gatilho aumenta ao longo do meio ciclo (θ_2 e θ_3), a lâmpada é iluminada por menos tempo e a tensão média fornecida à lâmpada também será proporcionalmente menor, reduzindo seu brilho.

A importância do estudo da retificação elétrica será observada posteriormente neste trabalho ao entrarmos no campo da excitação dos geradores; Diodos de alta capacidade ou tiristores são encontrados em praticamente todos os diesel-geradores navais modernos.

4 EXCITAÇÃO DE GERADORES

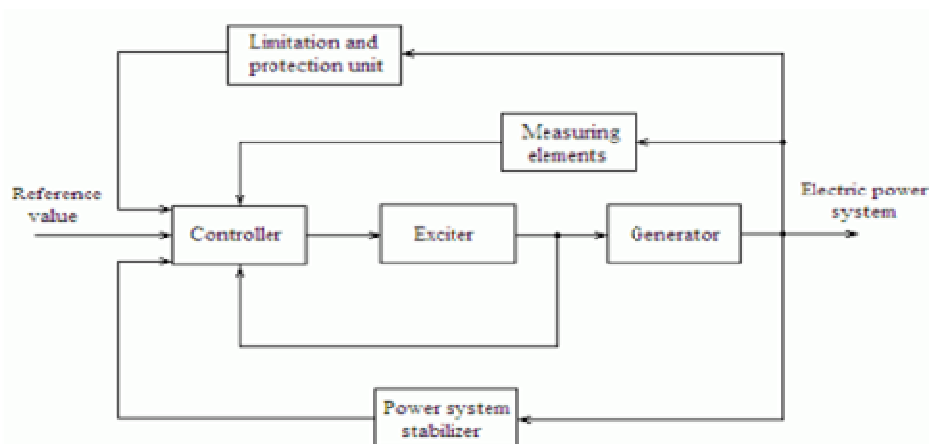
Geradores são elementos tão cruciais de toda planta industrial ou marítima que sua operação muito frequentemente se torna um reflexo automático e irracional; a ideia de que partindo o gerador se energiza todo o sistema é tão central e enraizada que acaba inibindo outra de igual importância:

Afinal, o que energiza o gerador no primeiro lugar?

Como vimos no primeiro capítulo, o método mais antigo é o uso de ímãs para gerar um campo magnético no qual o rotor se movimenta. Este exemplo como vimos atualmente é largamente teórico, sendo impossível o uso de apenas ímãs para a construção de um gerador.

Diante desta limitação foi inventado o conjunto excitador, um sistema complexo encarregado de criar o campo magnético necessário a geração de corrente. Estes conjuntos geralmente consistem de regulador autônomo de tensão (AVR), excitatriz, elementos de medição, estabilizador do sistema de potência e unidade de proteção e limitação.

Figura 7 – Diagrama lógico de controle e excitação



Fonte: JERKOVIC, Vedrana. Excitation System of Synchronous Generator.

O conjunto excitador é a fonte de energia elétrica para o enrolamento de campo do gerador e geralmente assume a forma de um gerador DC ou AC separado no mesmo eixo do principal. O excitador tem seu enrolamento de campo (fornece o campo) no estator, e enrolamento da armadura (sofre indução e gera corrente) no rotor. No caso de geradores AC, à medida que o rotor gira, a corrente CC do estator induz corrente alternada trifásica no enrolamento do rotor. Esta

corrente CA é retificada usando diodos, tiristores ou ponte de transistores instalada no rotor.

4.1 Tipos de excitadores

A categorização de sistemas de excitação é feita de acordo com a fonte de energia de excitação. As duas classes principais desta categorização são: sistemas separados de excitação e sistemas de auto-excitação.

Sistemas separados de excitação podem ser estáticos ou sem escova. Esses sistemas são independentes de interrupções e falhas que ocorrem no sistema de energia elétrica, e têm a possibilidade de forçar a excitação.

Sistemas sem escova são usados para excitação de geradores maiores (potência superior a 600 MVA) ou empregados em ambientes explosivos. Um sistema sem escova consiste de excitador AC, ponte de diodos rotativos e gerador de AC auxiliar realizado com excitação de ímã permanente. Tentativas de construir sistemas sem escova com pontes de tiristores não foram bem-sucedidas devido á inconsistência de resultados com o controle dos tiristores. O resultado deste problema é uma das significativas desvantagens destes sistemas, a incapacidade do gerador de ser des-excitado. Outra desvantagem é a resposta mais lenta do sistema, especialmente em caso de baixa excitação.

Sistemas de auto-excitação tem como vantagem a simplicidade e custos baixos. A ponte de tiristores ou diodos é alimentada por terminais do gerador através de um transformador. A principal desvantagem é que a tensão de alimentação de excitação e por consequência, corrente de excitação, depende diretamente da saída do gerador. Sistemas de auto-excitação sem escova com ponte de diodos também existem.

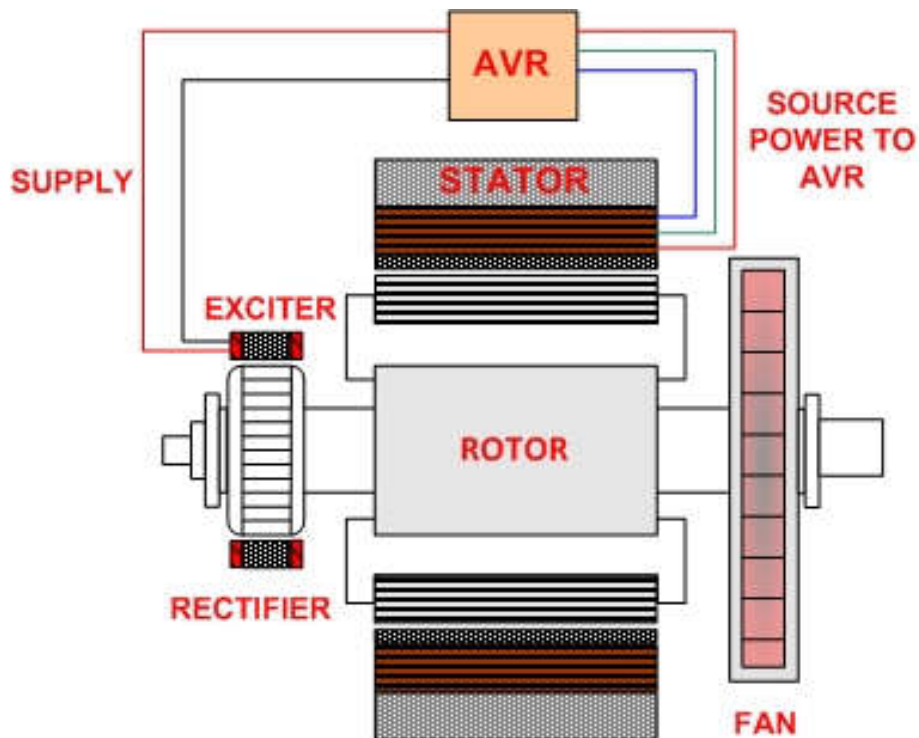
Focaremos a seguir na explicação de geradores auto-excitados sem escova, que é o tipo relevante ao estudo de caso ao qual este trabalho se destina.

4.2 Gerador auto excitado tipo shunt

O método “shunt” (desvio, em inglês) apresenta um design simples e econômico para fornecer energia de entrada para o AVR. Este método não requer componentes adicionais ou fiação excessiva. Quando surgem problemas, a solução de problemas é simplificada com menos componentes e fiação para testar e validar.

Neste método, além de medir a tensão de saída do gerador e regulá-la através da variação de excitação, o próprio AVR realiza a retificação e realimentação do circuito excitador. Vejamos a seguir:

Figura 8 – Diagrama de um gerador tipo Shunt



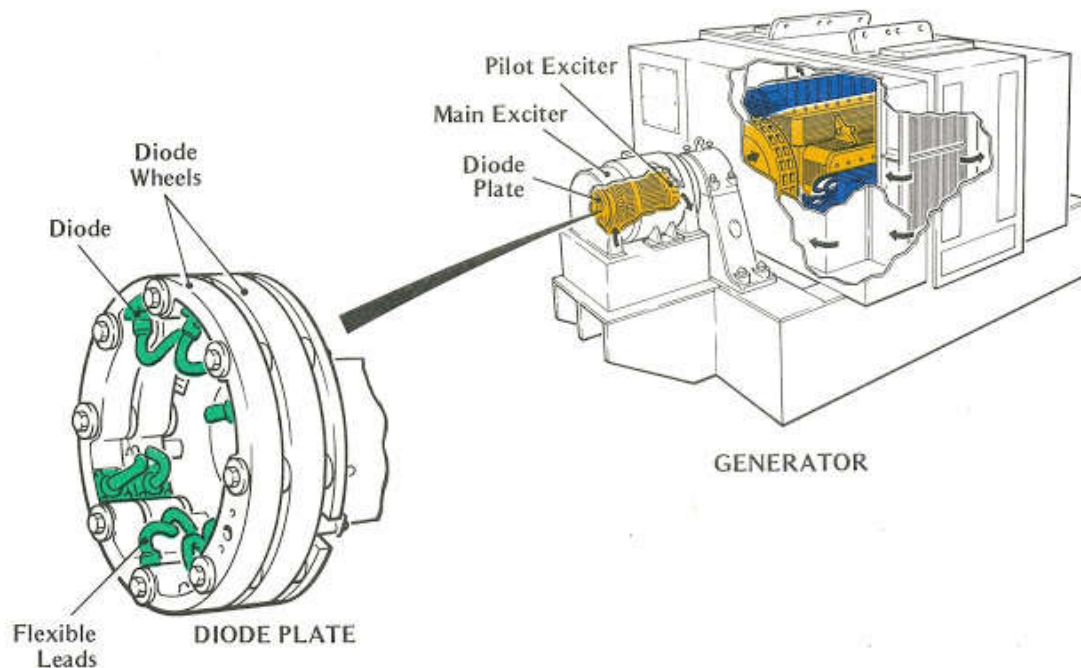
Fonte: <https://www.dieselserviceandsupply.com/Generator-Excitation-Methods.aspx>

Quando o gerador é girado, o estator fornece tensão de entrada ao AVR. Além disso, o AVR possui sensores que monitoram a saída do estator. É muito importante ressaltar que estas duas funções são realizadas em paralelo, por componentes separados. De acordo com a tensão monitorada, os circuitos eletrônicos do AVR modulam a tensão a ser transmitida para a excitatriz; se a carga do sistema aumenta (por exemplo, quando se parte uma bomba), a tensão na saída cai e o AVR aumenta a excitação para que esta se reestabeleça. Quando a carga no circuito reduz, o contrário ocorre, e o AVR reduz a excitação para manter a tensão constante.

A tensão captada na saída do gerador pelo AVR é imprópria para a excitação em seu estado original pois se trata de AC. Logo, o AVR tem também como função a retificação desta tensão através de uma ponte retificadora (semelhante à vista nos capítulos anteriores); sendo assim, o estator da excitatriz é

suprida com uma corrente DC, gerando um campo magnético constante. Este campo induz tensão AC no rotor da excitatriz, localizado à extremidade do eixo principal do gerador. Esta tensão é retificada pela ponte de diodos localizada no próprio eixo, e transmitida ao rotor principal do gerador, que, alimentado por DC, passa a gerar um campo constante ele mesmo. Este campo induz tensão AC no estator principal, aonde estão conectados os cabos principais que irão alimentar todo o sistema elétrico. É um sistema difícil de ser visualizado mentalmente para os que não o conhecem, mas facilmente compreendido ao observarmos a figura a seguir:

Figura 9 – Visão em corte de um gerador



Fonte: <https://emadrlc.blogspot.com/2013/01/chapter-3-generator-excitation.html>

A maior desvantagem desse sistema é que o AVR é impactado pela carga que o gerador está alimentando. Quando a carga aumenta, a tensão começa a diminuir e o AVR deve fornecer mais corrente ao excitador para suportar a demanda. Isto pode levar o AVR além de seus limites operacionais. Se o AVR for além para além dos seus limites, o campo de excitação entra em colapso. A tensão de saída do gerador é reduzida para uma quantidade insignificante. Além disto, se ocorrer uma falha no fornecimento ao AVR (que normalmente é uma fonte independente ao

gerador, e será explicada posteriormente), o gerador não terá uma fonte de excitação. Isso causa uma perda completa da saída de energia do gerador (o conhecido black-out).

Geradores com métodos de shunt simples ou auto-excitados tem seu uso recomendado em cargas lineares (carga constante). Aplicações que possuem cargas não lineares (carga variável) não são recomendadas para geradores com este método de excitação, pois a variação brusca ou uma falha repentina (curto-circuito) de um grande consumidor podem exceder o limite operacional do AVR. Além disto, harmônicos associados a cargas não lineares podem causar paradas no campo de excitação. Desta maneira, para que possam ser usados a bordo, geradores auto-excitados requerem um recurso adicional, que veremos a seguir.

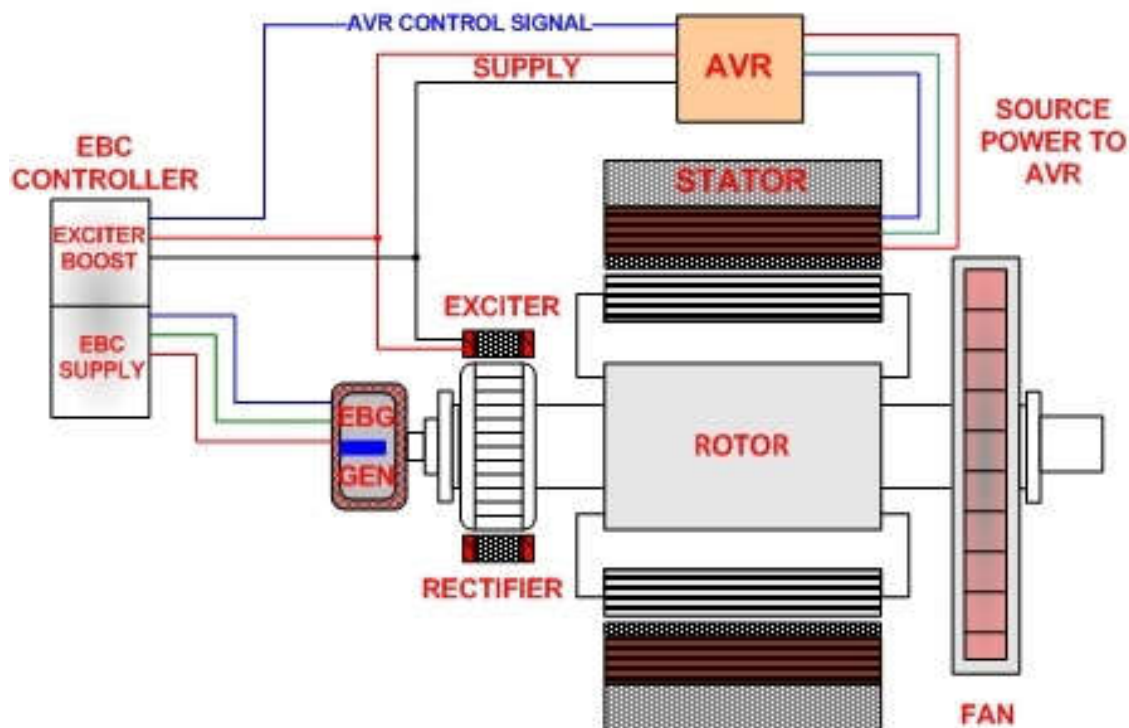
4.3 Gerador tipo shunt+boost

As vantagens de se ter um gerador que não utiliza escovas (que se desgastam, geram detritos e precisam ser trocadas em intervalos regulares) e que gera a própria excitação (usando assim menos componentes, ocupando menos espaço e reduzindo custos de manutenção) são consideráveis.

Para poder aproveitá-las também em instalações com cargas variáveis (como por exemplo navios de apoio offshore, que executam uma vasta gama de atividades e cuja condição operacional está sempre mudando), a indústria desenvolveu um recurso chamado módulo Boost.

O módulo Boost (incrementar, em inglês) nada mais é que um componente paralelo à saída do AVR, e se destina a fornecer energia para a excitação quando este último não puder, como é o caso das variações bruscas e curtos-circuitos mencionados anteriormente. Veremos a seguir dois tipos de geradores com Boost.

Figura 10 – Diagrama de gerador Shunt com Boost

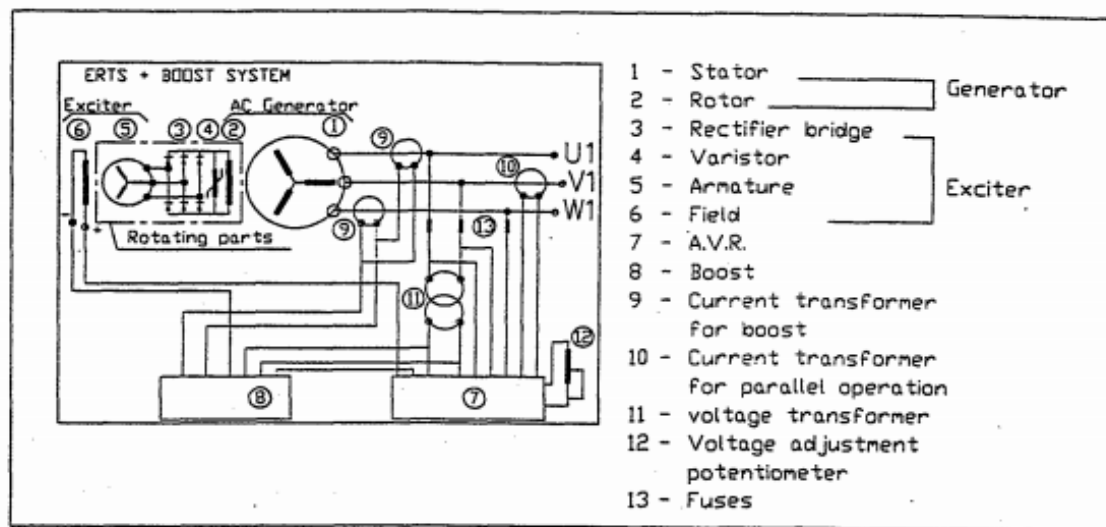


Fonte: <https://www.dieselserviceandsupply.com/Generator-Excitation-Methods.aspx>

No modelo acima, vimos que montado ao fim do sistema temos o conjunto de Boost, composto por uma unidade de Controle dividida em módulo de suprimento e módulo de Boost ao excitador propriamente dita. A unidade de suprimento recebe a tensão gerada por um pequeno gerador de ímãs permanentes acoplado ao eixo, mas sua passagem só ocorrerá caso o módulo de Boost receba um sinal do AVR indicando que há queda brusca na tensão de saída do gerador. Esta passagem é variável e controlada, de modo a atender as necessidades do conjunto gerador de maneira precisa e rápida, atenuando consideravelmente picos de tensão, como aqueles gerados durante partidas de motores.

Porém, a necessidade de se alongar o eixo e instalar mais componentes ao conjunto o torna maior, aumentando sua necessidade de espaço; além disto, a capacidade limitada do gerador de ímãs permanentes faz com que este método possa ser utilizado somente em geradores pequenos, como aqueles utilizados a bordo na função de gerador de emergência. Diante disto, um segundo método foi elaborado para que se possa usar o Boost em geradores maiores.

Figura 11 – Diagrama de gerador com Boost retro-alimentado



Fonte: Manual do Fabricante, gerador AMG 560 L6 L, ABB Industrie.

A figura acima foi retirada do manual do gerador que veremos no estudo de caso ao final deste trabalho; por tratar-se de um equipamento real, sua documentação é mais complexa e menos legível à primeira vista. O item 6 representa o estator da excitatriz, o item 5 o rotor, os itens 3 e 4 a ponte retificadora e o varistor (um semiconductor cuja função é proteger o circuito contra picos de tensão), e o item 2 o rotor do gerador propriamente dito.

Nota-se a ausência de um gerador dedicado ao módulo Boost. Ao invés de um gerador separado ou outras fontes externas, o módulo Boost utiliza dois transformadores de corrente (itens 9) localizados na saída de tensão do estator. Em caso de curto-circuito, à medida que a tensão de saída cai e se torna insuficiente para a retro-alimentação da excitatriz através do AVR, os transformadores de corrente transformam esta baixa tensão em tensão suficiente para manter a excitação, e o módulo de Boost a direciona para a excitatriz, evitando assim a parada do gerador.

4.4 Alimentação do AVR

Vimos então como a função do AVR é essencial ao funcionamento do gerador, regulando sua tensão de acordo com as variações causadas pelo consumo na rede, realizando isto através do controle da excitação do próprio gerador. Vimos também que a maior parte dos geradores modernos de média ou alta capacidade

utiliza o método Shunt e suas variantes, que usa a própria tensão de saída para retro-alimentar a excitatriz. Porém, falta uma informação crucial em todos os diagramas que vimos. Afinal, o que alimenta o próprio AVR?

O AVR moderno é um componente eletrônico complexo, e, portanto, não só necessita de alimentação própria, mas também de uma fonte estável e segura. Os três principais métodos são via gerador auxiliar de imã permanente, via espira auxiliar no estator do gerador, ou via fonte externa.

O método que utiliza gerador de imã permanente dedicado, cujo nome é autoexplicativo, tem como vantagem a relativa simplicidade, e a exposição menor à variação operacional, visto que é exposto somente à variação de velocidade do condutor mecânico (por exemplo, o motor diesel), não sendo afetado por variações de tensão do primário. Sua desvantagem principal é a adição deste gerador ao eixo principal (onde inclusive pode já haver um gerador do tipo dedicado ao módulo Boost ou outro acessório), e dos componentes necessários para transformação e retificação desta tensão, que tornam o grupo gerador maior, alteram seu projeto devido ao aumento de carga mecânica sobre o eixo, geram maior demanda de manutenção e por consequência maior custo.

O segundo método elimina boa parte destas desvantagens, ao substituir o gerador auxiliar por uma espira adicional ao estator principal. Assim, praticamente, o único adicional expressivo à manutenção e ao tamanho do conjunto são os componentes do grupo transformador e retificador. Porém, por ser diretamente dependente da tensão gerada e ao mesmo tempo ter um estator separado, o AVR assim alimentado está exposto tanto a flutuações mecânicas quanto elétricas. Sendo assim, este método é mais indicado para cargas lineares.

O terceiro método é o mais simples dos três e consiste apenas de fornecer um meio de alimentação constante ao AVR como se fosse um dos demais eletrônicos de automação. Por razões de segurança, obviamente, este suprimento deve ser do tipo UPS (em inglês, Sistema de Força Ininterrupta), com uma fonte de energia operacional constante (gerador principal), uma fonte constante de emergência (gerador de emergência), e uma reserva transitória (baterias, por exemplo).

Originalmente as sociedades classificadoras recomendavam, para utilização em navios, AVR com gerador dedicado ou espira auxiliar. Porém, com a modernização dos navios e sua maior demanda de eletricidade, além de suas

cargas cada vez mais variáveis, tornaram o modelo de espira auxiliar menos viável. Por outro lado, a necessidade que muitos navios, principalmente no seguimento offshore, tem de manter seus geradores em funcionamento praticamente ininterrupto, além das restrições sobre manutenção e a disponibilidade de espaço grandemente reduzida, tornaram o modelo com fonte externa muito popular na indústria. Além disto, as exigências já existentes de redundância elétrica a bordo de navios tornam a adoção da fonte externa ainda mais desejável, assim garantindo seu suprimento ininterrupto.

Sendo assim, seguindo os procedimentos de inspeção e manutenção exigidos pelas sociedades classificadoras e pela lei marítima, o risco de falha de um AVR suprido por fonte externa se torna praticamente nulo. Porém, veremos a seguir um caso onde mesmo um excelente procedimento de bordo permitiu que a temida falha ocorresse.

5 ESTUDO DE CASO SOBRE BLACK-OUT

O caso a ser estudado ocorreu em um navio do tipo AHTS (Supply, reboque e manejo de âncora), construído em 1997 e muito bem mantido, com um plano de manutenção e inspeção rigoroso e mantido em dia. Sua planta elétrica consiste de quatro geradores de eixo, dois pequenos geradores auxiliares, e um gerador de emergência. É dotado também de três conjuntos de baterias para emergência; uma para o sistema supervisorio da máquina, um para o barramento de emergência, e um para o GMDSS.

Mensalmente, o teste real de black-out é efetuado, no qual se mede o tempo de resposta após o apagamento completo do barramento de emergência (Emergency Switchboard ou EMG SWB). É um teste muito simples, e consiste apenas em desarmar o disjuntor que conecta o barramento de emergência ao barramento principal, estando o navio fundeado ou em stand-by obviamente, para fins de segurança. Normalmente, após desarmar o disjuntor, as luzes de emergência se apagam, os equipamentos críticos se mantêm ligados graças às baterias, e as luzes e equipamentos ligados nos barramentos principais não se alteram. Então, após alguns segundos, o gerador de emergência parte automaticamente, se conecta ao barramento de emergência e energiza as luzes e os equipamentos novamente. Toda esta situação se desenvolve em cerca de dez segundos, muito abaixo do tempo exigido pela lei marítima (45 segundos).

Porém, durante um destes testes no ano de 2017, a situação se deu fora do esperado. Após o disjuntor principal do EMG SWB ser desarmado, ao invés do black-out somente das luzes de emergência, o navio apagou por completo. O gerador de emergência funcionou normalmente, e o navio encontrava-se fundeado com o passadiço tendo sido avisado do teste como manda o procedimento. Após o reestabelecimento do EMG SWB, os geradores auxiliares partiram e entraram no barramento. Com a energia reestabelecida, os motores principais foram partidos, os geradores de eixo acoplados e a investigação iniciada.

5.1 Pré-análise

Antes de iniciar a investigação técnica em si, é importante analisar as condições ambientais e de pessoal. Como dito anteriormente, o procedimento foi seguido e todas as manutenções estavam em dia no registro da máquina; porém, em navios offshore especialmente, existem sempre muitos problemas no aspecto de

garantida manutenção devido à qualidade variável dos tripulantes, mudanças frequentes de tripulação, escalas curtas, separação do trabalho entre setores e principalmente excesso de carga de trabalho incompatível com o número de tripulantes a bordo. Este último, em especial, com a setorização e informatização dos navios modernos faz com que existam equipamentos e sistemas que são totalmente ignorados ou até desconhecidos por tripulantes da máquina, por serem encargo de outros setores e haver muito pouco tempo hábil para o estudo mais profundo das instalações.

O navio em foco é um exemplo claro destes problemas; existem apenas quatro tripulantes para a seção de máquinas, sendo um deles um marinho dedicado apenas à limpeza. Por se tratar de um AHTS, apesar do pequeno tamanho (98 metros de comprimento), possui um grande número de sistemas complexos de funcionamento eletro-hidráulico. Além disto, à manutenção de ocorrência natural somam-se as pesadas exigências de inspeção e conformidade do próprio armador (que se trata de um conglomerado internacional com altíssimos padrões de garantia da qualidade), do cliente (Petrobrás), da autoridade marítima e da sociedade classificadora. Este quadro assim criou a situação que estamos estudando.

5.2 Investigação

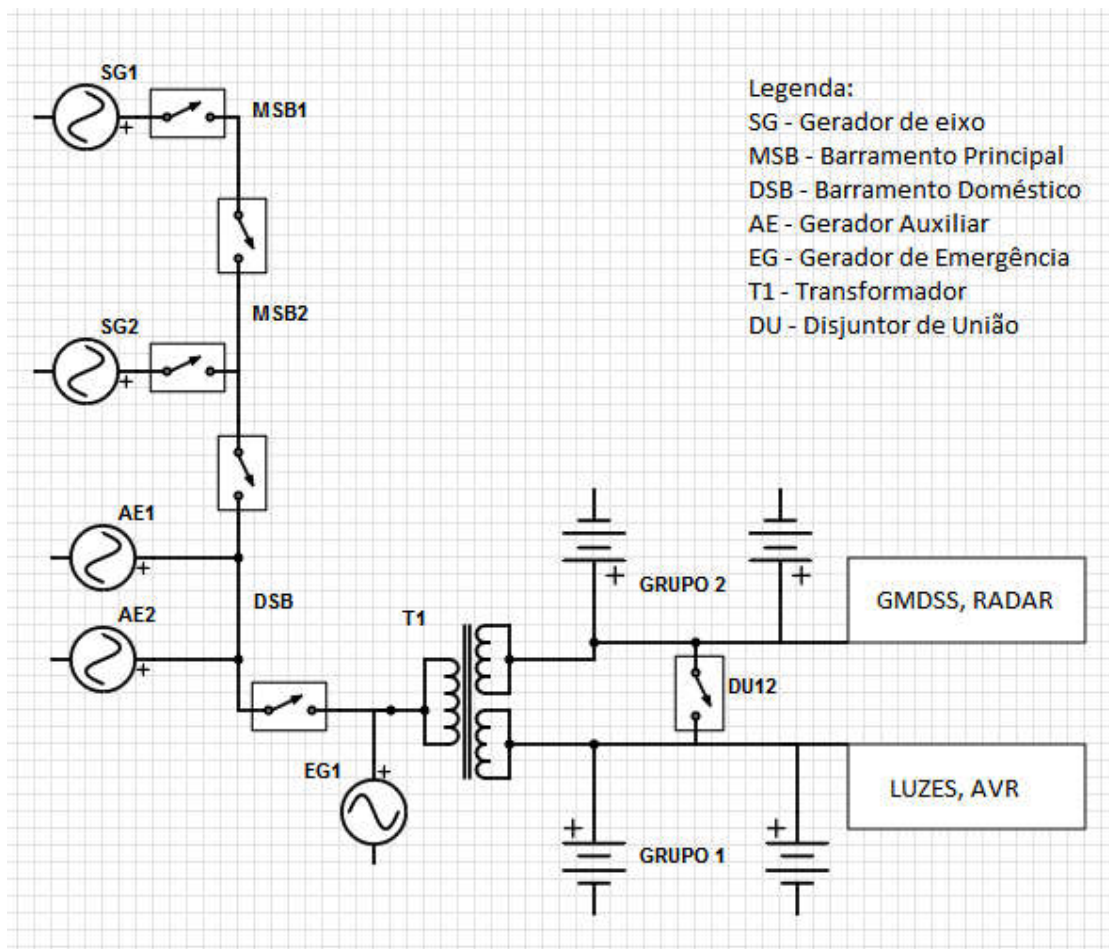
A causa inicial se tornou óbvia de imediato. O apagar instantâneo dos geradores, sem alarmes prévios, em conjunto com o desarme e apagamento do gerador de emergência só poderia ter sido causado por uma falha de excitação decorrente da interrupção da alimentação do AVR. Sendo assim, a razão imediata havia de ser a falha das baterias responsáveis pelo suprimento transitório do barramento de emergência, que em primeiro lugar deveriam ter evitado o seu black-out propriamente dito.

A inspeção destas baterias, que doravante chamaremos de Grupo 1, porém revelou que ambas as baterias estavam em boa condição e com tensão nominal acima dos 25 volts, o que indica desempenho adequado (uma bateria nova deve exibir, ao ser medida, cerca de 8 a 10 por cento de tensão acima da sua capacidade nominal, e uma bateria já em uso deve exibir pelo menos quatro por cento acima de sua tensão após ser carregada para ser considerada confiável). O retificador responsável por seu carregamento também apresentava funcionamento normal.

Sabendo-se que as baterias estavam em condição operante e ligadas ao barramento, a suspeita seguinte foi a de que houve sobrecarga; por algum motivo as baterias não conseguiram suprir o barramento. De início parecia uma hipótese impossível, pois as baterias alimentam apenas consumidores leves como as luzes de emergência, os computadores da automação e os AVR. A seguir foi feita uma verificação dos diagramas elétricos ainda datados da construção do navio. A princípio esta leitura apenas confirmou que não haveria a possibilidade de sobrecarga apenas pelos consumidores normais do barramento; levantou-se a possibilidade de haver sido feita alguma modificação ou adição de novos consumidores ao barramento que não houvesse sido adicionada à documentação. Casos como este são muito comuns em navios com muita idade e longo histórico operacional. Porém, uma segunda leitura mais extensa dos diagramas revelou um disjuntor interno aos quadros elétricos até então desconhecido pelos tripulantes da máquina. Este disjuntor, que estava armado, realiza uma ligação opcional das baterias e retificadores do grupo 1 ao grupo de baterias e retificadores localizados no tijupá do navio, responsáveis pela manutenção dos radares, GMDSS e instrumentos de navegação e comunicação do passadiço (doravante denominado grupo 2).

Ao inspecionar o grupo 2, foi constatado que as baterias, de capacidade original e tamanho maior do que as do grupo 1 devido à alta demanda de seus consumidores, estavam descarregadas, com uma tensão abaixo dos 24 volts. Foi constatado também que um dos retificadores, apesar de ainda estar ligado e exibindo a tensão de carregamento em sua tela, não estava mais operando corretamente. A manutenção deste grupo é de responsabilidade dos oficiais juniores de náutica, que ao serem questionados sobre a realização da mesma demonstraram não possuir o conhecimento técnico necessário para tal, além também de terem ingressado a pouco na tripulação.

Figura 12 – Diagrama Simplificado do sistema de força



Fonte: Elaboração própria.

5.3 Conclusão da análise

A falha foi remediada com a troca do retificador defeituoso e das baterias descarregadas. Uma instrução a respeito de sua inspeção mensal foi ministrada aos oficiais de náutica; uma transcrição desta foi adicionada à lista de familiarização que é entregue a todos os novos oficiais de náutica que chegam à embarcação. Foi também acordado que os oficiais de máquinas checariam também o grupo 2, pelo menos uma vez por embarque. O disjuntor foi deixado armado pois permite mais versatilidade ao sistema de emergência, mas sua localização foi marcada externamente no quadro elétrico, e o ocorrido como um todo foi compartilhado com os maquinistas da outra tripulação durante a troca de turma.

Como mencionado no início, o incidente ocorreu devido a uma combinação de fatores; incapacidade dos poucos tripulantes maquinistas de supervisionar sistemas vastos e complexos devido à falta de tempo e pressão constante, e falta de treinamento específico para alguns tripulantes, que passou despercebido devido às trocas constantes de quadro.

Porém, é louvável o procedimento que engloba o teste durante o qual ocorreu o incidente. Tanto a sua frequência de execução permitiu a detecção da falha provavelmente logo após sua ocorrência, quanto a exigência de que seja realizado em situação segura (e também, por decisão da própria tripulação, que seja realizado o quanto antes após a troca de turma para que haja certeza do funcionamento correto durante emergências) evitou que a falha causasse danos de qualquer natureza.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modernização é o principal desafio da Marinha Mercante global na atualidade, e sua superação ditará o sucesso econômico de nações e empresa igualmente. Modernizar a frota aumenta a sua eficiência e seu poder lucrativo, mas apenas se a bordo existir pessoal capaz de mantê-la operando apropriadamente.

Diante disto, o investimento na qualidade do treinamento dos futuros e atuais oficiais de máquinas deve receber prioridade especial. À medida que geradores e motores elétricos substituem os motores à combustão de grande porte como “coração” dos navios, não só deve ser feita a padronização e aperfeiçoamento da educação marítima existente, como também a incorporação de novas áreas e disciplinas a seus currículos.

Vimos também que mesmo onde há pessoal treinado, podem ocorrer falhas devido a fatores externos causados pela situação do mercado. Nestes casos, a aderência aos procedimentos e à melhora contínua são essências.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DZHENDUBAEV, Z.R., CHERNYKH, I.V. **Self-excitation of autonomous generators: 1. Theoretical aspects.** Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.3103/S1068371217110037>>. Acesso em: 02 set. 2018.

HERBST, J.F. **Automatic control in power generation, distribution and protection.** Pretoria: IPAC, 1980.

How does a generator create electricity? How generators work. Disponível em: <https://www.dieselserviceandsupply.com/How_Generators_Work.aspx>. Acesso em: 02 set. 2018.

PATEL, Mukund R. **Shipboard electrical power systems.** Boca Raton: CRC Press, 2012.

TAYLOR, David Albert. **Introduction to marine engineering.** 2a edição. Londres: Butterworth & Co, 1990.

WANKHEDE, Anish. **How is power generated and supplied on a ship?** Disponível em: <<https://www.marineinsight.com/marine-electrical/how-is-power-generated-and-supplied-on-a-ship/>>. Acesso em: 02 set. 2018.