

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA**

ADRIANO RODRIGUES DOS PASSOS

**PARÂMETROS RESPONSÁVEIS PELA RESPOSTA A DEGRAUS DE CARGA EM
MOTORES A DIESEL E GÁS NATURAL UTILIZADOS EM GRUPOS
GERADORES ESTACIONÁRIOS**

São Leopoldo

2019

ADRIANO RODRIGUES DOS PASSOS

PARÂMETROS RESPONSÁVEIS PELA RESPOSTA A DEGRAUS DE CARGA EM
MOTORES A DIESEL E GÁS NATURAL UTILIZADOS EM GRUPOS GERADORES
ESTACIONÁRIOS

Projeto de pesquisa apresentado como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Energia, pelo
Curso de Engenharia de Energia da
Universidade do Vale do Rio dos Sinos -
UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Wander

São Leopoldo

2019

PARÂMETROS RESPONSÁVEIS PELA RESPOSTA DE MOTORES A DIESEL E GÁS NATURAL APLICADOS EM GRUPOS GERADORES ESTACIONÁRIOS

Adriano Rodrigues dos Passos*

Paulo Roberto Wander**

Resumo: Artigo desenvolvido a partir da problemática acerca da dinâmica de resposta a degraus súbitos de carga, em motores a combustão, movidos a diesel e gás natural, aplicados em grupos geradores. A resposta dos motores impacta diretamente na frequência elétrica gerada, o que, dependendo do tipo de carga atendida, torna-se requisito fundamental para atestar a funcionalidade de um sistema de geração de energia. A partir de dados teóricos, baseados em bibliografias, simulação numérica de processos de combustão, informações de fabricantes e medições de campo, foi possível traçar as características de comportamento dos motores de grupos geradores submetidos a degraus instantâneos de potência. Utilizou-se o *software* Cantera para simulações variadas na composição de queima do combustível, tomando como base dados de pressão e temperatura reais nas câmaras de combustão, variando requisitos como razão de equivalência e velocidade de propagação de chama. Observou-se que a razão de equivalência na mistura ar combustível para os motores a gás, supõe um tempo maior de resposta a variação de carga do que o diesel, porém, os aspectos físicos dos motores foram mais significativos para o tempo de resposta. Com isso, foi proposto que um dos motivos que embasam um maior tempo de resposta dos motores a gás está relacionado com o sistema de admissão de combustível, desde a admissão do gás até a entrada no PMS. Com os parâmetros levantados, foi apresentada uma proposta de estudo para uma nova metodologia de dimensionamento de grupos geradores, junto ao departamento de engenharia da Stemac Grupos Geradores.

Palavras-chave: Degrau súbito de carga. Motores diesel e gás natural. Combustão. Dimensionamento de grupos geradores.

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica está inserida em um processo contínuo de desenvolvimento tecnológico que não se permite cessar, diante do iminente aumento de demanda energética mundial. Prova disso, são os números conhecidos referentes a carência energética, sobre a qual, para 2030 está estimada uma taxa mundial de utilização de energia de 22TW (ROSA, 2015). Com isso, facilmente se conclui que atender à toda esta demanda é tarefa difícil, requerendo cada vez mais desenvolvimento tecnológico e recursos para geração de energia. Grupos geradores

* Graduando curso de Engenharia de Energia na UNISINOS. E-mail: adriano_rpassos@hotmail.com

** Professor e pesquisador do Programa de Mestrado na área de Engenharia Mecânica da UNISINOS, atuando principalmente no seguimento aproveitamento de energia. E-mail: prwander@unisinos.br.

estacionários ainda figuram entre as principais fontes alternativas de energia, principalmente para uso privado, ou seja, atendendo a demandas específicas e esporadicamente utilizados para uso coletivo (grandes centrais geradoras em localidades remotas, por exemplo). Formados por motores à combustão acoplados a geradores síncronos, compõem uma fonte de energia de tecnologia consolidada no mercado, assegurando garantias de atendimento às mais diversas aplicações e tipos de cargas. Logicamente, estas garantias decorrem de uma evolução tecnológica que se aprimora há muito tempo, desde 1831, quando Michael Faraday inventou o primeiro dispositivo gerador de energia elétrica a partir da energia mecânica, Fitzgerald (2006).

Possuindo diversas modalidades de operação, os grupos geradores tornam-se fontes confiáveis de energia, desde que estejam asseguradas as mínimas condições de dimensionamento elétrico e mecânico dos componentes que formam o conjunto. Formado basicamente por um motor a combustão, acoplado diretamente ao eixo de um gerador síncrono e controlado por meio de CLP's (controladores lógicos programáveis), estes equipamentos apresentam algumas particularidades em relação ao seu funcionamento quando comparado a outras fontes, como por exemplo, a fonte hidrelétrica. Grupos geradores movidos por motores estacionários são definidos como fontes limitadas de energia, dadas as suas limitações em relação a respostas de tensão do alternador (reatâncias limitadas), conseqüentes variações de frequência do sistema diante da oscilação de velocidade do motor, bem como demais grandezas elétricas e mecânicas.

A imagem apresentada na Figura 1, ilustra um grupo gerador estacionário, composto por motor a combustão, gerador síncrono e quadro de comando.

Figura 1 – Grupo gerador estacionário



Fonte: Stamac Grupos Geradores S/A

Mesmo com o apelo ambiental pesando fortemente sobre a aplicação de motores à combustão para geração de energia, este recurso ainda se mantém aplicado em larga escala. A disponibilidade de combustíveis fósseis, como já é de nosso conhecimento, possui “prazo de validade”. Ainda assim, figura nesse cenário, o óleo diesel, muito utilizado no Brasil para geração de energia (principalmente em aplicações de backup emergencial). Diante deste inconveniente que recai sobre o diesel, há um relevante crescimento na utilização de grupos geradores movidos a gás natural, embora ainda existam restrições de abastecimento em boa parte do país. Segundo a Comgás (Cia de Gás de São Paulo), uma das grandes distribuidoras de gás natural no Brasil, a utilização de grupos geradores que utilizam esse combustível, apresenta relevantes vantagens quando comparado a grupos geradores à diesel, como: redução de até 70% no custo operacional em horário de ponta e de até 50% no custo operacional versus a operação com diesel, além de diminuir em 20% a emissão de CO₂.

As vantagens sinalizadas pela Comgás, refletem características de ordem operacional baseadas em custos agregados, o que neste trabalho não será abordado. Porém, outros fatores significativos e de ordem técnica recaem como desvantagens para equipamentos a gás natural, quando estes são comparados aos motores diesel. Baseado nesta afirmativa, neste artigo serão tratadas análises de comportamento destes motores quando submetidos à degraus súbitos de potência, ou seja, atendendo a cargas de característica pulsante, que apresentam comportamento variável em relação à potência ativa demandada aos grupos geradores. Exemplo disso, são os motores de indução, os quais possuem elevados valores de correntes de partida, que associadas ainda aos métodos de arranque, apresentam os degraus súbitos de potência em curtos intervalos de tempo.

Em caráter de teste para coleta de dados, ensaios práticos foram realizados com motor a diesel, sendo este submetido a degraus de carga ocasionados pelo acionamento de um banco de resistências, com o qual se obteve também degraus súbitos de potência ativa, o que, para o propósito deste artigo, independe do fator de potência da carga. Já para motor a gás natural, foram realizadas medições em um equipamento atualmente instalado, atendendo a um motor de indução. Condições de operação como estas, vão exigir dos motores que compõem os grupos geradores estacionários, exercendo a função de máquina primária, uma resposta rápida para

absorção de carga, o que significa reestabelecer imediatamente a rotação nominal evitando, fundamentalmente, variações bruscas de frequência no sistema elétrico, além de paradas de emergência pela atuação das proteções por subvelocidade. Portanto, essa abordagem será a norteadora deste trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados conceitos relevantes para o desenvolvimento do trabalho, com embasamento em bibliografias específicas sobre o tema, de forma a contribuir para a compreensão geral do propósito deste artigo.

2.1 Critérios para dimensionamento de grupos geradores

Neste tópico, serão detalhados os critérios adotados para dimensionamento de um grupo gerador estacionário, os quais seguem requisitos de aspecto mecânico e elétrico que devem ser observados. Para elaboração dos cálculos específicos desta atividade de dimensionamento, alguns parâmetros são pré-determinados, entre eles: queda de tensão máxima admissível e percentual de carga súbita absorvida pelo motor. Logo abaixo, estarão detalhadas essas e outras características, porém, é importante destacar que este detalhamento se baseia no procedimento adotado pelo departamento de engenharia de aplicação do fabricante Stemac Grupos Geradores.

2.1.1 Análise das características elétricas da carga

- Potências ativa, reativa e aparente demandada: grandezas elétricas que devem ser conhecidas para definição do motor a combustão, a partir da potência ativa (W) demandada. Potências aparente (VA) e reativa (VAr), são necessárias para definição do gerador síncrono que será acoplado ao motor diesel ou gás natural;
- Degraus súbitos de corrente elétrica: característica de cargas classificadas como pulsantes, ou seja, que apresentam comportamento variável, com linearidade não constante. A partir do conhecimento dessa grandeza elétrica da carga, já é possível determinar o percentual de afundamento de tensão nos terminais do gerador, associando às suas reatâncias transitórias ($x'd$) e

subtransitórias ($x'd$), valores estes que são definidos pelo fabricante do alternador.

- Fator de potência: característica observada na carga com o objetivo de verificar principalmente a potência aparente a ser absorvida pelo conjunto. Além disso, toma-se conhecimento da energia reativa presente na carga, o que deve ser observado também para o dimensionamento o gerador síncrono.
- Afundamento de tensão: característica apresentada em casos onde há inserções de carga com elevados valores de corrente instantânea, como em ciclos de partida de motores de indução. A partir dessa análise, o alternador síncrono deve estar preparado para absorver os degraus de corrente exigidos pela carga e assegurar os valores de tensão próximos da nominal do sistema. Essa análise está associada aos valores de reatância subtransitória de eixo direto saturada ($x'd$). A equação (2.1) é utilizada para determinar o percentual de queda de tensão nos terminais do gerador:

$$\Delta V = \frac{I_t / I_g x'd}{1 + I_t / I_g x'd} \quad (2.1)$$

Onde I_t é a corrente total do sistema, associando as sequências de partida dos motores de indução, I_g a corrente máxima do gerador síncrono, associada a tensão de operação, $X'd$ a reatância subtransitória de eixo direto saturada, determinada na folha de dados do fabricante e ΔV a variação percentual de tensão nos terminais do gerador (%).

2.1.2 Análise das características mecânicas da carga

- Potência mecânica a ser absorvida pelo conjunto: essa grandeza está associada ao valor de potência ativa (W) apresentado pela carga. A partir desse dado, já é possível previamente definir o motor diesel ou gás natural a ser acoplado ao gerador síncrono. Logicamente, a linearidade da carga também será determinante para essa definição.
- Potência ativa máxima: essa característica é verificada tomando conhecimento dos motores de indução ou outras cargas de características pulsantes presentes no circuito. A sequência de acionamento dessas cargas é

determinante para se obter o valor máximo de potência ativa a ser absorvido pelo conjunto motor gerador.

- Nível de carregamento mínimo do motor: em geral, os fabricantes dos motores sugerem que o nível de carga dos motores não fique abaixo de 30% da sua potência nominal. Este parâmetro não está citado em norma e essa referência de percentual é adotada, diante das recomendações da maioria dos fabricantes, que sugerem em média esse valor de carregamento. A necessidade de atender a esse requisito recai sobre as condições de temperatura e pressão do motor, as quais devem estar em faixas operacionais que evitam fenômenos danosos ao equipamento, como espelhamento de camisa, consumo excessivo de óleo lubrificante, presença de óleo no sistema de escapamento, entre outros aspectos prejudiciais ao desempenho do conjunto.
- Degrau de carga súbita exigida pela carga: esse aspecto, tema principal abordado neste artigo, reflete a análise dos pulsos de potência instantâneos apresentados pela carga. Características como estas são verificadas, de forma significativa, em motores de indução, os quais apresentam elevados valores de corrente de partida (dependendo do método de acionamento utilizado), o que associado ao fator de potência, reflete em elevados degraus de potência em curtos intervalos de tempo.

2.2 Definição do conceito de carga súbita

Conforme disposto nos tópicos anteriores, o dimensionamento de grupos geradores depende de inúmeras variáveis, sejam elas de aspecto mecânico ou elétrico. A abordagem macro desse artigo, está apoiada na análise do comportamento de motores a diesel e gás natural no que diz respeito à incidência de carga súbita, que é um dos requisitos que determinam o dimensionamento correto de um conjunto motor gerador. A carga súbita é ocasionada especialmente por motores de indução, os quais, dependendo do método utilizado durante o ciclo de partida, apresentam um alto valor de corrente elétrica, podendo atingir valores na ordem de 6 a 8 vezes a corrente nominal. A partir disso, o motor a diesel ou gás natural, que fora projetado para suportar a carga motórica em regime, deve estar preparado também para absorver

este “step” instantâneo de potência, durante um certo período de tempo. Este tempo de partida está diretamente associado ao método de acionamento do motor de indução, o qual, dependendo da configuração, pode contribuir para reduzir o degrau instantâneo de potência requerida. Apoiado ainda no objetivo de propor ao departamento de engenharia da empresa Stemac Grupos Geradores novos parâmetros de análise para dimensionamento, é importante detalhar o conceito de carga súbita a partir de motores de indução, condição que é rotineiramente encontrada na maioria dos casos onde são previstos grupos geradores estacionários como suprimento de energia, principalmente no segmento industrial.

Mamede Filho (2010), define termos específicos que ajudam entender como se dá a presença de degraus súbitos de carga em situações onde existem motores elétricos de indução. A seguir, estão elencados alguns destes termos, conforme define o autor.

2.2.1 Conjugado: motor e carga

Quando acionados, os motores elétricos exercem um esforço que faz com que seu eixo possa girar. A esse esforço se dá o nome de conjugado do motor. A carga, naturalmente resiste ao movimento do eixo do motor acionante, o que caracteriza o conjugado da carga. Os motores elétricos são classificados de acordo com as categorias de carga acionada, podendo ser de categoria N, H ou D.

A partir do exposto até aqui, já é possível tomar conhecimento do conceito de potência de partida, o que de certa forma, podemos dizer que reflete o esforço que o motor de indução realiza para vencer as barreiras de acionamento, denominadas conjugados. Mamede Filho (2010) ainda complementa que, o tempo de partida de um motor de indução pode ficar em torno de 0,5 à 10 segundos, tempo este que depende do porte e do projeto do motor em análise. Observa-se então que, em um curto espaço de tempo, o motor de indução pode atingir seu regime nominal, o que caracteriza um elevado degrau de corrente (para vencer as barreiras dos conjugados de carga e do próprio eixo), associado a um baixo fator de potência (entre 0,3 e 0,6), resultando em um degrau instantâneo de carga, ou seja, carga súbita.

2.3 Métodos de partida de motores de indução

A capacidade do sistema de geração deve estar adequada à potência demandada pela carga, seja ela a nominal somada aos degraus de carga, ocasionados essencialmente por motores de indução dependentes de seus métodos de partida. Buscando complementar o entendimento acerca dos conceitos de carga súbita e ainda associando ao cenário que encontramos na maioria dos processos que requerem grupos geradores estacionários, nos subcapítulos a seguir, conforme Mamede Filho (2010), serão detalhados alguns métodos de acionamento utilizados em motores elétricos e suas principais características. Notemos que os métodos de partida dos motores são determinantes para atenuar eventuais picos instantâneos de potência, favorecendo a absorção de carga pelos motores a combustão.

2.3.1 Partida direta

Método de partida no qual não são aplicados dispositivos específicos para acionamento do motor elétrico, limitando a composição do sistema em contadores, disjuntores e relé térmico para proteção. Para efeitos de comparação com o tema principal deste artigo, esse é o método que proporciona o maior degrau de carga súbita no sistema, já que não há nenhum tipo de tratamento para atenuar as correntes de partida do motor.

2.3.2 Partida estrela triângulo

Um dos recursos utilizados para atenuar os degraus de potência no acionamento de motores, com custo menos elevado é o método de partida estrela triângulo. Durante a partida do motor, em estrela, o conjugado e a corrente de partida ficam reduzidos a $1/3$ dos valores nominais. Em função disso, recomenda-se utilizar esse método de partida somente em motores que partem a vazio, ou seja, sem carga no eixo. Portanto, diante da redução do conjugado e da corrente de partida, a carga súbita é atenuada, favorecendo para a absorção de potência por grupos geradores.

2.3.3 Partida por chave compensadora

Neste método de partida, é utilizado um autotransformador que tem seu TAP de ligação alterado conforme a velocidade do motor vai se aumentando. Diferentemente do método estrela triângulo, com este modo de partida não ocorre o pico de corrente observado na comutação de chaves, pois o motor parte com tensão reduzida nos terminais, inferior a tensão nominal, a qual vai aumentando gradativamente com a alteração do TAP do transformador, aproximando as curvas de corrente e torque das curvas nominais de trabalho.

2.3.4 Partida por Soft Starter – Chave estática

Método de partida que consiste em utilizar um dispositivo composto por circuitos eletrônicos que tem por função principal ajustar os valores de tensão aplicados nos terminais dos motores de indução, contribuindo para a atenuação da rampa de partida. Com isso, há a possibilidade de controle de torque dos motores e consequente redução do conjugado de partida, o que contribui significativamente para diminuir o degrau de carga súbita aplicado no sistema, favorecendo efetivamente à resposta dinâmica dos motores que compõem o grupo gerador.

2.3.5 Partida por Inversor de frequência

Método de partida que consiste em controlar a velocidade do motor de indução. Nessas condições, dependendo da necessidade do conjugado e torque de partida do motor, a carga súbita requerida na partida pode chegar próxima de zero, ou seja, o motor parte sem degrau de potência instantânea. Mesmo em condições onde haja necessidade de elevação da corrente de partida, esse sistema propõe uma atenuação na rampa de partida do motor, elevando o tempo de partida, permitindo a absorção da potência pelos motores dos grupos geradores, de forma gradual.

2.4 Motor Diesel

Em 23 de fevereiro de 1893, o engenheiro alemão Rudolf Diesel recebeu a patente de sua invenção, o motor até então classificado como motor de autoignição,

em que a combustão se faz pelo aumento da temperatura provocado pela compressão do ar em uma câmara, Martins (2013). O principal aspecto que diferencia o motor diesel de outros motores é o fato de ocorrer a ignição espontânea de uma mistura ar-combustível diante de uma elevação de pressão. Essa característica permite que esses motores sejam também denominados motor ICO – MOTORES DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO. Nos subcapítulos a seguir, serão abordados aspectos teóricos que tratarão alguns fenômenos do processo de combustão por compressão do diesel no interior da câmara.

2.5 Motor a Gás Natural – Ciclo Otto

Em motores a combustão por ciclo Otto, ou seja, ignição por centelha, o processo de combustão inicia-se a partir de uma fonte externa de calor, originada pelo dispositivo que chamamos de “vela de ignição”. Este dispositivo, fornece calor à uma composição já pré misturada de ar e gás combustível, os quais estão sob alta pressão, já que a centelha é inserida no momento em que o curso do pistão está próximo do PMS. A partir desse instante, se origina um processo de chama turbulenta, que se espalha pelo ambiente da câmara até atingir suas paredes e então se extinguir (WILDNER,2006).

Sob o ponto de vista do propósito deste trabalho, que está apoiado em conhecer parâmetros que influenciam na resposta dos motores a degraus de carga, é importante frisar que em meio aos quatro processos de queima desenvolvidos na câmara (ignição, desenvolvimento de chama, propagação de chama e extinção), Wildner (2006) ainda complementa que a combustão deve ocorrer em um ponto onde sejam desenvolvidos máxima potência ou torque, o que nos remete a pensar em melhor resposta do motor à inserção instantânea de carga no eixo.

Algumas características do relacionadas ao combustível, desde já podem ser elencadas como possíveis influências na resposta de motores de ignição por centelha. Dentre elas, estão a probabilidade de detonação do combustível no interior da câmara. Este fenômeno decorre da autoignição de parcelas da mistura ar-combustível ainda não atingidas pela frente de chama. A partir disso, são gerados distúrbios que originam reações instantâneas de queima, contribuinte para elevação de pressão local, associada a liberação de calor. Geralmente, este processo ocorre com o motor

operando em baixa velocidade de rotação, visto que o tempo de exposição da mistura não queimada à altas temperatura pode ser maior (Heywood, 1988). Portanto, Heywood complementa afirmando que o desempenho do motor por ignição por centelha está diretamente associado às características antidetonantes do combustível. Embora o autor descreva como uma característica importante do sistema de ignição por centelha, assumiremos, desde já, que este efeito poderá ser desprezado, já que trataremos de motores estacionários com rotação fixa.

2.6 Aspectos químicos do processo de combustão

Diante do propósito deste artigo em apontar parâmetros que contribuam para a resposta dinâmica de motores aos eventos de carga súbita, foram elencadas algumas grandezas físico-químicas envolvidas no processo de queima do combustível no interior da câmara. A partir disso, este estudo apoiou-se em traçar o comportamento dos fenômenos envolvidos nesse processo como: limite de inflamabilidade, velocidade de chama, razão de equivalência e temperatura de ignição do combustível nas condições reais de temperatura e pressão no interior da câmara de combustão.

2.6.1 Limites de inflamabilidade

Uma chama somente se propagará e se manterá autossustentada quando os valores percentuais de combustível (ou frações volumétricas) que estiverem presentes em uma mistura comburente, estejam dentro dos valores mínimos e máximos, sendo esses classificados como limite inferior (mistura mais pobre: razão de equivalência $\phi < 1$) e limite superior (mistura mais rica: razão de equivalência $\phi > 1$), (Turns, 2013). Resumidamente, podemos afirmar que uma mistura ar-combustível só será inflamável se nesta composição o percentual presente de combustível estiver dentro da faixa de valores estabelecida como LII (limite de inflamabilidade inferior) e LIS (Limite de inflamabilidade superior). A esta faixa de valores podemos nomear como intervalo de inflamabilidade IIN (CROWL e LOUVAR, 2002).

2.6.2 Velocidade de chama

Esta característica representa o quão rápido ocorre o processo de queima do combustível na câmara de combustão, ou seja, a velocidade de propagação da frente de chama.

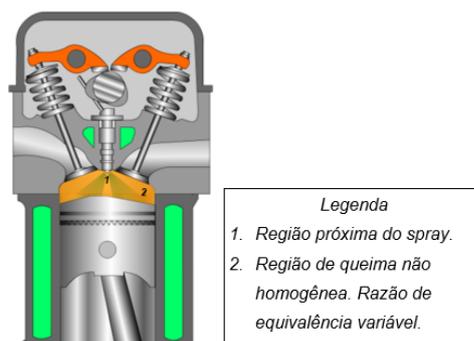
2.6.3 Razão de equivalência

2.6.3.1 Razão de equivalência na combustão em motores diesel

Grandeza utilizada para indicar de forma quantitativa se uma mistura ar-combustível é rica, pobre ou estequiométrica (TURNS, 2013). Logo, a partir dessa afirmativa, é razoável imaginarmos que a razão de equivalência somente será analiticamente aceitável em misturas homogêneas. Esta condição, não é encontrada na câmara de combustão de motores a diesel, pelo fato de não haver homogeneidade na mistura em todos os pontos onde estará ocorrendo a queima combustível.

Isso se justifica pelo fato de que no ciclo diesel a combustão ocorre por compressão, onde não há uma pré-mistura, já que o combustível é injetado em jatos no ambiente, com o ar comburente sob alta pressão e temperatura, fazendo com que imediatamente ocorra a ignição do diesel vaporizado e conseqüentemente a explosão, porém de forma não homogênea, quando analisarmos sob o ponto de vista temporal. Diante dessa condição estabelecida, as análises tomarão como base a razão de equivalência no ponto mais próximo do spray, onde estima-se maior homogeneidade da mistura ar-combustível.

Figura 2 – Câmara de combustão



Fonte: Adaptado de Stefanelli.eng.br

2.6.3.2 Razão de equivalência na combustão em motores a gás natural

Diferentemente do ciclo verificado nos motores diesel, os motores a gás natural operam com ignição por centelha. Nesta condição, a mistura ar-combustível é injetada na câmara de combustão após um processo de pré mistura, que ocorre junto ao coletor de admissão. Diante disso, é aceitável propor que a razão de equivalência da mistura poderá ser observada uniformemente na câmara de combustão, ou seja, não limitaremos a análise do processo de queima somente à região próxima do bico injetor. Importante adiantar ainda que, pelo fato de a queima ocorrer depois de uma pré mistura, a razão de equivalência deste ciclo estará sempre muito próxima da estequiométrica.

2.6.3 Propriedades do diesel e do gás natural

A Tabela 1 apresenta um resumo das propriedades físicas e químicas dos combustíveis objetos de análise deste artigo. Estas propriedades serviram como base para as simulações de comportamento do processo de combustão. A exceção se dá na composição molecular do gás natural, para o qual foi considerada a composição de 90% de metano, complementado por outros hidrocarbonetos, conforme informado pela concessionária Sulgás (vide anexo B).

Tabela 1 – Propriedades do diesel e gás natural

Tabela resumo - propriedades do diesel e do gás natural		
Propriedade	Gás Natural	Óleo Diesel
Fórmula química	CH ₄	C ₁₂ H ₂₆
Massa molecular [g/mol]	17,7	170
Massa específica [kg/m ³], 20°C e 1atm	0,736	830
Razão ar/combustível estequiométrica [kg/kg]	16,99/1	14,99/1
Temperatura de auto ignição [°C]	632	254
Poder calorífico superior [kJ/kg]	53970	45590
Poder calorífico inferior [kJ/kg]	48750	42450
Limite de inflamabilidade no ar - LII; LIS [% por vo	5 ; 15	0,7 ; 5
Número de octana [NO]	130	20
Número de cetano [NC]	-	44-50
Velocidade de propagação de chama [cm/s]	33,5	33-47

Fonte: adaptado de FRANCO (2007).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão descritos os métodos e materiais utilizados na pesquisa. A etapa prática de busca de dados, no que diz respeito a observar a resposta do motor em velocidade e conseqüentemente frequência do sistema elétrico, está baseada em realização de medições em grupos geradores, alimentando cargas que descrevam características pulsantes, ou seja, apresentem degraus bruscos de potência. Para a simulação de dados propôs-se a utilização do software de simulação numérica Cantera, com o qual foi possível realizar simulações em alguns cenários, alterando variáveis envolvidas no processo de queima do combustível. Dessa forma pôde-se prever determinadas alterações na resposta dos motores, principalmente no que tange à velocidade nominal, em função das alterações na performance energética do processo de combustão do diesel e do gás natural. O fluxograma 1 resume as etapas executadas.

Fluxograma 1 – etapas da pesquisa



Algumas restrições na busca de dados foram impostas pelo fabricante do motor Scania, com quem foram consultados alguns parâmetros físicos internos dos motores em análise, porém as consultas não foram respondidas, o que se imagina, por questões de confidencialidade de engenharia. A partir desta restrição, esta metodologia de pesquisa esteve fundamentada principalmente no comportamento previsto do motor em função das possíveis variações dos parâmetros envolvidos no processo de combustão e parâmetros físicos estimados para os motores.

3.1 Multimetro RE6000 - Embrasul

Conforme mencionado pelo fabricante Embrasul, o multimetro RE6000 possibilita a medição de grandezas elétricas como: tensão de fase e de linha, potências aparente, ativa e reativa, fator de potência, espectros de distorção harmônica de corrente e tensão, além da frequência. Com a utilização deste instrumento, foi possível visualizar a resposta em velocidade dos motores quando submetidos ao degrau de carga súbita, impactando diretamente na frequência elétrica entregue a carga. Na Figura 3, está a tabela com a faixa de frequência admissível pelo aparelho, a qual está adequada para o propósito deste trabalho, já que foram analisados grupos geradores operando em 60Hz. Além disso, estão indicadas as imprecisões das medições de corrente e frequência, bem como destacado em vermelho o sensor de corrente utilizado nas medições.

Figura 3 – Dados do analisador de energia RE6000

Entradas de corrente	
Número de entradas:	3 (IA, IB, IC) ou 4 (IA, IB, IC, IN)*
Tipo:	Sensor flexível** ou alicate rígido
	Com sensor flexível: 5A a 3000A
Faixa de medição:	Com Alicate rígido AL100: 0,2A a 100A Com Alicate rígido AL1000: 5A a 1000A
* Para equipamento com módulo (N) de medição de Neutro.	Opcional
** Deve-se optar pelo diâmetro do sensor flexível: 160mm ou 240mm	
Resolução:	0,01A
Precisão:	0,2% + imprecisão do acessório de corrente
Amplitude de banda:	1500Hz
Frequência nominal	
Frequência:	45 a 70Hz
Resolução:	0,01Hz
Precisão:	± 0,01Hz

Fonte: Adaptado do catálogo do fabricante – Embrasul

3.2 Motor diesel – Scania DC9 072A 02-13

A coleta de dados de resposta de um motor diesel, foi realizada utilizando um motor SCANIA DC9 072A 02-13. Este motor diesel, com sistema de injeção eletrônica, turbo compressor e arrefecimento por radiador acoplado, compõe um grupo gerador estacionário com potência de 375 / 340 kVA - 300 / 272 kWe (Standby / Prime Power),

cujas características complementares estão indicadas na Tabela 2. A tabela completa, com dados adicionais do grupo gerador está no anexo C.

Tabela 2 – Dados técnicos motor Scania DC9072A 02-13

Dados	Valores
Potência Standby (kVA):	375
Potência Standby (kWe):	300
Potência Prime (kVA):	340
Potência Prime (kWe):	272
Potência COP (kVA):	260
Potência COP (kWe):	208
Fabricante:	SCANIA
Modelo:	DC9 072A 02

Fonte: Departamento de engenharia – Stemac Grupos Geradores

3.3 Motor Gás Natural – Scania SGI12A

A coleta de dados de resposta de um motor gás, foi realizada utilizando um motor SCANIA SGI 12A. Este motor, com turbo compressor e arrefecimento por radiador acoplado, compõe um grupo gerador estacionário com potência de 330 / 300 kVA - 264 / 240 kWe (Standby / Prime Power), cujas características complementares estão indicadas na Tabela 3. A tabela completa, com dados adicionais do grupo gerador está no anexo D.

Tabela 3 – Dados técnicos motor Scania SGI12A

Dados	Valores
Potência Standby (kVA):	330
Potência Standby (kWe):	264
Potência Prime (kVA):	300
Potência Prime (kWe):	240
Potência COP (kVA):	255
Potência COP (kWe):	204
Fabricante:	SCANIA
Modelo:	SGI12A

Fonte: Departamento de engenharia – Stemac Grupos Geradores

3.4 Testes práticos para coleta de dados

3.4.1 Medições com motor diesel Scania DC9072A 02-13

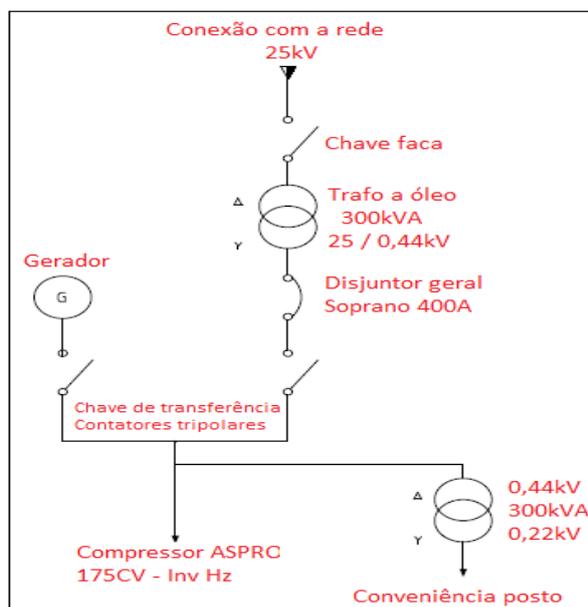
Para visualizar a dinâmica de resposta do motor diesel, foram realizadas medições em um grupo gerador em carga, alimentando a um banco de resistências. Estes testes foram realizados em bancada, nas dependências da Stemac Grupos Geradores. Com a utilização de um multimedidor RE6000, descrito no capítulo 3.1, foi possível identificar o comportamento do motor na sua resposta em velocidade, quando submetido à degraus de carga, os quais foram ensaiados em três estágios diferentes, sendo steps instantâneos de 72, 140 e 200 kW, conforme será detalhado no capítulo de análise de resultados e discussões. No apêndice A, estão apresentadas fotos do equipamento em teste.

3.4.2 Medições com motor gás Scania SGI 12A

Para buscar dados que ilustrem o comportamento de um motor a gás natural, sob aplicações instantâneas de carga, as medições foram realizadas no grupo gerador atualmente instalado em um posto de combustíveis, localizado na cidade de Canoas – RS. Por motivos de indisponibilidade de gás para testes em bancada (como fora executado com motor diesel), as medições foram realizadas em um grupo gerador atendendo a um compressor de GNV com potência de 175CV – partida por soft starter, além de outras cargas diversas que compõem a conveniência do estabelecimento. Assim, foi possível verificar os degraus de partida do compressor e conseqüentemente a dinâmica de resposta do motor.

Na Figura 4, está o diagrama unifilar orientativo, que indica o ponto de conexão do grupo gerador e a carga alimentada no estabelecimento. Nele, é possível identificar que o grupo gerador não está atendendo exclusivamente a carga do compressor GNV, estando conectados no seu circuito de alimentação outras cargas, com potência inferior, como iluminação, bombas de abastecimento, nobreaks e ar condicionado. Estas cargas, embora incidam degraus de potência no seu acionamento, não são relevantes sob o ponto de vista da análise em questão, já que as suas características elétricas não originam potências elevadas na partida, como o que acontece com o compressor.

Figura 4 – Diagrama unifilar orientativo



3.5 Software de simulação - CANTERA

A partir da proposta de pesquisa deste artigo, foi sugerido que além das características físicas dos motores, os parâmetros envolvidos no processo de combustão também sejam fundamentais para o entendimento sobre a dinâmica de absorção de carga súbita dos motores diesel e gás natural. Com essa condição e diante das restrições impostas pelo fabricante do motor, o estudo esteve apoiado no entendimento do processo de queima do combustível, variáveis envolvidas e determinadas alterações responsáveis pela dinâmica do conjunto grupo gerador.

A partir disso, foi proposto a utilização de um software de simulação numérica, chamado Cantera. O Cantera é uma biblioteca escrita em Python que permite resolver problemas que envolvam cinética química, termodinâmica, combustão e processos de transporte. É um software de código aberto, que deve ser utilizado com uma ferramenta com interface para compilação dos códigos. As ferramentas suportadas pelo Cantera são: Python, Matlab ou Fortran. Segundo o site do tutor, atualmente, esse simulador é utilizado para aplicações que incluem combustão, detonações, conversão e armazenamento de energia eletroquímica, células de combustível, baterias, soluções aquosas de eletrólitos, plasma e deposição de filmes finos.

O Cantera utiliza em sua biblioteca uma série de equações que relacionam a cinética química, associando dados de temperatura, pressão e massa de combustível.

As simulações realizadas buscaram identificar o comportamento da frente de chama no interior da câmara de combustão, relacionando ainda a razão de equivalência da mistura em determinados instantes de inserção de carga.

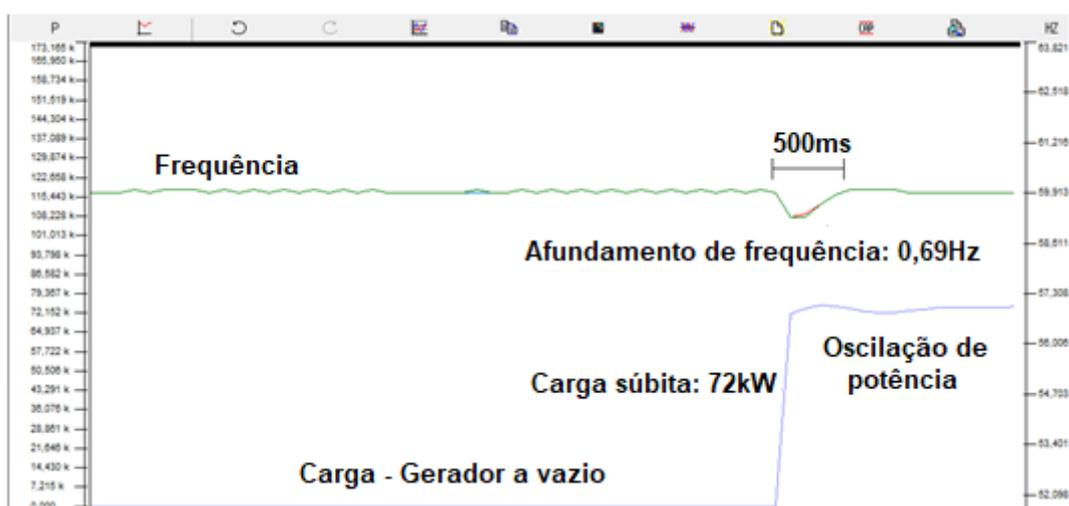
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Testes com motor Diesel

Conforme descrito no capítulo 3.4.1, o motor diesel Scania DC9072A-0213 foi submetido à testes com degraus súbitos em diferentes steps de carga com um banco de resistências. A visualização do comportamento de resposta em velocidade do motor é possível através dos gráficos gerados a partir do multimedidor RE6000. Neles, estão indicadas as grandezas de potência ativa em W e frequência elétrica em Hz, que são as grandezas de interesse nesta análise visual.

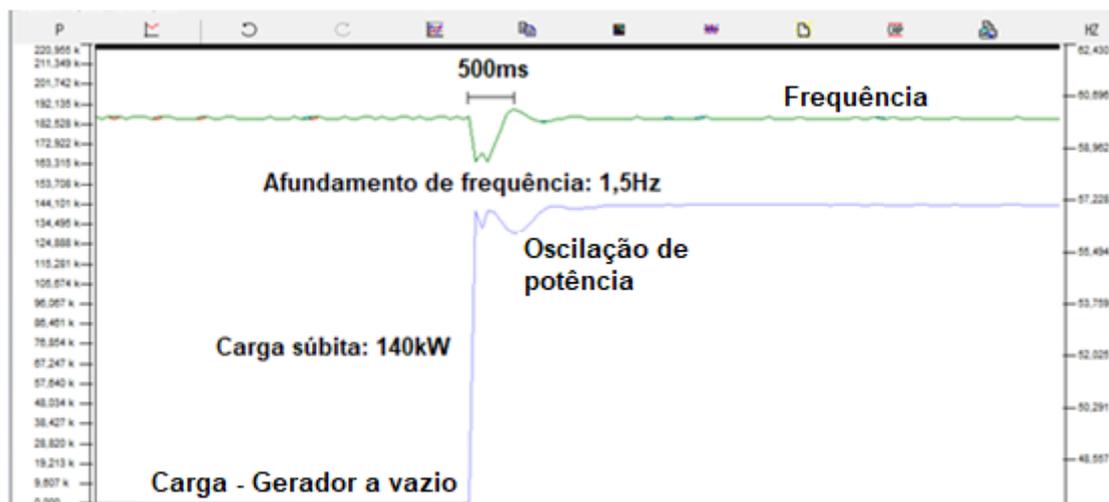
O tempo de integração da medição foi configurado em 100 ms. Portanto, é possível admitir que a inserção instantânea de carga ocorreu neste intervalo de tempo. Conhecendo o tempo de integração, logo visualizamos que o tempo de resposta do motor até atingir a rotação nominal ficou em 500 ms para os dois primeiros estágios e 400 ms para o último estágio de carga, conforme indicam as Figuras 5, 6 e 7.

Figura 5: primeiro estágio: grupo gerador a vazio. Degrau instantâneo de 72kW



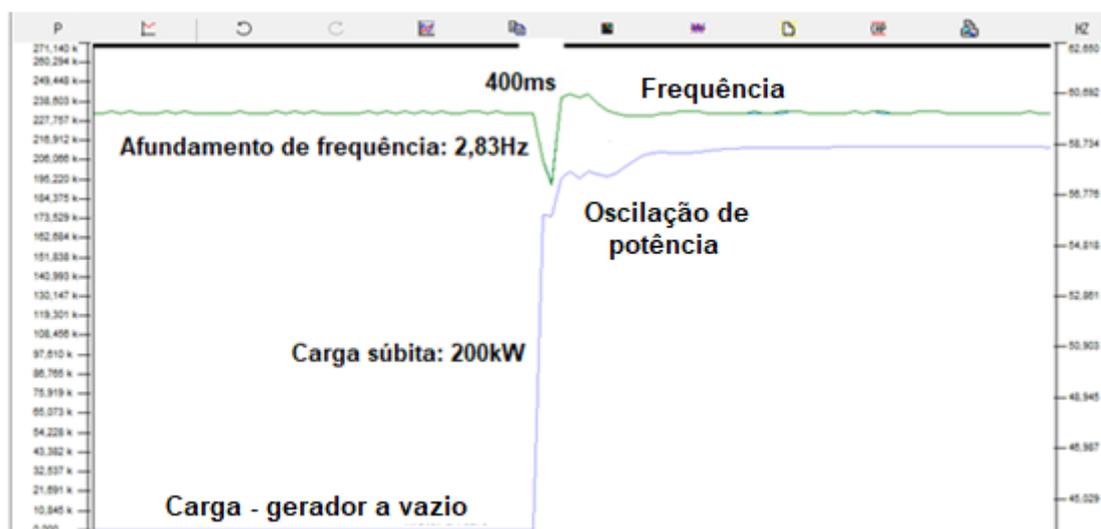
Já na figura 6, é verificada a resposta do motor quando submetido a 140 kW de carga instantânea:

Figura 6: segundo estágio: grupo gerador a vazio. Degrau instantâneo de 140kW



Na figura 7, verifica-se o afundamento de velocidade nominal do equipamento, quando submetido a 200 kW de carga súbita:

Figura 7: terceiro estágio: grupo gerador a vazio. Degrau instantâneo de 200kW



A Tabela 4, mostra o resumo dos dados obtidos com o motor diesel em teste de bancada, com ensaios realizados com o banco de resistências.

Tabela 4 – resumo dos dados coletados com teste de bancada

Resposta motor diesel Scania DC9 072A 02-13					
Degrau [kW] em $\Delta t=100\text{ms}$	Percentual sobre a potência nominal [%]	Frequência [Hz]	Δf [Hz]	Rotação mínima atingida [rpm]	Tempo de resposta [ms]
72	26,5	59,31	0,69	1779,3	500
140	51,5	58,5	1,5	1755	500
200	73,5	57,2	2,8	1716	400

4.1.1 Tempo de resposta motor diesel – Aspectos físicos

Conforme indicado na Tabela 4, o tempo de resposta do motor diesel para atingir a rotação nominal, fica em torno de 500 ms. De forma abrangente, é possível prever que este tempo corresponde ao período necessário para que o sistema de controle central “ECU – Engine Control Unit” detecte o afundamento de velocidade nominal do motor e imediatamente promova a injeção de combustível, retomada da rotação nominal e conseqüentemente atinja a frequência elétrica de 60Hz. Esta associação de rotação com a frequência é dada pela equação 4.1:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (4.1)$$

Onde n_s é a rotação síncrona (rpm), f é a frequência elétrica nominal (60 Hz) e P o número de pólos do gerador síncrono (4 pólos).

É importante ainda citar um aspecto que diz respeito ao tempo de injeção de combustível na câmara. Isso se refere ao fato de que o sistema de comando eletrônico do motor, ao perceber o afundamento de rotação ocasionado pela inserção de carga instantânea, imediatamente aumenta o débito da bomba de combustível. Porém, o que é relevante para esta análise é que o ECU envia comando de abertura de eletroválvulas e no mesmo instante, já está disponível a massa de diesel no ponto morto superior (PMS), contribuindo significativamente para redução no tempo de resposta do motor.

O documento do fabricante Scania, chamado “Step Loads for Power Generation Engines”, complementa que outros fatores são responsáveis pelo desempenho dos motores em aplicações de carga em degraus, como o design no sistema de turboalimentação, pressão efetiva média e o comportamento do sistema de regulação de velocidade. Para motores turboalimentados, como é o caso do Scania DC9072

utilizado como objeto de estudo, é possível afirmar que o tempo de resposta ao degrau de carga também poderá estar associado ao fato de que, com a existência da turbina, há um atraso no fornecimento de energia ao sistema, devido ao tempo necessário para aumento da pressão de ar de carga. À medida que a carga aplicada subitamente aumenta, é razoável afirmar que o tempo de resposta também vai aumentar, diante da necessidade de aumento de pressão na turbina. Além disso, o documento ainda referencia outros fatores de aspecto físico, como por exemplo, o percurso de encaminhamento de ar desde o sistema de admissão (filtros) até a câmara de combustão.

Outro aspecto importante e não detalhado neste artigo, é a consideração sobre a inércia da massa rotativa acoplada ao eixo, ou seja, uma variável que depende da massa total e momento de inércia do gerador síncrono que compõe o grupo gerador. Em algumas aplicações, há a necessidade de se prever a utilização de grupos geradores denominados híbridos, isto é, o gerador síncrono com potência maior que a potência disponibilizada pelo motor acionante. Essa necessidade se dá a partir da característica de resposta de tensão exigida pela carga, determinada através da equação 2.1. Portanto, aumentando o tamanho do gerador acoplado, aumenta a massa acionada pelo motor, contribuindo para elevar o tempo de resposta em velocidade.

4.1.2 Tempo de resposta motor diesel – Aspectos químicos

De acordo com a Tabela 4, é verificado que, com um degrau de carga maior, houve uma sutil redução no tempo de resposta do motor, de 500 para 400 ms. Conforme indicado a seguir, no capítulo 4.3, foi realizada uma simulação numérica para verificação da velocidade de chama em função da razão de equivalência. Percebe-se que, através do gráfico gerado, a velocidade da frente de chama aumenta com o aumento da razão de equivalência, ou seja, teoricamente, com a injeção de combustível a velocidade da queima ocorre de forma mais rápida. Porém, é importante salientar que esta grandeza pode não ser adequada para alguma análise conclusiva, já que a combustão não é pré misturada, ou seja, há um comportamento difusivo no processo de queima, dependente ainda de outras variáveis como por exemplo, o diâmetro da gota do combustível, características do spray, entre outros.

Assumindo que o parâmetro de velocidade de chama ensaiado pelo Cantera pode não ser adequado para o ciclo diesel, é necessário prever teoricamente o comportamento da razão de equivalência com o aumento da carga inserida no motor, conforme equacionamento seguir. A vazão de ar, com motor a 100% foi assumida como constante e estipulada a partir da suposição de uma razão de equivalência típica para o diesel com valor de 0,7 e utilizando a equação 4.2, deduzida por Heywood (1988):

$$\phi = \left(\frac{Y_F}{Y_o} \right)_{est} \frac{\dot{m}_F}{\dot{m}_O} \quad (4.2)$$

Onde Y_o é a massa de ar ou oxigênio, Y_F a massa de combustível, \dot{m}_F e \dot{m}_o as vazões mássicas de combustível e ar, respectivamente. O índice “est” significa estequiométrico. As variáveis utilizadas para definir a nova vazão de ar foram:

Razão de equivalência típica do diesel: 0,7

Razão combustível / ar estequiométrico do diesel: 1/15

Vazão mássica de diesel a 100% de carga: 63,9 l/h = 0,0150875 kg/s.

Vazão de ar encontrada: 0,32 kg/s ou 956 m³/h.

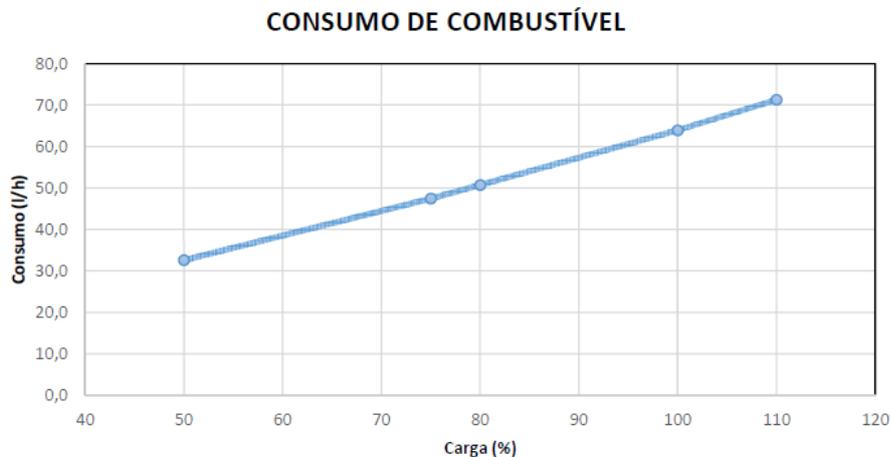
Importante destacar que, utilizando o dado de vazão de ar de admissão informado no datasheet do anexo C, fornecido pelo fabricante, os valores de razão de equivalência estiveram extremamente em desacordo com o valor típico de aproximadamente 0,7. Logo, assume-se um possível erro nos dados disponibilizados pela Scania. Por este motivo, foi gerada esta simulação teórica.

Para estimar as razões de equivalência a partir da vazão de ar definida anteriormente, foi utilizada a equação 4.3, definida em TURNS (2013):

$$\phi = \frac{(F / A)}{(F / A)_{est}} \quad (4.3)$$

Já as taxas de massa foram previstas a partir da curva de consumo da Figura 8 apresentada pelo fabricante, seguido de uma sequência de cálculos.

Figura 8: curva de consumo motor Scania DC9072A 02-13



Fonte: Scania

A partir da curva de consumo, definiu-se a massa injetada para cada valor de potência na carga, adotando a densidade do óleo diesel em 0,85 kg/l, conforme equacionamento abaixo:

- **Para carga de 72 kW (corresponde a 26,5% de carga):**
Consumo de diesel: 16,5 l/h = 0,0165 m³/h = 0,00000459 m³/s.
Taxa de massa em 1s: 0,00000459 m³/s x 850 kg/m³ = 0,0039015 kg/s.
- **Para carga de 140 kW (corresponde a 51,5% de carga):**
Consumo de diesel: 32,6 l/h = 0,0326 m³/h = 0,0000090556 m³/s.
Taxa de massa em 1s: 0,0000090556 m³/s x 850 kg/m³ = 0,00769726 kg/s.
- **Para carga de 200 kW (corresponde a 73,5% de carga):**
Consumo de diesel: 47,5 l/h = 0,0475 m³/h = 0,0000131944 m³/s.
Taxa de massa em 1s: 0,0000131944 m³/s x 850 kg/m³ = 0,01121524 kg/s.
- **Para carga de 272 kW (corresponde a 100% de carga):**
Consumo de diesel: 63,9 l/h = 0,0639 m³/h = 0,00001775 m³/s.
Taxa de massa em 1s: 0,00001775 m³/s x 850 kg/m³ = 0,0150875 kg/s.

Definidas as vazões mássicas para cada nível de carga, foi aplicada a equação 4.3, chegando a razões de equivalência estipuladas conforme Tabela 6, onde verificamos que a combustão do diesel ocorre sempre em condições de excesso de ar, com o processo variando de queima “muito pobre” para “pouco pobre”, de acordo com o nível de carga.

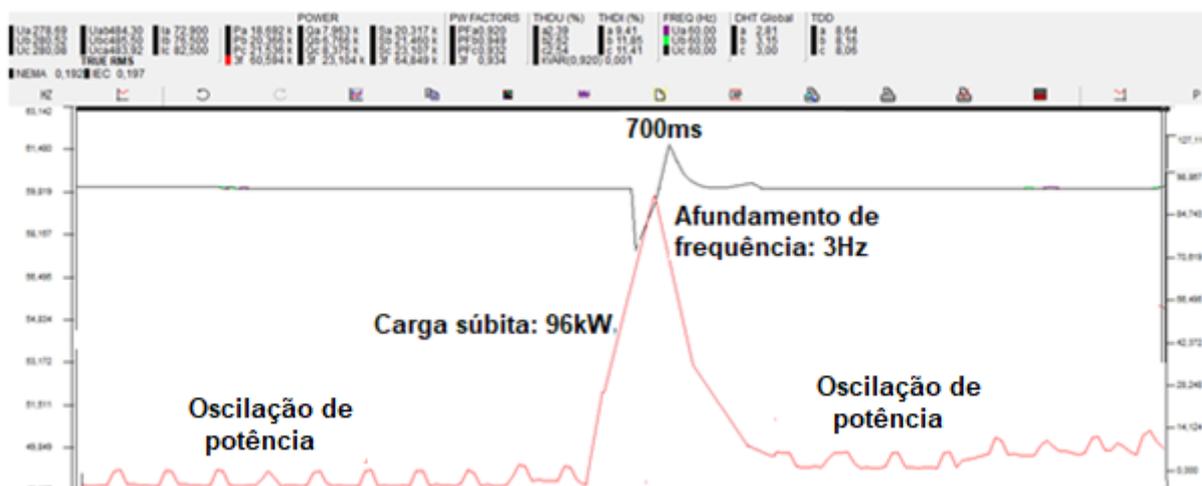
Tabela 6 – Estimativa de razão de equivalência

Estimativa de razão de equivalência para diferentes níveis de carga						
Potência	Percentual de carga [%]	Vazão mássica de diesel [kg/s]	Densidade do óleo diesel [kg/m ³]	Vazão mássica de ar [kg/s]	Razão F/A estequiométrico	Razão de equivalência [F/A]
72	26,5	0,0039015	850	0,32	0,067	0,18
140	51,5	0,00769726	850	0,32	0,067	0,36
200	73,5	0,01121524	850	0,32	0,067	0,52
272	100	0,0150875	850	0,32	0,067	0,7

4.2 Testes com motor a gás natural

Conforme destacado no capítulo 3.4.2, os testes com motor a gás natural foram realizados observando o comportamento de partida de um motor de 175 CV, com soft starter, o qual está acoplado ao compressor GNV de um posto de combustíveis. A Figura 9 apresenta o gráfico obtido, associando as grandezas de potência x frequência elétrica:

Figura 9: degrau de partida com compressor GNV

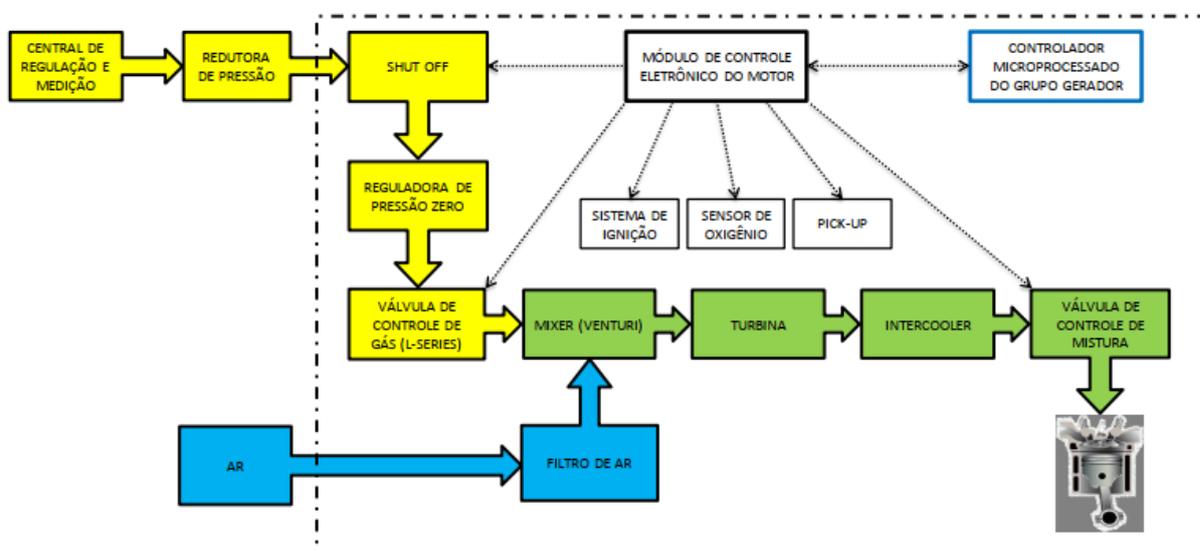


Como indicado na Figura 9, o motor a gás natural é submetido a um degrau instantâneo de carga de 96 kW. Este valor corresponde à 40% da potência prime do grupo gerador. Nesta condição, percebe-se que o tempo de resposta do motor, até o reestabelecimento da rotação e frequência nominais, atinge 700 ms.

4.2.1 Tempo de resposta motor gás natural – Aspectos físicos

Com a inserção de carga no eixo, há a abertura imediata da válvula de admissão de gás, promovendo a injeção de combustível no coletor de admissão, enriquecendo a mistura. A Figura 10, apresenta um fluxograma detalhado do ciclo de funcionamento do sistema de admissão de combustível e controle de mistura:

Figura 10 – fluxograma de funcionamento motor a gás natural estacionário



O controle de velocidade do motor é realizado por meio do ajuste do fluxo da mistura ar / combustível. Através da sonda lambda (sensor de oxigênio) instalada na saída dos gases de exaustão, o módulo de controle do motor recebe a informação da quantidade de oxigênio residual, e, por relação direta, calcula a proporção ar/combustível da mistura que está entrando na câmara de combustão. A fim de manter a proporção correta, ou seja, em uma faixa muito próxima da estequiométrica, o módulo atua sobre a válvula borboleta da entrada de gás natural. Após a válvula, a mistura ocorre em um mixer tipo venturi, até chegar no coletor de admissão. O acionamento das bobinas de ignição, responsáveis pela geração do sinal de alta tensão para as velas, é realizado pelo módulo de controle, que calcula o momento apropriado para a ignição de cada vela de cada cilindro em função da posição exata deste cilindro no ciclo. Para isto recebe a informação do sensor da engrenagem de comando.

Sob o ponto de vista de aspectos físicos, comparando com o motor diesel, é possível apontar prováveis causas do aumento do tempo de resposta do motor gás ao degrau de carga. Justifica-se essa colocação, com base no fato de que com o motor diesel, já há combustível no PMS de forma imediata após a abertura da válvula, com ar disponível em alta pressão no interior da câmara. Já para o gás natural, percebe-se uma sequência de ações para o enriquecimento da mistura, que vai desde a leitura de rotação do módulo de controle, comando e abertura de válvula de controle de gás, passagem pelo venturi, até chegar na câmara de combustão, conforme Figura 10. Com o objetivo de demonstrar matematicamente esta condição, foi estimado o tempo gasto para que o combustível e o ar sejam admitidos no sistema e injetados no PMS. Para isso, assumimos que $V = \frac{Q}{A}$ e $t = \frac{d}{V}$, onde “V” é a velocidade em m/s, “Q” é a vazão volumétrica em m³/s, “A” é a área da tubulação, “d” é a distância percorrida em metros na tubulação e “t” o tempo estimado. A partir dessas informações, foi gerada a Tabela 6:

Tabela 6 – estimativas de tempo de injeção de ar / gás no PMS

Tempo estimado para injeção de gás na mistura				
Vazão de combustível [m³/s]	Percentual de carga [%]	Diâmetro da tubulação [m]	Percurso do fluido [m]	Tempo estimado [ms]
0,025	100	0,05	1,5	118
0,0101	40	0,05	1,5	300

Tempo estimado para injeção de ar na mistura				
Vazão de ar [m³/s]	Percentual de carga [%]	Diâmetro da tubulação [m]	Percurso do fluido [m]	Tempo estimado [ms]
0,454	100	0,2	0,5	35

Para definição dos valores apresentados na tabela 6, algumas condições foram assumidas, como: a vazão de ar constante, embora sabe-se que há uma variação desta grandeza. Porém, o percurso desse fluido desde a admissão até o venturi, é relativamente menor que o gás, motivo pelo qual irá influenciar de forma menos significativa, já que se estima 35 ms até que a admissão ocorra e o ar seja injetado na mistura. Já para o gás, foi assumido que a mangueira de combustível possui diâmetro de 5 cm e comprimento total de 1,5 m, conforme indicado no anexo E. Portanto,

percebe-se que o tempo estimado para que o gás seja assumido pela válvula reguladora e injetado no venturi, nas condições de teste, já atinge 300ms. Estima-se que o restante do tempo, até os 700ms registrados para estabilização da rotação, esteja relacionado com as leituras da sonda lambda, sensor pick-up e processamento das informações pelo módulo do motor até o comando de abertura da válvula de admissão.

4.2.2 Tempo de resposta motor gás natural – Aspectos químicos

Por características da queima do metano, assume-se que o processo de combustão possui uma razão de equivalência constante, sempre próxima da estequiométrica, podendo passar de levemente pobre a muito rica e poucos milissegundos, porém seguindo a faixa de limite de inflamabilidade, que é definida como $0,64 < \phi < 1,64$, TURNS (2013). A partir disso, se define que a velocidade da frente de chama não tem influência significativa sobre a resposta do motor e que o parâmetro que pode influenciar no tempo para que ocorra a combustão, é a velocidade do ar nos dutos de admissão, passagem por todo o circuito, até a pré mistura e entrada na câmara.

4.3 Simulações com Cantera

A proposta de utilizar a simulação numérica com o Cantera foi embasada na necessidade de visualizar graficamente o comportamento da velocidade de chama e sua relação com a razão de equivalência no processo de queima no interior da câmara. Com base nisso, as rotinas de programação, tanto para o diesel quanto para o gás natural foram inseridas (conforme ilustração no APÊNDICE B).

Para simulação com o diesel, foi aplicada a molécula principal $C_{12}H_{26}$, enquanto para gás natural, foi adotada a composição molecular informada pela Sulgás, que corresponde a metano CH_4 (90%), etano C_2H_6 (5,6%), propano C_3H_8 (1,5%), dióxido de carbono CO_2 (1,3%). Para os dados de pressão e temperatura, foram adotados valores típicos de motores a diesel, que correspondem a mínimo de 450 °C e 60 bar (MARTINS, 2013). Arbitrariamente, estes dados também foram considerados para o motor a gás natural. De forma a possibilitar uma quantidade de linhas de programação

e dados de análise mais ampla, foi adotada uma faixa de razão de equivalência de 0,4 a 2.

Para o gás natural: tomado como base o consumo de combustível informado pela Scania, que corresponde a 91 Nm³/h à 100% de carga. Estimando uma variação linear do consumo de combustível com o nível de carga, foi adotado um consumo de 36,4 Nm³/h, associado ao degrau de carga simulado de 96 kW, o qual corresponde a 40% de carga no motor.

A partir destes dados de entrada, foram geradas as rotinas de cálculo no software, dando origem às curvas razão de equivalência x velocidade de chama, indicadas nas Figuras 11 e 12:

Figura 11: Curva razão de equivalência x velocidade de chama - diesel

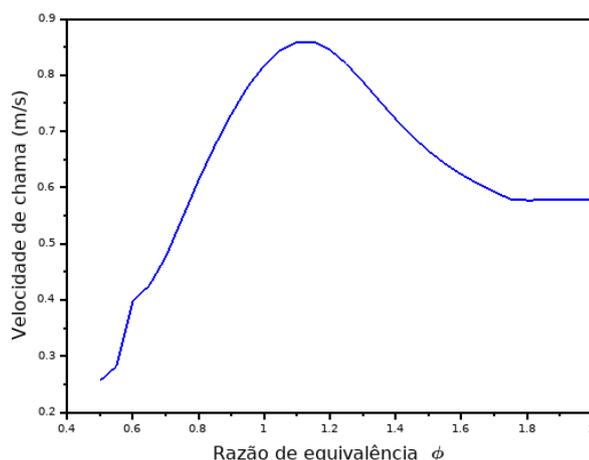
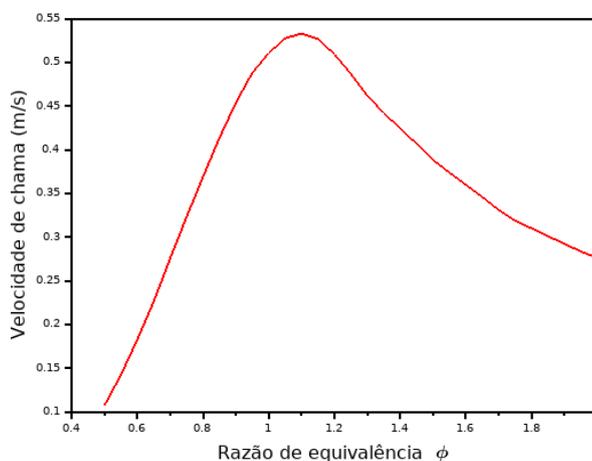


Figura 12 - Curva razão de equivalência x velocidade de chama – gás natural



Os gráficos gerados pelo Cantera, indicam que, para uma mesma razão de equivalência, há uma significativa diferença na velocidade da frente de chama, comparando o gás natural e o diesel. Esta condição, reflete o que é indicado na tabela de características dos combustíveis (tabela 1), onde identificamos que a velocidade de chama do gás natural é menor que o diesel, para uma mesma quantidade de combustível. Por exemplo, é possível observar que para uma razão de equivalência de aproximadamente 1.1 (mistura rica), a frente de chama do diesel atinge 0,85 m/s, enquanto o gás natural aproxima-se de 0,53 m/s.

Sob o ponto de vista da potência desenvolvida pelo motor para absorver o degrau de carga, é possível associar a equação 4.2 (potência indicada), que se refere a potência obtida por meio da conversão de energia química do combustível em energia mecânica no eixo do motor.

$$Pi = \frac{W_l}{\Delta t} = \dot{m}_c \cdot PCI \cdot \eta_t \quad (4.2)$$

Onde:

W_l = trabalho líquido produzido pelo motor durante o ciclo.

Δt = tempo para realização do ciclo.

PCI = poder calorífico inferior do combustível.

η_t = rendimento térmico da conversão.

m_c = vazão mássica de combustível.

A equação 4.2 nos indicará somente as condições de conversão de potência em função do combustível utilizado e das suas propriedades físico químicas, o que será interessante diante de uma análise mais aprofundada sob ponto de vista de potência instantânea entregue pelo motor e não somente em relação ao tempo de resposta em rotação. Embora teoricamente, com a simulação através do Cantera seja perceptível a diferença das velocidades de frente de chama entre diesel e gás, este aspecto não é tomado como determinante para o tempo de resposta do motor gás ser maior que o diesel, já que conforme verificado anteriormente, as razões de equivalência para o gás natural se mantêm em faixas muito próximas da estequiométrica, razão pela qual não influencia significativamente. Logo, as

características físicas dos motores, principalmente relacionadas ao sistema de admissão de combustível, conforme já detalhado, são determinantes para esta análise.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O propósito para a elaboração desse artigo esteve baseado na problemática encontrada na rotina de trabalho do autor, a qual compreende o dimensionamento elétrico e mecânico de grupos geradores estacionários. Uma das razões que serviram para a definição do tema está no fato de que no ambiente de engenharia da empresa Stemac, não existem dados ou material de análise que possa embasar o conceito de carga súbita. Na rotina de pós-venda, não é raro encontrar casos de aplicação em que grupos geradores apresentem respostas não satisfatórias para atendimento principalmente a cargas compostas por motores de indução, os quais são os principais responsáveis por apresentar degraus instantâneos determinantes para a resposta dinâmica dos motores a combustão. O tema desenvolvido neste artigo é de grande complexidade, visto que tratar do comportamento dos motores a combustão envolve outros aspectos que não foram profundamente abordados.

Sob o ponto de vista de normas que regem a capacidade de absorção de carga de motores em grupos geradores, é importante citar a ISO 8528-5 “Grupos geradores de corrente alternada acionada por motor de combustão interna - Parte 5: Grupos geradores”. Esta norma apresenta os requisitos mínimos que devem ser atendidos por um motor estacionário, no que diz respeito a desvio de frequência, tempo de recuperação da frequência nominal e queda de tensão. Os percentuais admissíveis para estas três variáveis são apresentados na tabela 7:

Tabela 7: requisitos conforme norme ISO 8528-5

	G1	G2	G3
Desvio de frequência	$\leq 15\%$	$\leq 10\%$	$\leq 7\%$
Tempo de recuperação	$\leq 10\text{ s}$	$\leq 5\text{ s}$	$\leq 3\text{ s}$
Queda de tensão	-25%	-20%	-15%

Fonte: adaptado de Step Loads for Power Generation Engines

Para efeito de informação, o dimensionamento dos grupos geradores está baseado na classe de desempenho G1, a qual é descrita pela norma como “necessário para aplicações em que as cargas conectadas são tais que somente tensão e frequência precisam ser especificadas. Normalmente usado em aplicações de uso geral, iluminação e cargas elétricas”.

Diante dos dados analisados neste artigo, é possível também propor um estudo de uma nova metodologia de dimensionamento de grupos geradores, verificando o comportamento dos motores sob os aspectos químicos e físicos. Isso se viabiliza, no que se refere a software, sob a condição de que o Cantera é livre e de código aberto, porém, requer uma carga considerável de treinamento de usuários. Apesar desse cenário, é possível propor que sejam também analisados os fenômenos de combustão envolvidos, já que a resposta dos motores está diretamente relacionada à níveis de carga inseridos no eixo, associado a variação das taxas de massa. Esses níveis podem ser provisionados por meio das curvas de consumo de cada motor, além de condições de pressão e temperatura na câmara. Já para uma análise dos aspectos físicos de cada motor, há a relação principalmente com os circuitos de admissão de combustível, estritamente no motor a gás natural, no que se refere aos tempos de admissão e queima da mistura. Entretanto, há necessidade de coletar dados reais com os fabricantes, denotando uma dificuldade considerável, conforme enfrentado na elaboração deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CATÁLOGO RE6000, Embrasul Indústria Eletrônica – Disponível em http://www.embrasul.com.br/painel/pdf/Cat%C3%A1logo_RE6000_v05r00_pt_HR.pdf. Acesso em 05 de junho de 2019.

ÇENGEL, YUNUS A; BOLES, MICHAEL A. **Termodinâmica**. 7 ED. New York. AMGH EDITORA, 2013.

COMPRESSOR COM INVERSOR DE FREQUÊNCIA. Arpressi – Chicago Pneumatic – Disponível em <http://www.arpressi.com.br/capa.asp?idpagina=227> Acesso em 30 de maio de 2019.

CROWL. D. A., LOUVAR, F. **Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications**, 2 ED, NY, Prentice Hall, 2002.

DADOS MOTOR SCANIA. SCANIA BRASIL. Disponível em: <https://www.scania.com/content/dam/scanianoe/market/master/products-and-services/engines>. Acesso em 11 de setembro de 2019.

DICAS GERAIS SOBRE INSTALAÇÃO ELÉTRICA. Portal do eletrícista – Disponível em: <http://www.portaleletricista.com.br/chave-soft-starter/> Acesso em 30 de maio de 2019.

FILHO, J. MAMEDE, **Instalações Elétricas Industriais**. 8 ED. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

FITZGERALD, A.E; KINGSLEY JR, CHARLES; UMANS, STEPHEN D. **Máquinas elétricas, com introdução a eletrônica de potência**. 6 ED. Porto Alegre. BOOKMAN, 2006. 648p.

FRANCO, A. C. L. **Análise técnico-econômica da substituição parcial do combustível Diesel pelo Gás Natural em motores marítimos na região Amazônica**. Dissertação de mestrado (Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica) Universidade Federal do Pará. Belém, 2007.

GERAÇÃO COM ENERGIA A GÁS NATURAL. Comgas – Companhia de Gás de São Paulo. Disponível em: <https://www.comgas.com.br/para-industria/geracao-de-energia-a-gas-natural/>. Acesso em 8 de abril de 2019.

HEYWOOD, J.B. **Internal combustion engine fundamentals**. New York: McGraw-Hill, 1988. 930p.

MARTINS, JORGE. **Motores de combustão interna**. 4 ED. Porto, Portugal. Publindústria, Produção e Comunicação, 2013.

MOTOR DIESEL 4 TEMPOS. Disponível em: <https://www.stefanelli.eng.br/ciclo-diesel-motor-quatro-tempos>. Acesso em 11 de outubro de 2019.

ROSA, ALDO VIEIRA DA. **Processos de energias renováveis**. 3 ED. Rio de Janeiro. Elsevier, 2015.

SALIN, RAPHAEL. **Compensação dinâmica de reativo na partida de motores de indução**. 2011. 51f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

SANTOS, VARELLA &. **Noções básicas de motores diesel**. 44f. Universidade Federal Rural do Rio De Janeiro UFRRJ. Rio de Janeiro, 2010.

Site para download e tutoriais Cantera. Disponível em <https://cantera.org>. Acesso em 01/10/2019.

URNS, STEPHEN R. **Introdução à combustão. Conceitos e aplicações**. 3 ED. Porto Alegre. AMGH, 2013

WILDNER, F. D. **Estudo experimental da variação de velocidade de combustão para diferentes combustíveis, relações de mistura e relações de compressão em um motor ASTM CFR**. (Dissertação de Mestrado). UFRGS, 2006.

**APÊNDICE A – FOTOS DOS TESTES NO MOTOR DIESEL – CARGA COM
BANCO DE RESISTÊNCIAS**



APÊNDICE B – TELAS DAS ROTINAS DE PROGRAMAÇÃO DO CANTERA PARA O DIESEL E GÁS NATURAL

DADOS DE ENTRADA - GÁS NATURAL

```

import cantera as ct
import numpy as np
import csv

gas = ct.Solution('gri3.cti')

#parameters value
p      = 60*ct.one_atm
tin    = 723
n      = gas.n_species
npoints = 31
phi = np.zeros(npoints, 'd')
flamespeed = np.zeros(npoints, 'd')
for j in range(npoints):
    phi[j] = 0.5 + 0.05*j
    gas.TP      = tin, p
    gas.set_equivalence_ratio(phi[j], 'CH4:0.9, C2H6:0.056, C3H8:0.015, CO2: 0.013', 'O2:1.0, N2:3.76')

initial_grid = 2*np.array([0.0, 0.001, 0.01, 0.02, 0.029, 0.03], 'd')/3

```

DADOS DE ENTRADA - DIESEL

```

import cantera as ct
import numpy as np
import csv

gas = ct.Solution('diesel.cti')

#parameters value
p      = 60*ct.one_atm
tin    = 723
n      = gas.n_species
npoints = 31
phi = np.zeros(npoints, 'd')
flamespeed = np.zeros(npoints, 'd')
for j in range(npoints):
    phi[j] = 0.5 + 0.05*j
    gas.TP      = tin, p
    gas.set_equivalence_ratio(phi[j], 'c12h26:1.0', 'o2:1.0, n2:3.76')

initial_grid = np.array([0.0, 0.002, 0.005, 0.007, 0.009, 0.01], 'd')/20

```

ANEXO A – TABELA DE CARGA SÚBITA – MOTORES DIESEL

STANDBY		PRIME		BASE POWER		Súbita Admitida (kW)		Marca do motor	Modelo do motor
kVA	kWe	kVA	kWe	kVA	kWe				
25	20	22	18	NA	NA	65%	11	Perkins	404D-22G
40	32	36	29	24	19	70%	20	Perkins	1103A-33G
40	32	37	30	35	28	65%	19	MWM International	D229-3
55	44	50	40	NA	NA	60%	24	Perkins	1104A-44G
55	44	50	40	48	38	65%	26	MWM International	D229-4
81	65	78	62	74	59	75%	46	MWM International	D229-6
83	66	75	60	NA	NA	75%	45	Perkins	1104A-44TG1
85	68	78	62	74	59	55%	34	MWM International	TD229-4
100	80	90	72	NA	NA	75%	54	Perkins	1104A-44TG2
110	88	100	80	86	69	65%	52	MWM International	4.10T
111	89	101	81	78	62	55%	44	FIAT (FPT/IVECO)	NEF45-SM6
120	96	109	87	94	75	49%	42	MWM International	4.10TCA
125	101	114	91	NA	NA	60%	54	Perkins	1104C-44TAG2
140	112	125	100	100	80	65%	65	FIAT (FPT/IVECO)	NEF45-TM6
150	120	141	113	122	98	59%	66	MWM International	6.10T
180	144	168	134	158	126	49%	65	MWM International	6.10TCA
220	176	200	160	152	122	65%	104	FIAT (FPT/IVECO)	NEF67-TM6
230	184	210	168	200	160	50%	84	MWM International	6.12TCA
245	196	228	182	180	144	65%	118	FIAT (FPT/IVECO)	NEF67-TE5
260	208	240	192	228	182	50%	96	MWM International	6.12TCA
300	240	272	225	228	182	80%	180	FIAT (FPT/IVECO)	NEF67-TE8W
330	264	300	240	240	192	65%	156	Scania	DC9 072A 02-12
375	300	340	272	260	208	65%	176	Scania	DC9 072A 02
400	320	364	291	291	233	65%	189	Scania	DC9 072A 02-14
460	368	434	347	347	278	65%	225	Scania	DC13 072A 02-15
500	400	455	364	364	291	65%	236	Scania	DC13 072A 02-12
500	400	455	364	319	255	68%	247	Volvo	TAD1344GE
550	440	500	400	400	320	65%	260	Scania	DC13 072A 02-14
625	500	569	455	500	400	60%	273	Perkins	2506A-E15TAG4
642	514	583	466	408	326	50%	233	Volvo	TAD1641GE
655	524	594	475	475	380	65%	308	Scania	DC16 49A 10-28C
700	560	635	508	508	406	65%	330	Scania	DC16 49A 10-28D
700	560	635	508	440	352	50%	254	Volvo	TAD1642GE
750	600	680	544	563	450	65%	353	Perkins	2806A-E18TAG3

Fonte: Departamento de engenharia – Stemac Grupos Geradores

ANEXO B – FISPQ – GÁS NATURAL - SULGÁS

	FICHA DE INFORMAÇÃO DE SEGURANÇA DE PRODUTO QUÍMICO – FISPQ
	GÁS NATURAL

superfícies quentes. — Não fume.

P261- Evite Inalar os gases.

P304 + P340 EM CASO DE INALAÇÃO: Remova a pessoa para local ventilado e a mantenha em repouso numa posição que não dificulte a respiração.

P377 – Vazamento de gás com chamas: não apague, a menos que se possa conter o vazamento com segurança.

P381 – Elimine todas as fontes de ignição se puder ser feito com segurança.

Outros perigos que não resultam em uma classificação:

É um asfixiante simples e, em concentrações elevadas, provoca asfixia por redução da concentração de oxigênio do ambiente.

Podem formar misturas explosivas com o ar.

Explode espontaneamente com cloro sob luz solar.

3 COMPOSIÇÃO E INFORMAÇÕES SOBRE OS INGREDIENTES

Nome químico comum ou nome técnico: Gás Natural

Sinónimos: Gás natural de combustão; gás natural sintético.

Número de registro CAS (Chemical Abstracts Service): 8005-14-2

Composição: Mistura de hidrocarbonetos formados essencialmente de: (média aproximada)

Componente	Valores	Nº CAS
Metano	90,0 %	74-82-8
Etano	5,6 %	74-84-0
Propano	1,5 %	74-98-6
CO ₂	1,3 %	124-38-9
N ₂ +CO ₂	2,05 %	7727-37-9/124-38-9
S total	3,3 mg/m ³	7704-34-9
H ₂ S	2,8 mg/m ³	2148-87-8
Hg	0,014 µg/m ³	7439-97-6

Ingredientes ou impurezas que contribuam para o perigo:

Componente	Concentração	Nº CAS
Sulfeto de Hidrogênio	Max. 15 mg/m ³	2148-87-8
Odorante SPOTLEAK 1005 (70% de Tetrahidrothiofeno + 30% de Terc-butilmercaptana)	10-20 mg/m ³	110-01-0 / 75-66-1
Enxofre total	Max. 70 mg/m ³	7704-34-9

Fonte: Sulgás – Cia de Gás do Estado do Rio Grande do Sul

ANEXO C – DADOS COMPLEMENTARES GRUPO GERADOR DIESEL

Dados	Valores
Potência Standby (kVA):	375
Potência Standby (kWe):	300
Potência Prime (kVA):	340
Potência Prime (kWe):	272
Potência COP (kVA):	260
Potência COP (kWe):	208
Fabricante:	SCANIA
Modelo:	DC9 072A 02
Número de cilindros:	5
Cilindrada (l):	31,84
Sistema elétrico do motor (Vcc):	24
Peso do motor (Kg):	950
Potência mecânica bruta Standby (cv):	454
Potência mecânica bruta Prime (cv):	412
Potência mecânica bruta COP (cv):	318
Sistema de controle velocidade:	Eletrônico, tipo EMS
Tipo de injeção:	Eletrônica
Fabricante da bomba injetora:	Unidade Injetora PDE
Taxa de compressão:	18:1
Diâmetro do cilindro (mm):	127
Curso do cilindro (mm):	140
Vazão total da bomba diesel (l/h):	Não informado
Potência absorvida pelo ventilador do radiador (cv):	13,6
Sistema de admissão:	Turboalimentado
Arrefecimento do ar de admissão:	Pós arrefecimento por intercooler
Vazão de ar de admissão (m³/h):	1560
Temperatura máxima dos gases de descarga (°C):	529
Diâmetro da conexão de descarga (pol):	5
Vazão de gases de descarga (m³/h):	3820

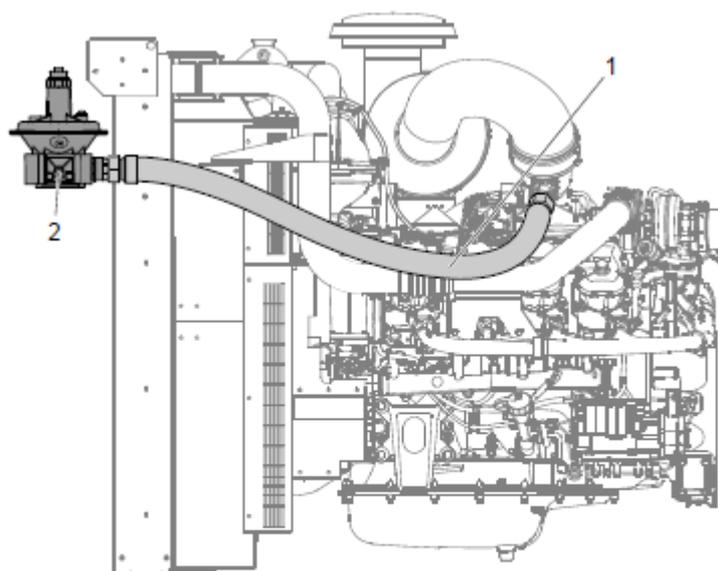
Fonte: Departamento de engenharia – Stamac Grupos Geradores

ANEXO D – DADOS COMPLEMENTARES GRUPO GERADOR GÁS

Dados	Valores
Potência Standby (kVA):	330
Potência Standby (kWe):	264
Potência Prime (kVA):	300
Potência Prime (kWe):	240
Potência COP (kVA):	255
Potência COP (kWe):	204
Fabricante:	SCANIA
Modelo:	SGI12A
Número de cilindros:	6
Cilindrada (l):	11,7
Sistema elétrico do motor (Vcc):	24
Peso do motor (Kg):	980
Potência mecânica bruta Standby (cv):	400
Potência mecânica bruta Prime (cv):	364
Potência mecânica bruta COP (cv):	333
Sistema de controle velocidade:	E3-LBTS Lean Burn Trim System
Taxa de compressão:	11:1
Diâmetro do cilindro (mm):	127
Curso do cilindro (mm):	154
Pressão de admissão do gás	5 a 10psi
Arrefecimento do ar de admissão:	Pós arrefecimento por intercooler
Vazão de ar de admissão (kg/h):	1980
Temperatura máxima dos gases de descarga (°C):	600
Diâmetro da conexão de descarga (pol):	5
Vazão de gases de descarga (m³/h):	1850

Fonte: Departamento de engenharia – Stemac Grupos Geradores

ANEXO E – IMAGEM ILUSTRATIVA MOTOR SCANIA SGI



Mangueira de combustível

Apenas a mangueira de combustível (1) fornecida pela Scania pode ser usada. A mangueira de combustível tem 1,5 m de comprimento. Não mude o comprimento.

Nota:

Nenhum componente além da mangueira de combustível pode ser instalado entre o regulador de pressão do gás (2) e a conexão de gás no motor.

Fonte: adaptado do manual de instalação Scania