5. Resultados e Análises

Neste capítulo é importante ressaltar que as medições foram feitas com uma velocidade constante de 1800 RPM, para uma freqüência de 60 Hz e uma voltagem de 220 V, entre as linhas de saída do trifásico, para todos os ensaios. O grupo gerador empregado nos ensaios é um Perkins 1006 TAG do modelo P135. Este modelo, por sua vez, só trabalha em regime de *carga prime* (conceito detalhado no capitulo 2), sendo sua potência efetiva, não limitada, de 120 kW ou 151 kVA, com uma provável sobrecarga de 10% em intervalos de uma hora para cada doze horas de funcionamento.

E importante detalhar que, nos ensaios a potência elétrica efetiva máxima alcançada foi de 120 kW e não se tentou trabalhar com uma sobrecarga.

5.1. Resultados no Modo Diesel Puro, Diesel-Gás e Com Restrição de Ar

Na **Figura 18,** tem-se a potência gerada, tanto no eixo do motor, como na potência elétrica do grupo gerador, em função do consumo de óleo diesel. No modo diesel puro, o cálculo da potência elétrica foi realizado a partir da combinação das medidas de voltagem e amperagem. Porém, houve dificuldades no momento de avaliar o torque gerado no eixo do motor, por estar diretamente ligado ao eixo do gerador. Optou-se, portanto, por dividir a medida da potência elétrica gerada pela eficiência do gerador, que é de 0,9 (fornecida pelo fabricante), conseguindo, finalmente, chegar até a potência ao eixo, que foi utilizada na maioria dos cálculos subseqüentes.

O consumo de diesel, medido na máxima potência, foi aproximadamente 6% maior que o consumo máximo fornecido pelo fabricante. Esta medida pode ter sido aumentada pelo desgaste do gerador em outros ensaios, e pela falta de manutenção ocorrida nos anos em que este se encontrava inativo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711107/CA

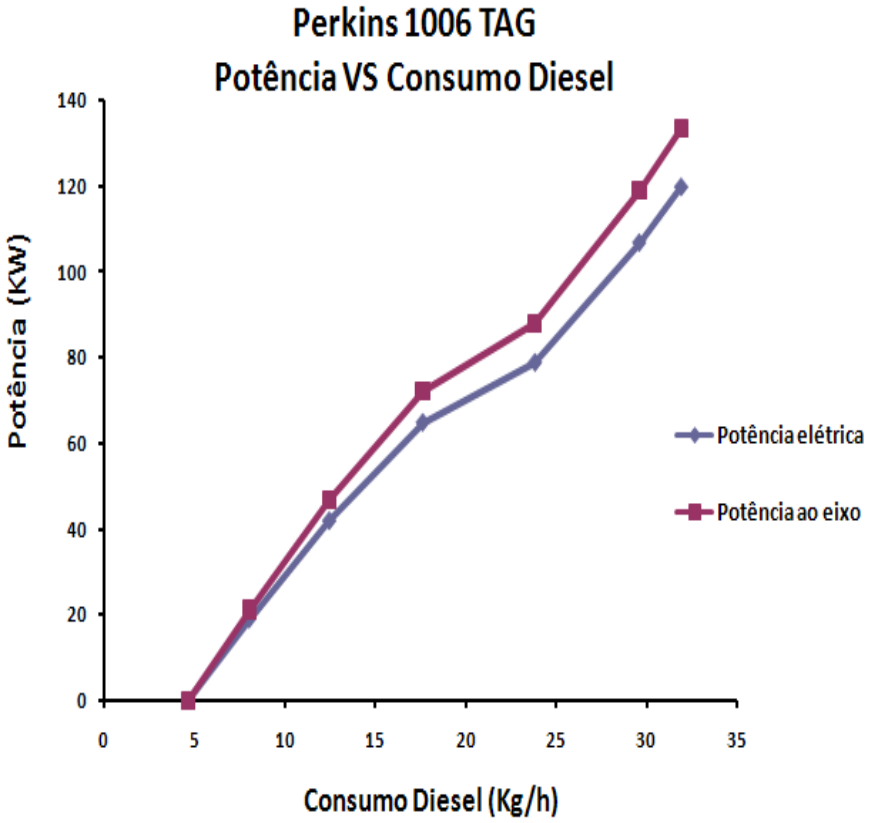


Figura 18: Curva de potência elétrica e potência ao eixo em função do consumo de óleo Diesel (Modo Diesel Puro)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711107/CA

Na **Figura 19** é observada a curva do consumo específico de combustível, em função da fração de carga prime, operando no modo diesel puro e no modo Diesel-gás, com máxima taxa de substituição. Os resultados mostram que em baixas cargas (16%, 35% e 60%), o consumo específico de combustível no modo diesel-gás é 15% maior que no modo diesel com 10% de carga, alcançando neste ponto uma porcentagem maior do que a dos outros.

O ponto de intercepção, que tem as duas curvas analisadas, e o ponto onde os consumos específicos são iguais, se encontra próximo aos 67% de carga, com um consumo aproximado de 260 g/kWh.

Ao lado direito do gráfico, onde estão representadas as altas cargas, especificamente 90% de carga, o consumo no modo diesel puro é 15% maior que no modo Diesel-Gás. Analogamente, ocorre em baixas cargas, o que justifica o uso do Diesel-Gás em altas cargas. O motivo é o maior poder calorífico do gás natural em relação ao diesel, consequentemente, o consumo específico de combustível diminui no modo bicombustível.

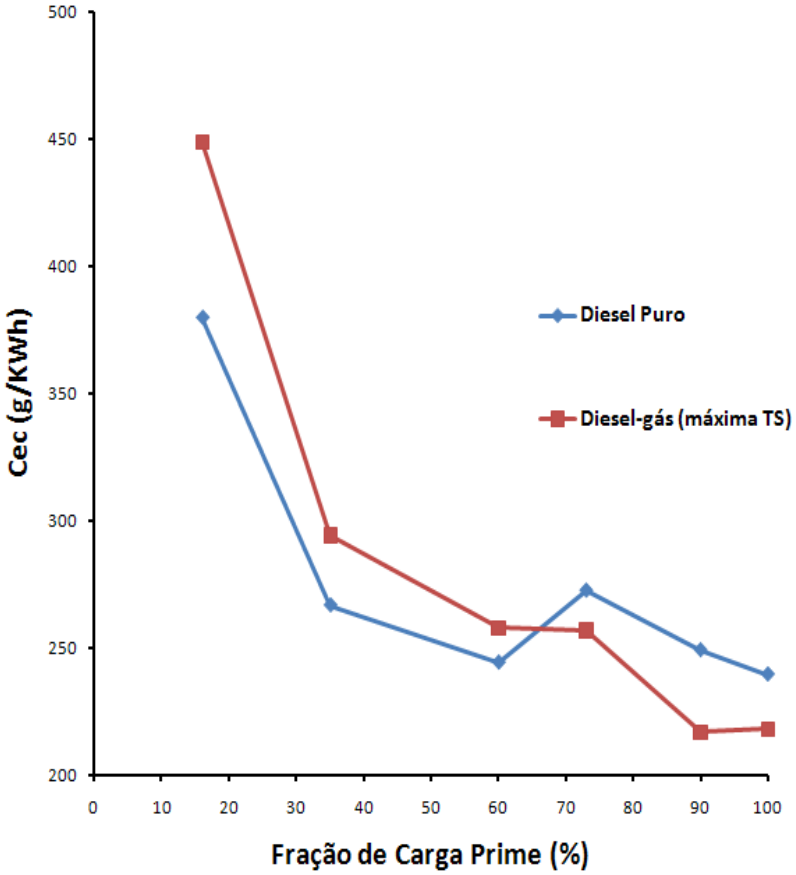
Temos a representação do consumo de combustível, seja diesel ou gás natural, em função da fração da carga *prime* (**Figura 19**).

Neste caso, obtivemos os consumos de diesel no modo puro e no modo bicombustível, sendo obviamente maior no caso de diesel puro. Além disso, o consumo de gás natural é 30% maior que o do diesel puro com 10% de carga. Existe um ponto de intercepção onde os consumos de gás natural e diesel são iguais. Ele se encontra próximo aos 65% de carga, com um consumo aproximado de 13 kg/h.

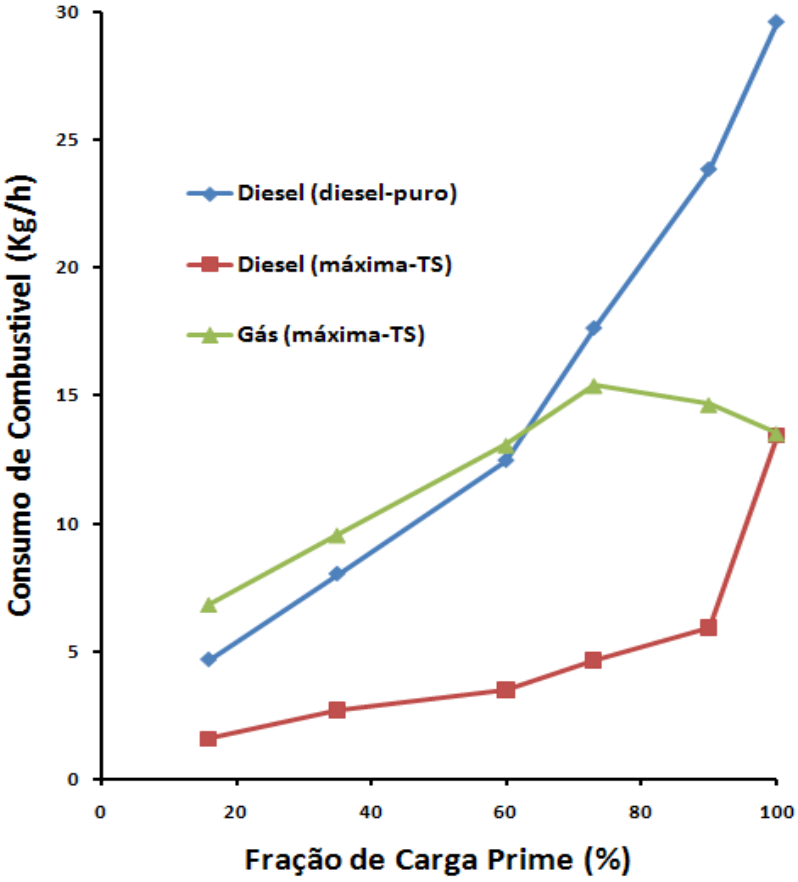
Podemos observar que o consumo de gás diminui em altas cargas, se mantido o consumo de diesel, no modo bicombustível, com uma tendência linear, até o ponto de carga máxima, onde ocorre um aumento abrupto. A explicação para isso é a máxima taxa de substituição avaliada em 100% de carga; O gerador não aceita altas taxas de substituição, e por isso, interrompe o fornecimento de gás próximo aos 60% de taxa. Sabendo disto, foi possível observar que o consumo de diesel e de gás, no modo Diesel-gás, em condições de máxima carga, é quase de aproximadamente 13 kg/h.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711107/CA

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711107/CA



(19)



(20)

Figura19 e 20: Consumo específico de combustível no modo diesel puro e Diesel-gás, com máxima taxa de substituição; e o consumo de combustível diesel e gás natural, no modo diesel puro e Diesel-gás, com máxima taxa de substituição para diferentes frações da Carga *Prime*

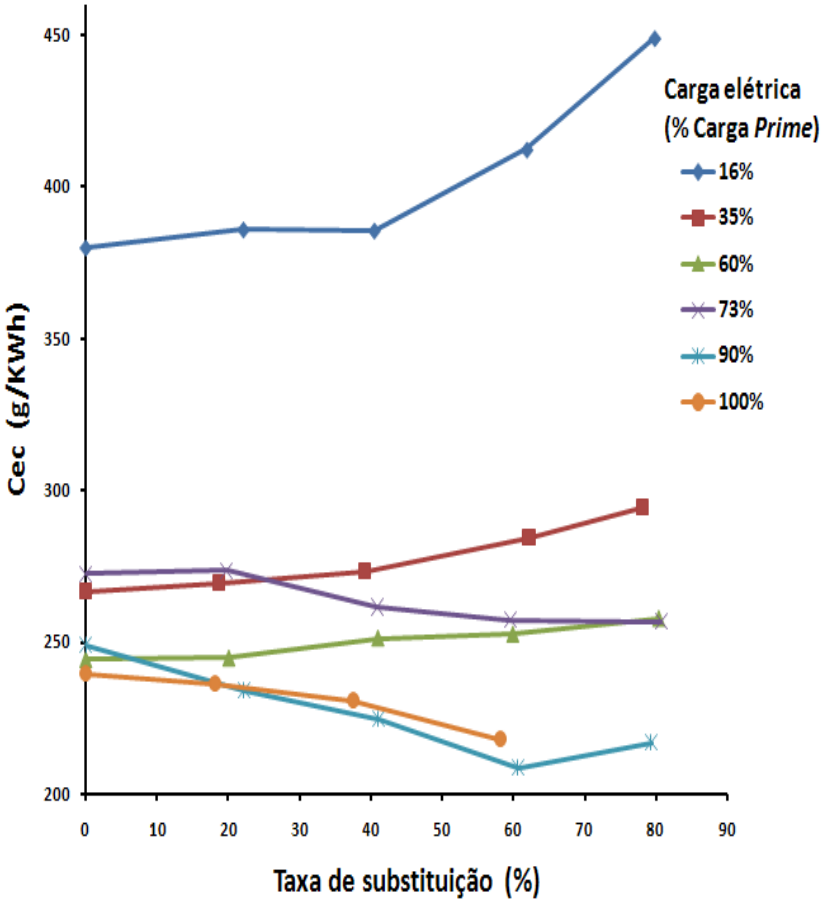


Figura 21: Consumo Específico de Combustível para diferentes porcentagens da Carga *Prime* em função da Taxa de Substituição.

É possível observar que na **Figura 21,** os consumos específicos de combustível, em todas as cargas avaliadas, estão em função das taxas de substituição. Para uma carga de 10%, o consumo específico é maior próximo aos 15%, com máxima substituição, se comparado ao modo diesel normal. Este consumo, em seu conjunto, é uma adição dos consumos de diesel junto ao de gás utilizados. Logo, o valor é muito alto em 35% e 60% de carga, já que o gás injetado em cargas baixas, simplesmente não queima em sua maior parte.

Tem-se uma tendência similar ás de cargas baixas, porém, sendo maior o consumo de combustível à medida que aumentamos a substituição, próximos aos 9% e 5% respectivamente, em cargas de 73%, 90% e 100%. No entanto, temos uma queda de consumo, comparando-se ao modo diesel puro, de 16% em carga elevadas. Isto pode significar uma melhoria em relação ao consumo de combustível, pois este será favorecido pelas altas temperaturas, que originam uma boa queima na câmara de combustão.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711107/CA

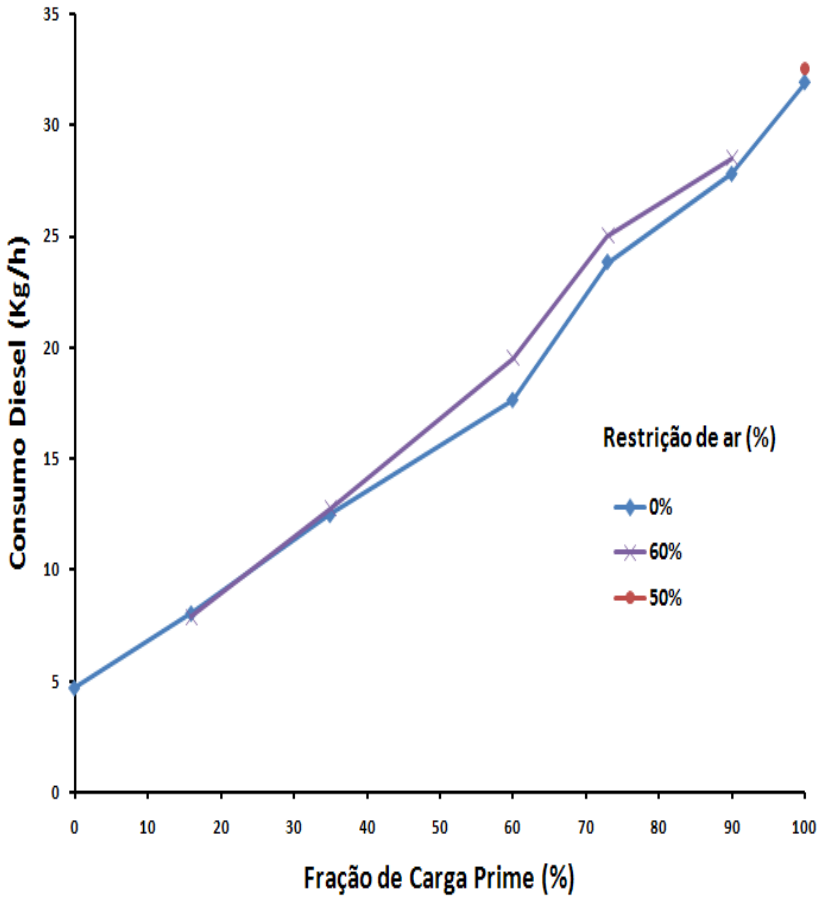


Figura 22: Consumo de diesel sem restrição, e com as máximas restrições de ar em função da Fração de Carga Prime.

Na **Figura 22** tem-se o consumo de diesel puro em função da fração de carga *prime*, aplicando-se o método de restrição de ar. Para um melhor entendimento do método de restrição, quando comentado sobre porcentagem de restrição, está de referindo a um conceito meramente geométrico, onde 0% de restrição indica que a válvula está completamente aberta, e 100%, a válvula está completamente fechada.

Na operação de restrição, nota-se a necessidade de mais combustível diesel para se atingir a exigência do motor. Com a restrição do ar, o sistema do governador detecta um possível afogamento do motor, e então, injeta uma maior quantidade de combustível, enriquecendo a mistura. Com isso, podemos perceber um aumento de consumo de diesel quando operado com restrição.

É possível compreender que em baixas cargas, o aumento de diesel, para uma máxima restrição de ar, é quase imperceptível. Já em cargas parciais e cargas elevadas, observa-se um aumento de 9% do consumo, com 63% de carga, sendo

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711107/CA

este valor, o mais perceptível. Além dos 4% e 2% de aumento, com 73% e 90% de carga, nota-se que com 100% de carga, há um aumento de 2%, com restrição máxima de 50% e um consumo de 32,6 kg/h.

Na **Figura 23,** é apresentado um rendimento térmico com variações de carga e restrição de ar, em função da taxa de substituição. Em cargas de 16% e 35%, o rendimento térmico, quando aumentada a taxa de substituição, se mantém quase constante, à medida que restringimos o ar. Em 60% de carga temos um rendimento térmico quase estável. Conforme aumenta a taxa de substituição, aumenta-se a restrição de ar.

Em cargas elevadas, como 73%, 90% e 100%, pode-se observar um incremento no rendimento térmico, mesmo aumentando a taxa de substituição e restringindo o ar. O aumento de 4%, 5% e 6% de rendimento, ocorre com máxima taxa de substituição, para uma operação sem restrição de ar. Operando com restrição de ar, tem-se um aumento de 3%, 4% e 5% nos pontos máximos, que não significa, necessariamente, máxima restrição.

Este fenômeno torna-se possível de acontecer, a partir do momento em que ocorre um aumento da temperatura dos gases de escape, que influencia na queima mais completa do combustível, gerando um aumento do rendimento térmico.

Na **Figura 24** estão representadas as variações da eficiência volumétrica para cargas e restrições de ar variáveis, em função da taxa de substituição. Obtemos como resultado, uma eficiência volumétrica quase estável, com pequenas variações.

É correto afirmar que, com a restrição de ar ocorrida na operação, a eficiência volumétrica diminui, explicando, portanto, o motivo pelo qual ocorre uma queda de 2% na eficiência, com 100% de carga. A taxa de substituição também causa um efeito de redução na eficiência volumétrica, como ocorrido nas cargas de 73%, 90% e 100%, onde a eficiência diminuiu em 1,5% .

Na **Figura 25** é possível analisar as temperaturas de escape em função da taxa de substituição, para 60% e 100% de carga. Essas cargas são bastante representativas em relação as outras, pois conforme aumenta a restrição de ar, elas apresentam um aumento de temperatura; de um modo contrario a medida que aumentamos a taxa de substituição, a temperatura de escape tende a diminuir. Isso pode ser explicado a partir do aumento da vazão de gás natural, que tem um efeito

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711107/CA

de resfriamento na parede da câmara de combustão, por conta do calor sensível desenvolvido pela mistura ar–gás natural.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711107/CA

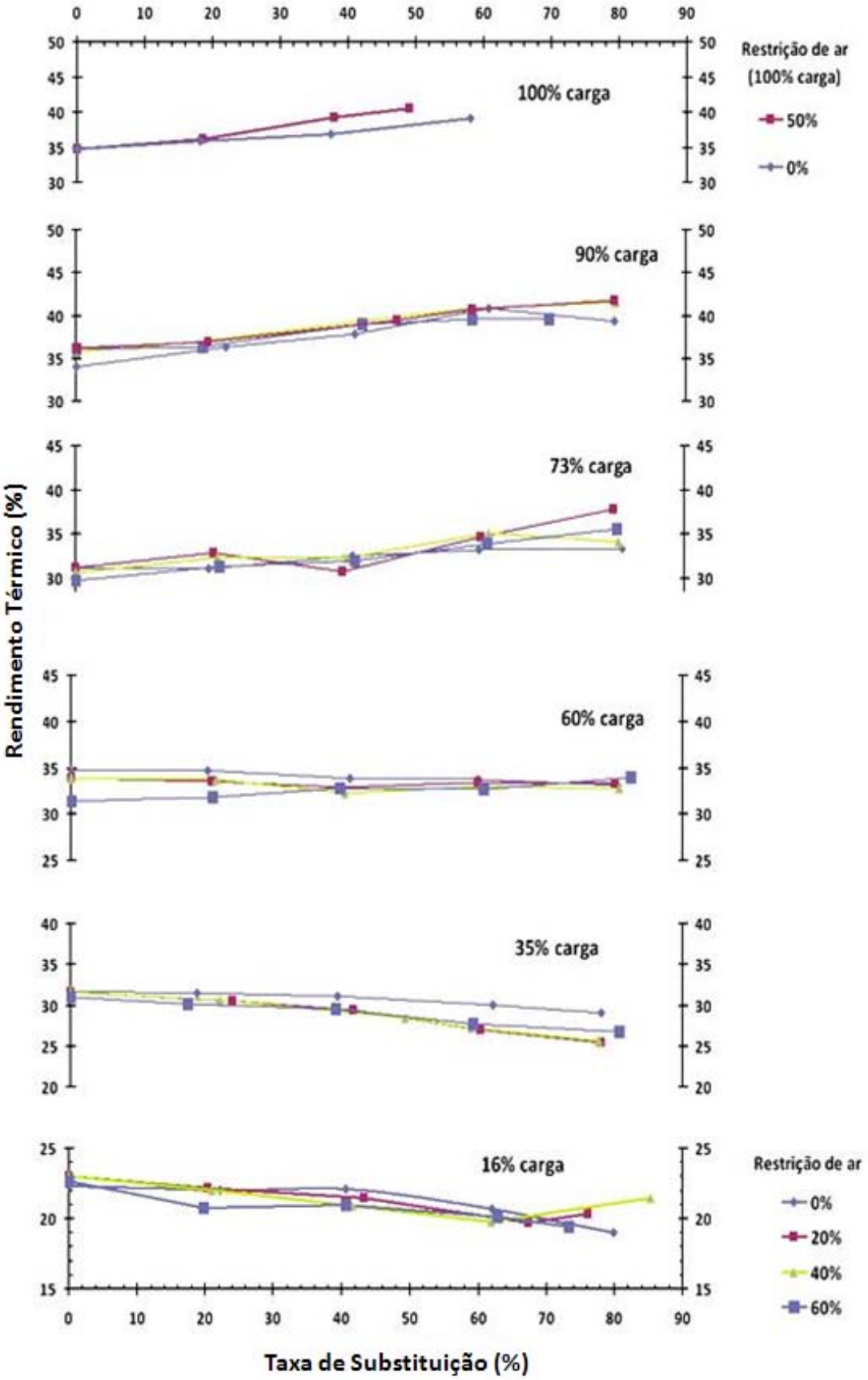


Figura 23: Rendimento Térmico com variações de carga e restrição de ar em função da Taxa de Substituição

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711107/CA

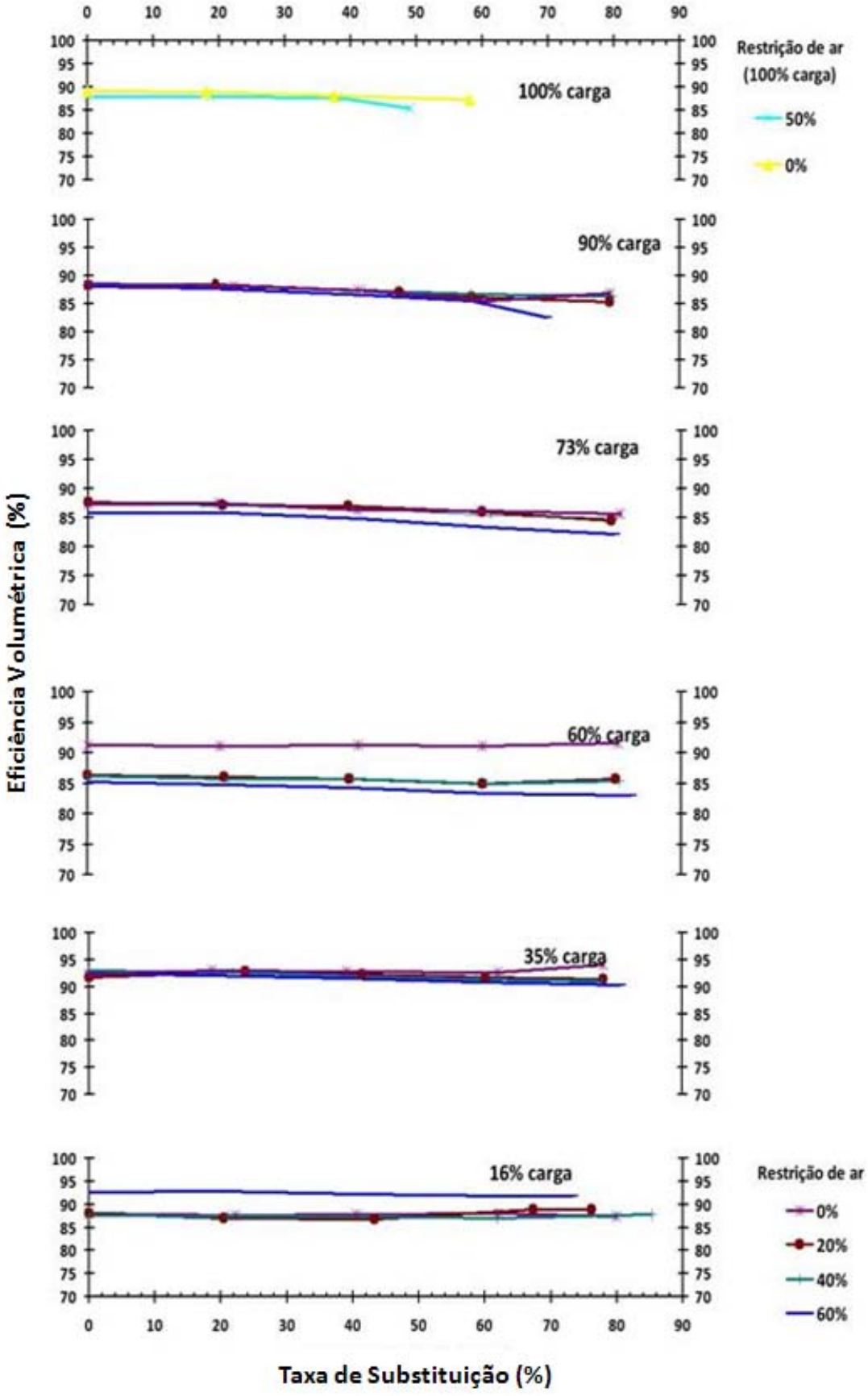


Figura 23: Eficiência Volumétrica com variações de carga e restrição de ar em função da Taxa de Substituição

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711107/CA

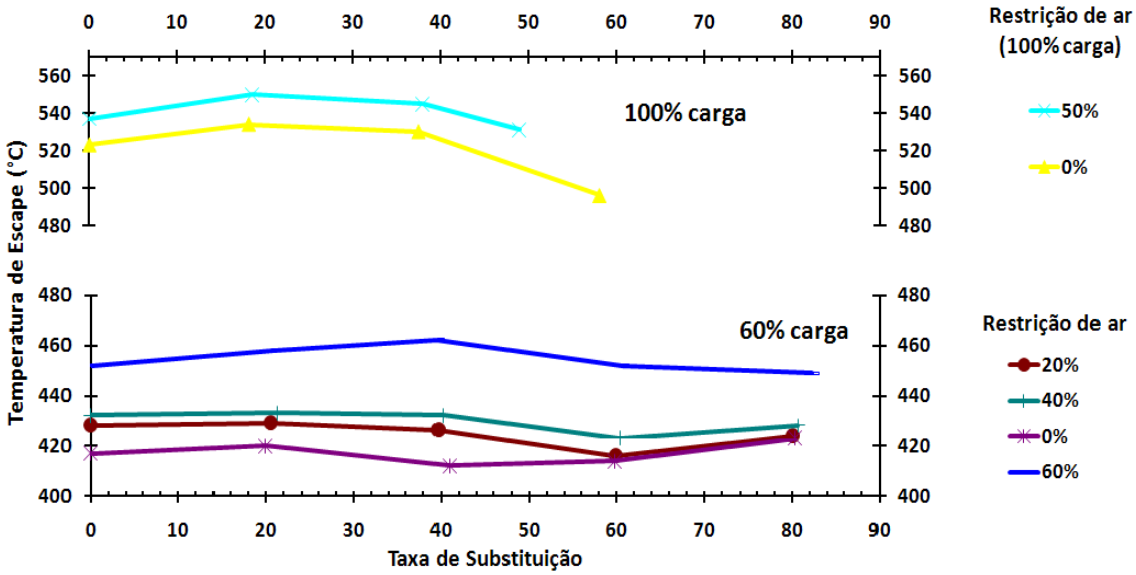


Figura 25: Temperatura de Escape em 60% e 100% de carga, com restrição de ar em função da Taxa de Substituição

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711107/CA

Com 60% de carga, como mostra a **Figura 25,** à medida que a taxa de substituição vai aumentando, observamos uma queda de 2% da temperatura de espace, em comparação ao modo diesel puro. Ao mesmo tempo, temos um aumento de 8% da temperatura, para um regime de 60% de restrição, comparado ao sem restrição.

Em 100%, temos uma queda de 8% da temperatura, com máxima taxa de substituição, e um aumento de 5% com máxima restrição de ar.

Na **Figura 26** estão representadas todas as temperaturas de escape, com variações de carga e restrição de ar, em função da taxa de substituição. Com 16% e 35% de carga, a temperatura aumenta conforme aumentamos a restrição de ar. Isso acontece porque os radicais HC do gás natural se queimam com maior facilidade, promovendo uma melhor queima, ou seja, uma melhor combustão.

Com 16% de carga, obtivemos um aumento de 4% na temperatura de escapamento. E com 35%, um aumento de 8% da temperatura.

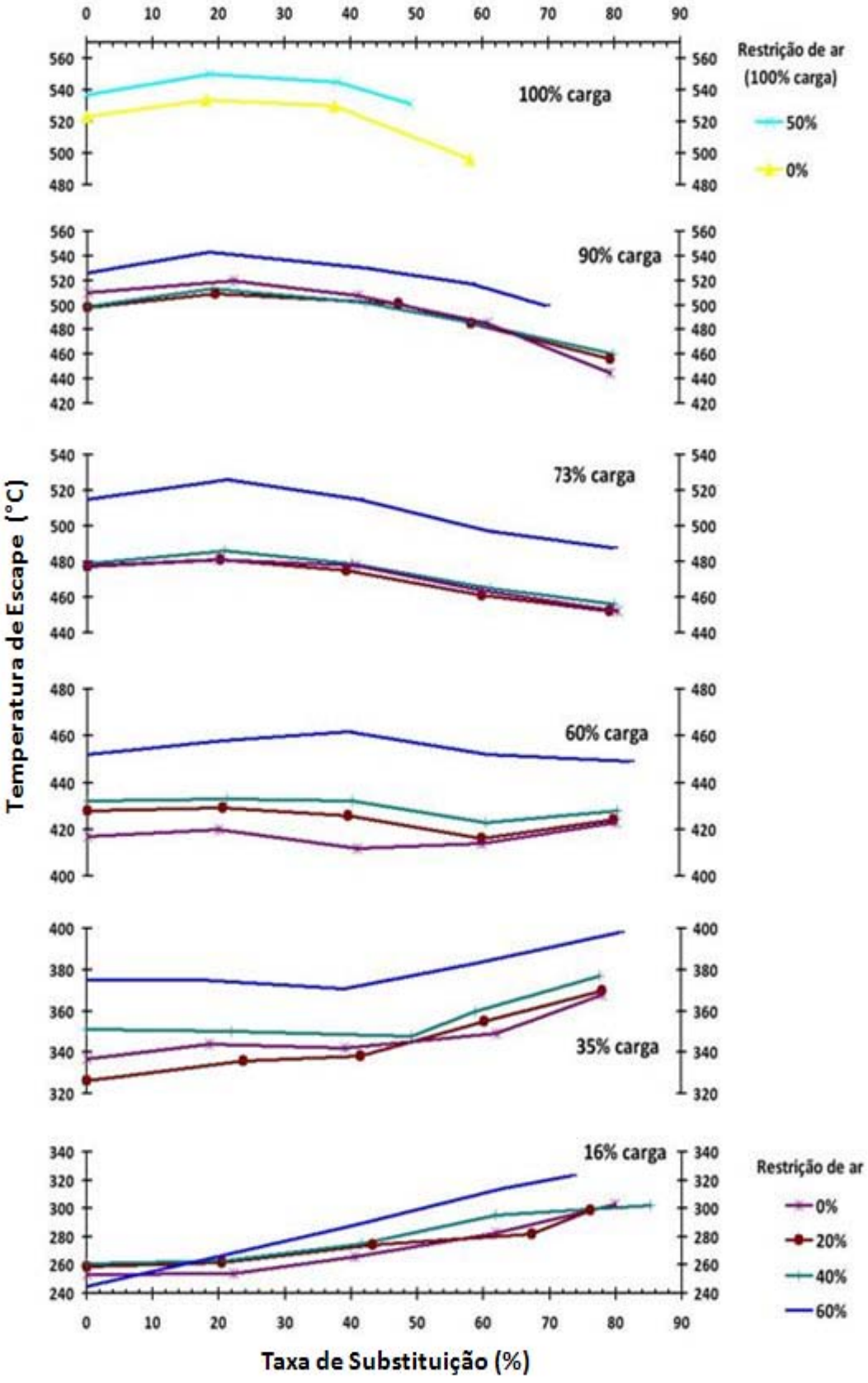


Figura 26: Temperatura de Escape com variações de carga e restrição de ar em função da Taxa de Substituição

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711107/CA

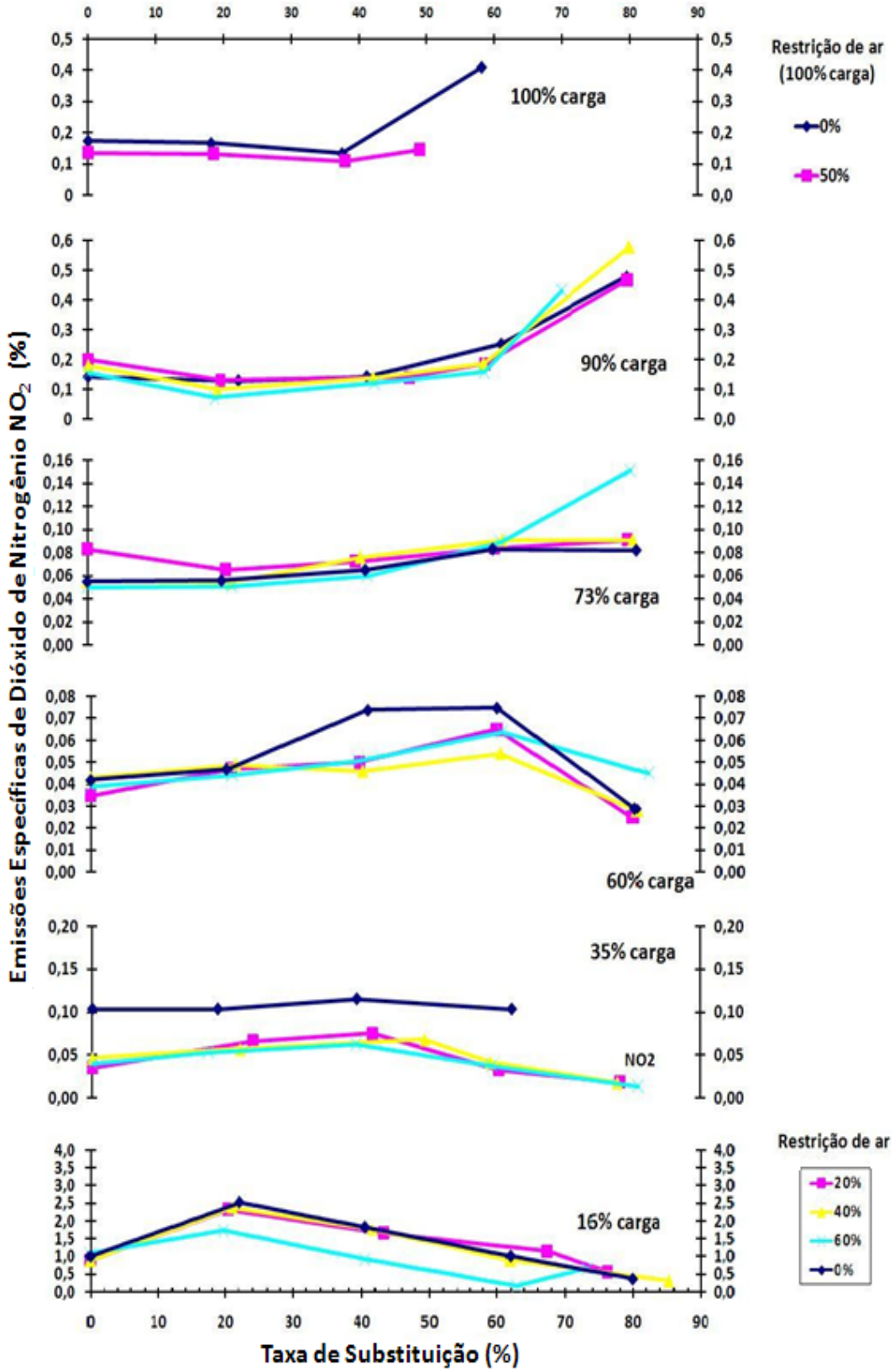


Figura 27: Emissões Específicas de Dióxido de Nitrogênio com variações de carga e restrição de ar em função da Taxa de Substituição

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711107/CA

Figura 27: Estão representadas as emissões específicas de NO_2, com variações de carga e restrição de ar, em função da taxa de substituição. Neste capítulo não mostramos a formação de NO, devido a problemas durante o ensaio com a célula do Testo de medição do NO em 16% de carga. Portanto, apenas as medidas de NO_2 foram consideradas como fator de grandeza nas emissões de óxidos de nitrogênio.

Na figura, apresentamos uma queda nas emissões de NO_2 com 16%, 35% e 60% de carga, e somente a partir de 73% é observada uma tendência de aumento das emissões. Isso ocorre a partir do aumento das emissões de óxidos de nitrogênio, que estão direitamente ligadas ao aumento da temperatura dos gases de escape. Desta maneira, explica-se a queda das emissões em baixas cargas, e um aumento em altas cargas. O mesmo ocorre com a temperatura dos gases de escape.

Figura 28: São analisadas as emissões específicas de monóxido de carbono (CO) para 61% e 100% de carga, com restrições de ar, em função da variação de taxa de substituição. Nosso caso mais representativo está em 60% de carga, pois quando não ocorre a restrição de ar, é observado um aumento de 80% das emissões, com máxima taxa de substituição. Comparando com o modo diesel normal, onde a queda de emissão ocorre quando há um aumento da razão de equivalência, originando uma melhor combustão, é observado também uma maior quantidade de combustível queimado.

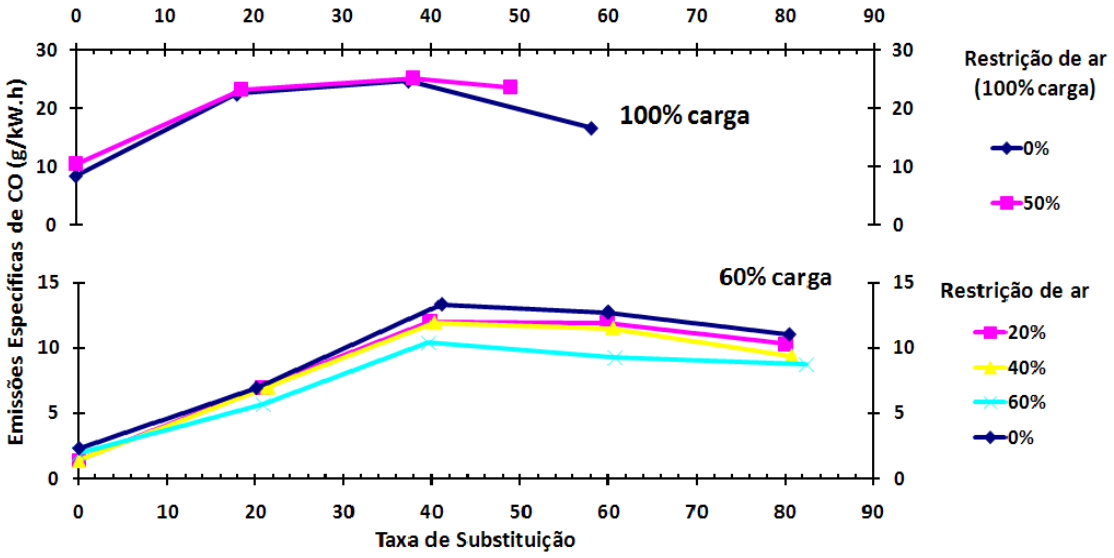


Figura 28: Emissões Específicas de Monóxido de Carbono de 60% e 100% de carga com restrição de ar, em função da Taxa de Substituição

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711107/CA

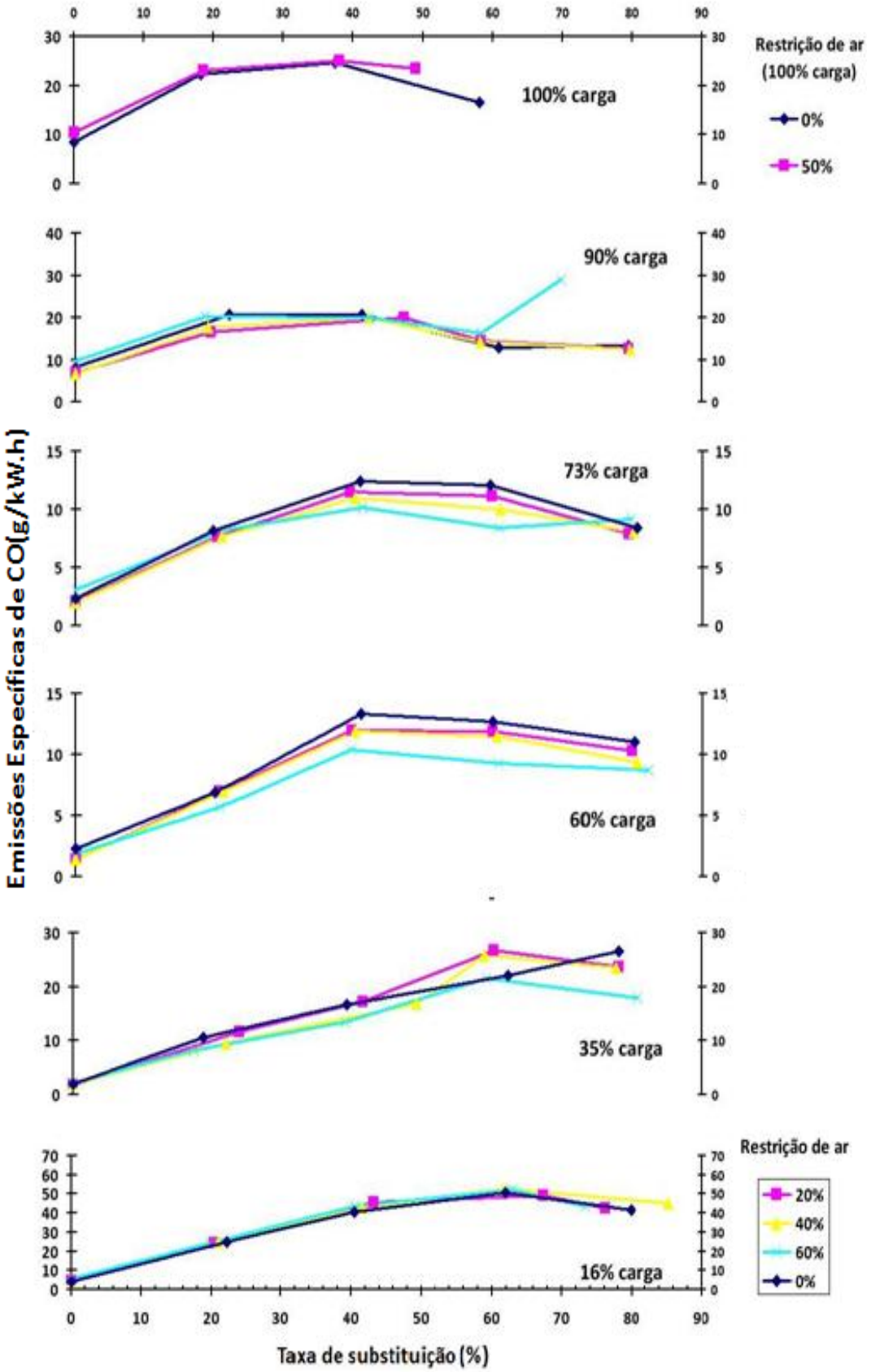


Figura 29: Emissões Específicas de Monóxido de Carbono com variações de carga e restrição de ar, em função da Taxa de Substituição

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711107/CA

Figura 29: São apresentadas as emissões de CO em todas as cargas, com variações de restrição de ar em função da taxa de substituição, onde em 16%, e 35% ocorreu um aumento nas emissões, com a taxa de substituição. Já com a restrição do ar, acorre uma diminuição nas emissões. Em 73% e 90% de carga, se tem a mesma tendência, porém a diminuição mais notável, com 20% de emissões esteve com 73% de carga, com 60% de substituição.

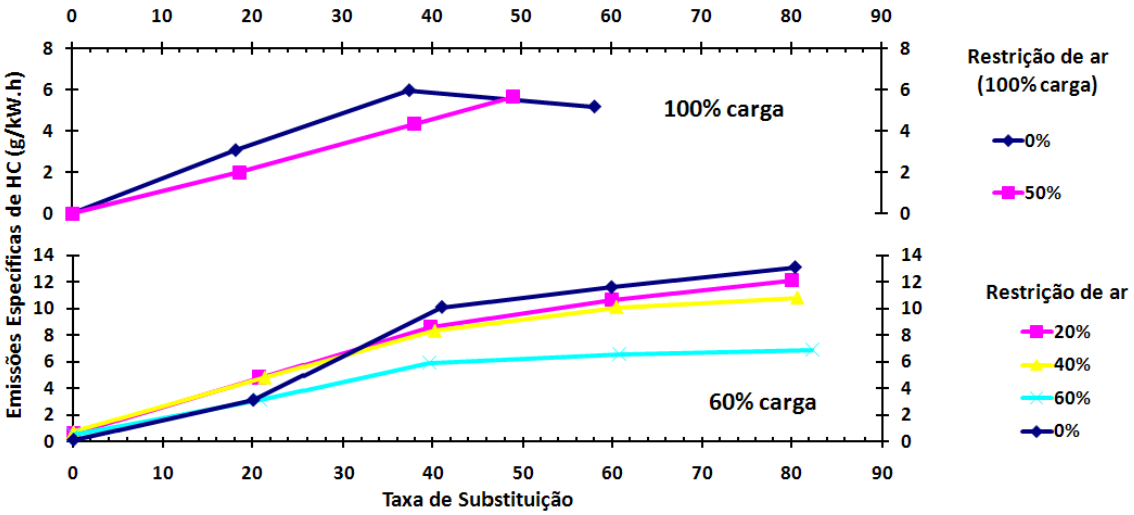


Figura 30: Emissões Específicas de Hidrocarbonetos não queimados com 60% e 100% de carga, e com restrição de ar em função da Taxa de Substituição

Figura 30: São apresentadas as emissões específicas de HC com diferentes restrições de ar, e com variações nas taxas de substituição para 60% e 100% de carga; Sendo elas as mais representativas, onde obtivemos uma queda de 50% de emissões, com a máxima restrição de ar. Para uma carga de 60%, e, considerando as emissões de HC muito elevadas, à proporção que aumentamos a taxa de substituição, se consegue diminuir, de maneira favorável, as emissões de HC. Mesmo estando com 100% de aplicação de restrição de ar (50%), é possível diminuir em 40% as emissões de HC, com uma taxa de substituição de 40%, além de ter a tendência de diminuir as outras taxas.

No modo diesel puro, as emissões de HC são quase zero. Com o aumento da taxa de substituição, mais radicais de HC são agregados à mistura (ar-gás). Com a restrição de ar, foi obtida uma melhora na queima dos radicais HC.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711107/CA

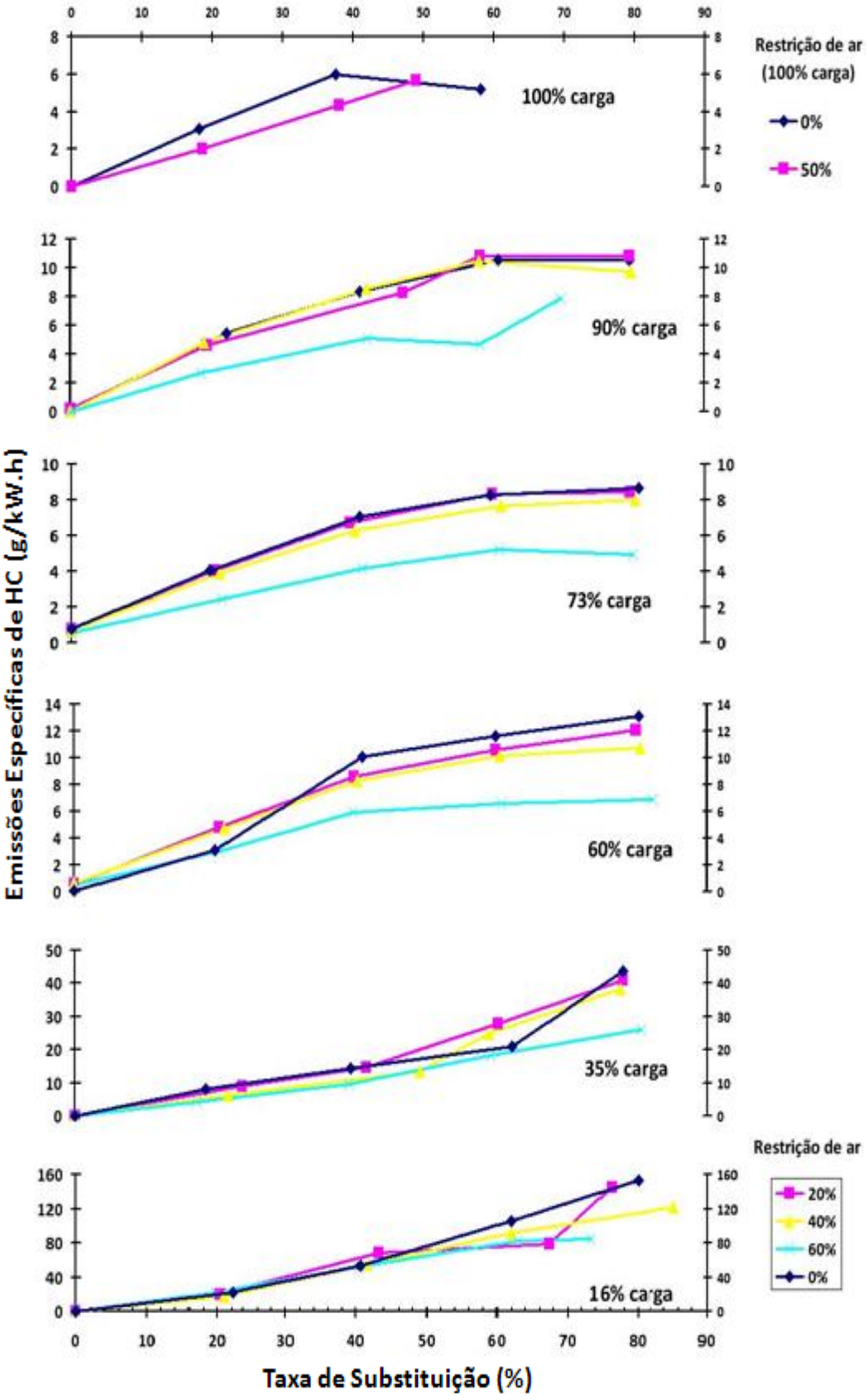


Figura 31: Emissões Específicas de Hidrocarbonetos não queimados com variações de carga e restrição de ar, em função da Taxa de Substituição

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711107/CA

Figura 31: Está representado as Emissões específicas de HC não queimados, para diferentes restrições de ar e taxas de substituição, em todas as cargas. É sabido que as emissões de HC no modo Diesel-Gás são um problema, especialmente em cargas baixas. Em baixas cargas, esse problema é diminuído aplicando-se o método de restrição de ar, sendo avaliado todas as cargas. O resultado foi que, em todas elas existe uma tendência de diminuição de hidrocarbonetos, onde em 35% de carga se estima uma redução de 35%, para uma máxima taxa de substituição. Em 73% de carga, tem-se uma diminuição de 40% das emissões, e com 90% de carga, uma redução de 18% para as máximas taxa de substituição.

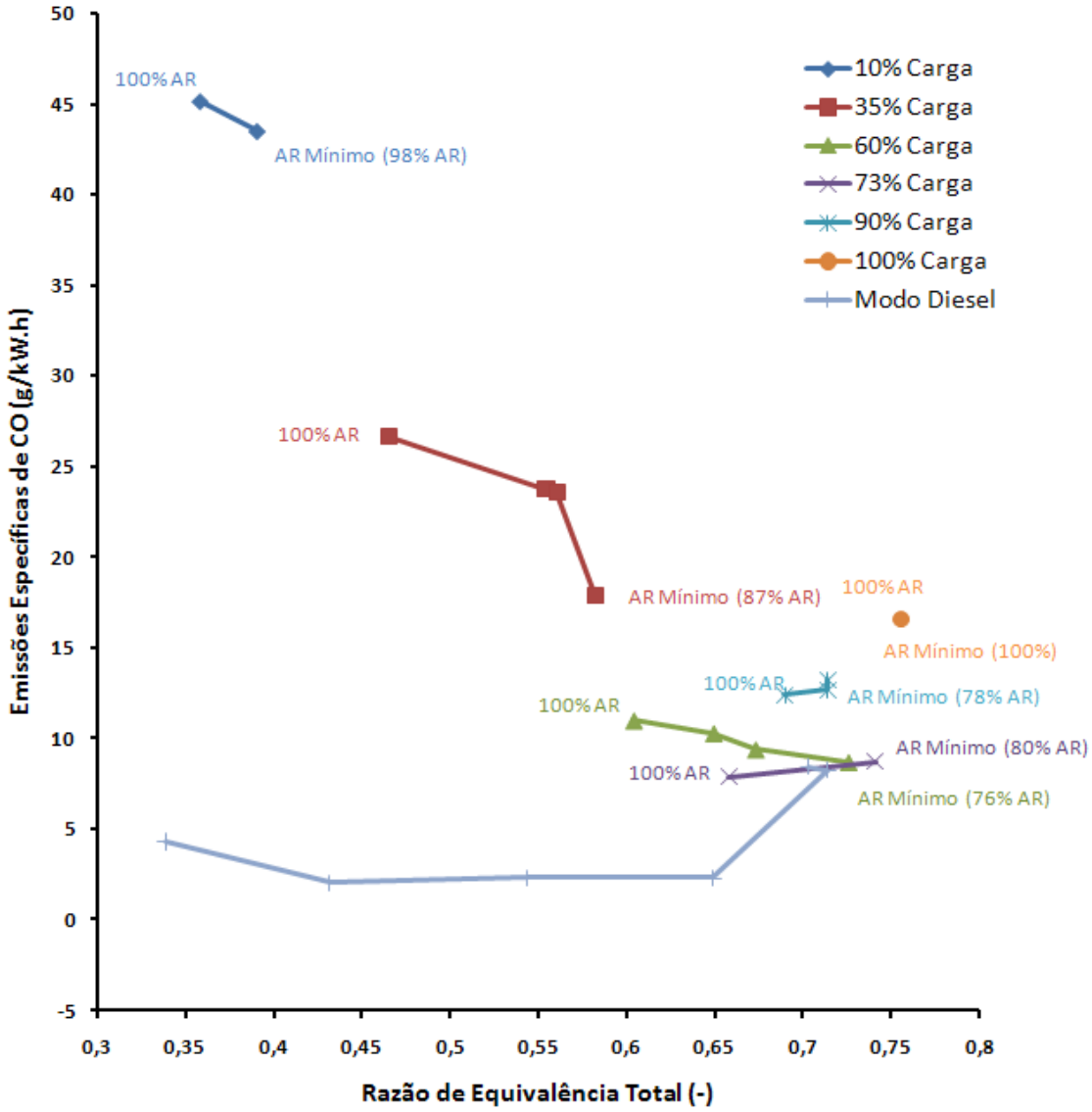


Figura 32: Emissões Específicas de Monóxido de Carbono queimados, com variação de Equivalência Total, para diferentes restrições de ar. Operação Diesel-Gás com máxima taxa de substituição.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711107/CA

Figura 32: São avaliadas as emissões específicas de monóxido de carbono operando com Diesel-Gás, variando a razão de equivalência total com a restrição de ar, e com máxima taxa de substituição. É notável a queda nas emissões de CO à medida que se aumenta a razão de equivalência. O termo AR Mínimo é utilizado para representar a restrição de ar em porcentagem de fluxo de massa (kg/h) (Ar admitido sem restrição / Ar admitido com restrição), onde obtivemos a maior queda de emissões, não sendo sempre esta, a máxima restrição feita.

Para uma carga de 10%, foi obtida uma queda de 6% nas emissões, para uma restrição de ar em 98% de massa; Em 35% de carga, a redução máxima foi de 56%, para uma restrição em massa de ar de 87%; Em 60% de carga, a queda de emissões foi de 36%, para uma restrição de 76% de massa de ar; Em 73%, se teve um aumento de 2% para uma redução de 80% de massa de ar, alcançando, nesse ponto, a menor taxa de emissões específicas de CO, para todo o desempenho do grupo gerador. Tem-se um aumento das emissões em cargas altas, quando a restrição de ar não foi significativa. Porém, se é observado as medidas das emissões de CO no modo Diesel puro, sabendo que as concentrações são pequenas, comparativamente ao modo Diesel-Gás, funcionando com máxima taxa de substituição, é provável que atinja uma relação de equivalência de 0.72. Quando alcançada esta relação, as emissões ficam muito próximas, quase iguais, a uma operação Diesel- Gás com 73% de carga.

É demonstrada a queda de emissões de CO de forma geral. Usando o método de restrição de ar, há uma melhora na combustão e na oxidação do combustível subministrado, quando se aumenta a razão de equivalência total.

Na **Figura 33**: São analisadas as emissões específicas de hidrocarbonetos não queimados, variando a razão de equivalência total, com restrições de ar, e operando com Diesel-Gás na máxima taxa de substituição. É observada uma queda geral das emissões de HC, à medida que se mantém a restrição de ar e aumenta-se a relação de equivalência, resulta em uma mescla mais rica. Nesta mistura, o termo de AR Mínimo fica relacionado àquela restrição de ar, em porcentagem de massa (Ar admitido sem restrição / Ar admitido com restrição), onde é obtida uma maior queda de emissões, não sendo esta porcentagem sempre a máxima restrição feita. Para uma carga de 10%, é obtida uma queda de 23% nas emissões, para uma restrição de 97% de massa em ar. Com 35% de carga, o resultado foi uma queda de 47% nas emissões, para uma restrição de 87% de ar

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711107/CA

em massa. Em 60% de carga, foi adquirida uma queda de 80% de emissões, para uma restrição de 76% de ar em massa. Em 73% de carga, o resultado foi de uma queda de 60% de emissões, para uma restrição de 71% de ar em massa. Para 90% de carga, tem-se uma queda de 60% de emissões, para uma restrição de 70% de ar em massa; e para 100% de carga a queda foi de 50% de emissões, para com 82% em massa de restrição de ar.

Nota-se que foi obtido um grande ganho em relação a emissões. Com o uso do método de restrição de ar, para a diminuição de hidrocarbonetos não queimados, aumentou-se a queda de emissões de CO em porcentagem. Além disso, o modo diesel puro não foi avaliado, pois as emissões de hidrocarbonetos são próximas à zero. Operando no modo diesel, quase não se têm presença de radicais HC.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711107/CA

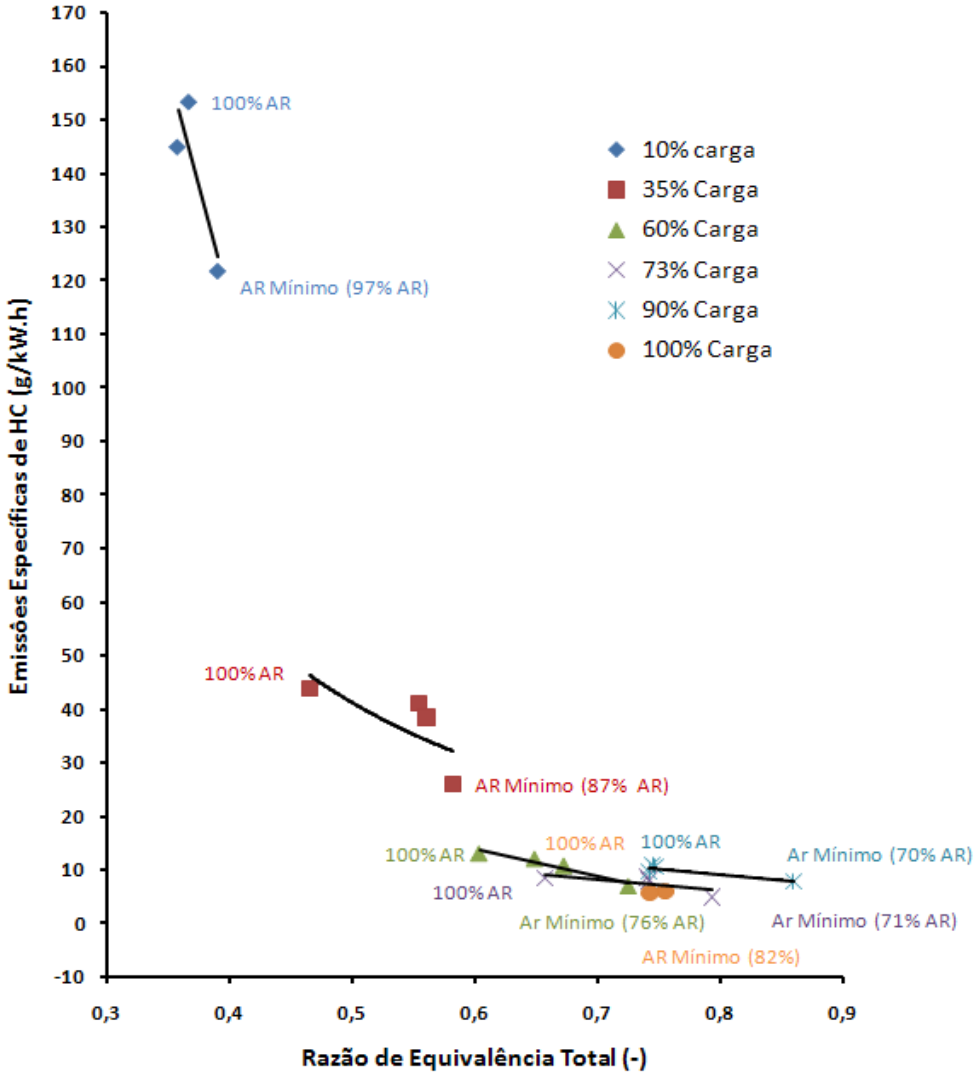


Figura 33: Emissões Específicas de Hidrocarbonetos não queimados, com variação de Equivalência Total, para diferentes restrições de ar. Operação Diesel-Gás com máxima taxa de substituição.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0711107/CA