

5. Resultados e discussões

Nesta seção são apresentados os resultados referentes a simulação da combustão do gás natural em condições típicas de um alto forno, ou seja, com comburente (ar) pré-aquecido a altas temperaturas e enriquecido com oxigênio. Os resultados obtidos são provenientes do software CHEMKIN, aplicando o mecanismo cinético GRI-Mech, a escolha desse mecanismo cinético é justificada pela representatividade correta da maioria dos resultados experimentais disponíveis para a combustão do gás natural.

Através do estudo paramétrico é possível compreender os efeitos das mudanças dos parâmetros do projeto nos requisitos de desempenho, determinar os valores dos parâmetros do projeto que satisfaçam os requisitos operacionais estabelecidos e evitar prejuízos em termos de produtividade e desperdício de combustível e comburente.

No processo do alto forno, quanto maior a temperatura de chama mais fácil é a injeção de combustíveis auxiliares, maior a produtividade e menores são os consumos específicos de ar de sopro e de coque ou carvão vegetal. Assim, os valores máximos possíveis de temperatura de chama são sempre objetivados na operação de altos fornos. A temperatura de chama em um processo de combustão é diretamente proporcional a, pelo menos, duas variáveis: a concentração de oxigênio no ar de combustão e a temperatura do ar de combustão.

5.1

Influência do enriquecimento de O₂ do ar de combustão na temperatura de chama adiabática

A **figura 14** apresenta o resultado referente a simulação da combustão do GN com 2,00Nm³/seg com ar pré aquecido a 1020°C com vazão de 72,45 Nm³/seg com percentuais de enriquecimento de oxigênio distintos: 0,44%, 3,21%

e 4,69% e ar sem enriquecimento de O₂ (0,00% O₂), no sentido de verificar o efeito do aumento do percentual de enriquecimento de O₂ no ar de combustão na temperatura de chama adiabática. Verifica-se que para essas condições a temperatura de chama adiabática requerida ao processo, ou seja, acima de 2200°C é alcançada e o aumento no percentual de enriquecimento de O₂ no ar possibilita um aumento considerável na temperatura de chama adiabática.

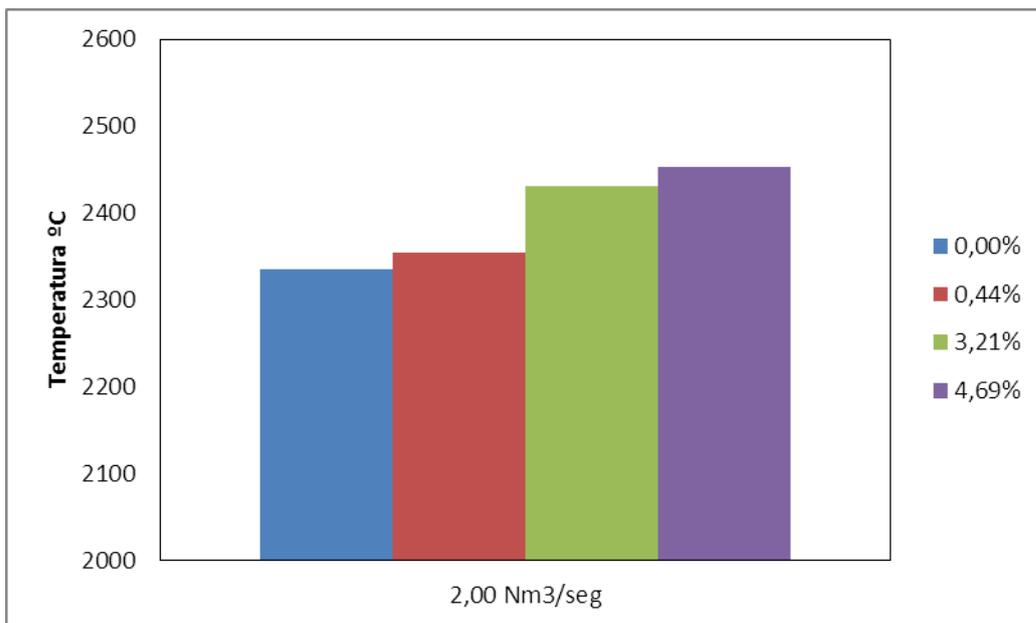


Figura 14: Influência do enriquecimento de O₂ do ar de combustão na temperatura de chama adiabática. Vazão de GN: 2,00Nm³/seg. Vazão do ar de combustão: 72,45 Nm³/seg. Temperatura de aquecimento do ar: 1020°C.

A **figura 15** apresenta os resultados obtidos a partir da simulação da combustão do gás natural utilizando vazão de GN constante: 0,18 Nm³/seg, menor vazão de gás natural aplicada no alto forno da siderúrgica em questão, vazão do ar de combustão variando entre 28,92 – 106,55 Nm³/seg, vazões provenientes da siderúrgica, com três percentuais de enriquecimento de oxigênio distintos: 0,44%, 3,21%, 4,69%, esse percentual representa respectivamente o menor, médio e o maior enriquecimento de oxigênio do ar de combustão da siderúrgica em questão. Nesta figura vê-se que o aumento do percentual de oxigênio para vazões de sopro de ar constante não influenciou no aumento da temperatura de chama adiabática. Verifica-se ainda que o aumento da vazão do ar de combustão acarreta na redução

da temperatura de chama adiabática, sendo que foi possível temperatura máxima de 1575°C a partir da combustão do GN com vazão de 0,18Nm³/seg e vazão de 28,92Nm³/seg do ar de combustão e temperatura mínima de 1176°C a partir da combustão do GN com vazão de 0,18 Nm³/seg e vazão de 106,55Nm³/seg do ar de combustão.

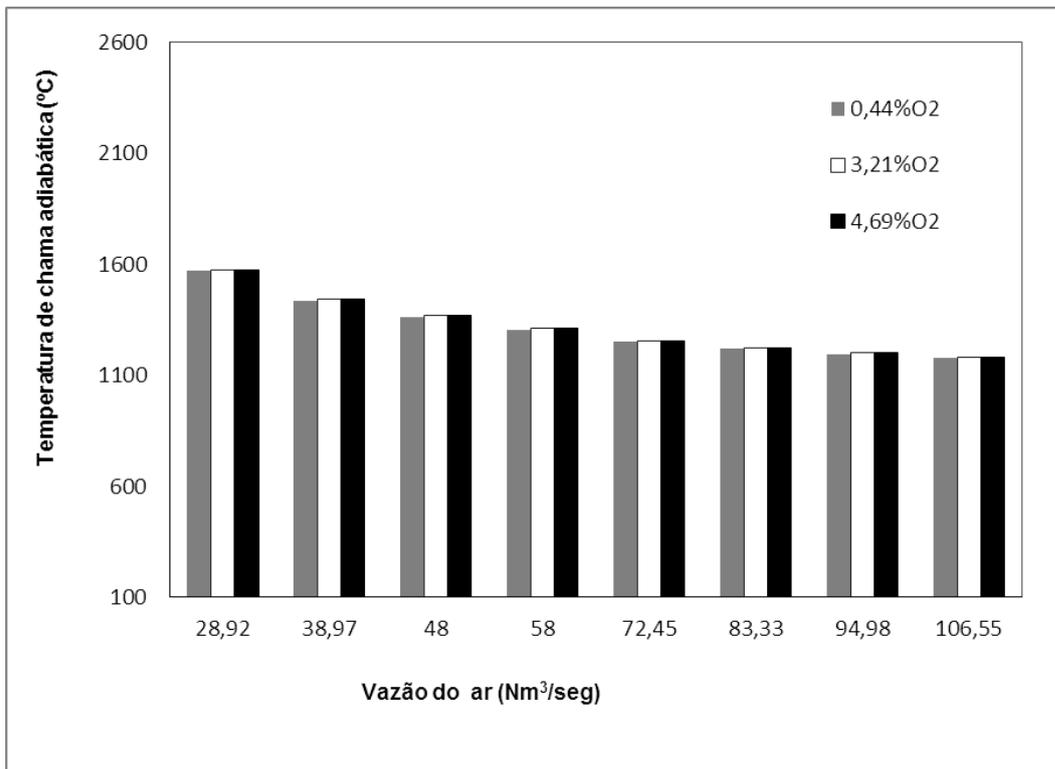


Figura 15 – Efeito do enriquecimento de oxigênio no ar de combustão. Ar pré-aquecido a 1020°C. Vazão de GN constante: 0,18Nm³/seg.

A **tabela 5** apresenta dados referentes a riqueza da mistura para as condições citadas acima, ou seja, mistura com 0,18Nm³ de GN e ar com 28,92Nm³ – 106,55Nm³, contendo distintos percentuais de enriquecimento de oxigênio: 0,44%, 3,21% e 4,69%. Como a temperatura e a composição dos produtos da combustão é diferente para misturas pobres e ricas de combustível, e porque a razão estequiométrica combustível/ar depende da composição do combustível, a proporção da atual relação combustível/ar para a relação estequiométrica, é um parâmetro mais informativo para definir composição da mistura.

Estabelecendo uma relação entre a riqueza da mistura (tabela 5) e a temperatura de chama adiabática (figura 15), verifica-se que para misturas entre 0,0150-0,0639, ou seja, pobres em combustíveis e ricas em comburente o aumento do percentual de oxigênio não influencia num aumento da temperatura de chama adiabática e, além disso, a medida que a mistura torna-se mais pobre em combustível, ou seja, a medida que aumenta-se a vazão do sopro de ar, a temperatura de chama adiabática é reduzida. Nota-se que para essas condições de processo não há possibilidade de alcançar temperatura de chama adiabática desejável ao processo em alto forno siderúrgico uma vez que a temperatura de chama adiabática mínima requerida na zona de combustão consiste em 2200°C.

Tabela 5 – Riqueza da mistura para distintos % de enriquecimento de O₂

Erro! Vínculo não válido.

A **figura 16** apresenta os resultados da temperatura de chama adiabática, a partir da combustão de GN, aplicando 2,00 Nm³/seg de combustível, essa vazão corresponde a vazão média de GN aplicada nas ventaneiras do alto forno da siderúrgica em questão, e vazão do sopro de ar variando entre 28,92 – 106,55Nm³/seg, enriquecido com: 0,44%, 3,21% e 4,69% de O₂. Verifica-se que a partir de 28,92Nm³/seg a 72,45Nm³/seg do ar de combustão, o aumento do percentual de enriquecimento de oxigênio do ar, afetou a temperatura de chama adiabática, para essas condições a riqueza da mistura variou de 0,24 – 0,70, conforme pode ser visto na **tabela 6**. A partir de 58 Nm³/seg de ar enriquecido com 3,21% e 4,69% de oxigênio é possível atingir temperatura de chama adiabática acima de 2200°C, para ar enriquecido com 0,44% de oxigênio só foi possível alcançar temperatura de chama adiabática a partir de 72,45Nm³/seg de vazão do ar de combustão.

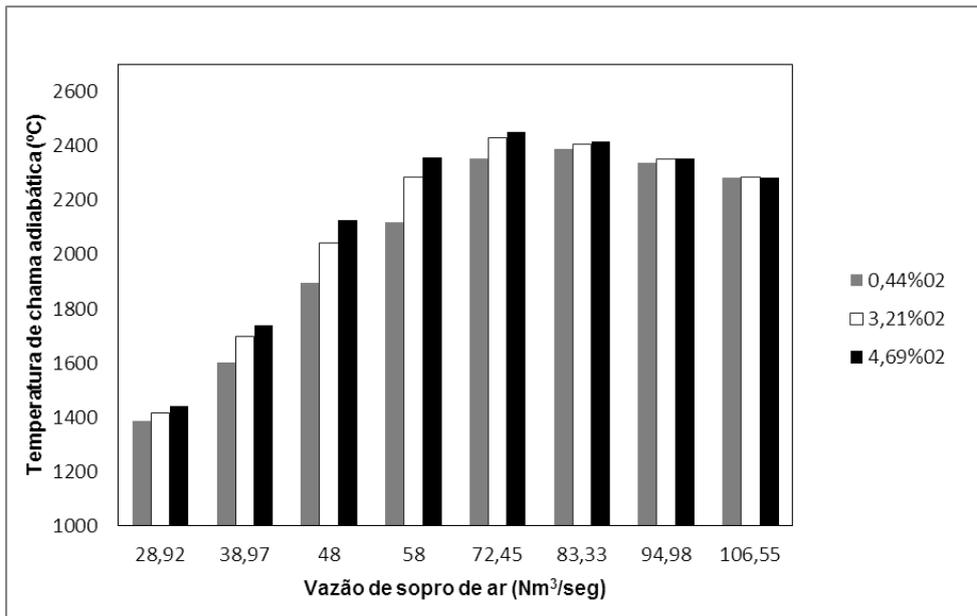


Figura 16 – Efeito do enriquecimento de oxigênio no ar de combustão. Ar pré-aquecido a 1020°C. Vazão de GN constante: 2,00Nm³/seg.

Estabelecendo uma relação entre a riqueza da mistura (ver tabela 6) e a temperatura de chama adiabática (ver figura 16), verifica-se que é possível obter temperatura de chama adiabática acima de 2200°C a partir da riqueza da mistura entre 0,166 – 0,319, para misturas mais ricas em combustível com variação de riqueza entre 0,351 – 0,705 não foi possível alcançar a temperatura de chama adiabática desejável ao processo

Tabela 6 – Riqueza da mistura para distintos % de enriquecimento de O2 **Erro! Vínculo não válido.**

A **figura 17** apresenta o resultado da temperatura de chama adiabática a partir da combustão de GN, com vazão constante de 3,92 Nm³/seg, essa vazão representa a vazão máxima de GN aplicada nas ventaneiras do alto forno da siderúrgica em questão, vazão de ar de combustão variou entre 28,92 – 106,55 Nm³/seg, ar enriquecido com oxigênio: 0,44, 3,21, 4,69%, representam o mínimo, o médio e o máximo enriquecimento aplicado na siderúrgica. Verifica-se que o aumento do percentual de enriquecimento de oxigênio aumenta consideravelmente a temperatura de chama adiabática em todas as faixas de vazões de ar de combustão. A temperatura de chama adiabática desejável, ou seja, acima de 2200°C foi alcançada a partir da vazão de 94,98Nm³/seg de ar

enriquecido com 4,69% de oxigênio. Para ar enriquecido com 0,44% e 3,21 de oxigênio a temperatura de chama adiabática foi alcançada somente a partir de $106,55\text{Nm}^3/\text{seg}$ de sopro de ar.

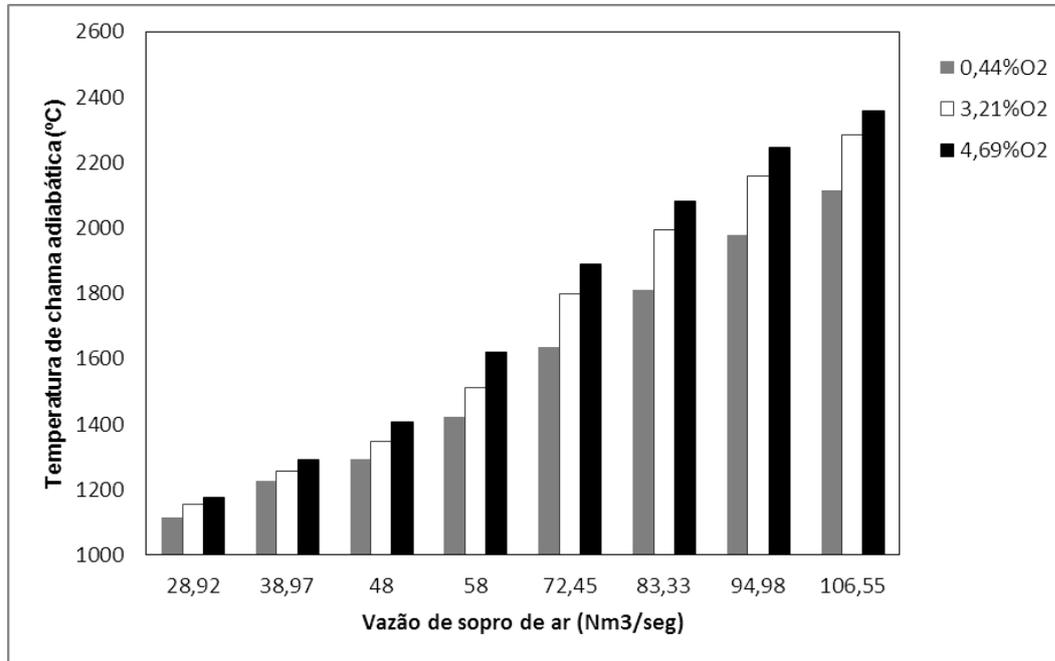


Figura 17 – Efeito do enriquecimento de oxigênio no ar de combustão. Ar pré-aquecido a 1020°C . Vazão de GN constante: $3,92\text{Nm}^3/\text{seg}$.

A **tabela 7** apresenta a riqueza da mistura para $3,00\text{Nm}^3$ de GN e ar de combustão variando entre $28,92 - 106,55\text{Nm}^3$ com distintos percentuais de oxigênio.

Estabelecendo uma relação entre a riqueza da mistura (tabela 7) e a temperatura de chama adiabática (figura 17), verifica-se que a faixa de riqueza da mistura entre 0,32 – 0,36 proporciona temperatura de chama adiabática acima de 2200°C enquanto que a faixa entre 0,38 – 1,38 não proporciona temperatura desejável ao processo.

Tabela 7 – Riqueza da mistura para distintos % de enriquecimento de O2 **Erro!**
Vínculo não válido.

5.2

Efeito do aquecimento do ar de combustão na temperatura de chama adiabática

A **figura 18** apresenta o resultado da temperatura de chama adiabática a partir da combustão do GN com vazão constante de $0,18 \text{ Nm}^3/\text{seg}$ e vazão de ar de combustão variando entre $28,92 - 106,55 \text{ Nm}^3/\text{seg}$, com 3,21% de enriquecimento de oxigênio, esse valor corresponde a média do percentual de enriquecimento aplicado no alto forno da siderúrgica em questão, a temperatura de aquecimento do ar foi de 1020 e 1250°C , corresponde a temperatura mínima de aquecimento do ar de combustão da siderúrgica em questão e a temperatura máxima de aquecimento do ar.

Verifica-se que o aumento de 230°C na temperatura de aquecimento do ar de combustão acarretou num aumento considerável da temperatura de chama adiabática, para todas as vazões de ar de combustão, porém mesmo com esse aumento do aquecimento do ar não foi possível alcançar a temperatura mínima desejável ao processo: 2200°C .

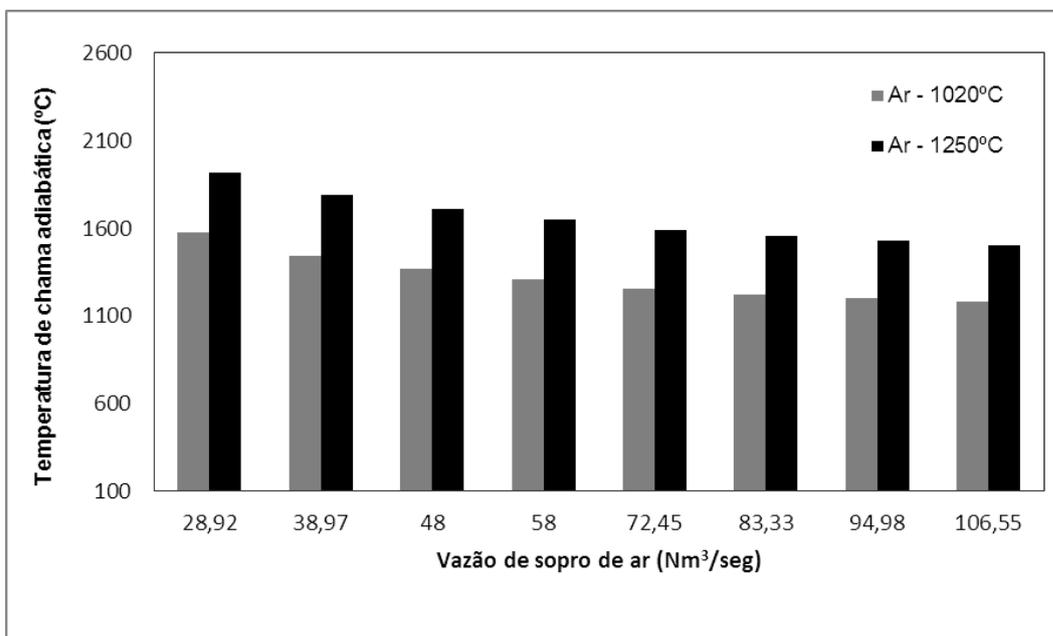


Figura 18 – Efeito da temperatura de aquecimento do ar na temperatura de chama adiabática. Ar pré aquecido a 1020°C e 1250°C , com 3,21% de enriquecimento de O_2 . Vazão de GN constante: $0,18 \text{ Nm}^3/\text{seg}$

A **figura 19** apresenta o resultado referente ao efeito do aumento da temperatura de aquecimento do ar na temperatura de chama adiabática. Nesse caso a vazão de GN foi de $2,00 \text{ Nm}^3/\text{seg}$, que corresponde a vazão média de GN do processo da siderúrgica em questão, e a vazão do ar de combustão: $28,92 - 106,55 \text{ Nm}^3/\text{seg}$. O ar foi enriquecido com 3,21% de oxigênio e aquecido com duas temperaturas distintas: 1020°C e 1250°C . Verifica-se que a partir de $58 \text{ Nm}^3/\text{seg}$ de ar de combustão pré aquecido a 1020 e 1250°C foi possível obter temperatura de chama adiabática acima de 2200°C .

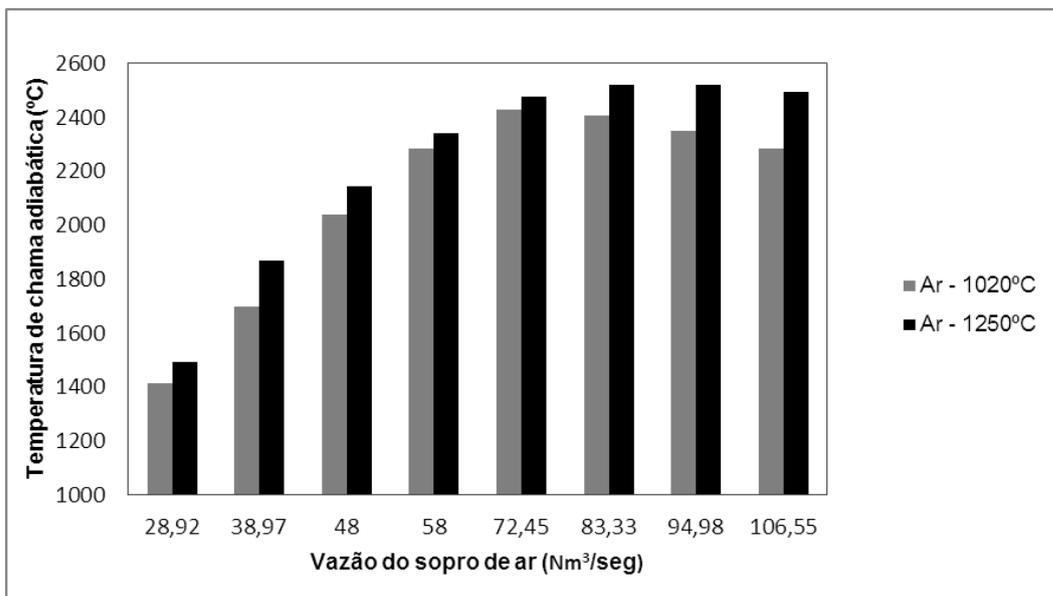


Figura 19 – Efeito da temperatura de aquecimento do ar na temperatura de chama adiabática. Ar pré aquecido a 1020°C e 1250°C , com 3,21% de enriquecimento de O_2 . Vazão de GN constante: $2,00 \text{ Nm}^3/\text{seg}$

A **figura 20** apresenta o resultado da temperatura de chama adiabática proveniente da combustão de GN com vazão de $3,92 \text{ Nm}^3/\text{seg}$, maior vazão de GN aplicada no processo do alto forno, da siderúrgica em questão, ar de combustão com vazão variando entre $28,92 - 106,55 \text{ Nm}^3/\text{seg}$, 3,21% de enriquecimento de oxigênio e temperatura de aquecimento: 1020°C e 1250°C . Verifica-se que a variação na temperatura de chama adiabática foi desprezível, considerando-se mesma vazão de sopro de ar e temperatura de aquecimento: 1020°C e 1250°C , ou seja, para essas condições de processo não é viável aumentar a temperatura de aquecimento do ar, pois não há efeito na temperatura de chama adiabática.

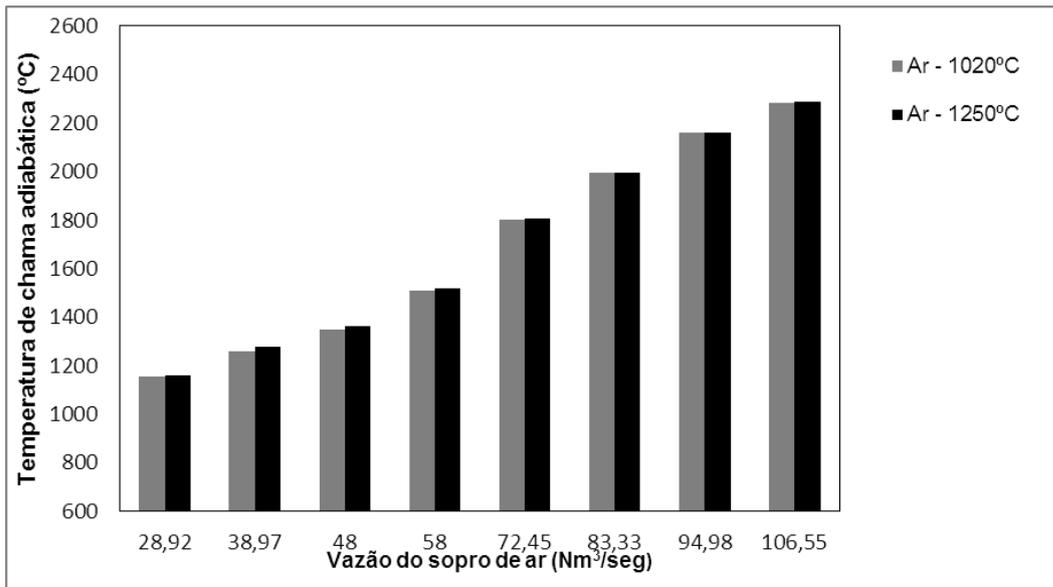


Figura 20 – Efeito da temperatura de aquecimento do ar na temperatura de chama adiabática. Ar pré aquecido a 1020°C e 1250°C, com 3,21% de enriquecimento de O₂. Vazão de GN constante: 3,92 Nm³/seg

5.3

Efeito da vazão de GN na temperatura de chama adiabática

A **figura 21** apresenta o resultado simulado da combustão de GN com cinco vazões distintas: 2,00 Nm³/seg, 1,00 Nm³/seg, 0,5Nm³/seg, 0,18Nm³/seg e 0,000000001 Nm³/seg. Enquanto que a vazão do ar de combustão manteve-se constante: 72,45Nm³/seg. Ar aquecido com temperatura de 1020°C e sem enriquecimento de O₂.

Verifica-se que a temperatura de chama adiabática, desejável ao processo, ou seja, acima de 2200°C é alcançada nas condições em que a vazão do GN é máxima: 2,00Nm³/seg. Nota-se a redução da temperatura de chama adiabática, a medida em que a vazão de GN é reduzida, sendo que para vazão mínima de GN (0,000000001Nm³/seg) o valor da temperatura de chama adiabática foi 1020°C, ou seja, a mesma temperatura de aquecimento de ar. Esses resultados demonstram a contribuição em termos de gradiente de temperatura, a partir da injeção de GN nas regiões em frente às ventaneiras dos altos fornos siderúrgicos.

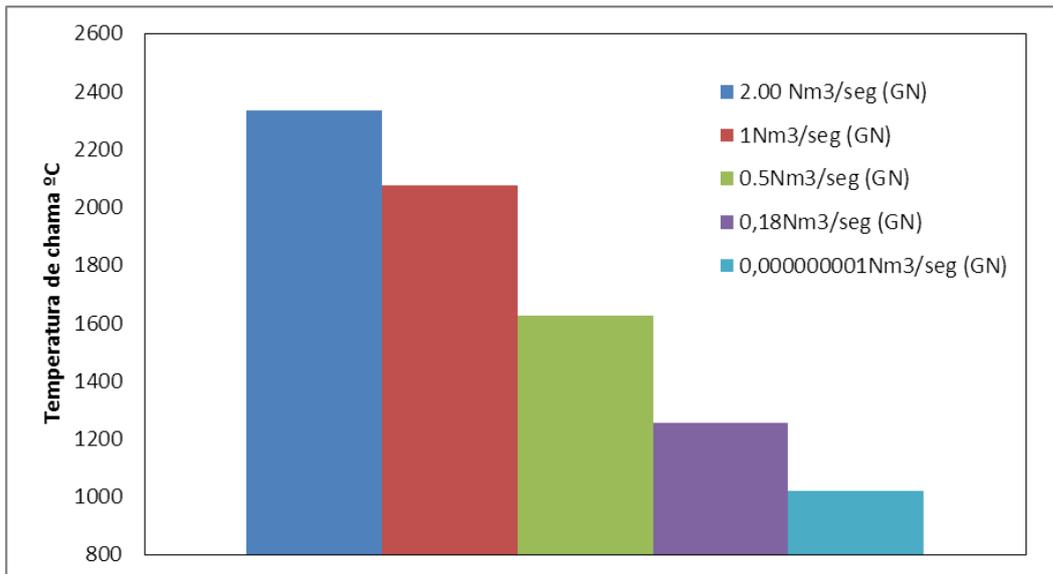


Figura 21 – Efeito da vazão de GN na temperatura de chama adiabática. Vazão do ar: 72,45 Nm³/seg. temperatura de aquecimento do ar: 1020°C. Enriquecimento de O₂: 0,00%

5.4

Efeito da formação de CO₂ na temperatura de chama adiabática

A **figura 22** apresenta o resultado referente a produção de CO₂, a partir da combustão de gás natural com ar de combustão pré aquecido a 1020°C, enriquecido com 3,21% de oxigênio, valor médio de enriquecimento de oxigênio do ar de combustão da siderúrgica em questão, vazão do sopro de ar variando entre 28,92 – 106,55 Nm³/seg com vazão de gás natural constante: 0,18 Nm³/seg, para essas condições de vazão de GN e de ar de combustão enriquecido com oxigênio a riqueza da mistura variou entre: 0,0157 – 0,0579 (ver tabela 5). Verifica-se que o aumento da riqueza da mistura proporciona o aumento da produção de CO₂ e aumento da temperatura de chama adiabática, isso é justificado pela exotermicidade das reações de formação do CO₂ a partir da combustão de GN. A produção máxima de CO₂ foi 28428 ppm e a temperatura de chama adiabática máxima foi 1572°C, para essas condições de processo o resultado não é satisfatório, pois a temperatura de chama requerida é no mínimo de 2200°C.

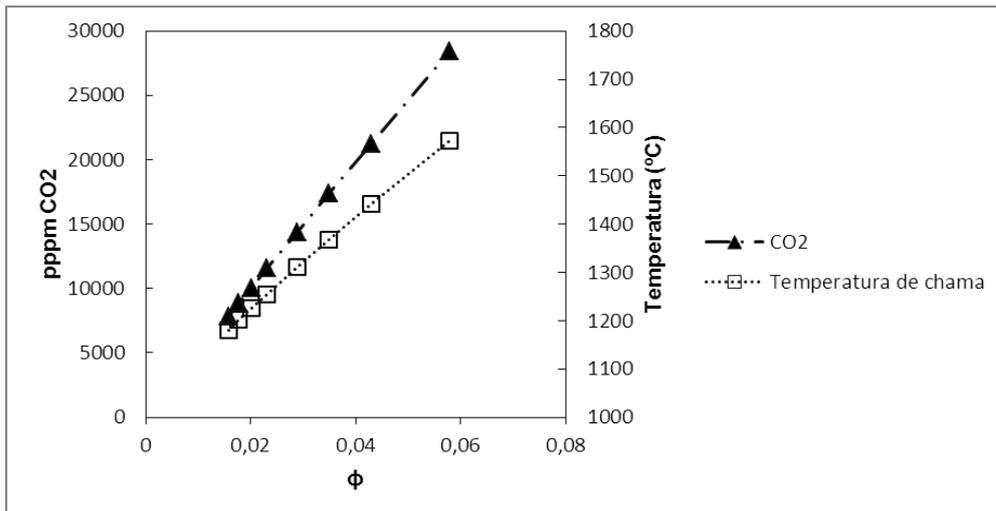


Figura 22 – Influência da formação de CO₂ na temperatura de chama adiabática. Ar de combustão pré aquecido a 1020°C e enriquecido com 3,21% O₂, vazão entre 28,92 – 106,55 Nm³/seg com vazão de GN: 0,18Nm³/seg

A **figura 23** apresenta a produção de CO₂ e a temperatura de chama adiabática a partir da combustão de GN com vazão de 2,00Nm³/seg, vazão média de GN injetado nas ventaneiras do alto forno da siderúrgica em questão, ar de combustão pré aquecido a 1020°C enriquecido com 3,21% O₂, percentual médio de enriquecimento de O₂ da siderúrgica em questão, vazão de sopro de ar entre 28,92 – 106,55 Nm³/seg, dessa forma a riqueza da mistura variou de 0,173 – 0,639 (ver tabela 6). Verifica-se que a temperatura de chama adiabática é proporcional a produção de CO₂, fato justificado pela exotermicidade da reação de formação de CO₂ a partir da combustão de GN. A produção máxima de CO₂ foi 73895 ppm a partir da riqueza da mistura de 0,255, nessa condição foi alcançada a temperatura de chama adiabática máxima: 2430°C. Para mistura com riqueza entre 0,173 – 0,319 a temperatura de chama adiabática é superior a 2200°C, acima de 0,319 a temperatura de chama adiabática é inferior a 2200°C. Dessa forma para o processo de produção de ferro gusa líquido em alto forno, injetando GN pelas ventaneiras como combustível/redutor para alcançar temperatura acima da temperatura mínima requerida ao processo deve-se operar com mistura com riqueza entre 0,173 – 0,319, nas condições de temperatura de aquecimento do ar e enriquecimento de oxigênio descritas acima.

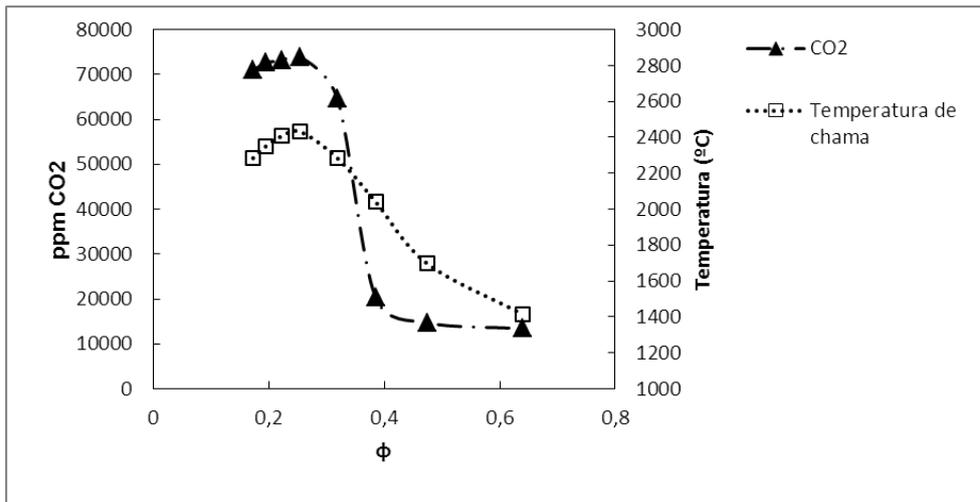


Figura 23 – Influência da formação de CO₂ na temperatura de chama adiabática. Ar de combustão pré aquecido a 1020°C e enriquecido com 3,21% O₂, vazão entre 28,92 – 106,55 Nm³/seg com vazão de GN: 2,00Nm³/seg

Na **figura 24** verifica-se a produção de CO₂ e a temperatura de chama adiabática a partir da riqueza da mistura entre 0,34 – 1,25. Essa faixa de riqueza é proveniente 3,92 Nm³/seg de GN, corresponde a vazão máxima de GN injetado no alto forno da siderúrgica em questão, ar de combustão: 28,92 – 106,55 Nm³/seg, enriquecido com 3,21%O₂, valor correspondente ao enriquecimento médio de oxigênio da siderúrgica em análise, temperatura de aquecimento do ar: 1020°C. Verifica-se a relação entre a produção de CO₂ com a temperatura de chama adiabática em diferentes riquezas de mistura, a medida que a mistura torna-se mais rica em combustível a produção de CO₂ e a temperatura de chama adiabática é reduzida. Esse comportamento é justificado pela exotermicidade da reação elementar de produção de CO₂ a partir da combustão de GN, dessa forma com a redução da produção de CO₂ a temperatura de chama adiabática é reduzida. A temperatura de chama adiabática máxima alcançada foi: 2284°C a partir da riqueza mínima de mistura: 0,34, nessa condição foi produzido o máximo de CO₂. A combustão de GN a partir de 0,34 de riqueza da mistura proporcionou temperatura de chama adiabática acima de 2200°C. Como a temperatura de chama adiabática mínima requerida ao processo é 2200°C, para essas condições de processo, levando em consideração a temperatura de aquecimento do ar e percentual de enriquecimento de oxigênio, a riqueza de mistura mais adequada ao processo é 0,34. A combustão de GN a partir de mistura com riqueza entre 0,38 –

1,25, proporcionou temperatura de chama adiabática abaixo de 2200°C, nesse caso o consumo de combustível é mais elevado, sendo que o excesso de combustível é atingido e o processo não é efetivo, pois a temperatura mínima requerida ao processo não é alcançada, ou seja, a relação custo x benefício desejada não é atendida.

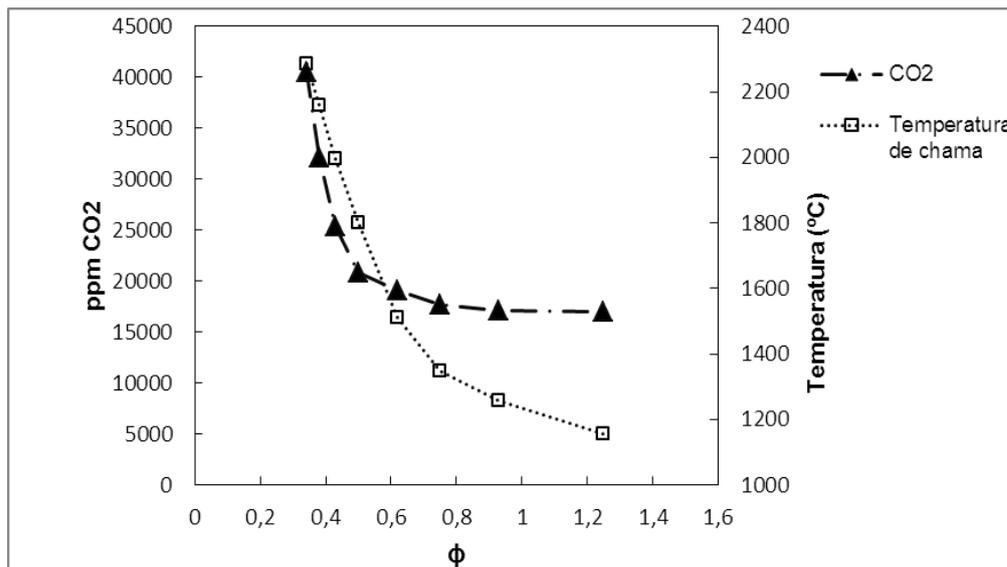


Figura 24 – Influência da formação de CO₂ na temperatura de chama adiabática. Ar de combustão pré aquecido a 1020°C e enriquecido com 3,21% O₂, vazão entre 28,92 – 106,55 Nm³/seg com vazão de GN: 3,92Nm³/seg

5.5

Efeito da riqueza da mistura na produção de CO, H₂, CO₂ e H₂O

Nesta seção é apresentado os resultados referentes a produção dos gases redutores de óxidos de ferro em alto forno siderúrgico: CO e H₂. Esses gases provenientes da combustão de gás natural são de fundamental importância para o processo de produção de ferro gusa, pois substituem parte do carbono proveniente do coque ou carvão vegetal, reduzindo dessa forma o consumo desse combustível/redutor que representa mais de 50% do custo do gusa. Além desses gases redutores é apresentado ainda a produção de CO₂ e H₂O, esses gases podem reagir com o carbono do coque ou carvão vegetal e formar os gases redutores: CO e H₂ e, além disso é importante quantificar a produção desses gases para controlar as variáveis de processo, no sentido de reduzir a produção de CO₂ para minimizar os impactos ambientais provenientes da emissão deste.

A **figura 25** apresenta o resultado referente a produção de H₂ e CO a partir da combustão de gás natural com ar de combustão pré aquecido a 1020°C e enriquecido com 3,21% de O₂. A vazão do GN foi constante: 0,18 Nm³/seg e a vazão do ar de combustão variou entre 28,92 – 106,55 Nm³/seg, para essas condições a riqueza da mistura varia entre 0,0157 – 0,0579 (ver tabela 5). Verifica-se que a produção de H₂ variou entre 1 – 11 ppm enquanto a produção de CO variou entre 37 – 97 ppm, a produção máxima para ambos os casos foi alcançada a partir de mistura com riqueza de 0,0579

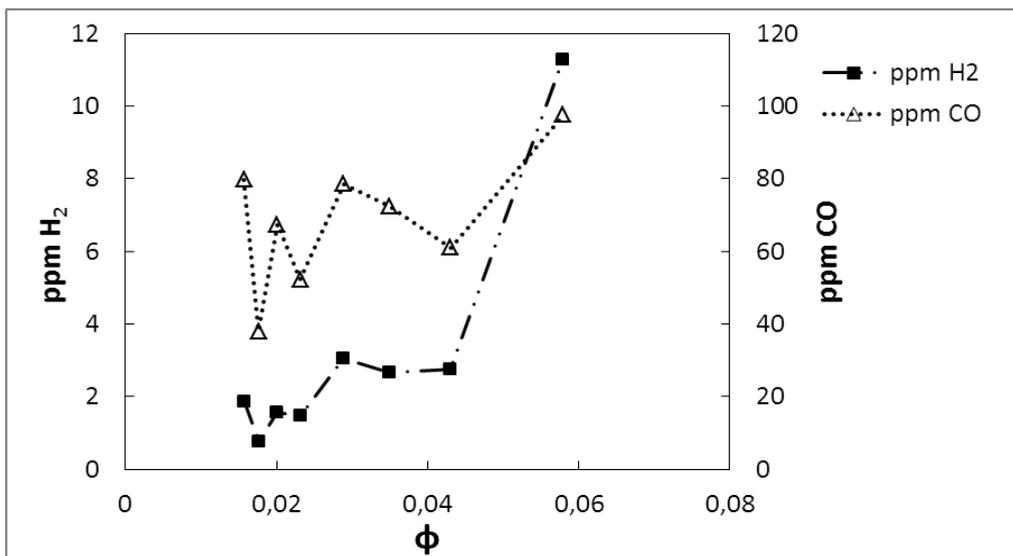


Figura 25 – Produção de H₂ e CO a partir da combustão de GN com ar de combustão pré aquecido a 1020°C e enriquecido com 3,21% de oxigênio. Vazão de GN constante: 0,18Nm³/seg, vazão do sopro de ar variando entre: 28,92 – 106,55 Nm³/seg

A **figura 26** apresenta o resultado referente a produção de H₂ e CO proveniente da combustão de GN com vazão de 2,00 Nm³/seg e ar de combustão enriquecido com 3,21% de O₂, pré aquecido a 1020°C e com vazão entre 28,92 – 106,55 Nm³/seg, para essas condições a riqueza da mistura varia entre 0,173 – 0,639 (ver tabela 6). Verifica-se que para mistura com riqueza mínima de 0,173 foi produzido o mínimo de H₂ e CO: 3633 e 9630 ppm, respectivamente. A produção máxima desses gases redutores foi obtida a partir da mistura com 0,474, onde a produção de H₂ e CO foi respectivamente: 256178 e 165455 ppm. Para mistura com riqueza entre 0,385 – 0,639 a produção de H₂ foi significativamente superior a produção de CO, esse resultado é satisfatório para o processo uma vez que a velocidade de redução dos óxidos de ferro pelo H₂ é significativamente superior a velocidade do CO e, além disso, as reações de redução de óxidos de

ferro por H_2 produzem H_2O enquanto que as reações de redução desses óxidos por CO produzem CO_2 .

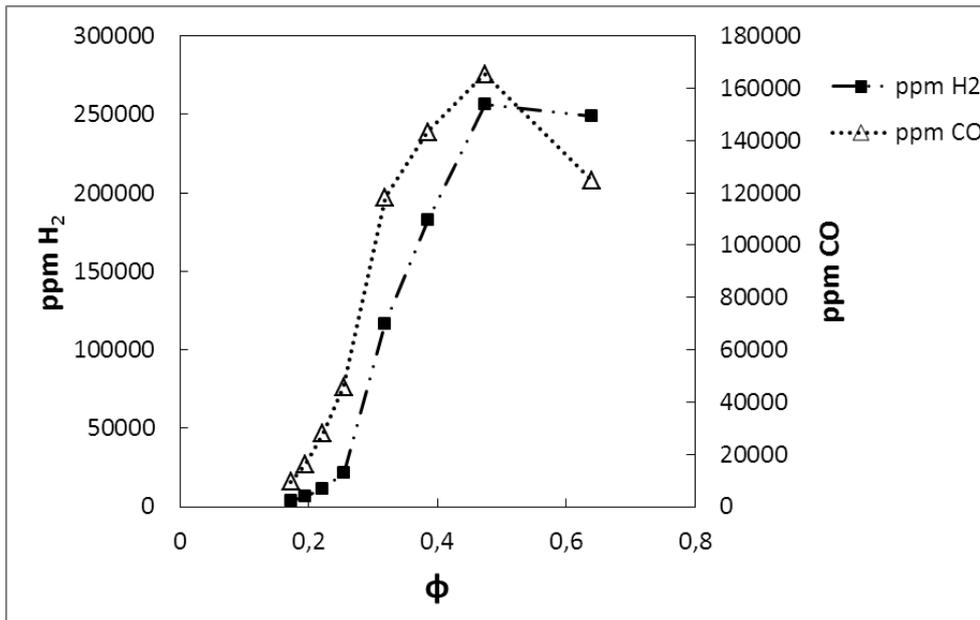


Figura 26 – Produção de H_2 e CO a partir da combustão de GN com ar de combustão pré aquecido a $1020^\circ C$ e enriquecido com 3,21% de oxigênio. Vazão de GN constante: $2,00 \text{ Nm}^3/\text{seg}$, vazão do sopro de ar variando entre: $28,92 - 106,55 \text{ Nm}^3/\text{seg}$

A **figura 27** apresenta o resultado referente a produção de H_2 e CO a partir da combustão de GN com ar de combustão enriquecido com 3,21% O_2 , pré aquecido a $1020^\circ C$. A vazão do GN foi constante: $3,91 \text{ Nm}^3/\text{seg}$ enquanto que a vazão do sopro de ar variou entre $28,92 - 106,55 \text{ Nm}^3/\text{seg}$, para essas condições a riqueza da mistura variou entre: $0,34 - 1,25$ (ver tabela 7). A produção de H_2 e CO oscilou entre $73\,936 - 250\,921 \text{ ppm}$ e $94\,485 - 152\,235$, respectivamente, sendo que a produção máxima desses gases foi proveniente de mistura com riqueza de 0,62. A produção de H_2 foi significativamente superior a produção de CO a partir de mistura com 0,43 a 1,25 de riqueza.

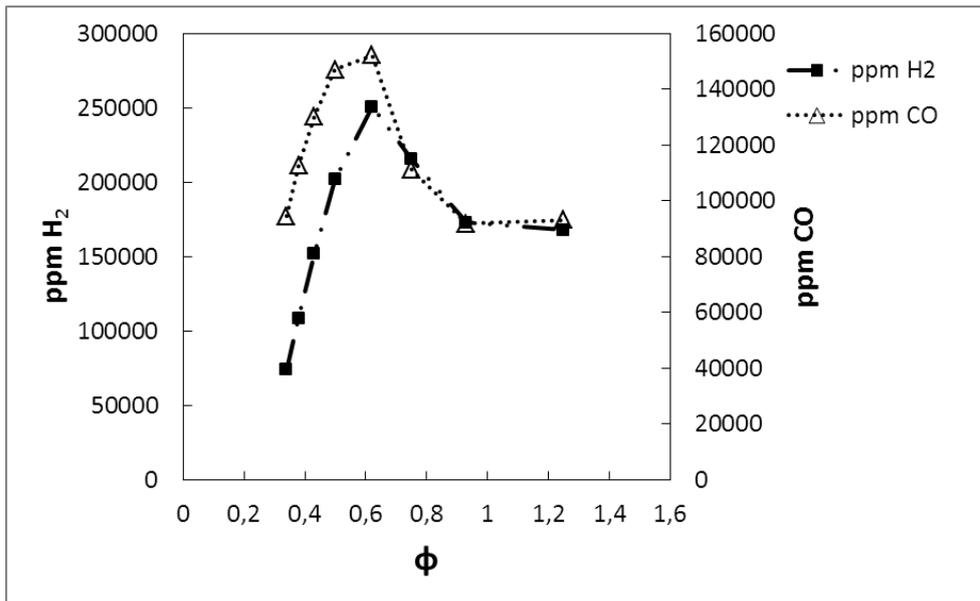


Figura 27 – Produção de H₂ e CO a partir da combustão de GN com ar de combustão pré aquecido a 1020°C e enriquecido com 3,21% de oxigênio. Vazão de GN constante: 3,92Nm³/seg, vazão do sopro de ar variando entre: 28,92 – 106,55 Nm³/seg

A **figura 28** apresenta o resultado da produção de H₂O e CO₂ a partir da combustão de GN com ar de combustão enriquecido com 3,21% O₂, pré aquecido a 1020°C. A vazão de GN foi 0,18 Nm³/seg enquanto que a vazão do ar de combustão variou entre 28,92 – 106,55 Nm³/seg, para essas condições a riqueza da mistura (ϕ) variou entre 0,0157 – 0,0579 (ver tabela 5). A produção de H₂O variou entre 44 713 – 82 806 ppm enquanto que a produção de CO₂: 7 813 – 28 428 ppm, nota-se que a produção de H₂O foi significativamente superior a produção de CO₂ em toda faixa de riqueza da mistura.

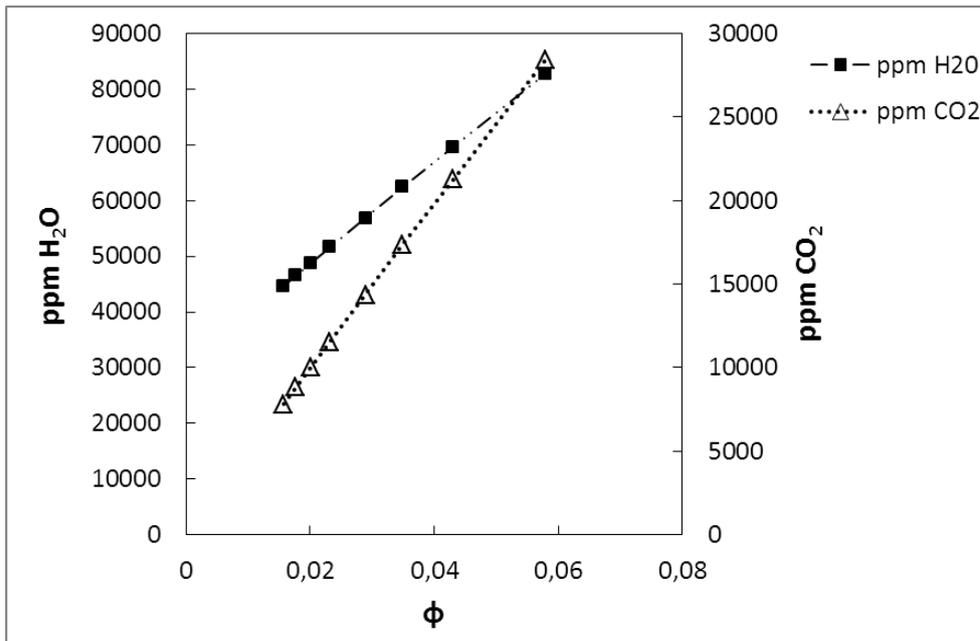


Figura 28 – Produção de H₂O e CO a partir da combustão de GN com ar de combustão pré aquecido a 1020°C e enriquecido com 3,21% de oxigênio. Vazão de GN constante: 0,18Nm³/seg, vazão do sopro de ar variando entre: 28,92 – 106,55 Nm³/seg

A **figura 29** apresenta o resultado da produção de H₂O e CO₂ a partir da combustão de GN com ar de combustão enriquecido com 3,21% O₂, pré aquecido a 1020°C. A vazão de GN foi 2,00 Nm³/seg, a vazão do ar de combustão variou entre 28,92 – 106,55 Nm³/seg, para essas condições a riqueza da mistura (ϕ) variou entre 0,173 – 0,639 (ver tabela 6). A produção de H₂O e CO₂ oscilou entre 101 055 – 205 373 ppm e 13 393 – 73 895 ppm respectivamente, sendo que a produção mínima desses gases foi proveniente da riqueza máxima: 0,639, enquanto que a produção máxima foi proveniente da mistura com riqueza de 0,25. Nota-se que a produção de H₂O é significativamente superior a produção de CO₂ em toda faixa de riqueza da mistura.

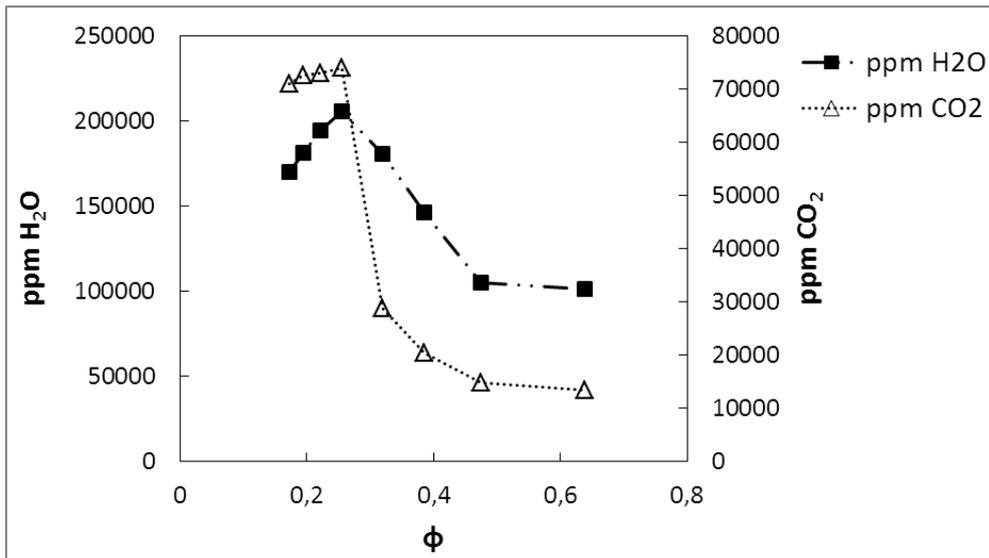


Figura 29 – Produção de H₂O e CO a partir da combustão de GN com ar de combustão pré aquecido a 1020°C e enriquecido com 3,21% de oxigênio. Vazão de GN constante: 2,00 Nm³/seg, vazão do sopro de ar variando entre: 28,92 – 106,55 Nm³/seg

A **figura 30** apresenta o resultado referente a produção de H₂O e CO₂ a partir da combustão de GN com ar de combustão enriquecido com 3,21% O₂, pré aquecido a 1020°C. A vazão de GN foi 3,92 Nm³/seg enquanto que a vazão do ar de combustão variou entre 28,92 – 106,55 Nm³/seg, para essas condições a riqueza da mistura (ϕ) variou entre 0,34 – 1,25 (ver tabela 6). A produção de H₂O e CO₂ foi respectivamente: 120 981 – 201 154 ppm e 16 963 – 40 463 ppm, sendo que a produção máxima desses gases foi alcançada a partir da riqueza mínima: 0,34 enquanto que a produção mínima foi proveniente da mistura com riqueza máxima: 1,25, em que há excesso de combustível. Nota-se que há um decrescimo da produção desses gases a medida em que a mistura torna-se mais rica em combustível. Verifica-se que a produção de H₂O é significativamente superior a produção de CO₂ em toda faixa de riqueza da mistura.

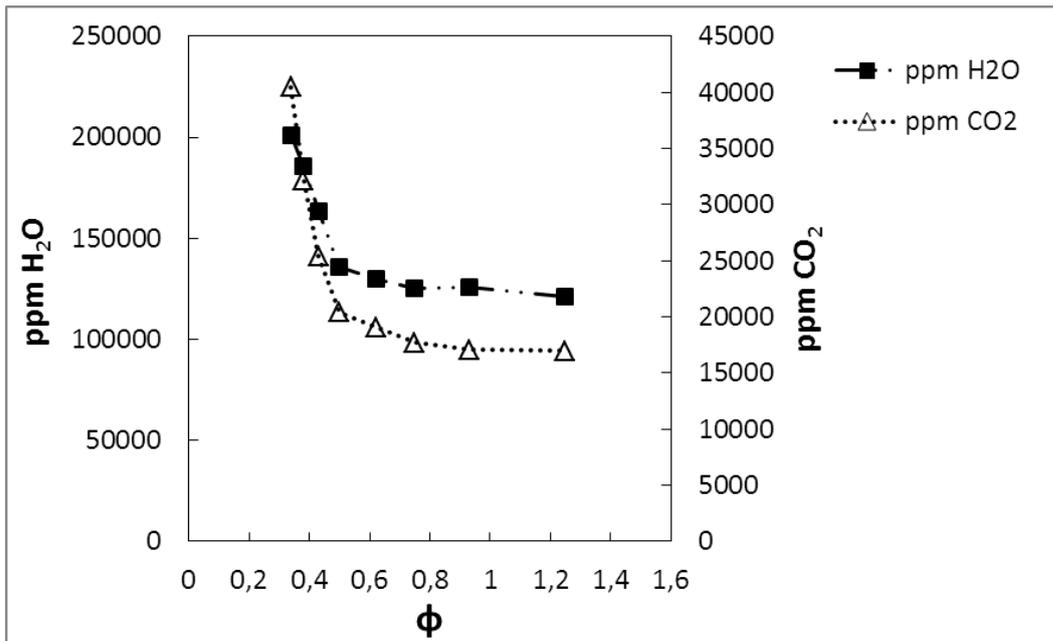


Figura 30 – Produção de H₂O e CO a partir da combustão de GN com ar de combustão pré aquecido a 1020°C e enriquecido com 3,21% de oxigênio. Vazão de GN constante: 3,92 Nm³/seg, vazão do sopro de ar variando entre: 28,92 – 106,55 Nm³/seg

5.6

Efeito da riqueza da mistura no consumo de CH₄ e O₂

No processo de combustão o controle do consumo de combustível e comburente é de fundamental importância para otimizar o processo, no sentido de evitar o desperdício desnecessário de combustível a partir da queima incompleta e no caso específico de altos fornos siderúrgicos, manter O₂ disponível para o processo.

A **figura 31** apresenta o resultado referente a disponibilidade de O₂ e CH₄ a partir da combustão do GN com ar de combustão enriquecido com 3,21% O₂, pré aquecido a 1020°C. A vazão do GN foi constante: 0,18 Nm³/seg, enquanto a vazão do ar de combustão variou entre: 28,92 – 106,55 Nm³/seg, nessas condições a riqueza da mistura (ϕ) varia entre 0,0157 – 0,0579 (ver tabela 5). A disponibilidade de O₂ variou entre 166 435 – 211 150 ppm, a alta disponibilidade de O₂ é justificada pela reduzida disponibilidade de combustível para queimar. Verifica-se que a disponibilidade de CH₄ é praticamente nula, ou seja, esse combustível é praticamente consumido em sua totalidade, fato justificado pela mistura ser rica em comburente e pobre em combustível, dessa forma a

disponibilidade de comburente é alta o suficiente para proporcionar queima completa do combustível.

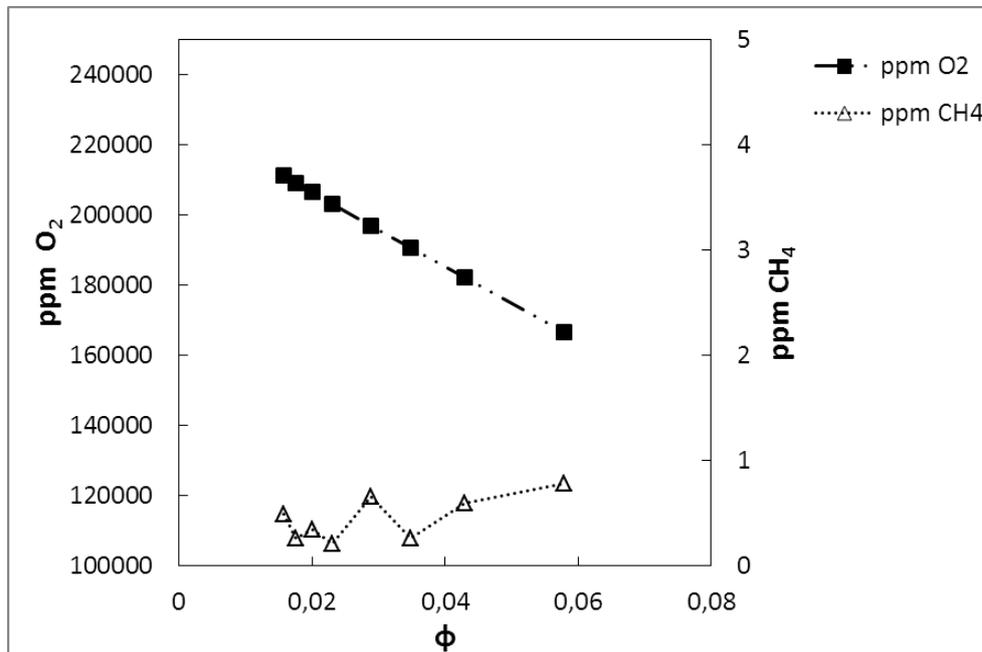


Figura 31 – Disponibilidade de O₂ e CH₄ a partir da combustão de GN com vazão de 0,18 Nm³/seg e ar de combustão enriquecido com 3,21% O₂, pré aquecido a 1020°C , vazão entre 28, 92 – 106,55 Nm³/seg

A **figura 32** apresenta o resultado da disponibilidade de O₂ e CH₄ a partir da combustão de GN com vazão de 2,00 Nm³/seg e ar de combustão enriquecido com 3,21% O₂, pré aquecido a 1020°C e com vazão variando entre: 28,92 – 106,55 Nm³/seg. Para essas condições a riqueza da mistura (ϕ) varia entre 0,173 – 0,639 (ver tabela 6). A disponibilidade de O₂ oscilou entre 3 - 48 280 ppm, enquanto que a disponibilidade de CH₄ variou de 0 – 26 448 ppm. O consumo de CH₄ é total para mistura com riqueza entre 0,173 – 0,319, enquanto que a disponibilidade de O₂ para essa faixa de mistura variou entre 54 – 48 280 ppm. Para mistura com riqueza entre 0,385 – 0,639 a disponibilidade de CH₄ é consideravelmente elevada, sendo máxima (26 448 ppm) a partir da mistura com riqueza máxima (0,639), isso é justificado pela baixa disponibilidade de O₂ nessa faixa de riqueza. Para a combustão de GN injetado pelas ventaneiras dos altos fornos siderurgicos visando o consumo total de CH₄ e disponibilidade de O₂, a mistura com riqueza entre 0,173 – 0,319 alcança esse objetivo, sendo que a

temperatura de chama adiabática requerida ao processo foi alcançada a partir dessa faixa de riqueza da mistura

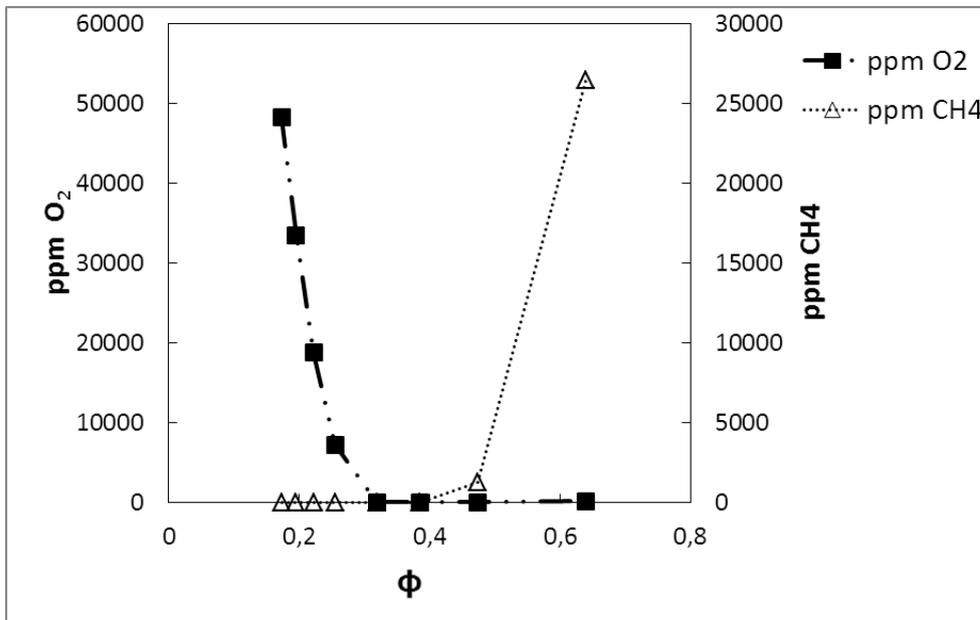


Figura 32 – Disponibilidade de O₂ e CH₄ a partir da combustão de GN com vazão de 2,00 Nm³/seg e ar de combustão enriquecido com 3,21% O₂, pré aquecido a 1020°C e com vazão entre 28, 92 – 106,55 Nm³/seg

A **figura 33** apresenta o resultado referente a disponibilidade de O₂ e CH₄ a partir da combustão do GN com ar de combustão enriquecido com 3,21% O₂ e pré aquecido a 1020°C. A vazão do GN foi constante: 3,92 Nm³/seg, enquanto que a vazão do ar de combustão variou entre: 28,92 – 106,55 Nm³/seg, nessas condições a riqueza da mistura (ϕ) varia entre 0,34 – 1,25 (ver tabela 7). A disponibilidade de O₂ oscilou entre 8 – 2407 ppm enquanto que a disponibilidade de CH₄ variou entre 3 – 165 677. Verifica-se que com o aumento da riqueza da mistura o consumo de CH₄ é reduzido mesmo com oxigênio disponível para a queima. Nota-se que para essa faixa de riqueza da mistura há desperdício de combustível, uma vez que o consumo de CH₄ não é completo.

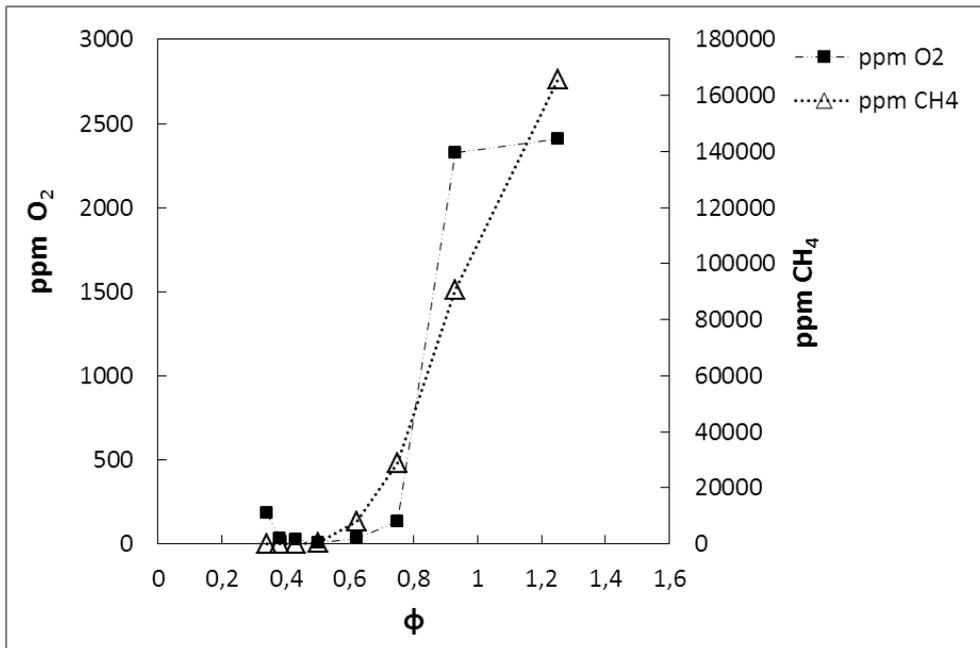


Figura 33 - Disponibilidade de O₂ e CH₄ a partir da combustão de GN com vazão de 3,92 Nm³/seg e ar de combustão enriquecido com 3,21% O₂, pré aquecido a 1020°C e com vazão entre 28, 92 – 106,55 Nm³/seg

5.7

Estudo paramétrico a partir da vazão do gás natural

A **figura 34** apresenta o resultado referente a temperatura de chama adiabática proveniente da combustão de GN com vazão variando entre 0,18 – 3,92 Nm³/seg, essa faixa de vazão é proveniente de dados reais da siderúrgica que injetou GN pelas ventaneiras do AF, no sentido de reduzir o consumo de coque. A vazão do ar de combustão teve variação correspondente a vazão mínima, média e máxima da siderúrgica em questão: 28,92, 62,44, 106,55 Nm³/seg, respectivamente. A temperatura de chama requerida ao processo, ou seja, acima de 2200°C, foi alcançada a partir da combustão utilizando-se 28,92Nm³/seg de ar de combustão com 0,58 e 0,71Nm³/seg de GN, para essas condições a riqueza da mistura é respectivamente: 0,21 e 0,25. Para ar de combustão com vazão de 62,44 Nm³/seg a temperatura de chama requerida foi alcançada utilizando-se GN com vazão de 1,26 e 1,72 Nm³/seg, para essas condições a riqueza da mistura é respectivamente: 0,21 e 0,28, enquanto que para ar de combustão com 106,55Nm³/seg a temperatura de chama requerida foi atingida, a partir da combustão de GN com vazão entre 1,72 – 3,48 Nm³/seg. Esses resultados são importantes, pois permitem otimizar o processo no sentido de alcançar

temperatura de chama requerida ao processo e reduzir o consumo de combustível e comburente, reduzindo dessa forma o custo com o processo. Nesse caso específico a combustão proveniente do ar de combustão com 28,92 Nm³/seg com GN com 0,58 e 0,71 Nm³/seg proporciona temperaturas de chama desejáveis ao processo com o consumo mínimo de combustível e comburente

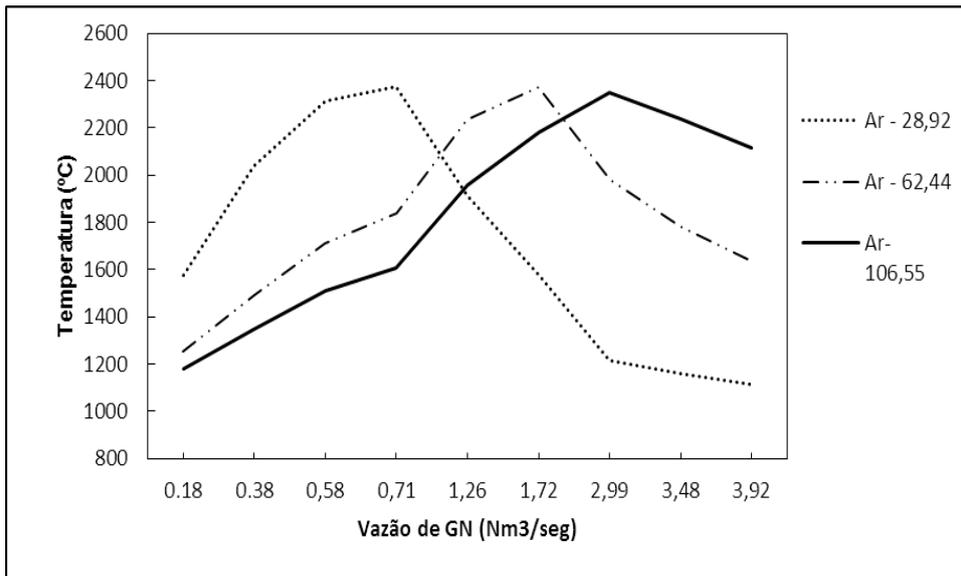


Figura 34 – Temperatura de chama adiabática proveniente da combustão de GN com ar de combustão pré aquecido a 1020°C.

A **figura 35** apresenta o resultado da produção de CO₂ a partir da combustão de GN com vazão variando entre 0,18 – 3,92 Nm³/seg e ar de combustão com três vazões distintas: 28,92, 62,44 e 106,55 Nm³/seg, esses valores representam respectivamente a vazão mínima, média e máxima do ar de combustão soprado pelas ventaneiras do alto forno da siderúrgica em questão. Verifica-se que a produção máxima de CO₂ proveniente da combustão de ar com 28,92 Nm³/seg foi alcançada a partir de GN com 0,58 e 0,71 Nm³/seg, nessas condições a produção de CO₂ foi respectivamente: 69 300 e 64 028 ppm, enquanto que para ar com 62,4 Nm³/seg a produção máxima de CO₂ foi alcançada a partir de GN com 1,26 e 1,71 Nm³/seg, a produção desse gás para essas vazões foi respectivamente: 67 484 e 66 084 ppm. A produção máxima de CO₂ a partir da combustão de ar com vazão máxima: 106,55 Nm³/seg, foi alcançada a partir de GN com vazão entre 1,71 – 3,92 Nm³/seg, nessas condições a formação de CO₂ variou entre 41 740 – 64 920 ppm. O resultado da produção de CO₂ abaixo,

justifica o resultado da temperatura de chama (ver figura figura 5.19), uma vez que as reações elementares de formação de CO_2 provenientes da combustão de GN são exotérmicas.

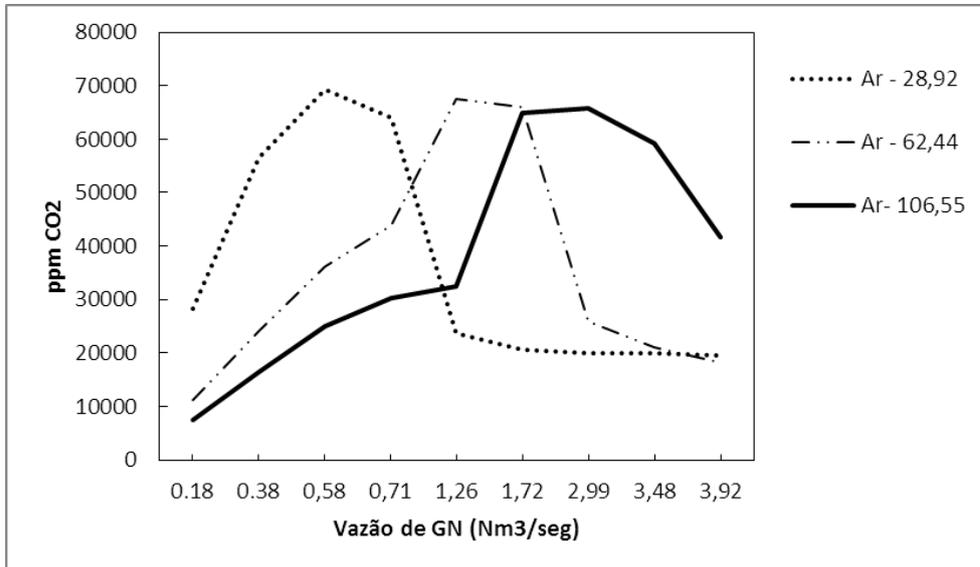


Figura 35 – Produção de CO_2 a partir da combustão de GN com ar pré aquecido: 1020°C . vazão: 28,92, 62,44 e 106,55 Nm^3/seg .

A **figura 36** apresenta o resultado da produção de H_2O a partir da combustão de GN com vazão variando entre 0,18 – 3,92 Nm^3/seg e ar de combustão com três vazões distintas: 28,92, 62,44 e 106,55 Nm^3/seg , esses valores representam respectivamente a vazão mínima, média e máxima do ar de combustão soprado pelas ventaneiras do alto forno da siderúrgica em questão. Verifica-se que a produção máxima de H_2O proveniente da combustão de ar com 28,92 Nm^3/seg foi alcançada a partir de GN com 0,58 e 0,71 Nm^3/seg , nessas condições a produção de H_2O foi respectivamente: 176 149 e 193 729 ppm, enquanto que para ar com 62,4 Nm^3/seg a produção máxima de H_2O foi alcançada a partir de GN com 1,26 e 1,72 Nm^3/seg , a produção desse gás para essas vazões foi respectivamente: 162 500 e 190 938 ppm. A produção de H_2O foi máxima, a partir da combustão de ar com vazão máxima: 106,55 Nm^3/seg e GN com vazão entre 1,72 – 3,92 Nm^3/seg , nessas condições a formação de H_2O oscilou entre 154 593 – 198 668 ppm. O resultado da produção de H_2O , foi semelhante ao resultado da produção de CO_2 , dessa forma conclui-se que para produções máximas de H_2O e CO_2 , nessas condições de vazão de ar de combustão e GN, é possível alcançar

temperaturas de chama adiabática requerida ao processo. Verifica-se ainda que a produção de H₂O é significativamente superior a produção de CO₂, esse resultado é satisfatório, uma vez que objetiva-se reduzir as emissões de CO₂.

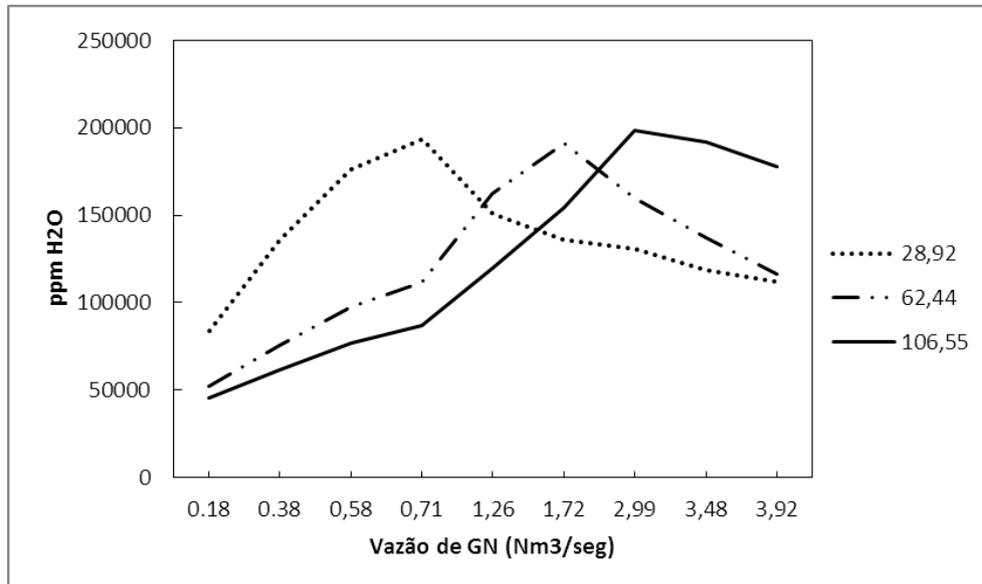


Figura 36 – Produção de H₂O a partir da combustão de GN com ar pré aquecido: 1020°C. vazão: 28,92, 62,44 e 106,55 Nm³/seg.

A **figura 37** apresenta o resultado da produção de CO a partir da combustão de GN com ar de combustão pré aquecido a 1020°C e com três vazões distintas: 28, 62,44 e 105,55 Nm³/seg que representam respectivamente a vazão mínima, média e máxima do ar soprado pelas ventaneiras do alto forno da siderúrgica em questão. A vazão do gás natural variou entre 0,18 – 3,92 Nm³/seg.

Estabelecendo uma relação entre a formação de CO (ver figura 37) e a temperatura de chama adiabática (ver figura 34), nota-se que para ar com 28,92 Nm³/seg a produção de CO, a partir da combustão de GN com 0,58 e 0,71 Nm³/seg foi respectivamente: 15 703 e 36 424 ppm. A partir dessa vazão de ar de combustão e GN foi possível alcançar temperatura de chama adiabática requerida ao processo.

No caso do ar de combustão com vazão média (62,44 Nm³/seg) a temperatura de chama adiabática requerida foi alcançada a partir da combustão com GN com 1,26 e 1,72 Nm³/seg (ver figura 34). Nessas condições a produção de CO foi respectivamente: 7 595 e 31 276 ppm. Enquanto que para vazão

máxima do ar de combustão ($106,55 \text{ Nm}^3/\text{seg}$) a produção de CO proveniente da combustão com GN a partir de 1,71, 2,99 e $3,48 \text{ Nm}^3/\text{seg}$ de vazão foi respectivamente: 4 933, 57 380 e 83 218 ppm. Nessas condições de vazão do combustível e comburente foi possível alcançar a temperatura de chama adiabática desejável ao processo (ver figura 33). Vale ressaltar que a produção de CO foi superior a produção de CO_2 (ver figura 34) quando o gás natural foi injetado pelas ventaneiras a partir de 3,48 e $3,92 \text{ Nm}^3/\text{seg}$ e o ar de combustão soprado com vazão de $106,55 \text{ Nm}^3/\text{seg}$.

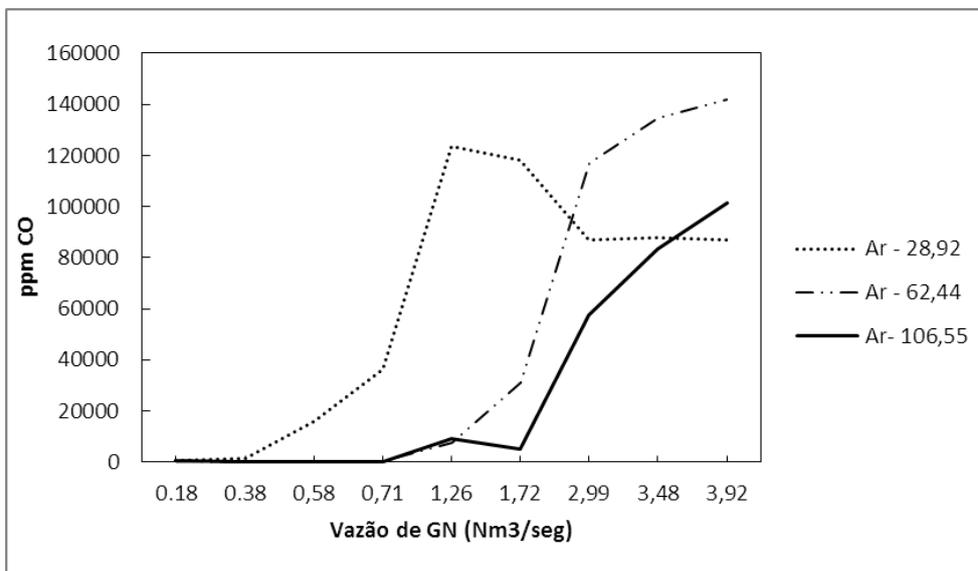


Figura 37 – Produção de CO a partir da combustão de GN com ar pré aquecido: 1020°C . Vazão: 28,92, 62,44 e $106,55 \text{ Nm}^3/\text{seg}$.

A **figura 38** apresenta o resultado referente a produção de H_2 a partir da combustão de GN com ar de combustão pré aquecido a 1020°C e com três vazões distintas: 28,92, 62,44 e $106,55 \text{ Nm}^3/\text{seg}$ que representam respectivamente: vazão mínima, média e máxima do ar de combustão soprado pelas ventaneiras do alto forno da siderúrgica em análise.

Verifica-se a partir da figura 36 que a produção de H_2 em ppm a partir da combustão de GN com 0,58 e $0,71 \text{ Nm}^3/\text{seg}$ e ar com vazão mínima (28,92 Nm^3/seg), foi respectivamente: 6 185 e 16 726 ppm. A partir dessa vazão de combustível e comburente foi possível alcançar temperatura de chama requerida ao processo, conforme figura 34. Enquanto que para ar de combustão com vazão média (62,44 Nm^3/seg) a temperatura de chama adiabática requerida ao processo foi alcançada a partir da combustão de GN com 1,26 e $1,72 \text{ Nm}^3/\text{seg}$, nessas

condições a produção de H_2 é respectivamente: 2 945 e 13 736 ppm . A produção de H_2 proveniente da combustão de ar com vazão máxima e $(106,44 \text{ Nm}^3/\text{seg})$ e GN com 1,71, 2,99 e $3,48 \text{ Nm}^3/\text{seg}$ foi respectivamente: 1 936, 32 544 e 63 853, a combustão de GN com ar de combustão (pré aquecido) a partir dessas vazões permitiram alcançar a temperatura de chama requerida ao processo (ver figura 34).

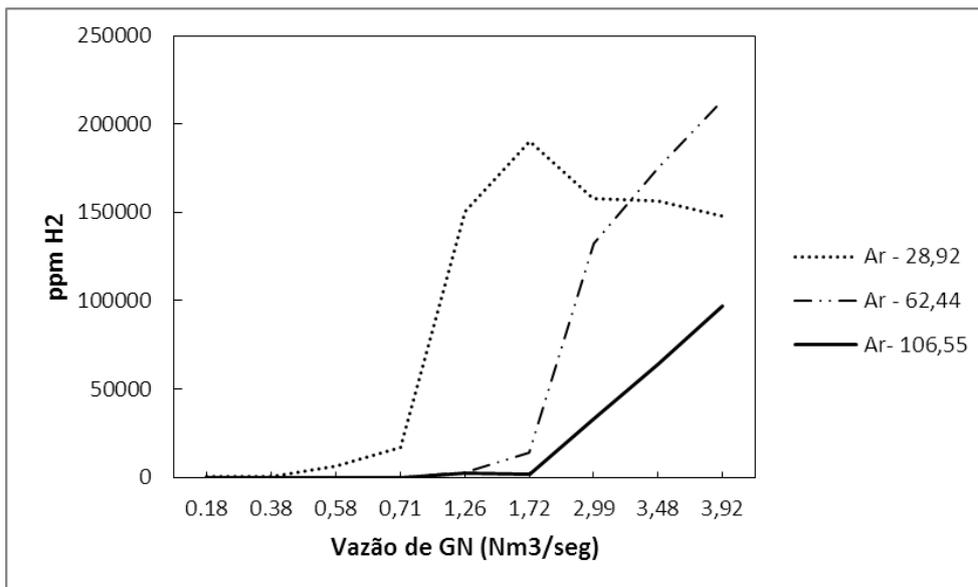


Figura 38 – Produção de H_2 a partir da combustão de GN com ar pré aquecido: 1020°C . Vazão: 28,92, 62,44 e $106,55 \text{ Nm}^3/\text{seg}$.

A partir da **figura 39** é possível verificar o consumo de CH_4 , principal constituinte do GN, a partir da combustão deste combustível com vazão: 0,18 – $3,92 \text{ Nm}^3/\text{seg}$ e ar de combustão aquecido a 1020°C , com vazão: 28,92, 62,44 e $106,55 \text{ Nm}^3/\text{seg}$, que representam respectivamente a vazão mínima, média e máxima do ar soprado pelas ventaneiras do alto forno da siderúrgica em questão. Esse resultado é útil para otimizar o processo, no sentido de evitar desperdício de combustível.

Levando em consideração que a temperatura de chama adiabática desejável ao processo foi alcançada a partir da combustão: ar aquecido a 1020°C com vazão de $28,92 \text{ Nm}^3/\text{seg}$ e GN com 0,58 e $0,71 \text{ Nm}^3/\text{seg}$, ar com vazão de $62,44 \text{ Nm}^3/\text{seg}$ com GN a partir de 1,26 e $1,72 \text{ Nm}^3/\text{seg}$, ar com $106,55 \text{ Nm}^3/\text{seg}$ com 1,72, 2,99 e $3,48 \text{ Nm}^3/\text{seg}$ de GN, o consumo de CH_4 será analisado a partir dessas faixas de vazão.

Verifica-se a partir da **figura 39** que o consumo de metano foi completo para todas as faixas de vazão de GN com ar de combustão que possibilitaram alcançar a temperatura de chama adiabática requerida ao processo.

Nota-se que a queima de GN não é completa e há desperdício de combustível a partir de GN com 1,26 Nm³/seg e ar com 28,92 Nm³/seg e, além disso, para essas condições a temperatura de chama adiabática não é alcançada, nessas condições a riqueza da mistura varia entre: 0,45 – 1,42.

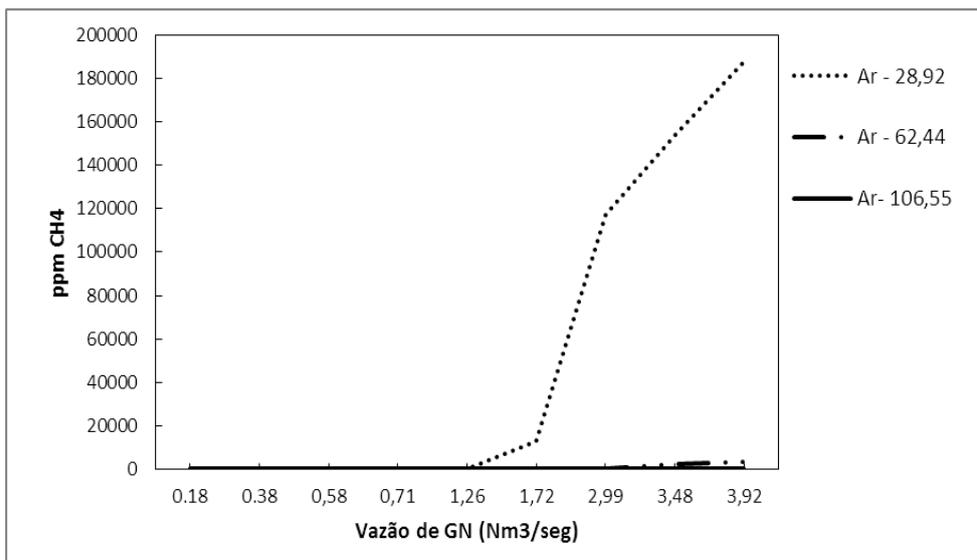


Figura 39– Disponibilidade de CH₄ a partir da combustão de GN com ar pré aquecido: 1020°C. Vazão: 28,92, 62,44 e 106,55 Nm³/seg.

5.8

Efeito da injeção de gás natural na produção de ferro gusa líquido

A **figura 40** apresenta o resultado referente a produção mensal de ferro gusa líquido no alto forno da siderúrgica analisada. Verifica-se a influência da injeção de GN na produção de ferro gusa líquido, sendo possível alcançar produção máxima a partir de altas taxas de consumo de GN e baixas taxas de consumo de coque, sendo que, para taxa de consumo de coque 10X superior ao consumo de GN foi possível atingir a produção máxima, enquanto que para consumo de coque 250X superior ao consumo de gás natural a produção foi mínima.

De acordo com esse resultado conclui-se que a injeção de GN como combustível auxiliar em altos fornos siderúrgicos proporciona altas taxas de

produção de ferro gusa líquido, permitindo reduzir o consumo de coque e as emissões de CO₂.

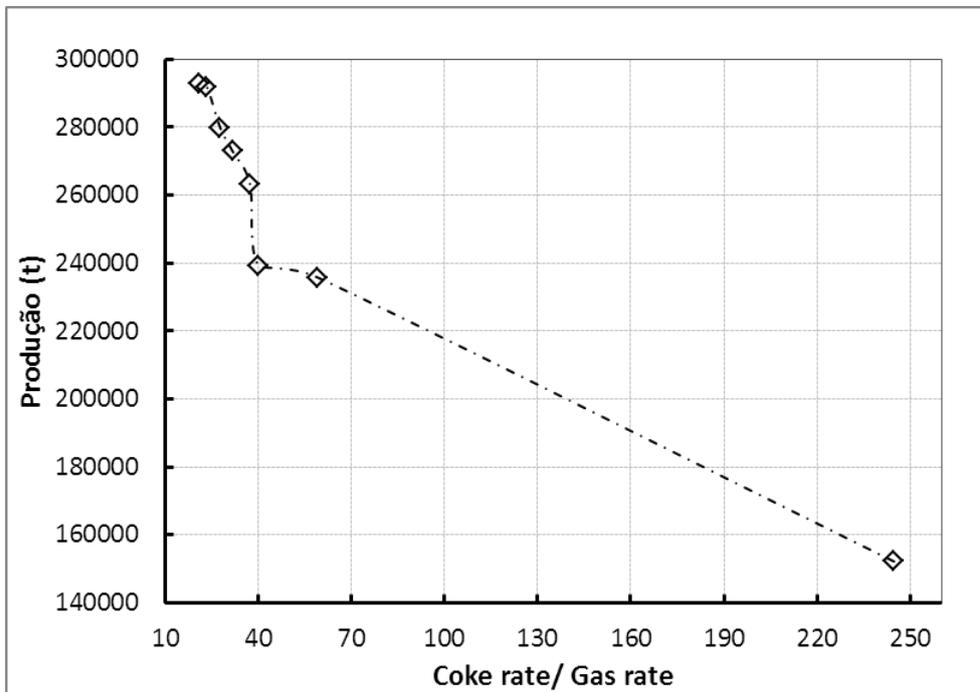


Figura 40 – Produção mensal de ferro gusa a partir de distintas taxas de consumo de coque e de gás natural

5.9 Taxa de substituição (kg coque/Nm³ GN)

Se não existe injeção no processo o consumo específico de coque ou carvão vegetal seria $C_{s/injeção}$ para uma produção P . A partir do momento que se introduz a injeção, o novo consumo específico pode ser calculado pela equação abaixo:

$$\text{Consumo}_{c/injeção} = \text{Consumo}_{s/injeção} - (\text{Taxa}_{substituição} * \text{Taxa}_{injeção})$$

A partir desta equação é possível calcular a taxa de substituição de kg de coque /Nm³ de gás natural, com os dados disponíveis referentes ao consumo de coque (kg coque/t gusa) com injeção de GN, consumo de coque sem injeção (kg coque/t gusa) e taxa de injeção de GN (Nm³/t gusa).

A **tabela 8** apresenta o resultado referente a taxa de substituição de kg coque/Nm³ de gás natural, levando em consideração distintas vazões de gás natural. Nota-se que é possível alcançar taxa de substituição máxima: 5,82 kg coque/Nm³ de gás natural a partir de GN com 0,89 Nm³/seg. Taxas de

substituição abaixo de 1 Kg coque/Nm³ de gás natural foi obtida a partir de GN com vazões: 0,18 Nm³/seg, 3,48 Nm³/seg e 3,92 Nm³/seg.

Tabela 8 – Taxa de substituição kg coque/Nm³ de GN

| GN (Nm ³ /seg) | Taxa de substituição (kg coque/Nm ³ GN) |
|------------------------------|--|
| 0,18 | 0,73 |
| 0,71 | 3,78 |
| 0,89 | 5,82 |
| 1,07 | 4,57 |
| 1,23 | 3,95 |
| 1,39 | 3,84 |
| 1,45 | 4,28 |
| 1,55 | 3,94 |
| 1,63 | 3,37 |
| 1,71 | 2,48 |
| 1,89 | 2,82 |
| 2,16 | 2,92 |
| 2,23 | 2,77 |
| 2,34 | 3,03 |
| 2,50 | 2,14 |
| 2,52 | 2,33 |
| 2,70 | 1,68 |
| 2,80 | 1,31 |
| 2,88 | 1,41 |
| 2,99 | 2,13 |
| 3,49 | 0,84 |
| 3,92 | 0,75 |