

ITALIAN PATENT OFFICE

Document No.

102012902087431A1

Publication Date

20140327

Applicant

SIT LA PRECISA S.P.A. CON SOCIO UNICO

Title

METODO PER IL MONITORAGGIO E CONTROLLO DELLA COMBUSTIONE
IN APPARECCHI BRUCIATORI A GAS COMBUSTIBILE E SISTEMA DI
CONTROLLO DELLA COMBUSTIONE OPERANTE IN ACCORDO CON TALE
METODO

Metodo per il monitoraggio e controllo della combustione in apparecchi bruciatori a gas combustibile e sistema di controllo della combustione operante in accordo con tale metodo

DESCRIZIONE

- 5 La presente invenzione riguarda un metodo per il monitoraggio e controllo della combustione in bruciatori a gas combustibile per apparecchi quali caldaie, scaldabagni, caminetti e simili, avente le caratteristiche enunciate nel preambolo della rivendicazione principale. Essa riguarda altresì un sistema di controllo della combustione operante in accordo con tale metodo.
- 10 Nel settore tecnico di riferimento, è noto che per mantenere una efficiente combustione, è necessario che il rapporto tra la quantità di aria e la quantità di gas combustibile immessi nel bruciatore sia mantenuto in un intorno di un predeterminato valore ottimale, che dipende sostanzialmente dal tipo di gas utilizzato, e, in generale, può dipendere anche dal valore della potenza erogata dal
- 15 bruciatore, ovverosia dalla portata di gas.
- Ciò consente di ottenere e mantenere nel tempo un processo di combustione completo senza eccessiva dispersione di energia nei fumi e minimizzando la produzione di gas inquinanti, nel rispetto delle normative sulle emissioni dei vari paesi.
- 20 Per raggiungere questo obiettivo di mantenimento del rapporto aria/gas ottimale, sono stati sviluppati nel settore tecnico di riferimento diversi dispositivi e metodi.
- Nello specifico ambito di applicazione dell'invenzione, sono noti metodi di monitoraggio e controllo della combustione basati sull'analisi di fiamma ed in particolare della ionizzazione del gas nella zona di combustione della fiamma stessa.
- 25 Tipiche metodologie prevedono l'impiego di un elettrodo collocato nella zona di fiamma o in prossimità della stessa, collegato ad un circuito elettronico che applica a tale elettrodo una tensione fissa o variabile e misura la corrente che attraversa

detto elettrodo. Tramite sistemi di elaborazione ed analisi del segnale di corrente viene effettuata la stima di uno o più parametri correlati con la combustione. Fra i sistemi di elaborazione sono note metodologie di analisi dello spettro di frequenza del segnale, capaci di individuare spettri di frequenza o variazioni dei medesimi
5 indicativi di instabilità di fiamma o di combustione non ottimale, sulla base dei quali sono predisposti sistemi di correzione del processo di combustione per riportare il medesimo nelle condizioni desiderate.

Limiti ravvisabili nelle metodologie note sono legati in via principale alla affidabilità dei risultati delle analisi degli spettri di frequenza e alla loro correlazione con il
10 processo di combustione.

Limiti sono altresì riscontrabili nella possibile usura ed invecchiamento dell'elettrodo atto a ricevere il segnale al sensore di ionizzazione, con conseguenti ripercussione sulla affidabilità e precisione dei dati analizzati dagli algoritmi di elaborazione degli spettri di frequenza.

15 I limiti anzidetti vengono inoltre amplificati qualora si desideri operare il controllo di combustione nei bruciatori di tipo modulante in cui si cercano condizioni ottimali di combustione al variare della potenza richiesta, all'interno dell'intervallo compreso fra una potenza minima ed una potenza massima ammissibile per il bruciatore.

E' altresì noto che il rapporto volumetrico fra la portata di gas e la portata di aria
20 idoneo ad una corretta combustione, dipende anche dal tipo di gas. Pertanto ciascuna famiglia di gas combustibili è correlata a rispettive e specifiche curve di regolazione (che correlano ad esempio la portata di gas alla portata di aria). Una delle problematiche dei sistemi noti di controllo della combustione è quella legata alla individuazione della famiglia di gas e alla associazione delle curve ottimali di
25 regolazione.

Il problema alla base della presente invenzione è quello di realizzare un metodo per il monitoraggio e controllo della combustione di un bruciatore di apparecchi a gas

combustibile, nonché un sistema di controllo della combustione operante in accordo con tale metodo, i quali siano strutturalmente e funzionalmente concepiti per superare i limiti sopra esposti con riferimento alla tecnica nota citata.

Nell'ambito di tale problema, è uno scopo dell'invenzione mettere a disposizione un metodo ed un sistema di controllo che sia in grado di garantire una combustione ottimale in tutto il campo delle portate (e per diversi tipi di gas) ovvero delle potenze per cui è dimensionato il bruciatore, garantendo affidabilità e ripetibilità di risultato nelle analisi dei segnali correlati al processo di combustione.

Un altro scopo del trovato è quello di offrire un metodo ed un sistema di controllo che risulti di semplice gestione e caratterizzazione sia in fase di installazione che in fase di utilizzo del bruciatore dell'apparecchio.

Questo problema è risolto e questi scopi sono conseguiti dalla presente invenzione mediante un metodo ed un sistema per il controllo di combustione in un bruciatore di un apparecchio a gas combustibile, realizzati in accordo con le rivendicazioni che seguono.

Le caratteristiche ed i vantaggi dell'invenzione meglio risulteranno dalla descrizione dettagliata di un suo preferito esempio di realizzazione, illustrato a titolo indicativo e non limitativo, con riferimento agli uniti disegni in cui:

- la figura 1 è una vista schematica di un bruciatore di un apparecchio dotato di un sistema di controllo della combustione operante secondo il metodo di monitoraggio e controllo della combustione in accordo con l'invenzione,
- la figura 2 è un grafico in cui sono mostrate le curve di correlazione tra parametri di funzionamento di un ventilatore e di una valvola gas modulante di un apparecchio bruciatore operante con il metodo di controllo della combustione dell'invenzione.

Con iniziale riferimento alla figura 1, con 1 è complessivamente contrassegnato un bruciatore, il quale è provvisto di un sistema di controllo della combustione,

realizzato per operare in accordo con il metodo di monitoraggio e controllo della combustione della presente invenzione.

Il bruciatore 1 è alloggiato in un apparecchio, non rappresentato, destinato alla produzione di acqua calda sanitaria e/o asservito ad un circuito di riscaldamento di ambienti, in modo di per sé noto e non illustrato nelle figure.

Il bruciatore 1 comprende una camera di combustione 2, la quale è alimentata da un primo condotto 3 e da un secondo 4, predisposti per immettere nella camera di combustione 2, una portata d'aria e, rispettivamente, una portata di gas combustibile. Preferibilmente, il secondo condotto 4 si immette nel primo condotto 3 a monte della camera di combustione 2 (bruciatore a pre-miscelazione). In corrispondenza della sezione di miscelazione aria-gas è previsto un ventilatore 5 con velocità di rotazione variabile. Con 6 è indicata una valvola modulante posta sul condotto 4 del gas per regolare la portata di gas immessa nel bruciatore.

La camera di combustione 2 è collegata a valle con un camino 7, attraverso cui sono evacuati i gas esausti della combustione.

Con 8 è indicato un sensore di monitoraggio della combustione, descritto in maggiore dettaglio nel seguito, il quale è collegato ad un dispositivo di controllo 9 predisposto con un complesso circuitale elettronico idoneo per controllare il bruciatore secondo il metodo della presente invenzione, di seguito illustrato. Il dispositivo di controllo è altresì operativamente collegato sia al ventilatore 5 che alla valvola 6 modulante per la regolazione di tali organi.

Il sensore 8 è disposto in prossimità della fiamma del bruciatore, esso è suscettibile di essere alimentato da un generatore di tensione ed è altresì collegato ad un circuito elettronico idoneo a misurare il potenziale risultante al sensore.

Una forma di realizzazione prevede che il sensore 8 comprenda due elettrodi, indicati con E1, E2, i quali sono posti entro o in prossimità della fiamma.

Secondo quanto è noto dalla fisica dei plasmi che si sviluppano nei processi di

combustione, se nel plasma viene introdotta dall'esterno una carica, essa, per il campo elettrico che produce, determina un moto delle cariche costituenti il plasma; tale moto cresce al crescere della carica esterna introdotta. Tuttavia vi è un valore di campo elettrico oltre il quale il flusso di particelle cariche non cresce ulteriormente (saturazione). Il moto è notevolmente diverso per gli elettroni e per gli ioni: gli elettroni essendo molto più leggeri e più piccoli, si muovono molto più velocemente e subiscono molte meno collisioni lungo il loro percorso. Ciò fa sì che il suddetto fenomeno di saturazione avvenga molto prima nel caso degli ioni positivi, mentre avviene dopo per gli elettroni. L'effetto macroscopico, generato dalla carica esterna introdotta, a causa dello spostamento di particelle cariche, è una alterazione del campo elettrico del plasma. Tale campo elettrico si propaga all'intorno della particella per una distanza dell'ordine della cosiddetta lunghezza di Debye. Essa, per quanto detto sopra, è maggiore per gli elettroni, cioè per il caso in cui la carica introdotta sia positiva. Sarà invece molto minore nel caso degli ioni positivi, corrispondenti al caso in cui la carica introdotta sia negativa.

Ritornando al metodo dell'invenzione, all'elettrodo E1 viene applicato un segnale elettrico avente una determinata forma d'onda nel tempo; tale potenziale è equivalente alla carica perturbatrice citata nella descrizione precedente. L'elettrodo E2 è posto ad una opportuna distanza ed assume un valore di potenziale determinato dal moto di cariche del plasma causato da E1 e rispondente alle dinamiche descritte sopra. Tale potenziale viene misurato dal circuito elettronico ed elaborato nel modo che verrà descritto di seguito.

Il concetto base del metodo dell'invenzione è quindi quello secondo il quale la forma d'onda risultante all'elettrodo E2 è univocamente determinata dalla composizione della miscela di comburente e combustibile prima della combustione. La conoscenza di tale composizione è essenziale per poter predire alcuni effetti chiave della combustione, come la quantità di CO_2 e CO prodotti e la potenza termica prodotta.

In questo modo, fra l'altro, è possibile compensare gli effetti di gas diversi da quelli nominali, indicati nel settore come G20 e G31. Quindi la conoscenza del rapporto aria-combustibile (numero d'aria altrimenti contrassegnato con " λ "), permette la realizzazione di un sistema di controllo della combustione di un apparecchio
5 bruciatore a gas.

Il metodo dell'invenzione comprende essenzialmente due macro fasi operative, una prima fase, indicata con F, di acquisizione ed elaborazione di dati da condizioni sperimentali, ed una seconda fase, indicata con H, diretta alla valutazione del numero d'aria λ o della quantità di CO₂ e CO prodotti o la potenza termica prodotta,
10 in una condizione reale operativa del bruciatore.

Entrambe dette fasi comprendono a loro volta una sequenza di passi operativi che vengono di seguito descritti in dettaglio.

Nella descrizione che segue verranno esposti i passi relativi alla valutazione del numero d'aria λ , ma essi possono essere applicati allo stesso modo per gli altri
15 parametri correlati alla combustione.

Un primo passo operativo della fase F, indicato con F1, prevede di individuare una pluralità (1, 2,, n) di condizioni sperimentali di combustione del bruciatore, in ciascuna delle quali è imposta una rispettiva potenza P (P1, P2,, Pn) e per ciascuna potenza è imposto un valore del numero d'aria (λ_1 , λ_2 ,, λ_m), il
20 numero d'aria λ esprimendo il rapporto tra la quantità d'aria nel processo di combustione e la quantità di aria per una combustione stechiometrica, ciascuna condizione sperimentale essendo ripetuta un prefissato numero di volte (r).

In via alternativa, in ciascuna condizione sperimentale può essere imposta una Potenza P (P1, P2, ..., Pn) e per ciascuna potenza è imposta una concentrazione di
25 CO₂ e/o CO (%1, %2,%n). Anche in questo caso ciascuna condizione sperimentale è ripetuta un prefissato numero di volte (r).

In un secondo successivo passo operativo, indicato con F2, è previsto di imporre, in

ciascuna di dette ($n * m * r$) condizioni sperimentali (P_i, λ_j oppure $P_i, \%j$), un segnale elettrico sull'elettrodo E1.

Nel seguito si farà riferimento alla scelta di condizioni sperimentali con Potenza e numero d'aria imposti, restando inteso che il metodo possa essere applicato in modo analogo nella scelta alternativa di condizioni sperimentali con potenza e concentrazione CO₂ (e/o CO) imposti.

In un terzo passo F3 si esegue un campionamento del segnale risultante all'elettrodo E2, calcolando i rispettivi parametri caratteristici della forma d'onda del segnale per ciascuna delle suddette condizioni sperimentali,

In un ulteriore e successivo passo operativo, indicato con F4, è previsto di calcolare una funzione di interpolazione o tabella di correlazione, a partire dai dati sperimentali acquisiti, atta ad interpolare o correlare, in modo univoco, la potenza P, il numero di aria λ ed i parametri caratteristici della forma d'onda del segnale all'elettrodo E2, nel processo di combustione del bruciatore.

I parametri caratteristici della forma d'onda sono convenientemente ottenuti tramite tecniche di analisi armonica del segnale di tensione campionato mediante applicazione della trasformata di Fourier.

Inoltre, la funzione di interpolazione che permette di correlare i parametri caratteristici della forma d'onda misurata al numero d'aria λ e alla potenza P è ottenuta con l'applicazione di tecniche di analisi di regressione.

In altri termini, il meccanismo che permette di correlare la forma d'onda misurata all'elettrodo E2 con il numero d'aria λ è del tipo cosiddetto "pattern matching" e si realizza con l'applicazione di tecniche di analisi di regressione.

In una forma di realizzazione, nella fase F2, all'elettrodo E1 viene applicato un segnale di tensione con forma d'onda periodica, ad esempio sinusoidale ad ampiezza costante M e ad una data frequenza f.

In una forma di realizzazione preferita si utilizza un unico elettrodo E2, e gli

anzidetti passi operativi F2 ed F3 vengono effettuati in immediata successione sul medesimo unico elettrodo.

Alla forma d'onda del segnale campionato all'elettrodo E2, viene applicata la trasformata discreta di Fourier (DFT) alla frequenza della forma d'onda dell'elettrodo E1 e alle sue armoniche successive, ottenendo per tali frequenze l'ampiezza M e la fase Φ .

Tale operazione viene effettuata per ciascuna delle suddette condizioni sperimentali, corrispondenti alle potenze prescelte ($P_1, P_2, \dots, P_n$), e per ciascuna di esse ai valori del numero d'aria ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$), effettuando per ciascuna di dette condizioni un numero prefissato (r) di ripetizioni, per un numero totale di rilievi pari a $n * m * r$.

A questo punto è previsto di:

- calcolare, per ciascuna condizione sperimentale (i, j), tramite applicazione della trasformata discreta di Fourier (DFT), le ampiezze ($M_{1i,j}, M_{2i,j}, \dots, M_{pi,j}$) e le fasi ($\Phi_{1i,j}, \Phi_{2i,j}, \dots, \Phi_{pi,j}$), dove p è la massima armonica per la quale è applicata la trasformata discreta di Fourier (DFT),

- inserire i valori di ampiezza (M) e fase (Φ) in un sistema lineare in cui ogni riga è composta da un rilievo sperimentale effettuato alla potenza P_i e al numero d'aria λ_j ed in cui il termine noto è λ_j ,

- imporre un numero di rilievi sperimentali ($n * m * r$) maggiore del numero massimo di armoniche (p), almeno uguale a $3p-2$,

- risolvere il sistema lineare dell'equazione $AB=\lambda$

con A matrice dei dati sperimentali, B vettore dei coefficienti incogniti e λ vettore, tramite metodo di regressione ai minimi quadrati dall'equazione Moore-Penrose dove

$$B = (A^T A)^{-1} A^T$$

- memorizzare nel circuito elettronico il vettore B dei coefficienti, con dimensione

pari alle incognite del sistema ovvero pari al numero di colonne della matrice A, così da utilizzare la seguente equazione di regressione:

$$\lambda_j = \left[1 \quad \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^s \quad \left(\frac{M_3}{M_1} \right)^s \quad \left(\frac{M_4}{M_1} \right)^s \quad \left(\frac{M_5}{M_1} \right)^s \quad \dots \quad \left(\frac{M_p}{M_1} \right)^s \right. \\ \left. \sin(\varphi_2 - 2r\varphi_1) \quad \sin(\varphi_3 - 3r\varphi_1) \quad \sin(\varphi_4 - 4r\varphi_1) \quad \sin(\varphi_5 - 5r\varphi_1) \quad \dots \quad \sin(\varphi_p - pr\varphi_1) \right. \\ \left. \cos(\varphi_2 - 2r\varphi_1) \quad \cos(\varphi_3 - 3r\varphi_1) \quad \cos(\varphi_4 - 4r\varphi_1) \quad \cos(\varphi_5 - 5r\varphi_1) \quad \dots \quad \cos(\varphi_p - pr\varphi_1) \right]$$

10

con s ed r che possono assumere un valore dell'intervallo [1;4] e $p \geq 5$.

Valori preferiti di p sono compresi tra 5 e 15.

Nella fase H del metodo, relativa ad una condizione operativa di reale funzionamento del bruciatore, sono previsti i seguenti passi operativi, per valutare il numero d'aria λ .

15

In un primo passo operativo, indicato con H1, è previsto di imporre il segnale di tensione sull'elettrodo E1.

Contemporaneamente (in un passo H2) è previsto di acquisire il segnale elettrico al secondo elettrodo (E2) per un intervallo di tempo prefissato, come descritto nella fase F2.

20

In una forma di realizzazione preferita si utilizza un unico elettrodo E2, e gli anzidetti passi operativi H1 ed H2 vengono effettuati in immediata successione sul medesimo unico elettrodo.

In un terzo e successivo passo H3 sono calcolati, mediante trasformata discreta di Fourier, ampiezza ($M_1, M_2, \dots, M_p$) e fase ($\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_p$) della forma d'onda del segnale risultante di tensione all'elettrodo E2, mentre in un quarto passo H4 viene calcolato il valore stimato (λ_{stim}) del numero d'aria tramite il prodotto scalare

25

seguente:

$$\lambda_{stim} = \left[1 - \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^s - \left(\frac{M_3}{M_1} \right)^s - \left(\frac{M_4}{M_1} \right)^s - \left(\frac{M_5}{M_1} \right)^s - \dots - \left(\frac{M_p}{M_1} \right)^s \right. \\ \left. \sin(\varphi_2 - 2r\varphi_1) \sin(\varphi_3 - 3r\varphi_1) \sin(\varphi_4 - 4r\varphi_1) \sin(\varphi_5 - 5r\varphi_1) \dots \sin(\varphi_p - pr\varphi_1) \right. \\ \left. \cos(\varphi_2 - 2r\varphi_1) \cos(\varphi_3 - 3r\varphi_1) \cos(\varphi_4 - 4r\varphi_1) \cos(\varphi_5 - 5r\varphi_1) \dots \cos(\varphi_p - pr\varphi_1) \right] \times B$$

utilizzando la funzione di interpolazione o tabella di correlazione che correla la
 10 potenza ed il numero d'aria λ con i parametri caratteristici della forma d'onda
 rilevati.

Il calcolo di λ può venire eseguito ad intervalli regolari prefissati, come verrà
 chiarito in dettaglio di seguito.

Preferibilmente, nella fase di analisi armonica della forma d'onda del segnale
 15 associato all'elettrodo E2, è previsto di calcolare ampiezza e fase di nove
 armoniche.

Convenientemente può essere previsto di calcolare, nella prima fase F del metodo,
 una pluralità di vettori B di coefficienti di taratura, ciascuno correlato a rispettive
 fasce di potenza comprese tra la potenza minima e massima ammissibile, e fra loro
 20 almeno parzialmente sovrapposte, al fine di ottenere maggiore precisione nella
 stima del numero d'aria. Ad esempio, tre distinti vettori Blow, Bmed e Bhi possono
 essere utilizzati rispettivamente in tre fasce di potenze parzialmente sovrapposte,
 bassa, media, ed alta potenza. In questo modo si ottiene una maggiore precisione
 rispetto all'impiego di un unico vettore B. Ciascun vettore è stato determinato
 25 utilizzando le potenze a cui sono riferiti.

Può essere altresì previsto di calcolare un vettore Bfam di coefficienti correlato alla
 rispettiva famiglia del gas a cui è destinato il bruciatore, così da consentire in fase

di installazione del bruciatore il riconoscimento della famiglia di gas. Bfam permette di stimare il numero d'aria indipendentemente dalla famiglia a cui appartiene il gas. E' meno preciso di altri vettori B e può servire esclusivamente al riconoscimento della famiglia in fase di installazione dell'apparecchio. In tale modo può essere
5 semplificata la procedura di installazione del bruciatore.

In via alternativa, tramite un metodo del tipo anzidetto, può essere stimata anche la potenza che può essere diversa da quella stimata normalmente ad anello aperto, per esempio per l'impiego di gas differenti da quello di riferimento per la famiglia o per l'effetto di staratura del dispositivo di modulazione della portata di gas o ancora
10 per le caratteristiche dell'installazione (ad esempio di tipo applicativo, relative alla lunghezza del condotto scarico fumi o alla sua eventuale ostruzione). Tale valore di potenza stimata può essere utilizzato nel suddetto sistema di controllo di combustione per regolare in anello chiuso anche la potenza. In questo modo è possibile ottenere anche una semplificazione delle procedure di installazione
15 dell'apparecchio con conseguente riduzione dei relativi tempi.

Tramite il metodo predetto è anche possibile diagnosticare condizioni dell'apparecchio differenti da quelle nominali, ad esempio determinate da un posizionamento dell'elettrodo al di fuori delle tolleranze o a causa di un degrado dell'elettrodo a causa di invecchiamento. Per realizzare ciò è sufficiente utilizzare al
20 posto di λ_j un opportuno parametro che rappresenta la condizione dell'apparecchio (nominale o anomala) in essere nell'esperimento j.

E' anche possibile applicare all'elettrodo E1 segnali di tensione periodici non ad una sola frequenza ma a più frequenze in successione, in modo che ogni frequenza ecciti le caratteristiche proprie del plasma. Ovvero è possibile applicare certe frequenze
25 per certi livelli di potenza e altre frequenze per altri livelli di potenza.

E' altresì possibile applicare ad E1 una forma d'onda costituita da una sinusoide sovrapposta ad un livello costante di valore maggiore. In tal caso i parametri

rilevabili su E2 sono il modulo e fase della sinusoide della stessa frequenza e delle sue armoniche e il valore medio.

In una principale variante del metodo dell'invenzione, è previsto che il sensore 8 sia di tipo mono-elettrodo, in cui l'unico elettrodo E1 è alimentato con un prescelto
5 segnale elettrico. Preferibilmente l'elettrodo E1 è alimentato con un segnale periodico di tensione ad impulsi, comprendente nel periodo del segnale un primo impulso ad ampiezza positiva seguito da un secondo impulso ad ampiezza negativa. Convenientemente la frequenza del segnale ad impulsi all'elettrodo E1 è funzione della potenza erogata al bruciatore, ed, in aggiunta, la frequenza di campionamento
10 è funzione della potenza erogata al bruciatore.

Può essere prevista una prima frequenza di campionamento del segnale associata al primo impulso ed una seconda e distinta frequenza di campionamento associata al secondo impulso.

Analogamente alla metodologia con sensore bi-elettrodo, anche nella variante con
15 sensore mono-elettrodo il metodo prevede di:

- applicare alla forma d'onda rilevata all'elettrodo E1 una trasformata discreta di Fourier (DFT) alla frequenza prescelta e alle sue armoniche successive, ottenendo per tali frequenze l'ampiezza (M) e la fase (Φ),

- effettuare tale operazione per ciascuna di dette condizioni sperimentali,
20 corrispondenti alle potenze ($P_1, P_2, \dots, P_n$), e per ciascuna di esse ai valori del numero d'aria ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$), effettuando per ciascuna di dette condizioni un numero prefissato (r) di ripetizioni, per un numero totale di rilievi pari a $n * m * r$,

- calcolare, per ciascuna condizione sperimentale (i, j), tramite applicazione della trasformata discreta di Fourier (DFT), le ampiezze ($M_{1i,j}, M_{2i,j}, \dots, M_{pi,j}$) e le fasi
25 ($\Phi_{1i,j}, \Phi_{2i,j}, \dots, \Phi_{pi,j}$),

dove p è la massima armonica per la quale è applicata la trasformata discreta di Fourier (DFT),

-inserire i valori di ampiezza (M) e fase (Φ) in un sistema lineare in cui ogni riga è ottenuta da un rilievo sperimentale effettuato alla potenza P_i e al numero d'aria λ_j ed in cui il termine noto è λ_j ,

-imporre un numero di rilievi sperimentali $(n * m * r)$ maggiore del numero massimo di armoniche (p),

- risolvere il sistema lineare dell'equazione $AB=\lambda$

con A matrice dei dati sperimentali, B vettore dei coefficienti incogniti e λ vettore, tramite metodo di regressione ai minimi quadrati dall'equazione Moore-Penrose dove

$$B = (A^T A)^{-1} A^T$$

-memorizzare nel circuito elettronico il vettore B dei coefficienti, con dimensione pari alle incognite del sistema ovvero pari al numero di colonne della matrice A, così da utilizzare la seguente equazione di regressione:

$$\lambda_j = \left[1 \quad \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^x \quad \left(\frac{M_3}{M_1} \right)^x \quad \left(\frac{M_4}{M_1} \right)^x \quad \left(\frac{M_5}{M_1} \right)^x \quad \dots \quad \left(\frac{M_p}{M_1} \right)^x \right. \\ \left. \sin(\varphi_2 - 2r\varphi_1) \sin(\varphi_3 - 3r\varphi_1) \sin(\varphi_4 - 4r\varphi_1) \sin(\varphi_5 - 5r\varphi_1) \dots \sin(\varphi_p - pr\varphi_1) \right. \\ \left. \cos(\varphi_2 - 2r\varphi_1) \cos(\varphi_3 - 3r\varphi_1) \cos(\varphi_4 - 4r\varphi_1) \cos(\varphi_5 - 5r\varphi_1) \dots \cos(\varphi_p - pr\varphi_1) \right]$$

Anche in questa variante, nella fase H del metodo, relativa ad una condizione operativa di reale funzionamento del bruciatore, sono previsti i seguenti passi operativi, per valutare il numero d'aria λ .

Un primo passo H1, prevede di acquisire il segnale della tensione all'elettrodo E1 per un intervallo di tempo prefissato; in un secondo e successivo passo H2 sono calcolati, mediante trasformata discreta di Fourier, ampiezza (M1, M2,..., Mp) e fase

($\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_p$) della forma d'onda del segnale acquisito all'elettrodo, mentre in un terzo passo H3 viene calcolato il valore stimato (λ_{stim}) del numero d'aria tramite il prodotto scalare seguente:

$$\lambda_{stim} = \left[1 - \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^s - \left(\frac{M_3}{M_1} \right)^s - \left(\frac{M_4}{M_1} \right)^s - \left(\frac{M_5}{M_1} \right)^s - \dots - \left(\frac{M_p}{M_1} \right)^s \right. \\ \left. \sin(\varphi_2 - 2r\varphi_1) \sin(\varphi_3 - 3r\varphi_1) \sin(\varphi_4 - 4r\varphi_1) \sin(\varphi_5 - 5r\varphi_1) \dots \sin(\varphi_p - pr\varphi_1) \right. \\ \left. \cos(\varphi_2 - 2r\varphi_1) \cos(\varphi_3 - 3r\varphi_1) \cos(\varphi_4 - 4r\varphi_1) \cos(\varphi_5 - 5r\varphi_1) \dots \cos(\varphi_p - pr\varphi_1) \right] \times B$$

utilizzando la funzione di interpolazione o tabella di correlazione che correla la potenza ed il numero d'aria λ con i parametri caratteristici della forma d'onda rilevati.

Il calcolo di λ può venire eseguito ad intervalli regolari prefissati, come verrà chiarito in dettaglio di seguito.

Da osservare come, a differenza dei metodi noti di monitoraggio e controllo della combustione, il metodo dell'invenzione, basandosi su misure di tensione, non è basato sulla misura della corrente di ionizzazione, e quindi meno affetto dai problemi derivanti dall'usura ed invecchiamento degli elettrodi.

Inoltre, per la determinazione dei parametri di taratura (vettore B), è necessario un numero prestabilito e relativamente limitato di prove sperimentali, permettendo così dei tempi di messa a punto limitati rispetto alla tecnica nota.

Un sistema di controllo e regolazione della combustione, per il bruciatore 1, operante con il metodo dell'invenzione, prevede ad esempio le seguenti fasi di funzionamento, con riferimento al grafico di figura 2, ove in ascissa è riportato il numero di giri (n) del ventilatore, le ordinate del quadrante superiore esprimendo la corrente (I) di attuazione della valvola gas modulante, le ordinate del quadrante

inferiore esprimendo la portata (Q) di gas erogata (correlata al fabbisogno di potenza).

Le curve c di regolazione dei parametri anzidetti sono tipicamente preimpostate nel circuito di controllo, come illustrato nel diagramma. Quindi, ad esempio, ad un
5 fabbisogno Q_1 corrisponde un numero di giri n_1 ed una corrente I_1 .

Se il fabbisogno di potenza passa da Q_1 a Q_2 , il numero di giri viene portato ad n_2 , condizione nella quale il circuito di controllo associa il valore di corrente I_2 al modulatore. Tali valori sono correlati ad un numero d'aria obiettivo (λ_{ob}), considerato ottimale per la combustione. In questa nuova condizione operativa
10 viene quindi stimato il numero d'aria effettivo (λ_{stim}) con il metodo più sopra descritto e viene operato un confronto tra λ_{ob} e λ_{stim} , apportando le opportune correzioni ai parametri – corrente I - ovvero - numero giri n – per ottenere un numero d'aria sostanzialmente coincidente con il numero d'aria obiettivo. Preferibilmente viene variata la corrente al modulatore che ad esempio è portata al
15 valore I_2' . A questo punto viene ulteriormente aggiornata la curva c di funzionamento, per il numero d'aria pari al numero d'aria obiettivo, che quindi diventa la curva c' .

L'aggiornamento della curva di regolazione può ad esempio avvenire, accumulando un certo numero di punti di correzione e calcolando la curva di regressione che li
20 correla, tale curva divenendo la nuova curva di regolazione. In alternativa è possibile operare esclusivamente una correzione, ove opportuno, in ciascun punto di funzionamento, sulla base del confronto - $\lambda_{ob} / \lambda_{stim}$ - senza individuazione di una nuova curva di funzionamento (tramite regressione lineare).

Il sistema di regolazione sopra descritto rappresenta semplicemente un esempio,
25 non limitativo, ai fini applicativi del metodo di monitoraggio e controllo della combustione dell'invenzione. Resta inteso che tramite tale metodo è possibile predisporre specifiche logiche di controllo e regolazione del funzionamento del

bruciatore, in funzione delle rispettive esigenze operative e di sistema, e che comunque prevedono il confronto tra un numero d'aria obiettivo, ottimale per la combustione, ed il numero d'aria stimato con il metodo dell'invenzione.

5 L'invenzione consegue pertanto gli scopi proposti, superando i limiti evidenziati rispetto alla tecnica nota, evidenziando i vantaggi enunciati rispetto alle soluzioni note.

RIVENDICAZIONI

1. Metodo per il monitoraggio e controllo della combustione in un bruciatore di un apparecchio a gas combustibile, del tipo comprendente un sensore con almeno un elettrodo posto nella fiamma o in prossimità di essa e suscettibile di essere alimentato da un generatore di tensione nonché collegato ad un circuito elettronico idoneo a misurare il potenziale risultante all'elettrodo,

il metodo comprendendo:

- una prima fase di acquisizione ed elaborazione di dati da condizioni sperimentali comprendente i seguenti passi:

- individuare una pluralità di condizioni sperimentali di combustione del bruciatore, in ciascuna di dette condizioni

- imporre una potenza ($P_1, P_2, \dots, P_n$) e per ciascuna potenza imporre un valore del numero d'aria ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$), il numero d'aria esprimendo il rapporto tra la quantità d'aria nel processo di combustione e la quantità di aria per una combustione stechiometrica,

ovvero, in via alternativa,

- imporre una potenza ($P_1, P_2, \dots, P_n$) e per ciascuna potenza imporre una concentrazione di CO_2 e/o CO ($\%1, \%2, \dots, \%n$), ciascuna condizione sperimentale essendo ripetuta un prefissato numero di volte (r),

- imporre, in ciascuna di dette ($n * m * r$) condizioni sperimentali (P_i, λ_j ovvero $\lambda_i, \%j$), un segnale elettrico su detto almeno un elettrodo ed eseguire un campionamento del segnale risultante all'elettrodo, calcolando i rispettivi parametri caratteristici della forma d'onda di detto segnale per ciascuna di dette condizioni

sperimentali,

- calcolare una funzione di interpolazione o tabella di correlazione, a partire dai dati sperimentali acquisiti, atta ad interpolare o correlare, in modo univoco, almeno un parametro significativo delle caratteristiche di combustione (tra potenza, numero di aria, concentrazione di CO₂ e/o CO), con i parametri caratteristici della forma d'onda del segnale all'elettrodo, nel processo di combustione del bruciatore,

- ed una seconda fase di valutazione del numero d'aria (λ) e di almeno uno dei suddetti parametri significativi di combustione, in una condizione reale operativa del bruciatore, comprendente i seguenti passi:

- misurare, in detta condizione operativa del bruciatore, i parametri caratteristici della forma d'onda del segnale risultante di tensione all'elettrodo,

- calcolare il valore stimato del numero d'aria (λ) tramite utilizzo della funzione di interpolazione o tabella di correlazione che correla la potenza, il numero d'aria (λ) e/o la concentrazione di CO₂ e/o CO, con i parametri caratteristici della forma d'onda rilevati.

2. Metodo secondo la rivendicazione 1, in cui i parametri caratteristici della forma d'onda sono ottenuti tramite tecniche di analisi armonica del segnale di tensione campionato mediante applicazione della trasformata di Fourier.

3. Metodo secondo la rivendicazione 2, in cui la funzione di interpolazione che permette di correlare la forma d'onda misurata al numero d'aria e alla potenza è ottenuta con l'applicazione di tecniche di analisi di regressione.

4. Metodo secondo una delle rivendicazioni da 1 a 3, in cui il sensore è di tipo mono-elettrodo.

5. Metodo secondo la rivendicazione 4, in cui è previsto di:

- applicare all'elettrodo (E1) una tensione con forma d'onda alternata ad impulsi, ad ampiezza (M) costante e a prefissata frequenza (f),

- acquisire dopo ogni singolo impulso all'elettrodo il segnale di risposta,
- applicare alla forma d'onda del segnale acquisito all'elettrodo una trasformata discreta di Fourier (DFT) alla frequenza della forma d'onda dell'elettrodo e alle sue armoniche successive, ottenendo per tali frequenze l'ampiezza (M) e la fase (Φ),
- 5 - effettuare tale operazione per ciascuna di dette condizioni sperimentali, corrispondenti alle potenze ($P_1, P_2, \dots, P_n$), e per ciascuna di esse ai valori del numero d'aria ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$), effettuando per ciascuna di dette condizioni un numero prefissato (r) di ripetizioni, per un numero totale di rilievi pari a $n * m * r$,
- calcolare, per ciascuna condizione sperimentale (i, j), tramite applicazione della
- 10 trasformata discreta di Fourier (DFT), le ampiezze ($M_{1i,j}, M_{2i,j}, \dots, M_{pi,j}$) e le fasi ($\Phi_{1i,j}, \Phi_{2i,j}, \dots, \Phi_{pi,j}$),
dove p è la massima armonica per la quale è applicata la trasformata discreta di Fourier (DFT),
- inserire i valori di ampiezza (M) e fase (Φ) in un sistema lineare in cui ogni riga è
- 15 ottenuta da un rilievo sperimentale effettuato alla potenza P_i e al numero d'aria λ_j ed in cui il termine noto è λ_j ,
- imporre un numero di rilievi sperimentali ($n * m * r$) maggiore del numero massimo di armoniche (p), almeno uguale a $3p-2$
- risolvere il sistema lineare dell'equazione $AB=\lambda$
- 20 con A matrice dei dati sperimentali, B vettore dei coefficienti incogniti e λ vettore, tramite metodo di regressione ai minimi quadrati dall'equazione Moore-Penrose dove
- $$B = (A^T A)^{-1} A^T$$
- memorizzare nel circuito elettronico il vettore B dei coefficienti, con dimensione
- 25 pari alle incognite del sistema ovvero pari al numero di colonne della matrice A, così da utilizzare la seguente equazione di regressione:

$$\lambda_j = \left[1 \quad \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^s \quad \left(\frac{M_3}{M_1} \right)^s \quad \left(\frac{M_4}{M_1} \right)^s \quad \left(\frac{M_5}{M_1} \right)^s \quad \dots \quad \left(\frac{M_p}{M_1} \right)^s \right. \\ \left. \sin(\varphi_2 - 2r\varphi_1) \sin(\varphi_3 - 3r\varphi_1) \sin(\varphi_4 - 4r\varphi_1) \sin(\varphi_5 - 5r\varphi_1) \dots \sin(\varphi_p - pr\varphi_1) \right. \\ \left. \cos(\varphi_2 - 2r\varphi_1) \cos(\varphi_3 - 3r\varphi_1) \cos(\varphi_4 - 4r\varphi_1) \cos(\varphi_5 - 5r\varphi_1) \dots \cos(\varphi_p - pr\varphi_1) \right]$$

5

con s ed r che possono assumere un valore dell'intervallo [1;4] e p≥5,

-stimare, in una condizione reale di funzionamento il valore del numero d'aria
10 mediante i seguenti passi:

- acquisire il segnale della tensione all'elettrodo per un intervallo di tempo prefissato,

-calcolare mediante trasformata discreta di Fourier ampiezza (M1, M2,..., Mp) e fase (Φ1 ,Φ2,..., Φp),

15 - calcolare il valore stimato (λstim) del numero d'aria tramite il prodotto scalare seguente:

$$\lambda_{stim} = \left[1 \quad \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^s \quad \left(\frac{M_3}{M_1} \right)^s \quad \left(\frac{M_4}{M_1} \right)^s \quad \left(\frac{M_5}{M_1} \right)^s \quad \dots \quad \left(\frac{M_p}{M_1} \right)^s \right. \\ \left. \sin(\varphi_2 - 2r\varphi_1) \sin(\varphi_3 - 3r\varphi_1) \sin(\varphi_4 - 4r\varphi_1) \sin(\varphi_5 - 5r\varphi_1) \dots \sin(\varphi_p - pr\varphi_1) \right. \\ \left. \cos(\varphi_2 - 2r\varphi_1) \cos(\varphi_3 - 3r\varphi_1) \cos(\varphi_4 - 4r\varphi_1) \cos(\varphi_5 - 5r\varphi_1) \dots \cos(\varphi_p - pr\varphi_1) \right] \times B$$

20

6. Metodo secondo la rivendicazione 5, in cui il segnale periodico di tensione ad impulsi comprende, nel periodo del segnale, un primo impulso ad ampiezza positiva
25 seguito da un secondo impulso ad ampiezza negativa.

7. Metodo secondo la rivendicazione 5 o 6, in cui la frequenza del segnale ad impulsi all'elettrodo è funzione della potenza erogata al bruciatore.

8. Metodo secondo la rivendicazione 5 o 6, in cui la frequenza di campionamento è funzione della potenza erogata al bruciatore.

9. Metodo secondo la rivendicazione 5 o 6, in cui è prevista una prima frequenza di campionamento del segnale associata agli impulsi di segno positivo ed una seconda e distinta frequenza di campionamento associata agli impulsi di segno negativo.

10. Metodo secondo una delle rivendicazioni da 1 a 3, in cui il sensore è previsto del tipo bi-elettrodo con un primo ed un secondo elettrodo (E1, E2), disposti a prefissata distanza reciproca, al primo elettrodo essendo applicata una tensione avente una determinata forma d'onda nel tempo, il potenziale assunto dal secondo elettrodo essendo misurato ed elaborato dal circuito elettronico, mediante detto campionamento ed analisi armonica della rispettiva forma d'onda.

11. Metodo secondo la rivendicazione 3, in cui è previsto di:

- applicare al primo elettrodo (E1) una tensione con forma d'onda periodica ad ampiezza (M) costante e a prefissata frequenza (f),

- applicare alla forma d'onda rilevata al secondo elettrodo (E2) una trasformata discreta di Fourier (DFT) alla frequenza della forma d'onda del primo elettrodo (E1) e alle sue armoniche successive, ottenendo per tali frequenze l'ampiezza (M) e la fase (Φ),

- effettuare tale operazione per ciascuna di dette condizioni sperimentali, corrispondenti alle potenze ($P_1, P_2, \dots, P_n$), e per ciascuna di esse ai valori del numero d'aria ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$), effettuando per ciascuna di dette condizioni un numero prefissato (r) di ripetizioni, per un numero totale di rilievi pari a $n * m * r$,

- calcolare, per ciascuna condizione sperimentale (i, j), tramite applicazione della trasformata discreta di Fourier (DFT), le ampiezze ($M_{1i,j}, M_{2i,j}, \dots, M_{pi,j}$) e le fasi ($\Phi_{1i,j}, \Phi_{2i,j}, \dots, \Phi_{pi,j}$),

dove p è la massima armonica per la quale è applicata la trasformata discreta di Fourier (DFT),

-inserire i valori di ampiezza (M) e fase (Φ) in un sistema lineare in cui ogni riga è ottenuta da un rilievo sperimentale effettuato alla potenza P_i e al numero d'aria λ_j ed in cui il termine noto è λ_j ,

-imporre un numero di rilievi sperimentali ($n * m * r$) maggiore del numero massimo di armoniche (p),

- risolvere il sistema lineare dell'equazione $AB=\lambda$

con A matrice dei dati sperimentali, B vettore dei coefficienti incogniti e λ vettore, tramite metodo di regressione ai minimi quadrati dall'equazione Moore-Penrose dove

$$B = (A^T A)^{-1} A^T$$

-memorizzare nel circuito elettronico il vettore B dei coefficienti, con dimensione pari alle incognite del sistema ovvero pari al numero di colonne della matrice A, così da utilizzare la seguente equazione di regressione:

$$\lambda_j = \left[1 \quad \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^s \quad \left(\frac{M_3}{M_1} \right)^s \quad \left(\frac{M_4}{M_1} \right)^s \quad \left(\frac{M_5}{M_1} \right)^s \quad \dots \quad \left(\frac{M_p}{M_1} \right)^s \right. \\ \left. \sin(\varphi_2 - 2r\varphi_1) \quad \sin(\varphi_3 - 3r\varphi_1) \quad \sin(\varphi_4 - 4r\varphi_1) \quad \sin(\varphi_5 - 5r\varphi_1) \quad \dots \quad \sin(\varphi_p - pr\varphi_1) \right. \\ \left. \cos(\varphi_2 - 2r\varphi_1) \quad \cos(\varphi_3 - 3r\varphi_1) \quad \cos(\varphi_4 - 4r\varphi_1) \quad \cos(\varphi_5 - 5r\varphi_1) \quad \dots \quad \cos(\varphi_p - pr\varphi_1) \right]$$

con s ed r che possono assumere un valore dell'intervallo $[1;4]$, e $p \geq 5$,

-stimare, in una condizione reale di funzionamento il valore del numero d'aria mediante i seguenti passi:

- acquisire il segnale della tensione al secondo elettrodo (E2) per un intervallo di tempo prefissato,

-calcolare mediante trasformata discreta di Fourier ampiezza ($M_1, M_2, \dots, M_p$) e fase ($\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_p$),

- calcolare il valore stimato (λ_{stim}) del numero d'aria tramite il prodotto scalare seguente:

$$\lambda_{stim} = \left[1 - \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^2 - \left(\frac{M_3}{M_1} \right)^2 - \left(\frac{M_4}{M_1} \right)^2 - \left(\frac{M_5}{M_1} \right)^2 - \dots - \left(\frac{M_p}{M_1} \right)^2 \right. \\ \left. \sin(\varphi_2 - 2r\varphi_1) \sin(\varphi_3 - 3r\varphi_1) \sin(\varphi_4 - 4r\varphi_1) \sin(\varphi_5 - 5r\varphi_1) \dots \sin(\varphi_p - pr\varphi_1) \right. \\ \left. \cos(\varphi_2 - 2r\varphi_1) \cos(\varphi_3 - 3r\varphi_1) \cos(\varphi_4 - 4r\varphi_1) \cos(\varphi_5 - 5r\varphi_1) \dots \cos(\varphi_p - pr\varphi_1) \right] \times B$$

12. Metodo secondo la rivendicazione 11, in cui, nella fase di analisi armonica della forma d'onda del segnale associato al secondo elettrodo, è previsto di calcolare ampiezza e fase di nove armoniche.

13. Metodo secondo la rivendicazione 11, in cui è previsto di calcolare in detta prima fase una pluralità di vettori (B) di coefficienti di taratura, ciascuno correlato a rispettive fasce di potenza comprese tra la potenza minima e massima ammissibile, e fra loro almeno parzialmente sovrapposte, per ottenere maggiore precisione nella stima del numero d'aria.

14. Metodo secondo la rivendicazione 11, in cui è previsto di calcolare un vettore (B) di coefficienti correlato alla rispettiva famiglia del gas a cui è destinato il bruciatore, così da consentire in fase di installazione del bruciatore il riconoscimento di detta famiglia di gas.

15. Metodo secondo una delle rivendicazioni precedenti, detto bruciatore comprendendo:

- una camera di combustione,
- un primo condotto atto a immettere aria in detta camera di combustione,
- primi mezzi di regolazione associati a detto primo condotto, predisposti per variare la quantità di aria immessa in detto primo condotto,
- un secondo condotto atto a immettere un gas combustibile in detta camera

di combustione,

- secondi mezzi di regolazione associati a detto secondo condotto, predisposti per variare la quantità di gas immessa in detto secondo condotto;

detto metodo comprendendo le fasi di:

- 5 - impostare uno tra detti primi e detti secondi mezzi di regolazione su un primo valore di impostazione,
- associare, in base a curve di regolazione preimpostate nel circuito di controllo, un corrispondente valore di impostazione per l'altro mezzo di regolazione, detti valori essendo correlati ad un numero d'aria obiettivo
10 (λ_{ob}) considerato ottimale per la combustione,
- calcolare, nella condizione operativa raggiunta, il valore reale del numero d'aria (λ_{stim}) con il metodo di una o più delle rivendicazioni precedenti,
- confrontare il numero d'aria obiettivo (λ_{ob}) con il numero d'aria reale (λ_{stim}) e correggere l'uno e/o l'altro tra detti primi e detti secondi mezzi di
15 regolazione in modo da ottenere un numero d'aria (λ_{stim}) reale sostanzialmente coincidente con il numero d'aria obiettivo (λ_{ob}).

16. Metodo secondo la rivendicazione 15, in cui detti primi mezzi di regolazione comprendono un ventilatore con prescelta curva di regolazione (numero giri – portata aria), e detti secondi mezzi di regolazione comprendono una valvola
20 gas di tipo modulante con prescelta curva di regolazione (corrente – portata gas), detti valori di impostazione essendo la velocità del ventilatore e/o la corrente di pilotaggio del modulatore della valvola.

25

CLAIMS

1. A method for monitoring and controlling combustion in a burner of a fuel gas apparatus, of the type comprising a sensor with at least one electrode located in the flame or in the vicinity thereof and capable of being supplied by a voltage generator
5 and connected to an electronic circuit suitable for measuring the resultant potential at the electrode,

the method comprising:

- a first phase of acquiring and processing data from experimental conditions comprising the following steps:

10 - identifying a plurality of experimental combustion conditions for the burner, in each of said conditions

- applying a power ($P_1, P_2, \dots, P_n$) and for each power applying a value of the air number ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$), the air number expressing the ratio between the quantity of air in the combustion process and the quantity of air for
15 stoichiometric combustion,

or, alternatively,

- applying a power ($P_1, P_2, \dots, P_n$) and for each power applying a CO_2 and/or CO concentration ($\%1, \%2, \dots, \%n$),

each experimental condition being repeated a predetermined number of times (r),

20 - applying, in each of said ($n * m * r$) experimental conditions (P_i, λ_j or $\lambda_i, \%j$), an electrical signal to said at least one electrode and carrying out sampling of the resultant signal at the electrode, calculating the respective characteristic parameters of the waveform of said signal for each of said experimental conditions,

- calculating an interpolation function or correlation table on the basis of
25 the acquired experimental data, capable of unambiguously interpolating or correlating at least one significant parameter of the combustion characteristics

(from among power, air number, CO₂ and/or CO concentration), with the characteristic parameters of the waveform of the signal at the electrode, in the burner combustion process,

- and a second phase of evaluating the air number (λ) and at least one of the above-stated significant combustion parameters, under a real burner operating condition, comprising the following steps:

- measuring, under said burner operating condition, the characteristic parameters of the waveform of the resultant voltage signal at the electrode,

- calculating the estimated value of the air number (λ) by using the interpolation function or correlation table which correlates the power, air number (λ) and/or CO₂ and/or CO concentration, with the characteristic parameters of the observed waveform.

2. A method according to claim 1, in which the characteristic parameters of the waveform are obtained by harmonic analysis of the voltage signal sampled by application of the Fourier transform.

3. A method according to claim 2, in which the interpolation function which makes it possible to correlate the measured waveform to the air number and to power is obtained by application of regression analysis techniques.

4. A method according to any one of claims 1 to 3, in which the sensor is of the single electrode type.

5. A method according to claim 4, which provides:

- applying to the electrode (E1) a voltage with a pulsed, alternating waveform at a constant amplitude (M) and at a predetermined frequency (f),

- acquiring the response signal after each individual pulse to the electrode,

- applying to the waveform of the signal acquired at the electrode a discrete Fourier transform (DFT) at the frequency of the waveform of the electrode and at

the subsequent harmonics thereof, obtaining the amplitude (M) and phase (Φ) for said frequencies,

- carrying out said operation for each of said experimental conditions corresponding to the powers (P1, P2, ..., Pn), and for each thereof at the air number values ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$), carrying out for each of said conditions a predetermined number (r) of repetitions, for a total number of observations equal to $n * m * r$,

- calculating, for each experimental condition (i,j), by application of the discrete Fourier transform (DFT), the amplitudes ($M_{1i,j}, M_{2i,j}, \dots, M_{pi,j}$) and phases ($\Phi_{1i,j}, \Phi_{2i,j}, \dots, \Phi_{pi,j}$),

where p is the harmonic maximum for which the discrete Fourier transform (DFT) is applied,

- inserting the amplitude (M) and phase (Φ) values into a linear system in which each row is obtained from an experimental observation carried out at the power P_i and at the air number λ_j and in which the known term is λ_j ,

- applying a number of experimental observations ($n * m * r$) greater than the maximum number of harmonics (p), at least equal to $3p-2$

- solving the linear system of the equation $AB=\lambda$

with A being the matrix of experimental data, B the vector of the unknown coefficients and λ the vector, by the least-squares regression method of the Moore-Penrose equation where

$$B = (A^T A)^{-1} A^T$$

- storing in the electronic circuit the coefficient vector B, with a dimension equal to the unknowns of the system or equal to the number of columns of the matrix A, so as to use the following regression equation:

$$\lambda_j = \left[1 \quad \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^s \quad \left(\frac{M_3}{M_1} \right)^s \quad \left(\frac{M_4}{M_1} \right)^s \quad \left(\frac{M_5}{M_1} \right)^s \quad \dots \quad \left(\frac{M_p}{M_1} \right)^s \right. \\ \left. \sin(\varphi_2 - 2r\varphi_1) \sin(\varphi_3 - 3r\varphi_1) \sin(\varphi_4 - 4r\varphi_1) \sin(\varphi_5 - 5r\varphi_1) \dots \sin(\varphi_p - pr\varphi_1) \right. \\ \left. \cos(\varphi_2 - 2r\varphi_1) \cos(\varphi_3 - 3r\varphi_1) \cos(\varphi_4 - 4r\varphi_1) \cos(\varphi_5 - 5r\varphi_1) \dots \cos(\varphi_p - pr\varphi_1) \right]$$

with s and r which may assume a value in the range [1;4] and p≥5,

- estimating, under a real operating condition, the value of the air number by means of the following steps:
- acquiring the voltage signal at the electrode for a predetermined time interval,
- calculating the amplitude (M1, M2, ..., Mp) and phase (Φ1, Φ2, ..., Φp) by means of a discrete Fourier transform,
- calculating the estimated value (λstim) of the air number by the following scalar product:

$$\lambda_{stim} = \left[1 \quad \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^s \quad \left(\frac{M_3}{M_1} \right)^s \quad \left(\frac{M_4}{M_1} \right)^s \quad \left(\frac{M_5}{M_1} \right)^s \quad \dots \quad \left(\frac{M_p}{M_1} \right)^s \right. \\ \left. \sin(\varphi_2 - 2r\varphi_1) \sin(\varphi_3 - 3r\varphi_1) \sin(\varphi_4 - 4r\varphi_1) \sin(\varphi_5 - 5r\varphi_1) \dots \sin(\varphi_p - pr\varphi_1) \right. \\ \left. \cos(\varphi_2 - 2r\varphi_1) \cos(\varphi_3 - 3r\varphi_1) \cos(\varphi_4 - 4r\varphi_1) \cos(\varphi_5 - 5r\varphi_1) \dots \cos(\varphi_p - pr\varphi_1) \right] \times B$$

6. A method according to claim 5, in which the pulsed periodic voltage signal comprises, over the signal period, a first pulse with a positive amplitude followed by a second pulse with a negative amplitude.

7. A method according to claim 5 or claim 6, in which the frequency of the pulsed signal at the electrode is a function of the power delivered to the burner.

8. A method according to claim 5 or claim 6, in which the sampling frequency is a function of the power delivered to the burner.

9. A method according to claim 5 or claim 6, which provides a first sampling frequency of the signal associated with the positive pulses and a second, distinct sampling frequency associated with the negative pulses.

10. A method according to any one of claims 1 to 3, in which the sensor provided is of the dual electrode type with a first and a second electrode (E1, E2), arranged at a predetermined distance apart, a voltage having a specific waveform over time being applied to the first electrode, the potential of the second electrode being measured and processed by the electronic circuit, by means of said sampling and harmonic analysis of the respective waveform.

11. A method according to claim 3, which provides:

- applying to the first electrode (E1) a voltage with a periodic waveform at a constant amplitude (M) and at a predetermined frequency (f),

- applying to the waveform of the signal observed at the second electrode (E2) a discrete Fourier transform (DFT) at the frequency of the waveform of the first electrode (E1) and at the subsequent harmonics thereof, obtaining the amplitude (M) and phase (Φ) for said frequencies,

- carrying out said operation for each of said experimental conditions corresponding to the powers (P1, P2, ..., Pn), and for each thereof at the air number values ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$), carrying out for each of said conditions a predetermined number (r) of repetitions, for a total number of observations equal to $n * m * r$,

- calculating, for each experimental condition (i,j), by application of the discrete Fourier transform (DFT), the amplitudes (M1i,j, M2i,j, Mpi,j) and phases ($\Phi_{1i,j}, \Phi_{2i,j}, \dots, \Phi_{pi,j}$),

where p is the harmonic maximum for which the discrete Fourier transform (DFT) is applied,

- inserting the amplitude (M) and phase (Φ) values into a linear system in which each row is obtained from an experimental observation carried out at the power P_i and at the air number λ_j and in which the known term is λ_j ,
- applying a number of experimental observations ($n * m * r$) greater than the maximum number of harmonics (p),
- solving the linear system of the equation $AB=\lambda$

with A being the matrix of experimental data, B the vector of the unknown coefficients and λ the vector, by the least-squares regression method of the Moore-Penrose equation where

$$B = (A^T A)^{-1} A^T$$

- storing in the electronic circuit the coefficient vector B, with a dimension equal to the unknowns of the system or equal to the number of columns of the matrix A, so as to use the following regression equation:

$$\lambda_j = \left[1 \quad \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^s \quad \left(\frac{M_3}{M_1} \right)^s \quad \left(\frac{M_4}{M_1} \right)^s \quad \left(\frac{M_5}{M_1} \right)^s \quad \dots \quad \left(\frac{M_p}{M_1} \right)^s \right. \\ \left. \sin(\varphi_2 - 2r\varphi_1) \sin(\varphi_3 - 3r\varphi_1) \sin(\varphi_4 - 4r\varphi_1) \sin(\varphi_5 - 5r\varphi_1) \dots \sin(\varphi_p - pr\varphi_1) \right. \\ \left. \cos(\varphi_2 - 2r\varphi_1) \cos(\varphi_3 - 3r\varphi_1) \cos(\varphi_4 - 4r\varphi_1) \cos(\varphi_5 - 5r\varphi_1) \dots \cos(\varphi_p - pr\varphi_1) \right]$$

with s and r which may assume a value in the range [1;4], and $p \geq 5$,

- estimating, under a real operating condition, the value of the air number by means of the following steps:
- acquiring the voltage signal at the second electrode (E2) for a predetermined time interval,

- calculating the amplitude (M1, M2, ..., Mp) and phase (Φ1, Φ2, ..., Φp) by means of a discrete Fourier transform,
- calculating the estimated value (λstim) of the air number by the following scalar product:

$$\lambda_{stim} = \left[1 - \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^2 - \left(\frac{M_3}{M_1} \right)^2 - \left(\frac{M_4}{M_1} \right)^2 - \left(\frac{M_5}{M_1} \right)^2 - \dots - \left(\frac{M_p}{M_1} \right)^2 \right. \\ \left. \sin(\varphi_2 - 2r\varphi_1) \sin(\varphi_3 - 3r\varphi_1) \sin(\varphi_4 - 4r\varphi_1) \sin(\varphi_5 - 5r\varphi_1) \dots \sin(\varphi_p - pr\varphi_1) \right. \\ \left. \cos(\varphi_2 - 2r\varphi_1) \cos(\varphi_3 - 3r\varphi_1) \cos(\varphi_4 - 4r\varphi_1) \cos(\varphi_5 - 5r\varphi_1) \dots \cos(\varphi_p - pr\varphi_1) \right] \times B$$

12. A method according to claim 11, which, in the phase of harmonic analysis of the waveform of the signal associated with the second electrode, provides calculating the amplitude and phase of nine harmonics.

13. A method according to claim 11, which provides calculating in said first phase a plurality of vectors (B) of calibration coefficients, which are each correlated with respective power bands between the minimum and maximum admissible power and which overlap at least in part, in order to achieve greater precision in estimating the air number.

14. A method according to claim 11, which provides calculating a coefficient vector (B) correlated with the respective gas family for which the burner is intended, so as to permit the identification of said gas family during the burner installation phase.

15. A method according to any one of the preceding claims, said burner comprising:

- a combustion chamber,
- a first duct capable of introducing air into said combustion chamber,

- first control means associated with said first duct, configured to vary the quantity of air introduced into said first duct,
- a second duct capable of introducing a fuel gas into said combustion chamber,
- 5 - second control means associated with said second duct, configured to vary the quantity of gas introduced into said second duct;

said method comprising the phases of:

- setting one of said first and said second control means to a first setting value,
- 10 - associating, on the basis of control curves preset in the control circuit, a corresponding setting value for the other control means, said values being correlated with a target air number (λ_{ob}) which is deemed optimal for combustion,
- calculating, under the achieved operating condition, the real value of the air number (λ_{stim}) with the method of one or more of the preceding claims,
- 15 - comparing the target air number (λ_{ob}) with the real air number (λ_{stim}) and correcting one and/or the other of said first and said second control means in such a manner as to obtain a real air number (λ_{stim}) which substantially coincides with the target air number (λ_{ob}).

20 16. A method according to claim 15, in which said first control means comprise a fan with a preselected control curve (rotational speed/air flow rate), and said second control means comprise a gas valve of the modulating type with a preselected control curve (current/gas flow rate), said setting values being fan speed and/or the driving current for the valve modulator.

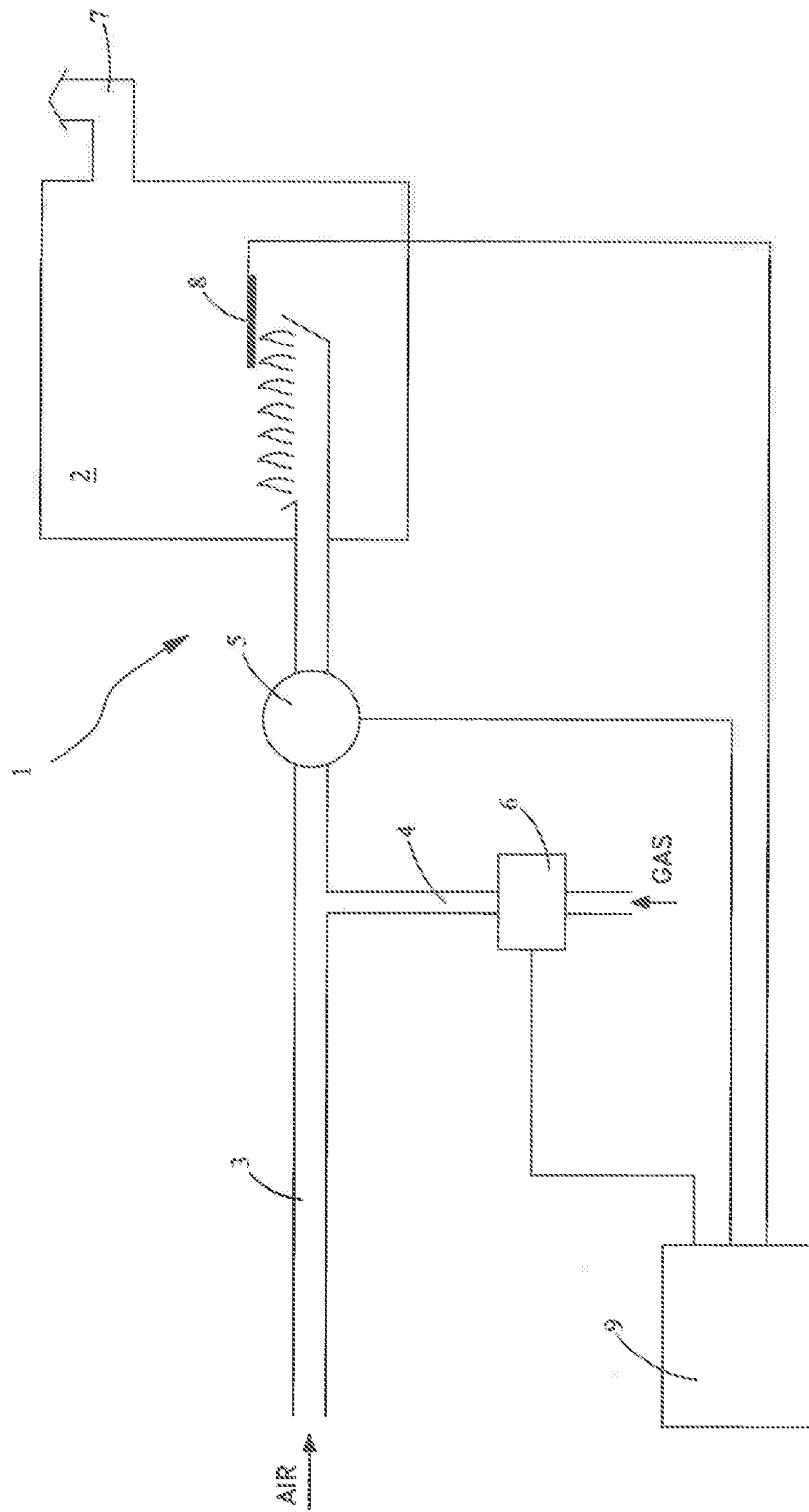


Fig. 1

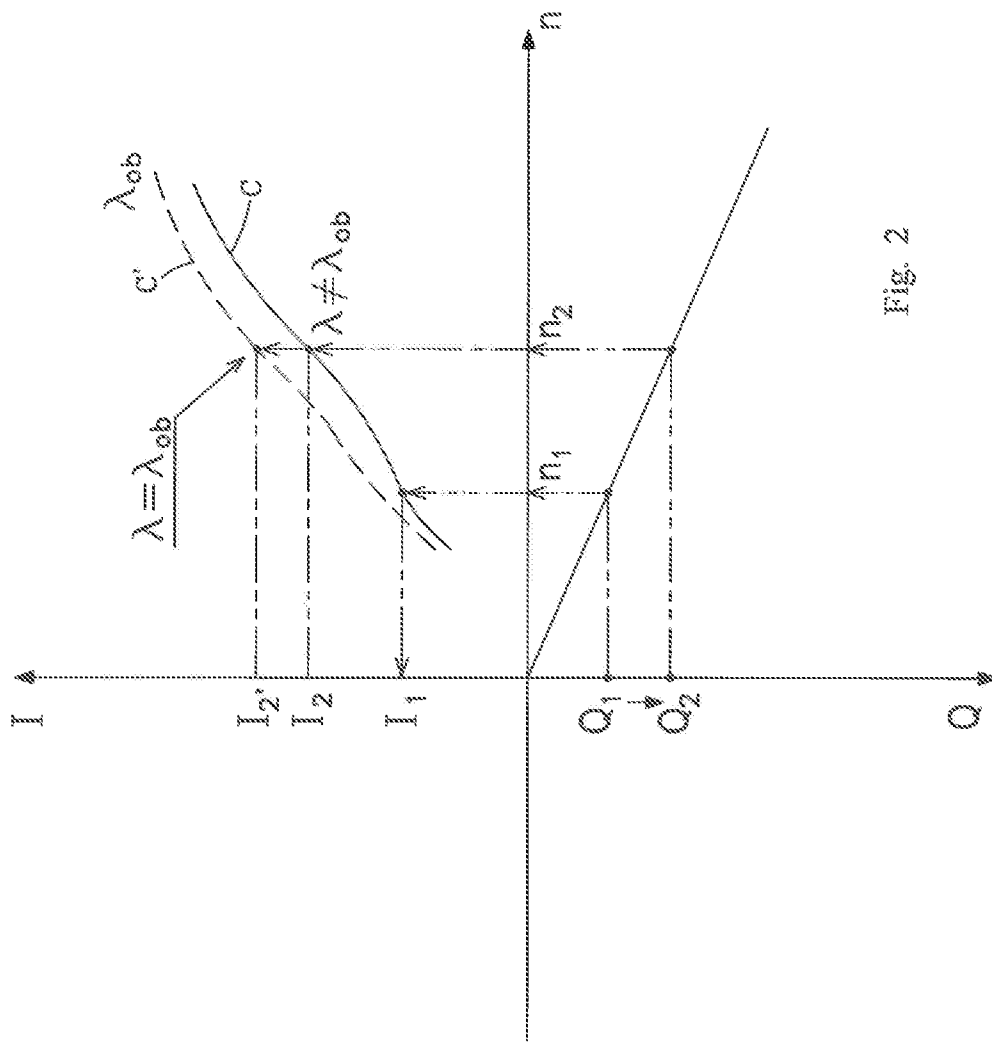


Fig. 2